

Schriftenreihe

Heft

4

Siedlungswasserwirtschaft und Umwelt

HAHN, M.; KÖNNEMANN, T.; MANGOLD, S.;

OUERFELLI, I.; PREUß, V.; SCHÖPKE, R.; SONNTAG, B.

Literaturstudie zum Thema:

Darstellung und Bewertung des Wissensstandes zum Schadstoffabbau und -transport in natürlichen Böden

Cottbus 2000

Herausgeber:

Lehrstuhl Wassertechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. R. Koch Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. R. Koch

Lehrstuhl Wassertechnik

der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus

Vertrieb: Eigenverlag des Lehrstuhls Wassertechnik

der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus

Postfach 10 13 44 03013 Cottbus

Tel. 0049-355-69-4302 Fax: 0049-355-69-3025

e-mail: wassertechnik@tu-cottbus.de

Alle Rechte vorbehalten. Wiedergabe nur mit Genehmigung des Lehrstuhls Wassertechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus, Postfach 10 13 44, 03013 Cottbus

Cottbus 2000

Vorwort

Die Nutzung natürlicher Böden zur kostengünstigen Beseitigung von Niederschlagswasser aber auch von schwachbelastetem Abwasser ist eine Variante der Abwasserbeseitigung, die zunehmend Antragsgegenstand in wasserrechtlichen Verfahren ist.

Der Schutz des Grundwassers ist dabei in besonderem Maße zu beachten. Die Einschätzung der Eignung dieser Variante ist Behörden aufgrund unzureichender Aussagen zum Langzeitverhalten und zu Abbaueffekten während der Bodenpassage derzeit nicht möglich.

Durch die **THÜRINGER LANDESANSTALT FÜR UMWELT** erhielt der Lehrstuhl Wassertechnik der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus den Auftrag, im Rahmen einer Literaturstudie, den gegenwärtigen Stand der schadlosen Versickerung von Niederschlagswasser in natürlichen Böden aufzuzeigen.

Die Literaturrecherche bildet den ersten Schritt einer Untersuchungsreihe, von der folgende Wirkungen erwartet werden:

- Verfahrensbeschleunigung durch Bewertbarkeit der Eignung der Behandlungsvariante
- Nutzung dieser kostengünstigen Umwelttechnologie zur Behandlung von Abwasser unter Beachtung des Gewässerschutzes.

Inhaltsverzeichnis

1	Aufgal	ben- und Zielstellung	7
2	Chara	kterisierung des zu reinigenden Mediums Wasser	8
	2.1 Stra	Benoberflächenwasser (SOW)	8
	2.1.1	Herkunftsbereiche der Verschmutzungen	8
	2.1.2	Beschaffenheit des Straßenoberflächenabflusses	10
	2.1.3	Bindungsformen und Struktur der gelösten und partikulären Schadstoffe	13
	2.1.4	Ermittlung der Schadstofffrachten	20
	2.1.5	Beurteilung und Schadwirkung der Inhaltsstoffe / Stoffgruppen	22
	2.1.6	Beschaffenheitskategorien für den Niederschlagsabfluß	24
	2.2 Sch	wachbelastete Industrieabwässer	26
	2.2.1	Definition – schwachbelastete Industrieabwässer	26
	2.2.2	Menge und Beschaffenheit des anfallenden Industrieabwassers	27
	2.2.3	Eignung des gereinigten Industrieabwassers zur Versickerung	28
3	Chara	kterisierung der natürlichen Bodenmatrix	29
	3.1 Defi	inition des Begriffs Bodens	29
	3.2 Nati	ürliche Bodenmatrix	29
	3.2.1	Boden als Lebensraum für Mikroorganismen	29
	3.2.2	Boden als Filter, Puffer und Transformator	30
	3.3 Wic	htige Eigenschaften von Böden	31
	3.3.1	pH- Wert des Bodens	31
	3.3.2	Redoxpotentiale von Böden	33
	3.3.3	Bodenwasser	33
4	Darste	ellung der im Boden ablaufenden Prozesse	35
	4.1 Trai	nsportprozesse	35
	4.1.1	Transportverhalten ausgewählter Schwermetalle	37
	4.2 Abb	auvorgänge und Speicherprozesse	39
	4.2.1	Filterung	39
	4.2.2	Kolmationseffekte	40

	4.	.2.3	Sorption	44
	4.	2.4	Fällung	58
	4.	2.5	Abbauprozesse	58
	4.	2.6	Komplexierung	62
5	S	chadst	toffe im Boden	63
	5.1	Natü	rliche Stoffgehalte im Boden und Grundwasser	63
	5.2	Ausb	reitung von Schadstoffe an Straßen	64
	5.3	Einte	eilung der Schadstoffe nach ihrem Verhalten bei der Versickerung	67
	5.4	Verh	alten ausgewählter Schadstoffgruppen im Boden	68
	5.	4.1	Organische Schadstoffe	68
	5.	4.2	Verhalten von Schwermetallen im Boden	74
	5.	4.3	Verhalten von Auftausalzen im Boden	80
6	M	Iodelli	ierung des Schadstoffverhaltens im Boden	82
	6.1	Grun	adlagen der Modellierung	82
	6.2	Über	sicht von Stofftransportmodellen	83
	6.3	Stoffi	transportmodell LEACHP	86
	6.4	Mode	ellierung mit PHREEQC [29]	87
7	A	nlagei	n zur Versickerung von Niederschlagswässern	88
	7.1	Theo	retische Grundlagen der Versickerung	88
	7.	1.1	Einphasenströmung	89
	7.	1.2	Mehrphasenströmung	89
	7.	1.3	Die Abflußbildung in der Bodenzone	89
	7.2	Eigni	ung von Standorten für die Versickerung	91
	7.	2.1	Bodenart	92
	7.	2.2	Durchlässigkeit	92
	7.	.2.3	Sickerraum / Schichtdicke	94
	7.	2.4	pH- Wert des Bodens	97
	7.	2.5	Bodenbelastung	97

	7.3 Art i	und Aufbau von Versickerungsanlagen	97
	7.3.1	Zentrale Versickerungsanlagen	97
	7.3.2	Dezentrale Versickerungsanlagen	98
	7.4 Plan	nung von Versickerungsanlagen	101
	7.4.1	Planungshilfe I	101
	7.4.2	Planungshilfe II	102
	7.4.3	Zusammenfassung	109
	7.5 Betr	ieb von Versickerungsanlagen	110
	7.5.1	Pflege und Unterhaltung	110
	7.5.2	Bauliche und betriebliche Aspekte	111
	7.6 Reg	enwasservorbehandlungsmaßnahmen	112
	7.6.1	Möglichkeien einer Regenwasservorbehandlung	112
	7.6.2	Wirksamkeit von Vorbehandlungsmaßnahmen	114
	7.6.3	Vergleich von 3 Absetzbecken	115
	7.7 Beis	piele für bestehende Versickerungsanlagen	118
	7.7.1	Das Versickerungsbecken Nienburg/Langendamm	119
8	Rechtli	iche Grundlagen der Versickerung von Straßenoberflächenwasser	126
	8.1 Rech	ht der Europäischen Gemeinschaft	126
	8.1.1	EU - Allgemeine Regelungen	126
	8.1.2	Europäisches Wasserrecht	127
	8.2 Rech	ht der Bundesrepublik Deutschland	136
	8.2.1	Gesetze des Bundes	136
	8.2.2	Verordnungen und Verwaltungsvorschriften	147
	8.3 Rech	ht der Länder	153
	8.3.1	Baden-Württemberg	153
	8.3.2	Bayern	155
	8.3.3	Berlin	156
	8.3.4	Brandenburg	157
	8.3.5	Bremen	158

13	Lit	eratu	ırverzeichnis	. 193
12	Ab	kürzı	ungsverzeichnis zu Kap. 8	. 191
11	Tal	beller	nverzeichnis	. 187
10	Ab	bildu	ngsverzeichnis	. 185
!	9.3	Weite	rführende Aufgaben	. 183
!	9.2	Defizi	ite im naturwissenschaftlichen sowie technisch-technologischen Kenntnisstand	. 181
	9.1	Defizi	ite in der Gesetzgebung	. 181
9	We	eiterfi	ührende Aufgaben	. 181
•	8.6	Zusan	nmenfassung	. 177
	8.5		Richtlinie für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten (RiSt\u00e4176	
		unrei	A 138: Bau und Bemessung von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schä nigtem Niederschlagswasser	. 175
2			A 128. Pay and Pamassang von Anlagen zur dezentralen Versiekerung von nicht sehö	
			nische Regeln, Normen und Richtlinien von Arbeitsgemeinschaften, Vereinen	
(8.4	Satzu	ngsrecht der Gemeinden	. 175
	8.3	.17	Zusammenfassung zum Recht der Länder	. 174
	8.3		Thüringen	
	8.3		Schleswig-Holstein	
	8.3 8.3		Sachsen-Anhalt	
	8.3		Saarland	
	8.3		Rheinland-Pfalz	
	8.3	.10	Nordrhein-Westfalen	. 164
	8.3	.9	Niedersachsen	. 163
	8.3	.8	Mecklenburg-Vorpommern	. 162
	8.3	.7	Hessen	. 161
	8.3	.6	Hamburg	. 160

1 Aufgaben- und Zielstellung

Die zu realisierende Literaturauswertung wurde nach folgenden Grundsätzen durchgeführt:

- Darstellung chemischer, physikalischer und biologischer Prozesse im Boden und grundwassernahen Bereich anhand ausgewählter Abwässer (z.B. Straßenoberflächenwasser)
 - theoretische Betrachtungen
 - → Schadstoffeigenschaften (Struktur, chem.-physikal. Eigenschaften, ...)
 - → Schadstoffrelevanz (Vorkommen, Menge, Schadwirkung, ...)
 - → Prozeßdarstellung (Abbau, Speicherung, Transport, ...)
 - → Bilanzbetrachtungen
 - → Berechnungsmodelle
 - Einfluß der Bodenart und sonstiger Randbedingungen
 - → relevante Bodeneigenschaften
 - → Darstellung geeigneter Bodenklassifizierungen für Untersuchungen
 - → sonstige Einflußgrößen und ihre Wirkung (pH, O₂-Gehalt, Temperatur, ...)
- Bewertung von vorliegenden Untersuchungsergebnissen
 - Vergleich des Aufbaus der Versuche (Apparate, Methodik etc.)
 - durchgeführte Analysen (Probenahmeintervalle, Probenahmeort, Analysenparameter, Analyseverfahren, ...) für Boden und Wasser
- Darstellung von Defiziten in der Erfassung und Bewertung der Schadstofftransport- und Abbauprozesse im Boden

2 Charakterisierung des zu reinigenden Mediums Wasser

2.1 Straßenoberflächenwasser (SOW)

2.1.1 <u>Herkunftsbereiche der Verschmutzungen</u>

2.1.1.1 Grundbelastung durch Niederschlag

Durch Niederschlagsereignisse werden Stoffe aus der Atmosphäre bedingt durch physikalische Transportvorgänge und chemische Reaktionen ausgewaschen (nasse Deposition). Aus der Niederschlagszusammensetzung kann somit auf die Belastung der Atmosphäre rückgeschlossen werden. Aufgrund der Großräumigkeit von atmosphärischen Durchmischungs- und Transportvorgängen ist aber eine Zuordnung von Quelle und Verschmutzungsgrad nur in sehr begrenztem Maße möglich. Trotzdem reflektiert die Zusammensetzung der Niederschläge in gewisser Weise die durch den Menschen bedingten Aktivitäten wie beispielsweise den DDT-Transport, den Schwefeldioxid-Gehalt im Niederschlag oder auch den äolischen Transport von Cadmium.

Tabelle 1 Zusammensetzung des Niederschlages

Tabelle 1	Zusamm	ensetzung des	s Miederschlages	S			
Parameter	Dim.	Hahn (1994) [44]	HEINZMANN (1993) [47]	STRIEBEL (1994) [115]	MAGISTRAT DER STADT MARBURG (1992) [91]	HUTH/RENNERT/ GROTHKOPP/ LÜTZNER (1995)	HAHN (1990) [45]
pН	-	-	3,5-6,8	-	-	-	-
Ltf.	μS/cm	-	29-172	-	-	-	-
abf. St.	mg/l	5-13	-	-	3,5-12,5	-	4
CSB	mg/l	8-20	-	-	18,7-25,6	-	22,5
NO ₃	mg/l	0,6-0,7	-	-	-	-	0,2-2,5
NO ₃ -N	mg/l	-	0,07-5	-	-	-	-
NH ₃	mg/l	0,6-2,9	-	-	0,6-1,58	-	-
N_{ges}	mg/l	0,7-2,8	-	_	-	-	-
P _{ges}	mg/l	0,04-0,3	0,015-3,594	-	0,031-0,26	-	-
SO_4	mg/l	4,4-41	3-41	-	-	-	-
Chloride	mg/l	2,7-10	0,3-10	-	-	-	-
Zn	μg/l	50-150	25-494	30	60-120	8,5-1060	-
Cu	μg/l	7-200	2-29	11,2	7-21	4,9-74,2	-
Pb	μg/l	30-110	0,9-71	4,2	31-110	1,82-19,1	-
Cd	μg/l	1-3	0,21-3	0,34	0,8-3	0,11-4	-
Fe	μg/l	660	36,9-117	79	660	-	-
Mn	μg/l	50	-	-	50	-	-
Cr	μg/l	2	-	-	1,9-2	-	-
Ni	μg/l	-	-	2,1	-	1,1-24,9	-

Bei der Schadstoffanreicherung des Niederschlages unterteilt man in zwei verschiedene Prozesse. Zum einen kommt es zum *rain out* von Schadstoffen, wobei hier der Wasserdampf an Kondensationskernen in die flüssige Phase übergeht. Der zweite Prozess ist der sogenannte *wash out*; der Niederschlag wäscht in flüssiger Form die Schadstoffe auf dem Weg zur Erdoberfläche aus der Atmosphäre aus. Bestimmte Abhängigkeiten gibt es von der Größe und Konzentration der Aerosole, vom Tropfenradius sowie von der Niederschlagsmenge [75].

In Tabelle 1 sind Stoffkonzentrationen des Niederschlagswassers aus mehreren Untersuchungen zusammengestellt.

2.1.1.2 Natürliche und verkehrsbedingte Verunreinigung der Straßenoberfläche

Beim Abfluß des Regenwassers über verunreinigte Flächen kommt es zur Schadstoffaufnahme und damit zur weiteren Verschmutzung des Niederschlagswassers. Die auftretenden Verunreinigungen können unterteilt werden in:

- ⇒ natürlich
 - vegetationsbedingt,
- ⇒ anthropogen
 - verkehrsbedingt.

Vegetationsbedingte Verunreinigungen sind z.B. verstärktes Auftreten von Blütenstaub, Blütenmaterial, Pollen, geschnittenem Gras, Laub und Ästen. Dieser Eintrag von organischem Material kann zu einer nicht zu vernachlässigenden Stickstoff- und Phosphorfracht führen.

Anthropogene Faktoren wie Papierabfälle, Zigarettenkippen, organische Abfälle und Hundekot (in Berlin 16 t/d, wovon ein Teil mit dem Regenwasser abgespült wird) haben ebenfalls Einfluß auf die Qualität des abfließenden Regenwasser (Straßenoberflächenwasser) [47].

Tabelle 2 Verkehrsbedingte Verunreinigungen im Niederschlagsabfluß von Straßen und befestigten Flächen [108]

Emissionsquelle	Stoffspektrum							
Kraftstoffverbrennung	Ruß, Öle, PAK's, Schwermetalle (Pb), aromatische Kohlen-wasserstoffe (Phenole, Benzole)							
Kfz-Tropfverluste	Benzin, Diesel, Öle , Fette, Unterbodenschutz, Bremsflüssigkeit, Frostschutzmittel, Wasch- und Konservierungsmittel							
Reifenabrieb	Kautschuk, Ruß, Schwermetalloxide							
Abrieb von Bremsbelägen	Schwermetalle (Cr, Cu, Ni, Pb, Zn, Fe)							
und Bremsteilen								
Fahrbahnabrieb und	Mineralische Partikel, Si, Ca, Schwermetalle (Ti, Ni, Mn, Pb, Cr, Cu, Zn),							
-auswaschungen	organische Stoffe und u.a. PAK's (Bitumen, Asphalt)							
Streugut (Winterdienst)	Mineralische Stoffe, Na, Cl, SO ₄ , Ca, K, Mg, Tenside, Phtalate, Herbizide							
Straßenunterhaltung	(Pflanzenschutzmittel)							

Die verkehrsbedingten Verunreinigungen und Stoffeinträge haben jedoch auf das abzuführende Niederschlagswasser den größte Einfluß (s. Tabelle 2).

Der Reifenabrieb setzt sich überwiegend aus biologisch schwer abbaubaren organischen Stoffen zusammen, die somit zwar einen niedrigen BSB₅ aber einen hohen CSB verursachen. Bei der Reifenproduktion werden neben Kautschuk Füllstoffe wie Ruß (25%), Öl (15-20%) und Schwermetalloxide (Zn) verwendet. In Deutschland liegt der durchschnittlich jährliche Reifenabrieb bei ca. 75.000 t. Die dadurch hervorgerufenen Zinkemissionen belaufen sich jährlich auf 0,14 g/km bei Anliegerwegen, 2,84 g/km bei Hauptverkehrsstraßen und 8,1 g/km bei Schnellverkehrsstraßen. Die Schadstofffreisetzungen aus Bremsbelägen sind ebenfalls von Bedeutung, da diese einen großen Anteil an Schwermetallen wie Kupfer, Nickel, Chrom und Blei enthalten. Als weitere Quelle ist der Fahrbahnabrieb zu nennen, wovon in Deutschland etwa 13-17 t/ha·a anfallen. Darin enthalten ist biologisch schwer abbaubares Bitumen. [47]

2.1.2 Beschaffenheit des Straßenoberflächenabflusses

In Tabelle 3 werden sog. allgemeinen Parametern dargestellt, die auch zur Charakterisierung von häuslichem und gewerblichem Schmutzwasser verwendet werden.

Tabelle 3 Konzentrationen im Regenabfluß von befestigten Flächen (Straßenabfluß): allgemeine Parameter

Parameter	Dim.	LANGE (4/1997) [83]	LANGE (6/1997) [82]	HAHN (1994) [44]	Вокснакот (1994) [18]	HEINZMANN (1993) [47]	HAHN (1990) [45]	XANTHOPOULOS (1990) [121]	übliche Zulaufkon- zentrationen in KA*	Mindestanforderungen Ablauf KA**
abf. St.	mg/l	6,6-7,5	137	564	5-999	70	134-339	980	542	-
BSB ₅	mg/l	-	-	-	1-104	28	7,3-18,4	-	500	15
CSB	mg/l	46,7-119	107	49	7-996	113	47-120	260	1000	75
NH ₄	mg/l	-	-	-	-	-	0,8-2,3	0,8	-	-
NH ₄ -N	mg/l	0,2-2,3	0,8	0,2	0,01-8,9	1	0,6-1,8	0,6	54	10
NO ₃	mg/l	1,5-6,1	-	-	-	-	1,8-3,5	1,7	-	-
NO ₃ -N	mg/l	-	-	0,6	0,1-4,5	1,1	0,4-0,8	0,4	-	-
N_{ges}	mg/l	-	-	-	-	5,9	-	-	117	18
PO_4	mg/l	-	0,25	-	-	-	-	-	-	-
P_{ges}	mg/l	0,25-1,7	-	1,5	0,03-9,98	0,56	-	3	14	1

^{*} Errechnung der Zulaufkonzentrationen aus den Lastzahlen eines Einwohners nach [98] und [50] bei einem angenommenen Wasserverbrauch von 120 l/E·d.

^{**} geforderte Ablaufwerte einer Kläranlage >100.000 EW nach Allgem. Rahmen-VwV vom 25.11.1992 [50] Die kursiv gedruckten Werte sind vom Verfasser aus den zugehörigen Zahlen darüber errechnet worden.

Prinzipiell läßt sich feststellen, daß die angegebenen Konzentrationen für Regenabflüsse von befestigten Straßen sehr stark streuen. Dies liegt in den jeweiligen Gegebenheiten der ausgewählten Meßstellen (z.B. Befahrenheit der Straße, unterschiedlicher Verschmutzungsgrad) und den Meßmethoden (d.h. Abweichungen im Meßaufbau, bei der Probenahme und Analytik) begründet. Trotzdem lassen sich anhand dieser Zahlen die Verschmutzungen des Straßenoberflächenwassers verdeutlichen.

In Tabelle 4 sind Meßwerte der wichtigsten im Straßenoberflächenabfluß vorkommenden Schwermetalle Blei, Cadmium, Kupfer, Zink sowie Chrom aufgeführt. Auch hier ist ebenfalls eine starke Streuung zu erkennen. Ein Vergleich mit den Grenzwerten Trinkwasserverordnung (s.Tabelle verdeutlicht, daß die Inhaltsstoffe 5) im Straßenoberflächenabfluß zum Teil deutlich höhere Konzentrationen erreichen.

Tabelle 4 Konzentrationen im Regenabfluß von befestigten Flächen (Straßenabfluß): (Schwer)-Metalle sowie Bor

		(Schwer)-M	etane so	wie Boi						
Para- meter	Dim.	LANGE (4/1997) [83]	LANGE [6/1997) [82]	Hahn (1990) [45]	XANTHOPOULOS (1990) [121]	Hahn (1994) [44]	HEINZMANN (1993) [47]	BORCHARDT (1994) [18]	Magistrat der Stadt Marburg (1992) [91]	GROTEHUANN (1995) [41]
Pb	mg/l	0,02-0,34	0,2	0,25- 1,31	0,98	0,311	0,08	0,041- 0,359	0,058	<0,001- 0,98
Zn	mg/l	0,24-0,62	0,4	0,4- 3,15	1,95	0,603	1,49	0,13-0,5	0,65	0,09-1,95
Cd	μg/l	1,5-6,2	5,9	-	20	6,4	<5	0,48-3	58	0,2-20
Cu	mg/l	0,013- 0,15	0,1	-	0,38	0,108	0,038	0,0057- 0,437	-	0,02-0,38
Ni	mg/l	0,011- 0,035	0,035	-	0,116	0,057	<0,018	0,0026- 0,113	0,07	<0,01- 0,116
Ag	µg/l	-	-	-	-	-	<11	-	-	-
Co	μg/l	-	-	-	-	-	<11	-	-	-
Cr	μg/l	5,2-24,2	10	-	-	-	<13	0,65-31	50	9,6-20,4
Fe	mg/l	1,1-10,4	3,4	-	-	-	2	0,567	1,08	-
Hg	μg/l	0,4	0,4	-	-	-	<1	0,2-5	-	-
Mn	mg/l	-	-	-	-	-	0,09	-	0,21	-
V	μg/l	-	-	-	-	-	<10	-	-	-
Al	mg/l	-	-	-	-	_	1,34	0,392	-	-
Ca	mg/l	-	-	-	-	-	13	-	31	-
K	mg/l	-	-	-	-	-	<3,51	-	3,8	-
Li	μg/l	-	-	-	-	-	<11	-	-	-
Mg	mg/l	-	-	-	-	-	1,24	-	-	-
Na	mg/l	-	-	-	-	-	<6,19	-	125	-
В	mg/l	-	-	-	-	-	0,29	-	-	-

Tabelle 5	Grenzwerte	für Schad	stoffe im T	Trinkwasser It	. TrinkwV

Parameter	Grenzwert in mg/l
Blei	0,04
Cadmium	0,005
Chrom	0,05
Kupfer	3 (Richtwert - nach Stagnation von 12 Stunden)
Nickel	0,05
Zink	5 (Richtwert - nach Stagnation von 12 Stunden)
ΣΡΑΚ	0,0002
Pflanzenschutzmittel einschl. der toxischen Hauptabbauprodukte	0,0001 (einzelne Substanz)
Polychlorierte, polybromierte Biphenyle und Terphenyle	0,0005 (insgesamt)

Tabelle 6 zeigt die Konzentrationen an organischen Schadstoffen im SOW. Besonders zu beachten ist die Gruppe der polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe, deren Meßwerte den Grenzwert der TrinkwV in der Regel um das 10-fache überschreiten.

Tabelle 6 Konzentrationen im Regenabfluß von befestigten Flächen - organische Schadstoffe

Parameter	Dim.	Lange (4/1997) [83]	LANGE (6/1997) [82]	Нани (1994) [44]	НАНN (1990) [45]	XANTHOPOULOS (1990) [121]	Wassmann (1996) [120]	Grotehusmann (1995) [41]	Grenzwert Klär-schlammverordnung in [µg/g] aus HAHN (1994) [44]
		LAN	LAN	HAF	HAF	XAN7 [121]	WA	GRC [41]	Grenzy schlam [μg/g] [44]
Fluoranthen	μg/l	-	-	0,74	-	-	-	0,25-9,6	2,18
Benz(B,J,R)- Fluoranthen	μg/l	-	-	1,07	-	-	-	-	1,25
Benzapyren	μg/l	-	-	0,40	-	-	-	0,02-4,1	0,78
Indeno (1,2,3,cd)-pyren	μg/l	-	-	0,31	-	-	-	0,01-2,3	0,76
Benz(ghi)- perylen	µg/l	-	-	0,42	-	-	-	0,19-4,7	1,42
Σ ΡΑΚ*	μg/l	0,2-3,0	2,6	2,90	2-3	3,1	0,24-2,97	0,24-4,4	6,3
Σ ΗСΗ	μg/l	-	-	1	0,04	0,036	-	-	-
Σ РСВ	μg/l	-	-	-	0,15	0,15	-	-	-
Mineralöl	μg/l	0,7-7,0	7	-	-	0,9	0,831-7,02	-	-
AOX	μg/l	-	-	-	-	600	-	-	-

^{*} Der Grenzwert der TrinkwV beträgt für Σ PAK 0,20 μ g/l.

In Tabelle 7 sind die Werte von Niederschlag, Dachabfluß und Straßenabfluß gegenübergestellt. Die Schadstoffkonzentrationen nehmen bis auf wenige Ausnahmen vom relativ gering belasteteten Niederschlag über den Dachablauf bis hin zum Straßenabfluß stetig zu. Beim Dachablauf kommt es teilweise zu Retentionserscheinungen einiger Substanzen auf der Oberfläche, so daß dadurch etwas niedrigere Werte zustande kommen.

Tabelle 7 Gegenüberstellung der Konzentrationen von Niederschlag, Dachablaufwasser und Straßenablaufwasser [44]

Parameter	Dim.	Niederschlag	Dachabfluß	Straßenabfluß
pН		4,9	6,2	6,4
Ltf.	μS/cm	32	80	108
abf. Stoffe	mg/l	n.n.	60	564
CSB	mg/l	5	22	49
DOC	mg/l	1,5	8	12
NH ₄ -N	mg/l	0,2	4	0,2
NO ₃ -N	mg/l	0,6	0,2	0,6
NO ₂ -N	mg/l	0,05	0,3	0,02
PO ₄ -ges.	mg/l	0,2	0,3	1,5
Pb	μg/l	5	104	311
Cd	μg/l	1	1	6,4
Zn	μg/l	5	24	603
Cu	μg/l	1,5	35	108
Ni	μg/l	5	n.b.	57
ΣΡΑΚ	μg/l	n.b.	0,5	3,1
MKW	μg/l	n.b.	n.b.	5,5

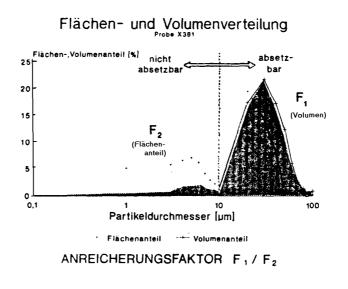
2.1.3 Bindungsformen und Struktur der gelösten und partikulären Schadstoffe

Im Hinblick auf die spätere Behandlung des Straßenoberflächenwassers ist die Kenntnis der vorkommenden Bindungs- und Erscheinungsformen der Schadstoffe außerordentlich wichtig. Davon hängt unter anderem ab, ob die Substanzen leicht bei der Versickerung von der oberen Bodenschicht zurückgehalten oder in gelöster Form weitertransportiert werden.

Ein großer Teil der im Straßenoberflächenwasser vorkommenden gefährlichen Stoffe (Schwermetalle, PAKs) neigt sehr stark zur Adsorption, meist bedingt durch besondere Affinitäten zu spezifischen, im Niederschlagsabfluß vorkommenden Suspensa mit ihren Oberflächen. Aber auch Lipophobie kann eine Rolle spielen, vor allem bei organischen Stoffen. Eine Großzahl von Adsorptionsflächen steht aufgrund der im Niederschlagsabfluß in hohen Konzentrationen nachgewiesenen feinst suspendierten Stoffen zur Verfügung. Transport, Verteilung und Ablagerung der Schadstoffe stehen in engem Zusammenhang mit der Anreicherung an feinen Partikeln, wie sie mit Hilfe des Parameters "abfiltrierbare Stoffe" nachgewiesen werden.

Die Untersuchungen müssen dahingehend erfolgen, die ungelösten Feststoffe im Niederschlagsabfluß bezüglich ihrer spezifischen Oberfläche und ihrer Affinität zu den Schadstoffen zu erfassen. Dabei ist das Konzept der Verteilungskoeffizienten (Konzentration in einer Phase in Relation zur Konzentration der Ausgangsphase) am verbreitetsten. Im folgenden wird davon ausgegangen, daß zwischen der Anreicherung und der spezifischen Oberfläche (in [m²/l] spezifisch für jede Korngrößenfraktion) eine direkte Proportionalität besteht. Bei zusätzlicher Berücksichtigung der chemischen Affinität wäre es möglich, einen Verteilungskoeffizient multiplikativ einzuführen und somit die tatsächliche Anreicherung zu berechnen.

Mit Teilchenanalysengeräten ist es möglich, die spezifische Oberflächenkonzentration der im Niederschlagsabfluß enthaltenen Feststoffe zu ermitteln.



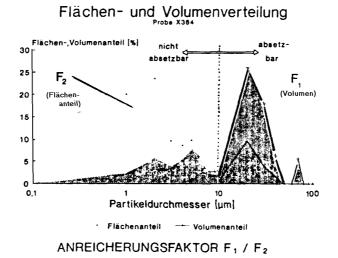


Bild 1 Oberflächen- und Volumenverteilung der Partikeln zweier Proben [45]

In Bild 1 sind die Untersuchungsergebnisse von zwei verschiedenen Niederschlagsabflußproben in Bezug auf die Volumen- und Oberflächenaufteilung der Feststoffe als Funktion des Korngrößendurchmessers der auftretenden Feststoffe dargestellt. Anhand der oberen Grafik in Bild 1 wird deutlich, daß bei der Probe X 381 das Maximum der Volumenund somit Gewichtsanteile bei etwa 20 bis 30 µm liegt. Die Verteilung der spezifischen Oberfläche (Anzahl x Einzelkornoberfläche je Korngrößenfraktion [m²/l]) ist relativ gleichmäßig über alle Korngrößenfraktionen verteilt, wobei die 15 µm-Fraktion etwas dominiert. Es wäre bei dieser Probe durch Sedimentation der Partikeln > 10µm möglich, den größten Teil der Volumen- und Gewichtsanteile und damit ca. die Hälfte der spezifischen Oberfläche zu entfernen. In gleicher Größenordnung ist damit auch die Entfernung der proportional zu der spezifischen Oberfläche adsorbierten Schadstoffe gewährleistet.

Bei der Probe X 384 wäre es ebenfalls möglich, den weitaus größten Teil der Volumenkonzentration (Massekonzentration) zurückzuhalten. Da das Maximum der spezifischen Oberfläche (Anzahl x Einzelkornoberfläche je Korngrößenfraktion) dagegen in einem wesentlich kleineren Korngrößenbereich auftritt, bleibt die Adsorptionsmatrix für Schadstoffe weitgehend bestehen.

Die über den Feststoffgehalt einer Probe und die spezifische Feststoffbelastung ermittelte Fracht der gefährlichen Stoffe wird nicht im selben Maße reduziert wie die Feststoffmasse selbst. Weiterhin ist zu beachten, daß Transport, Verteilung und Ablagerung der gefährlichen Stoffe in feststoffbelasteten Systemen im Zusammenhang stehen mit der verfügbaren Oberflächenkonzentration und somit nicht aus direkten Massenbetrachtungen ermittelt werden dürfen. Als Bezugsgröße darf nicht die Dimension [mg Feststoffe/l] sondern muß die Einheit [m²/l] verwendet werden, wobei die Betrachtung proportional zur Wassermenge und nicht zur Feststofffracht erfolgt. [45]

In Bild 2 sind die Gesamtmetallgehalte (sowohl gelöste als auch im Schweb gebundene Anteile) von zwei parallel genommenen Einzelproben aufgeführt, wobei die Probenahme gegen Ende eines Abflußereignisses mit niedriger Intensität erfolgte. Insgesamt sind die Gesamtgehalte relativ niedrig, unter anderem aufgrund von geringen Schwebgehalten.

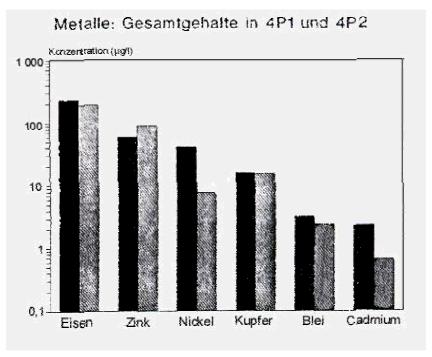


Bild 2 Gesamtmetallgehalte der Einzelproben [25]

In Bild 3 ist die Speziesaufteilung für das Schwermetall Blei dargestellt. Die gelösten Anteile konnten komplett nicht nachgewiesen werden (gesamtgelöstes Blei unter 1 μ g/l). Ganz deutlich wird in der Grafik die Fixierung des Bleis am Schweb. Die stärkste Belastung tritt in der mittleren Kornfraktion zwischen 0,45 und 12 μ m auf.

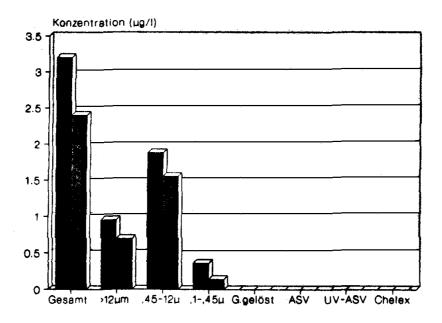


Bild 3 Speziesaufteilung für Blei bei den beiden Einzelproben [25]

In Bild 4 wird die Speziesaufteilung für Nickel gezeigt. Im Gegensatz zum Blei überwiegt hier deutlich der gelöste Anteil.

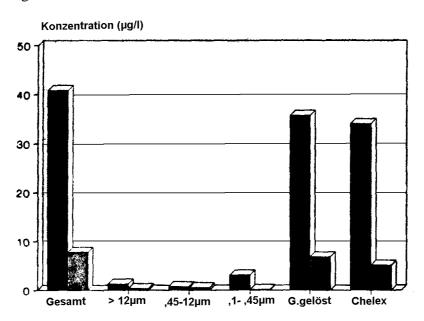


Bild 4 Speziesaufteilung für Nickel bei den beiden Einzelproben [25]

Bild 5 charakterisiert die Bedeutung des gelösten Anteils am Gesamtgehalt von Cadmium in den Proben. Ein sehr hoher Anteil liegt in austauschbarer Form vor, der aber nicht unbedingt ASV-labil sein muß. ASV steht dabei für Anodic Stripping Voltametry. Dies ist ein elektrochemisches Verfahren zur Messung schwach gebundener und freier Metalle in Lösung. Es werden dabei frei gelösten Metalle und Metalle in ASV-labilen Komplexen erfaßt.

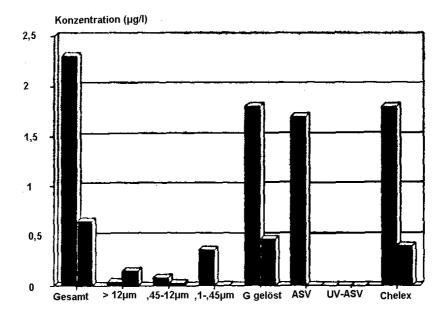


Bild 5 Speziesaufteilung für Cadmium bei den beiden Einzelproben [25]

Bild 6 stellt die Verteilung für Kupfer dar. Die Gesamtkonzentration ist sehr niedrig, wobei diese fast ausschließlich in gelöster Form und austauschbar vorliegt. Da der UV-ASV-labile Anteil sehr hoch ist, kann auf eine starke organische Komplexierung geschlossen werden. Zur Bestimmung des UV-ASV-labilen Anteils wurde die Probe 6 Stunden zur Zerstörung der organischen Komplexbildner mit UV-Licht bestrahlt, bevor die ASV-Messung erfolgte. Es werden also frei gelöstes Kupfer, ASV-labile Kupferkomplexe sowie organisch komplexiertes Kupfer erfaßt.

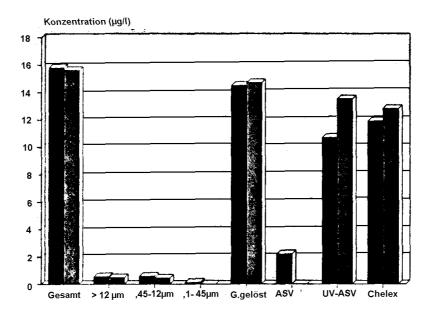


Bild 6 Speziesaufteilung für Kupfer bei den beiden Einzelproben [25]

Neben den anorganischen Schadstoffen ist bei den organischen Spurenstoffen eine Betrachtung von gelöster und partikulärer Phase ebenfalls von Bedeutung. Besonders hervorzuheben sind die polyzyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe (PAK) mit der Leitsubstanz Benz(a)pyren.

Die drei wichtigsten PAK treten hinsichtlich ihrer Wasserlöslichkeit unterschiedlich in Erscheinung, obwohl sie generell eine stark hydrophobe Stoffgruppe darstellen. Phenantren hat eine Wasserlöslichkeit von 1,29 mg/l. Bei Fluoranthen liegt dieser Wert mit 0,26 mg/l deutlich niedriger. Am stärksten hydrophob reagiert Benz(a)pyren mit einer sehr geringen Wasserlöslichkeit von 0,0038 mg/l.

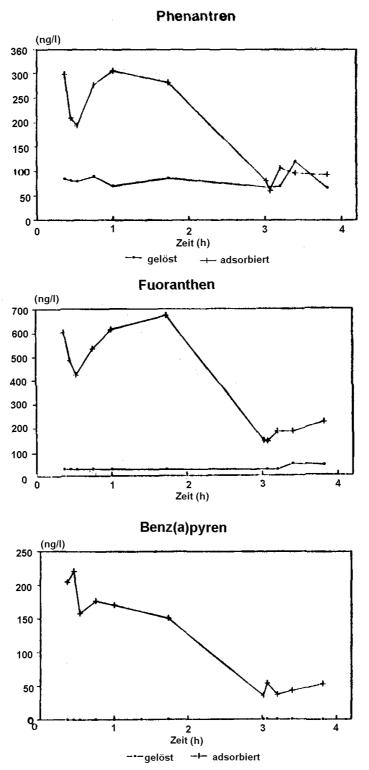


Bild 7 Konzentrationsganglinien in [ng/l] von organischen Mikroschadstoffen im Straßenabfluß [25]

In Bild 7 sind die Ganglinien dieser 3 PAK während eines bestimmten Abflußereignisses aufgeführt. Dabei wird zwischen den gelösten und den am Schweb adsorbierten Stoffmengen unterschieden. Die Abnahme der Schwebkonzentrationen verläuft bei allen drei Substanzen nach etwa dem gleichen Schema, wogegen aber bei der anschließenden Zunahme der Stoffkonzentrationen deutliche Unterschiede zu erkennen sind. Beim schwer löslichen Fluoranthen und Benz(a)pyren wird zum Ende des Ereignisses ein deutlicher Anstieg in den Schwebkonzentrationen sichtbar. Beim leichter löslichen Phenantren ist ein schwacher Rückgang zu verfolgen. Die Erklärung dieses Phänomens kann so erfolgen, daß zu Beginn des Ereignisses das leichter lösliche Phenantren wesentlich stärker in gelöster Form abgespült wurde als Fluoranthen und Benz(a)pyren (vgl. [25]).

Eine Differenzierung der partikulären Fraktion hat ebenfalls Xanthopoulos [121] vorgenommen. Dabei wurden für ausgewählte Proben nach manueller Probenahme die Partikeln zum Zentrifugieren abgetrennt und es erfolgte eine Bestimmung der Gehalte an Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffen sowohl für die Gesamtprobe als auch für die zwei getrennten Phasen. In Tabelle 8 werden die festgestellten Konzentrationen an PAK in wässriger und partikulärer Phase mit den Grenzwerten aus der Trinwasser- und der Klärschlammverordnung verglichen.

Tabelle 8 Konzentrationen an PAK in wäßriger und partikulärer Phase verglichen mit den Grenzwerten der Trinkwasser- und der Klärschlammverordnung [121]

	obe in	erte µg/1]	gierte in	robe 2+3 in	.ii	nm- g in
	Gesamtprobe [µg/l]	zentrifugierte Probe in [µg/l]	abzentrifugierte Partikel in [µg/g]	Gesamtprobe ber. aus 2+3	TrinkwV [μg/l]	Klärschlamm- verordnung [µg/g]
Fluoranthen	0,74	0,04	3,19	0,82		2,18
Benz(B,J,R)-Fluoranthen	1,07	0,04	4,59	1,16		1,25
Benz(a)pyren	0,40	0,01	1,38	0,35		0,78
Indeno (1,2,3,cd)-pyren	0,31	0,01	1,24	0,31		0,76
Benz(ghi)-perylen	0,42	0,01	1,81	0,45		1,42
Σ ΡΑΚ	2,90	0,11	12,21	3,09	0,20	6,3

Auch hier wird deutlich, daß die PAK hauptsächlich an die Feststoffphase gebunden sind, in der zentrifugierten Probe sind die Konzentrationen sehr gering. Der Parameter "abfiltrierbare Stoffe" reicht nicht aus, um die Rolle der partikulären Fraktion für den Stofftransport zu beschreiben.

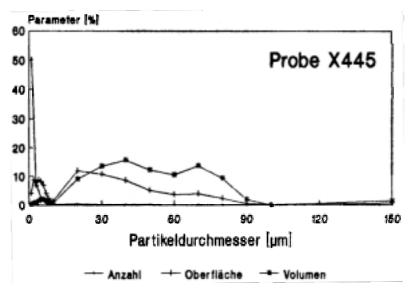


Bild 8 Verteilung der Anzahl der Partikeln, ihrer Oberfläche und ihres Volumens über die Korngröße am Beispiel einer Regenabflußprobe [121]

Aus der Verteilung der Partikeloberfläche über die Korngröße kann das Transportpotential jeder Fraktion abgeleitet werden. In Bild 8 ist das Ergebnis einer Partikelanalyse dargestellt.

Die Feststoffe werden in vier Fraktionen unterteilt, wie sie in Tabelle 9 aufgeführt sind.

Tabelle 9 Unterteilung der partikulären Phase des Regenabflusses in vier Fraktionen anhand ihrer Transportcharakteristik und Schadstoffbeladung [121]

Fraktion	Bewertung		
> 600 µm	Geschiebe, unbelastet		
60-600 μm	mäßig belastete, absetzbare Stoffe		
6-60 µm	stark belastete, absetzbare Stoffe		
< 6 μm	stark belastete, nicht absetzbare Stoffe		

2.1.4 Ermittlung der Schadstofffrachten

Die Bestimmung der Frachten des abfließenden Regenwassers ist insbesondere für die Abschätzung der Leistungsfähigkeit von Versickerungsanlagen von Bedeutung. Weiterhin ist die Ermittlung der über Jahrzehnte zurückgehaltenen Menge an nicht abbaubaren Stoffen, die sich in der Regenwasserversickerungsanlage akkumuliert haben, notwendig.

Die folgenden Angaben sind Jahresfrachten, die als Produkt aus mittlerer Schmutzkonzentration und dem mittleren Jahresabfluß pro Hektar ermittelt wurden. In Tabelle 10 sind die mittleren Jahresfrachten von verschiedenen städtischen Gebieten angegeben.

Tabelle 10	Ausgewählte mittlere Jahresfrachten im Regenwasserabfluß unterschiedlicher Einzugsgebiete
	sowie Autobahnen in Deutschland in [kg/ha·a]

Parameter	SIEKER/GROTTKER	MAGISTRAT DER STADT MARBURG (1992) [91]
	(1988) [110]	Autobahn
	Städtisches Einzugsgebiet	
Abf. Stoffe	2.121	479-873
CSB	568,5	207-672
P _{ges}	10,6	0,63-1,62
NH ₄ -N	14,4	1,03-4,6
NO ₃ -N	11,4	-
NO ₂ -N	0,7	-
Cd	0,0264	0,0072-0,037
Cr	0,1514	0,012-0,1
Cu	0,8	0,13-0,621
Fe	64,7	4,37-28,81
Hg	0,0025	-
Ni	0,2	-
Pb	1,9	0,36-1,332
Zn	2,7	0,715-2,892
PAK	0,0015	0,005-0,018
Mineralöl	5,2	4,85-43,27

Es wird deutlich, daß bis auf wenige Ausnahmen die Frachten der Autobahn geringer sind als im städtischen Einzugsgebiet. Die Ursachen dafür sind vielfältig. Auf der Autobahn gibt es nur wenige Brems- und Anfahrvorgänge, bei denen ein erhöhter Reifenabrieb auftritt. Weiterhin ist der anthropogene Schmutzstoffeintrag (z.B. Abfallablagerungen, Hundekot) und der natürliche Eintrag (z.B. Fehlen von Bäumen mit entsprechendem Laubeintrag) auf der Autobahn geringer. Zu den 3 Probenahmestellen von [91] können folgende Angaben gemacht werden:

- ⇒ Probenahmestelle 1: Autobahn A 81 bei Pleidelsheim (Fläche von 1,3 ha, Befestigung Beton, 41.000 Fahrzeuge/Tag, Fahrzeug-km pro versiegelter Oberfläche: 8,6·10⁶ km/(ha·a), versiegelte Oberfläche 100 %, Geschwindigkeitsbeschränkung 60 km/h)
- ⇒ Probenahmestelle 2: Autobahn A 6 bei Obereisesheim (Fläche von 2,52 ha, Asphalt, 47.000 Fahrzeuge/Tag, 8·10⁶ km/(ha·a) sowie eine versiegelte Oberfläche von 85,7 %)
- ⇒ Probenahmestelle3: Autobahnkreuz A 8 / B 10 Ulm/West (Fläche 25 ha groß, ebenfalls Asphalt, 52.200 Fahrzeuge/Tag, 3,2·10⁶ km/(ha·a) und eine versiegelte Oberfläche von nur 39,6 %)

2.1.5 Beurteilung und Schadwirkung der Inhaltsstoffe / Stoffgruppen

Der Begriff "Schadstoff" wird durch [41] definiert als:

- ⇒ Stoffe, die ein hohes Schadpotential zum Beispiel in Form ihrer Toxizität aufweisen, dabei können sie schon in geringen Konzentrationen (im μg/l-Bereich) auf die belebte Umwelt wirken.
- ⇒ Stoffe, die durch menschliche Aktivitäten in die Umwelt gelangt sind, wo sie in relevanten Konzentrationen vorkommen.

Tabelle 11 Grenzwerte für Oberflächenwasser (Rohwasser) und Trinkwasser nach verschiedenen Richtlinien [111]

Schadstoff	W 151 A (OFW als Rohwasser)	TVO (TW)	EG-Richtlinie (Oberfl.was.)	WHO (TW)	UdSSR (Rohwasser)	Grenzwert für Einleitung in Gewässer
	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l	mg/l
Arsen	0,01	0,04	0,05	0,05	0,05	-
Beryllium	0,0001	-	-	-	0,0002	-
Blei	0,03	0,04	0,05	0,1	0,1	0,5
Bor	1,0	-	-	-	-	-
Cadmium	0,005	0,006	0,005	0,01	0,01	0,1
Chrom	0,03	0,05	0,05	0,05	0,1 (Cr VI)	2,0
					0,5 (Cr III)	
Eisen	0,1	-	0,3	0,1	0,5	2,0
Kobalt	0,05	-	-	-	1	-
Kupfer	0,03	-	-	0,05	0,1	0,5
Mangan	0,05	-	-	-	-	-
Nickel	0,03	-	-	-	0,1	-
Quecksilber	0,0005	0,004	0,0001	0,001	0,005	-
Selen	0,01	0,008	0,01	0,01	0,01	-
Titan	-	-	-	-	0,1	-
Vanadium	0,05	-	-	-	0,1	2,0
Zink	0,5	2	3	5	1,0	2,0
Zinn	-	-	-	-	-	-
Kwe	0,05	-	0,05	-	-	-
PCA	0,001	0,00025	0,0002	-	-	-
Mineralöl	-	mgC/l	0,01	-	-	10
(gel. o. emulg. Kwe)		-				

Bei der Beurteilung der bei der Regenwasserversickerung auftretenden Schadstoffe unterscheidet [41] zwischen human- und ökotoxikologischen Belangen. Humantoxikologische Aspekte sind insbesondere für den Schutz des Grundwassers (vor allem bei Nutzung als Trinkwasser) von Bedeutung. Grundlage bei der Beurteilung der Gefährdung des Grundwassers bildet hier die TrinkwV (1990). Unter ökotoxikologischen Gesichtspunkten sind besonders Einflüsse auf Bodenlebewesen zu nennen, wobei die Fruchtbarkeit und Belastbarkeit von Böden gegenüber bestimmten chemischen Einwirkungen betrachtet wird.

Bei akut-toxischen Einzelwirkungen von Chemikalien gibt es eindeutige Dosis-Wirkungs-Beziehungen. Dagegen sind die Verhältnisse bei chronischen und synergetischen Wirkungen als Komplex anzusehen. Somit ist für Stoffe, bei denen der Verdacht auf kanzerogene, teratogene und mutagene Eigenschaften vorliegt, ein generelles Minimierungsgebot bezüglich Grund- und Trinkwasser gegeben. Für diese Substanzen bedarf es keines Grenzwertes, da die erwähnten Wirkungen schon in kleinsten Konzentrationen auftreten können. In diesem Zusammenhang sind insbesondere Stoffe mit nachgewiesenem kanzerogenen Potential (z.B. PAK) zu nennen. Diese sollten bei der Bewertung von Regenwasserversickerungsanlagen prioritär berücksichtigt werden (vgl. [41]).

[111] sind der Meinung, daß versickerndes Regenwasser in seiner Qualität dem Rohwasser für die Trinkwasseraufbereitung nahe kommen sollte, um spätere Gefährdungen auszuschließen. In Tabelle 11 sind verschiedene Grenzwerte für Oberflächenwasser und Trinkwasser zusammenfassend aufgeführt, wie sie zur Orientierung verwendet werden sollten.

Weiterhin geben [111] zu bedenken, daß der Mensch auch indirekt über die Aufnahme von Schadstoffen durch die Pflanzen gefährdet werden kann. Speziell ist dabei auf Schwermetalle zu achten, die sich in Pflanzen anreichern können, z.B. Cadmium, Kupfer, Molybdän, Nickel und Zink. Auch die toxische Wirkung von Schwermetallen auf das Pflanzenwachstum ist von Bedeutung. In Tabelle 12 sind zur Verdeutlichung dieses Problems die tolerierbaren Schwermetallgehalte des Bodens in Bezug auf die Pflanzenverträglichkeit angegeben.

Tabelle 12	Tolerierbare Schwermetallgehalte im Boden bezüglich ihrer Pflanzenverträglichkeit [111]	

Element	tolerierbarer Gehalt im Boden			
	ppm	g/m³		
Blei	100	180		
Cadmium	3	5,4		
Chrom	100	180		
Eisen	-	-		
Kobalt	50	90		
Kupfer	100	180		
Mangan	-	-		
Nickel	50	90		
Quecksilber	2	3,6		
Zink	300	540		

Zu den Schadwirkungen von Schwermetallen in Gewässern können nach [84] folgende Aussagen getroffen werden: Cadmium ist durch eine große humantoxikologische aber auch ökotoxikologische Wirkung gekennzeichnet. Blei wirkt gegenüber Fischen und anderen Wasserlebewesen geringer akut toxisch als Cadmium. Blei reichert sich in Fischen und Planktonorganismen an. Kupfer ist im Gewässer schon in geringen Konzentrationen für fast alle Wasserorganismen wie Bakterien, Algen, Fische und Fischnährtiere toxisch. Eine nachteilige Beeinflussung der Besiedlungs- und Selbstreinigungsmechanismen ist darauf zurückzuführen. Beim Eisen werden durch Zudecken des von Mikroorganismen gebildeten biologischen Rasens ebenfalls die Selbstreinigungmechanismen behindert. Zink gilt als

humantoxikologisch wenig bedenklich, aber im Gewässer setzt es ebenfalls wieder die biologische Selbstreinigungskraft herab, es reichert sich sowohl im Sediment als auch in Weichtieren wie Schnecken und Muscheln an. [84] gibt desweiteren Schwellenwerte für Gewässer an, ab welcher Konzentration mit Beeinträchtigungen der aquatischen Ökosysteme zu rechnen ist. Diese sind in Tabelle 13 aufgeführt.

Tabelle 13 Schwellenwerte für Gewässer entsprechend den allgemeinen Güteanforderungen für Fließgewässer des Landes Nordrhein-Westfalen von 1991 [84]

Parameter	Grenzwerte AGA (NRW), 1991 [mg/l]	
CSB	20	
PAK	-	
Cd	0,001	
Cr	0,03	
Cu	0,04	
Fe	2	
Pb	0,02	
Zn	0,3	
Ni	0,03	
Hg	0,0005	

2.1.6 Beschaffenheitskategorien für den Niederschlagsabfluß

Um für die Praxis verwendbare Empfehlungen für die Regenwasserversickerung zu erhalten, sollen im folgenden Verschmutzungsklassen für das Straßenoberflächenwasser aufgestellt werden, nach denen dann über die Art der Behandlung entschieden werden kann.

[108] haben versucht, Beschaffenheitskategorien für den Niederschlagsabfluß aufzustellen, um danach die Art der anzustrebenden Behandlung des Straßenoberflächenwassers festzulegen. In Tabelle 14 sind diese Klassen mit den dazugehörigen Herkunftsmöglichkeiten aufgeführt.

Anhand dieser Kategorien lassen sich dann die Möglichkeiten einer Regenwasserversickerung auswählen.

[41] geht bei der Auswahl des optimalen Behandlungsverfahrens für Straßenoberflächenwasser folgendermaßen vor: Zuerst werden die Niederschlagsabflüsse qualitativ bewertet, indem diese bezüglich der Stoffkonzentrationen und der in diesem Zusammenhang möglichen potentiellen Grundwassergefährdung bei Versickerung in drei Kategorien (siehe Tabelle 15) eingeteilt werden: unbedenklich, tolerierbar, nicht tolerierbar.

Tabelle 14 Zuordnung der Herkunft des Niederschlagsabflusses zu Beschaffenheitskategorien [108]

Kategorie	Belastung	Herkunft
A	nicht belastet =	- Dachflächen in Wohngebieten
	unverschmutzt	- Radwege
		- Fuß- und Wohnwege mit ger. Menschen- und Tieransammlungen
		- Hofflächen in Wohngebieten mit eingeschränkter
		Nutzung wie Verbot des Waschens von Kfz
В	schwach belastet = gering verschmutzt	- Wohnstraßen mit Park- und Stellplätzen mit schwachem fließenden oder ruhenden Kfz-Verkehr
		- Freiflächen mit großen Menschenansammlungen wie Einkaufsstraßen, Märkte, Freiluftveranstaltungen
		 Dach-, Hof- und Verkehrsflächen in Gewerbegebieten sowie Dachflächen in Industriegebieten, wenn nachweislich hinsichtlich seiner Verschmutzung mit Wohngebiet vergleichbar Start- und Landebahnen von Flughäfen ohne Winterbetrieb (Enteisungseinrichtungen)
С	belastet = stark verschmutzt	 Hauptverkehrsstraßen und Fernstraßen mit starkem fließenden und ruhenden Kfz-Verkehr sowie Großparkplätze mit häufiger Frequentierung Gleisanlagen Start- und Landebahnen von Flughäfen mit Winterbetrieb (Enteisung) sowie Flächen, auf denen eine Betankung oder Wäsche von Flugzeugen erfolgt Lager-, Abfüll- und Umschlagplätze mit Umgang mit wassergefährdenden Stoffen sowie Jauche und Gülle
		 - Dach-, Hof- und Verkehrsflächen in Gewerbe- und Industriegebieten - Freiflächen mit großen Tieransammlungen wie Viehhaltungsbetriebe, Reiterhöfe, Schlachthöfe, Pelztierfarmen - Abfallentsorgungsanlagen wie Deponiegelände, Umschlaganlagen, Zwischenlager, Kompostierungsanlagen

Ohne spezielle Vorbehandlung können die unbedenklichen Niederschlagsabflüsse über die ungesättigte Bodenzone versickert werden. Diese Abflüsse werden aufgrund ihrer geringen Verunreinigungen als unproblematisch angesehen, so daß nachteilige Grundwasserbeeinträchtigungen nicht erwartet werden. Eine Versickerung tolerierbarer Niederschlagswässer kann nur nach geeigneter Vorbehandlung erfolgen. Unter letzterer wird auch die Versickerung über eine bewachsene, belebte Bodenschicht angesehen. Größere Beschaffenheitsschwankungen werden durch die Pufferwirkung des Oberbodens kompensiert, wozu aber spezielle Anforderungen an die Versickerungsanlage gestellt werden. Nicht tolerierbare Abflüsse dürfen nur nach Vorbehandlung in Sonderanlagen versickert werden. In Tabelle 15 ist die Zuordnung der abflußliefernden Flächen zu den drei oben genannten Kategorien enthalten.

Fläche/Gebietsdefinition	Qualitative Bewertung
Dachflächen in Wohn- und vergleichbaren Gewerbegebieten	unbedenklich
Rad- und Gehwege in Wohngebieten	
Hofflächen in Wohn- und vergleichbaren Gewerbegebieten	
Straßen DTV<2.000 Kfz	
Dachflächen in sonstigen Gewerbe/Industriegebieten	tolerierbar
Straßen mit DTV 2.000 bis 15.000 Kfz	
Parkierungsflächen	
Straßen mit DTV>15.000 Kfz	
Landwirtschaftliche Hofflächen	
Hofflächen und Straßen in sonstigen Gewerbe/Industriegebieten	nicht tolerierbar

Tabelle 15 Qualitative Bewertung der Niederschlagsabflüsse hinsichtlich der Regenwasserversickerung in Abhängigkeit der Flächennutzung [41]

DTV = durchschnittliche tägliche Verkehrsdichte

Es wird bei dieser Einteilung unterschieden nach Flächenarten, nach der Nutzung dieser Flächen sowie nach der Emissionssituation im Umfeld. Die Straßen wird nach der durchschnittlichen Niederschlagsabflusses von Verkehrsdichte eingeteilt. Beim ruhenden Verkehr ist eine Einteilung wesentlich schwieriger, da hier die Belastung des Straßenoberflächenwassers von vielen Faktoren abhängt.

Da die Berücksichtigung von zufälligen Verunreinigungen der Oberflächen durch Unfälle sehr schwierig ist, kann oftmals keine pauschale Flächenzuordnung zu Stoffpotentialen und Verunreinigungsrisiken gegeben werden. Wenn aufgrund spezieller Kenntnisse und wegen der Art der Nutzung ein hohes Gefährdungsrisiko besteht, kann das abfließende Niederschlagswasser als nicht tolerierbar für die Versickerung angesehen werden.

2.2 Schwachbelastete Industrieabwässer

2.2.1 Definition – schwachbelastete Industrieabwässer

Der Begriff Abwasser ist z.B. in § 2 des Abwasserabgabengesetzes erläutert: "Abwasser ... sind das durch häuslichen, gewerblichen, landwirtschaftlichen oder sonstigen Gebrauch in seinen Eigenschaften veränderte und das bei Trockenwetterabfluß damit zusammen abfließende Wasser (Schmutzwasser) sowie das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten und befestigten Flächen abfließende und gesammelte Wasser (Niederschlagswasser). ..." [1] Unter Abwasser ist somit zu verstehen:

- a) Häusliches Schmutzwasser
- b) Gewerbliches (betriebliches) Schmutzwasser ist das Abwasser aus Industrie- und Gewerbegebieten. Betriebliche Abwässer (gewerbliche und industrielle Schmutzwässer) entstehen bei der Gewinnung und Verabreitung von Rohstoffen zu industriellen Erzeugnissen sowie bei deren Verwendung zur Herstellung von Gebrauchsgütern. Es besteht häufig sehr einseitig aus organischen oder mineralischen Stoffen, ist u.U. stark gefärbt oder von hoher Temperatur. Kühlwasser ist eine besondere Art des gewerblichen Schmutzwassers.
- c) landwirtschaftliches Schmutzwasser

- d) Fremdwasser
- e) Sickerwasser aus Abfalldeponien
- f) Niederschlagswasser [24]

2.2.2 Menge und Beschaffenheit des anfallenden Industrieabwassers

Die Arten und Beschaffenheit industrieller Schmutzwässer wird in [101] und [7] genauer beschrieben. An dieser Stelle soll nur ein grober Überblick gegeben werden.

Eine erste Einteilung erfolgt aufgrund des Anfalles im Betrieb selbst. Unterschieden werden:

- Prozeßabwässer, die unmittelbar an der Produktionsstelle anfallen (z.B. Reinigungswässer, Spülwässer),
- Kühlwässer, mit denen Abfallwärme abgeleitet wird,
- Grubenwässer, die im Bergbau aus größeren Tiefen an die Erdoberfläche gepumpt werden.

Alle Prozeßabwässer sind wegen ihrer unmittelbaren Berührung mit den Rohstoffen üblicherweise stärker verschmutzt als Kühlwässer.

In der Regel wird der Schmutzwasseranfall immer geringer sein als der Frischwasserbedarf, da beim Produktionsverfahren ein Teil des Frischwassers im Produkt bleibt oder verbraucht wird.

In der Bundesrepublik Deutschland beträgt nach statistischen Erhebungen der Gesamtwasserbedarf (Gebrauch und Verbrauch) für den industriellen Bereich ca. 40 Milliarden m³/a. Darin mit einbezogen sind die im innerbetrieblichen Kreislauf eingesetzten Wassermengen. Dabei sind die in den Wärmekraftwerken anfallenden Kühlwassermengen allerdings nicht enthalten. Durch Verbesserung der Fabrikationsverfahren, vor allem durch Rückführung von Wasser in den Produktionsprozeß (innerbetriebliches Recycling), ist in den letzte Jahren der spezifische Wasserverbrauch und damit der spezifische Schmutzwasseranfall in vielen Branchen wesentlich reduziert worden .[6]

Der betriebliche Abwasseranfall ist zum Teil erheblichen Schwankungen unterworfen; Vorhersagen sind problematisch. Die Schwankungen unterscheiden sich für jedes Gewerbe, u.U. auch für jeden einzelnen Betrieb. Die Abwässer können gleichmäßig, ungleichmäßig oder auch stoßweise mit Schwankungen nach Tag und Nacht (Schichtbetrieb) und nach Jahreszeiten (Saisonbetrieb) anfallen. Die Unterschiede im Abwasseranfall lassen sich folgenden Kriterien zuordnen:

- Art des Industriebetriebes
- Ausgangsmaterial
- Herstellungsmethoden
- Größe der Betriebe
- Saisonbetrieb

- Art der Energieversorgung (Eigen- oder Fremdversorgung)
- Lage des Betriebes
- Vorhandensein von innerbetrieblichen Wasserkreisläufen

Sichere Angaben über Abwasseranfall sind nur aufgrund von Messungen möglich. Literaturwerte sind mit großer Vorsicht zu betrachten. [24]

2.2.3 Eignung des gereinigten Industrieabwassers zur Versickerung

Bei den Mindestanforderungen an die Abwasserbeschaffenheit wird unterschieden zwischen gewöhnlichen Abwässern, die nur nach den allgemein anerkannten Regeln der Technik (a.a.R.T.) zu behandeln sind, und den Schmutzwässern, die gefährliche Stoffe enthalten und mit spezifischen Verfahren zu reinigen sind. Diese Abwässer sind nach genauer Analyse u.U. von der Behandlungsart "Versickerung" aufgrund ihrer Beschaffenheit auszuschließen.

Weiterhin sind Abwässer von einer Versickerung auszuschließen, die entsprechend der ATV-Richtlinie A 115 höhere Beschaffenheitswerte aufweisen. Das Kernstück des Arbeitsblattes A 115 ist ein Katalog von Parametern. Diese Richtwerte gelten bei der Einleitung in öffentliche Abwasseranlagen in der Regel als noch unbedenklich [3].

Eine Einteilung der Abwasserbeschaffenheit nach Industriebereichen ist in [4] enthalten zusammen mit Hinweisen auf Gefährdungen und Beeinträchtigungen durch bestimmte branchenübliche Stoffe auf Kanalarbeiter, Kanalisation, Kläranlagen und Vorfluter.

Ausnahme bezüglich der Behandlungsweise bei den industriellen Abwässern bildet das Kühlwasser. Dieses soll, soweit es keine schädlichen Stoffe enthält, möglichst einer Regenwasserkanalisation zugeführt oder unmittelbar in ein Gewässer eingeleitet werden.

Die meisten betrieblichen Abwässer (industrielle und gewerbliche Abwässer) scheiden für die Behandlungsart "Versickerung" aufgrund ihrer Beschaffenheit aus.

Zeigt betriebliches Abwasser nahezu die gleiche Charakteristik wie gereinigtes kommunales Abwasser, so kann es als schwach belastet bezeichnet werden und einer Versickerungsanlage zugeführt werden.

Grundsätzlich können keine Pauschalaussagen zur Behandlungsfähigkeit von betrieblichen Abwässern in einer Versickerungsanlage getroffen werden, da diese zu stark in Menge und Beschaffenheit schwanken. Genaue Untersuchungen des jeweiligen Betriebes sind unabdingbar.

3 Charakterisierung der natürlichen Bodenmatrix

3.1 Definition des Begriffs Bodens

Ein Boden ist Teil der belebten obersten Erdkruste; er ist nach unten durch festes oder lockeres Gestein, nach oben durch eine Vegetationsdecke bzw. die Atmosphäre begrenzt, während er zur Seite gleitend in benachbarte Böden übergeht.

Ein Boden besteht aus Mineralen unterschiedlicher Art und Größe sowie organischen Stoffen, dem Humus. Minerale und Humus sind in bestimmter Weise im Raum angeordnet und bilden ein Bodengefüge mit einem bestimmten Hohlraumsystem. Dieses besteht aus Poren unterschiedlicher Größe und Form, die mit Bodenlösung (Wasser mit gelösten Salzen) und Bodenluft gefüllt sind. Ein Boden weist Horizonte auf, die oben streuähnlich sind und nach unten gesteinsähnlicher werden.

Ein Boden ist ein Naturkörper, bei dem ein Gestein unter einem bestimmten Klima und einer bestimmten streuliefernden Vegetation durch bodenbildende Prozesse (Verwitterung, Mineralbildung, Zersetzung, Humufizierung, Gefügebildung, Verlagerung) umgewandelt wurde und wird. Ein Kulturboden entwickelt sich zudem unter dem Einfluß des Menschen.

Böden sind verschieden, weil sich ihre Eigenschaften mit der Zeit verändern und weil Gesteins-, Relief-, Klima- und Vegetationsunterschiede, bei Kulturböden auch Nutzungs- unterschiede, ihre Entwicklung beeinflussen.

Die Böden einer Landschaft sind miteinander durch Stofftransporte verknüpft, beeinflussen sich mithin in ihren Eigenschaften und bilden mit den anderen Bestandteilen der Landschaft ein gemeinsames Wirkungsgefüge (Ökosystem).

Böden dienen Organismen als Lebensraum. Pflanzen bieten als Wurzelraum Verankerung sowie Versorgung mit Wasser, Sauerstoff und Nährstoffen in ausgewogener Dosierung. Die Versorgung wird bestimmt durch Angebot und Widerstand. Angebot an Wasser, Sauerstoff und Nährstoffen im Wurzelraum ergibt sich aus Vorrat und Verfügbarkeit. Widerstände ergeben sich aus Durchwurzelbarkeit, der Leitfähigkeit des Wurzelraumes für Flüssigkeiten und Gase sowie als "physiologisch" wirksame Widerstände an der Wurzeloberfläche und in der Pflanze (z.B. Nährelementselektivität, Intensität des Saftstroms).

Böden wirken schließlich als Puffer gegenüber den verschiedensten Umwelteinflüssen. Sie filtern Schadstoffe ab und ermöglichen so die Bildung sauberen Grundwassers, werden dabei allerdings selbst belastet. [103]

3.2 Natürliche Bodenmatrix

3.2.1 Boden als Lebensraum für Mikroorganismen

In Böden leben zahlreiche Organismen. Für manche sind sie der alleinige Lebensraum (Biotop) und somit Ort der Nahrungsaufnahme, Vermehrung, Zufluchts- und Rückzugsgebiet bei Gefahr und ungünstigen Lebensbedingungen wie Kälte, Hitze, Trockenheit. Für andere

sind sie nur der Ort für einen oder mehrere der erwähnten Lebensvorgänge. Unterschiedliche Bodeneigenschaften bedingen eine große Vielfalt der Bodenlebewelt. Gleichzeitig beeinflussen die Organismen viele Bodeneigenschaften sowie Umwandlungs- und Verlagerungsprozesse und damit die Entwicklung von Böden.

Die Bodenlebewelt, das Edaphon, setzt sich aus Bodenflora und Bodenfauna zusammen. Die Lebensweise aller Bodenorganismen ist den besonderen Eigenschaften der Böden als Lebensraum angepaßt. Bodenleben ist außer in den toten Pflanzen- und Tierresten nur in den mit Wasser bzw. Luft gefüllten Bodenhohlräumen möglich. Deren Größe und Zahl und die zur Verfügung stehende Nahrung sowie die Wasser-, Luft- und Wärmeverhältnisse bestimmen das Organismenleben in Böden. [103] Diese optimalen Verhältnisse müssen auch bei Nutzung von Böden gewährleistet werden.

3.2.2 Boden als Filter, Puffer und Transformator

Bei der Versickerung werden Böden als Medium für die Aufnahme, Zwischenspeicherung und Weiterleitung des Regen- bzw. Abwassers in Anspruch genommen.

Stoffe, die als trockene oder nasse Deposition auf überbauten und versiegelten Flächen abgelagert sind, werden durch abfließendes Regenwasser in den Boden eingetragen. [92]

Der Boden ist in der Lage, suspendierte oder gelöste Stoffe zu filtern. Nach der Größe der Schadstoffpartikel lassen sich unterscheiden in:

• grobdisperse Suspensionen d > 100 nm

kolloiddisperse Suspensoide d = 1 - 100 nm und

• molekulardisperse, echte Lösungen.

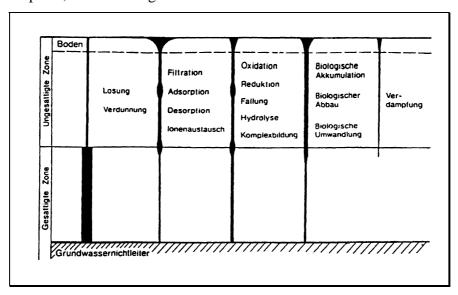


Bild 9 Intensität physikalischer, chemischer und biologischer Vorgänge in der belebten Bodenzone, der Grundwasserüberdeckung (ungesättigte Zone) und dem Grundwasserleiter (gesättigte Zone) (qualitative Darstellung) [5]

Die Reinigung während der Bodenpassage kann rein mechanisch im Porensystem, physikochemisch an den Oberflächen der feinsten Bodenbestandteile, chemisch durch Bildung kaum

wasserlöslicher Verbindungen und biologisch durch Abbau erfolgen. Die mechanische Rückhaltung wird als Filterung, die Adsorption an Bodenaustauscher und die chemische Fällung als Pufferung, eine Umwandlung oder ein Abbau als Transformation bezeichnet. Die Intensität der einzelnen Vorgänge ist unterschiedlich. Im wasserungesättigten Bereich herrschen vor allem Filtration, Sorption, Komplexbildung und mikrobieller Abbau vor. Im Grundwasserraum spielen dagegen vor allem Verdünnungsvorgänge eine bedeutende Rolle. [38]

3.3 Wichtige Eigenschaften von Böden

3.3.1 pH- Wert des Bodens

Die chemischen, physikalischen und biologischen Vorgänge im Boden werden in vielfältiger Weise durch den pH-Wert beeinflußt. Er wird oft zur Einteilung von Böden verwendet (s. Tabelle 16).

The one is a manual with pri (ewerz) were [100]					
Reaktionsbezeichnung	pH- Bereich	Reaktionsbezeichnung	pH- Bereich		
neutral	7,0				
schwach sauer	6,9 - 6,0	schwach alkalisch	7,1 - 8,0		
mäßig sauer	5,9 - 5,0	mäßig alkalisch	8,1 - 9,0		
stark sauer	4,9 - 4,0	stark alkalisch	9,1 - 10,0		
sehr stark sauer	3,9 - 3,0	sehr stark alkalisch	10,1 - 11,0		
extrem sauer	< 3,0	extrem alkalisch	> 11,0		

Tabelle 16 Einstufung der Böden nach dem pH (CaCl₂)-Wert [103]

Der pH-Wert ist innerhalb eines Bodenprofils nicht konstant. Die Produktion der meisten H⁺ Ionen erfolgt durch die mikrobielle Zersetzung der toten Biomasse. Dieser Vorgang verläuft vor allem im Oberboden. Weiterhin schreitet die Auswaschung austauschbarer Kationen im humiden Klimagebiet von oben nach unten fort. Daher sinkt in einem Bodenprofil der pH- Wert im allgemeinen zur Oberfläche hin ab. Der pH-Wert eines Bodens wird durch die Bodenacidität und die wirkenden Puffersysteme beeinflußt.

3.3.1.1 Bodenacidität

Die Gesamtacidität eines Bodens setzt sich aus den austauschbaren Al-Ionen, den Hydroxo-Al-Polymeren, den Al(OH)₂-Gruppen an den Seitenflächen von Tonmineralen und an amorphen Al-Silikaten sowie aus den sauren funktionellen Gruppen der organischen Substanz zusammen. Diese wird durch die Produktion von H-Ionen und entsprechendem Verlust an basisch wirkenden austauschbaren Kationen bedingt. Zu den austauschbaren Kationen gehören Ca-, Mg-, K-, Na-Ionen. Eine pH-Absenkung ist möglich, wenn die ausgetauschten Kationen aus der Bodenlösung entfernt werden und damit die Basensättigung abnimmt. H-Ionen der Bodenlösung bedingen die aktive Acidität, an Austauschern adsorbierte H- und Al-Ionen die potentielle Acidität, die erst nach dem Austausch der H- und Al-Ionen wirksam

wird. Al-Ionen gehören zur potentiellen Acidität, weil sie nach dem Austausch mit Wasser reagieren, wobei H-Ionen entstehen:

$$Al^{3+} + 3 H_2O \rightarrow Al(OH)_3 + 3 H^+$$

H-Ionen entstehen weiterhin durch die Bildung von Kohlensäure und organischen Säuren bei der mikrobiellen Oxidation von Biomasse, bei der Wurzelatmung, bei der Abgabe von H-Ionen durch die Wurzeln bei der Kationenaufnahme, durch Oxidation von löslichen Fe²⁺- und Mn²⁺- Ionen, durch Oxidation von Sulfiden, durch den Eintrag saurer Niederschläge und bei der Oxidation von NH₄ und NH₃ aus Düngern und aus der Atmosphäre.

3.3.1.2 Puffersysteme

In humiden Klimaten ist die Menge an H-Ionen in den Böden größer als diejenige, die von ihnen neutralisiert werden kann. Daher nimmt der pH-Wert allmählich ab; es kommt zur Versauerung. Das Ausmaß der Versauerungswirkung wird von der Pufferkapazität des Bodens bestimmt. Die Abpufferung erfolgt durch den Austausch von sauer wirkenden Ionen mit Basen, bis der Basenvorrat erschöpft ist. Die Pufferung kann dabei irreversibel erfolgen, wenn die basischen Kationen ausgewaschen werden, oder reversibel, wenn Säuren an die Bodenmatrix gebunden werden, die bei pH-Anstieg zu einer H⁺- Abgabe führen.

Bei [16] werden Puffersubstanzen, Pufferreaktionen, pH-Bereiche der Pufferung und bodenchemische Veränderungen von Böden aufgeführt.

3.3.1.3 Bodenversauerung

Bei kalkhaltigen Böden führt die Versauerung zur Lösung und Auswaschung der Carbonate. In kalkfreien Böden werden mit zunehmender Versauerung vor allem Na, K, Ca und Mg-Ionen durch Protonen desorbiert und ausgewaschen. Dadurch nimmt die Basensättigung des Bodens ab. Gleichzeitig sinkt der pH-Wert und zwar um so mehr, je niedriger die Basensättigung und damit die Pufferkapazität des Austauscher-Puffers war. Bei humusarmen, sorptionsschwachen Sandböden erfolgt dies sehr schnell. Austauscher mit variabler Ladung, vor allem Huminstoffe, verlieren mit zunehmender Protonierung die Fähigkeit, Metallionen zu adsorbieren. Weiterhin werden bei pH-Werten unter 4 vor allem quellfähige und damit gefügebildende Tonminerale hoher Sorptionskapazität verstärkt zerstört. Die dabei freigesetzten Al-Ionen nehmen infolge der hohen Eintauschstärke Bindungspositionen von Kationen geringerer Wertigkeit ein. Bei pH-Werten zwischen 3,5 und 4,5 wird ein Teil des Aluminiums in Form von Hydroxokomplexen in Zwischenschichten quellfähiger Tonminerale eingelagert. Dabei werden Chlorite gebildet (Tonminerale mit geringer Quellfähigkeit und Kationenaustauschkapazität), die jedoch gegenüber der weiteren Verwitterung vergleichsweise stabil sind. Bei einem pH-Wert unter 3,5 wird kein Chlorit mehr gebildet. Dagegen erfolgt eine verstärkte Tonmineralzerstörung. Unter extrem sauren Bedingungen wird Ferrihydrid aufgelöst, wobei es zur Freisetzung von Fe³⁺- Ionen kommt. Dabei erfolgt in starkem Maße die Mobilisierung möglicherweise an Eisenhydroxide gebundener Schwermetalle [16].

Die Versauerung bewirkt weiterhin Verschiebungen im Artenbestand der Bodenorganismen. Dabei treten die Bakterien und Actinomyceten zugunsten der Pilze bei abnehmendem pH-Wert der Bodenlösung zurück [16]. Bakterien, die die höchsten Abbauleistungen vollbringen, sind unterhalb eines pH-Wertes von 3,5 - 4 kaum noch aktiv [103].

3.3.2 Redoxpotentiale von Böden

Gut durchlüftete Böden mit viel im Bodenwasser gelöstem Sauerstoff, hohen Anteilen an oxidierten Verbindungen (Fe- und Mn- Oxide und -Hydroxide, Nitrate, Sulfate), d.h. in Böden ohne stagnierendes Grundwasser oder Stauwasser mit niederen Gehalten an leicht umsetzbarer organischer Substanz treten hohe positive Redoxpotentiale (bis + 0,8 V) auf. Unter anaeroben Bedingungen, hohen Anteilen reduzierter Verbindungen (Fe²⁺, Mn²⁺) und umsetzbarer organischer Substanz, d.h. in Stauund Grundwasserböden, Überflutungsböden, Anmooren und Mooren treten dagegen niedrige und zum Teil sogar negative (bis - 0,35 V) Werte auf. Die Redoxeigenschaften der Böden können sich jahreszeitlich sehr stark ändern. Potentialunterschiede von 0,1 - 0,8 V sind gemessen worden. Die niedrigsten Redoxpotentiale treten in niederschlagsreichen Perioden auf. Die Intensität der mikrobiell ausgelösten Redoxprozesse hängt vor allem vom Gehalt der organischen Substanz ab. Daher findet in humusreichen Ah-Horizonten bereits nach wenigen Stunden Wassersättigung eine starke Abnahme der Redoxpotentiale ab. Im Unterboden findet dagegen nach Wassersättigung nur eine langsame und insgesamt geringere Veränderung der Redoxbedingungen statt.

Mit abnehmenden Redoxpotentialen treten charakteristische pH- Wert Änderungen auf. In schwach bis mäßig sauren Böden steigen die pH- Werte mit zunehmender Reduktion bis zu neutraler Reaktion hin an, da für die Reduktion oxidierter Substanzen H- Ionen verbraucht werden. Im umgekehrten Fall führt die Oxidation reduzierter Stoffe zu einer pH-Erniedrigung. In alkalischen Böden findet durch mikrobielle Produktion von CO₂ und organischen Säuren unter reduzierenden Bedingungen in der Regel eine pH- Erniedrigung bis zu neutraler Reaktion statt. [103]

3.3.3 Bodenwasser

Das Wasser im Boden ist im Gegensatz zu Wasser in einem offenen Gewässer nur teilweise frei beweglich. Es unterliegt Bindungen durch die Eigenschaften der Bodenmatrix.

Das durch Niederschläge eingetragene Wasser wird zum Teil in den Poren entgegen der Schwerkraft festgehalten, zum Teil als Sickerwasser in tiefere Zonen verlagert. Das im Boden bereits vorhandene Wasser kann dabei durch das Sickerwasser verdrängt und selbst zum Sickerwasser werden. Das im Boden verbleibende Wasser wird als Haftwasser bezeichnet.

Grund- und Stauwasser:

Diese Anteile des Bodenwassers werden nicht durch Bindungen an der Bodenmatrix festgehalten und können daher in Gräben oder Bohrlöcher frei hineinfließen. Grund- und Stauwasserkörper bilden sich über Schichten mit geringer Wasserleitfähigkeit wie Ton.

Grundwasser ist das ganze Jahr über vorhanden, Stauwasser nur zu einem Teil des Jahres, meistens im Frühjahr.

Adsorptions- und Kapillarwasser:

Das Wasser kann entgegen dem Einfluß der Schwerkraft an die Bodenmatrix gebunden werden. Diese Bindung besteht aufgrund der Wirkung verschiedener Kräfte. Nach Art dieser Kräfte kann man das Wasser in Adsorptions- und Kapillarwasser einteilen.

-Adsorptionswasser:

Adsorptionswasser steht unter der Wirkung von Adsorptionskräften und osmotischen Kräften. Es umhüllt die feste Oberfläche der Bodenteilchen, ohne das Menisken gebildet werden. Adsorptionskräfte zwischen der Festsubstanz und den Wassermolekülen umfassen zum einen die nur über kurze Entfernungen wirkenden Van-der-Waalsschen-Kräfte und die H- Bindungen zwischen den Sauerstoffatomen der festen Oberfläche und den Wassermolekülen, zum anderen die über längere Entfernungen wirkenden Kräfte unter der Einwirkung des elektrostatischen Feldes vor allem der Gegenionen, in geringem Maße auch der geladenen festen Oberfläche. In diesem Fall werden die Wasserdipole ausgerichtet und angezogen. Die Bindung zwischen den adsorbierten Wassermolekülen erfolgt über Wasserstoffbrücken.

-Kapillarwasser:

Verursacht wird die Bildung von Kapillarwasser durch die Tendenz der Grenzfläche von Wasser und Luft, sich zu verkleinern, weil hierdurch aufgrund der hohen Grenzflächenspannung von Wasser gegenüber Luft ein energieärmerer Zustand erreicht wird. Die Bildung von Menisken beruht auf dem Zusammenwirken von Adhäsionskräften zwischen der festen Oberfläche und Wassermolekülen sowie mit Kohäsionskräften zwischen den Wassermolekülen unter Bildung von Wasserstoffbrücken. [103]

4 Darstellung der im Boden ablaufenden Prozesse

4.1 Transportprozesse

Für die in den Boden eingetragenen Schadstoffe unterscheidet man drei Ausbreitungsmechanismen:

- Transport mit dem Sickerwasser,
- eigenständige Bewegung in einer zweiten flüssigen Phase,
- diffuse Ausbreitung in der Gasphase.

Die eigenständige Bewegung in einer zweiten flüssigen Phase kommt nur vor, wenn ein flüssiger Schadstoff (z.B. bei Leckage an einem Ölbehälter) in größeren Mengen in den Boden gelangt. Bei dieser Form der Ausbreitung kann der Schadstoff sehr schnell bis in das Grundwasser transportiert werden. Dieser Fall ist allerdings für die Regenwasserversickerung nicht von Bedeutung.

Die diffuse Ausbreitung in der Gasphase ist bei Stoffen mit hohem Dampfdruck relevant. Auf diesem Weg kann es zu Verflüchtigungen organischer Substanzen aus dem Bodenraum kommen.

Der stärkste Ausbreitung von Schadstoffen erfolgt über den konvektiv-dispersiven Transport mit dem Sickerwasser. Auf diesem Weg gelangen die bei der Versickerung in den Boden eingetragenen Schadsubstanzen hauptsächlich in das Grundwasser. [41]

Konvektion ist die Strömung der Porenflüssigkeit und deren Inhaltsstoffe durch die Poren der Bodenmatrix aufgrund eines hydraulischen Potentials [27]. Beim konvektiv-dispersiven Transport ist die Konvektion dafür verantwortlich, daß sich der transportierte Stoff mit der gleichen Geschwindigkeit durch den Boden bewegt wie das transportierende Medium, ohne daß sich das Konzentrationsprofil verformt. Allerdings bewegen sich die einzelnen Stoffteilchen auf unterschiedlichen Wegen und mit verschiedenen Fließgeschwindigkeiten. Dieser Umstand sorgt für eine Aufweitung des Konzentrationsprofils und wird durch die Dispersion beschrieben. Konvektion und Dispersion sind abhängig von der Sickerwassermenge. [41]

Unter dem Einfluß der Diffusion wird ein Konzentrationsausgleich innerhalb einer Phase erreicht. Der Transport durch Diffusion ist vom hydraulischen Gefälle und der Wasserbewegung unabhängig. Infolge der Brown´schen Molekularbewegung gelangen dabei wassergelöste Stoffe von Orten höherer Konzentration zu Orten niedrigerer Konzentration. [5]

Das Ausmaß, in dem die Transportmechanismen die Stoffbewegung beeinflussen, hängt von der Sickerwasserströmung, den Bodeneigenschaften und den Stoffeigenschaften ab.

Die Konvektion ist wegen des vorherrschenden humiden Klimas, aufgrund dessen regelmäßig größere Mengen an Niederschlägen fallen und im Boden versickern, der vorherrschende Verlagerungsprozeß für alle straßenspezifischen Stoffe.

Im Verlauf der Konvektion bewirkt die Dispersion eine Verteilung und Vermischung der Sickerwasserinhaltsstoffe, so daß sich die Stoffkonzentrationen durch diesen "Verdünnungseffekt" verringern. Damit wirkt die Dispersion vor allem bei vorübergehenden Einflüssen, wie z.B. der Chloridbelastung bei der Tausalzstreuung, schützend in Hinblick auf eine Belastung des Grundwassers.

Die Stoffverlagerung infolge der Diffusion bedingt einen Konzentrationsgradienten. Daher spielt diese Art des Transportes an Straßen nur eine geringe Rolle, weil die Stoffe bereits im Fahrbahnabfluß nur in relativ geringen Konzentrationen vorliegen und durch versickerndes Niederschlagswasser noch verdünnt werden, wodurch auch die Konzentrationsgradienten gering sind. [5]

Geht der Stoff bei der Bewegung durch den Boden reversible Bindungen durch Sorptionsvorgänge mit Bodenbestandteilen ein, kann die Schadstofffront hinter der Wasserströmung zurückbleiben. Dieser Prozeß wird als Retardierung bezeichnet.

Möglich ist beim Transport weiterhin, daß die Schadstoffe durch Abbau, Umwandlung, irreversible Bindung an Bodenbestandteile und Verflüchtigung in der Gasphase, dem Sickerwasser entzogen werden. [41]

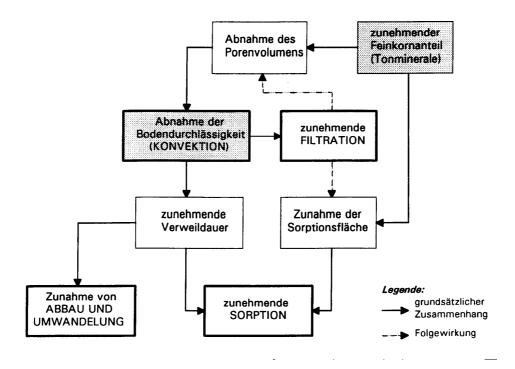


Bild 10 Schematische Darstellung der Verlagerungsprozesse unter besonderer Berücksichtigung der Bodenparameter Durchlässigkeit und Feinkornanteil [5]

4.1.1 <u>Transportverhalten ausgewählter Schwermetalle</u>

Für die von [74] durchgeführten Untersuchungen wurden die Festphasen Ouarz, Kaliumfeldspat, Natriumfeldspat, Kalk und ein mit Eisen/Mangan-Oxidhydrat überzogener Quarzsand eingesetzt. Als fluide Phase diente ein Modellwasser, das an einem Grundwasser aus dem Bereich Karlsruhe orientiert war. Die Untersuchungen wurden anhand von Säulenversuchen durchgeführt. In Bild 11 und Bild 12 werden die Durchbruchskurven der Säulen, die mit Kalk und Kaliumfeldspat gepackt waren, gezeigt. In der Kaliumfeldspat-Säule wird das Cadmium wesentlich schwächer gebunden als Blei und Kupfer. In der Kalksand-Säule wurde die umgekehrte Reihenfolge festgestellt. Außerdem erfolgt der Durchbruch der Metalle viel später. Dieses Ergebnis zeigt, daß die Art der Festphase des Grundwasserleiters das Transportverhalten der Metalle stark beeinflußt. Weiterhin ist zu erkennen, daß die Formen der Durchbruchskurven sehr unterschiedlich sind. Die Metalldurchbrüche am Kaliumfeldspat steigen zu Beginn sehr schnell an und flachen dann in ihrem weiteren Verlauf ab. Diese Form des Verlaufs ist typisch für einen diffusionskontrollierten Vorgang, da durch die zunehmende Beladung der Festphase das treibende Gefälle der Diffusion abnimmt. Die Durchbruchskurven am Kalk zeigen dagegen eine relativ konstante und für alle drei Metalle Verlaufs weist ähnliche Steigung. Diese Form des darauf geschwindigkeitsbestimmende Schritt der Festlegung nicht im Transport der Metalle zur Festphase hin liegt, sondern in der Bildung schwerlöslicher Verbindungen mit entsprechender Reaktionskinetik zu sehen ist. Für den Durchbruch der Schwermetalle an den verschiedenen Festphasen ergab sich mit der Ausnahme Quarz/Cadmium die folgende Reihenfolge steigender Sorptionskapazität:

Quarz < Kaliumfeldspat < Natriumfeldspat < Kalk < amorphes Eisen/Mangan-Oxidhydrat.

Die Schwermetalladsorption an den beiden Feldspäten läßt sich auf die spezifischen Kationenaustauschkapazitäten zurückführen. Natriumfeldspat kann mehr Ladungsäquivalente freisetzen und austauschen als Kaliumfeldspat. Weiterhin läßt sich ein großer Anteil der freisetzbaren Ladungsäquivalente auf austauschbares Kalzium zurückführen Kaliumfeldspat 33 %, für Natriumfeldspat 56 %). Aufgrund der sehr großen inneren Oberflächen der Eisen/Mangan-Oxihydrate wurden dort für die Schwermetalle die höchsten Beladungen erreicht. Die niedrigen Beladungen des Quarzes lassen sich darauf zurückführen, daß Quarz weder austauschbare Kationen noch eine innere Oberfläche besitzt. Die hohen Beladungen am Kalk entstehen durch die Festlegung von Schwermetallen an der Kalkoberfläche und sowie im Mineral. Mit diesen Versuchen konnte gezeigt werden, daß die Mineralphasen des Aquifers das Durchbruchsverhalten von Metallen spezifisch beeinflussen.

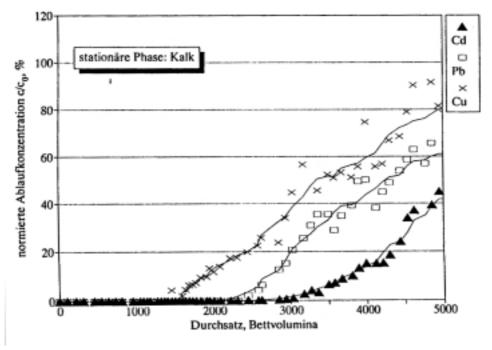


Bild 11 Durchbruchskurven für in eine Kalk-Säule eingebrachten Metalle Cd, Pb, Cu [74]

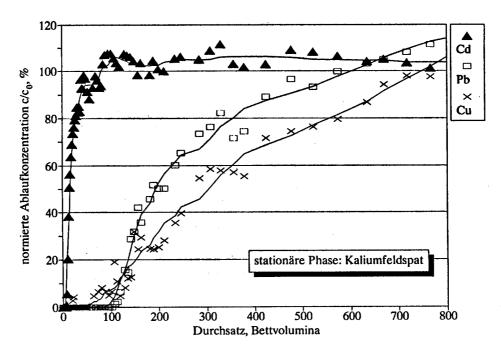


Bild 12 Durchbruchskurven für in eine Kaliumfeldspat-Säule eingebrachten Metalle Cd, Pb, Cu [74]

4.2 Abbauvorgänge und Speicherprozesse

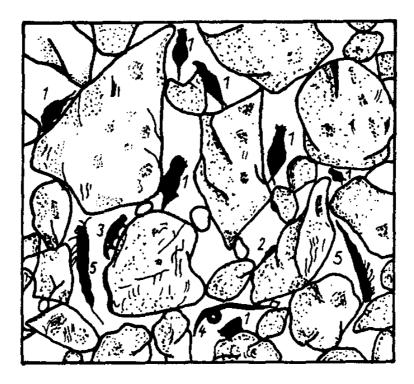
4.2.1 Filterung

Bei der Filtration werden ungelöste Stoffe im Boden zurückgehalten. Das Ausmaß der Filtration ist abhängig von der Porosität des Bodens und der Wasserbewegung im Untergrund. Gegenüber grobdispersen Stoffen wirkt der Boden als Oberflächenfilter und als Tiefenfilter. Beim Oberflächenfilter wird der eingetragene Stoff ohne Eindringen in den Porenraum des Bodens an der Oberfläche angesammelt. Dabei bildet sich ein Filterkuchen, der selbst wieder zum Filter wird und so die Filterwirkung verstärkt. Allerdings nimmt parallel dazu die Wasserleitfähigkeit und damit die Sickerrate ab. Bei Austrocknung des Kuchens bilden sich Trockenspalten, in denen das Wasser später rasch versickern kann. Beide Vorgänge sind unerwünscht, daher muß der Filterkuchen regelmäßig entfernt werden. Bei natürlichen, bewachsenen Böden kommt es meist zu keiner Anhäufung an der Bodenoberfläche, da wühlende Bodentiere einmischen und neue Grobporen schaffen, die der Wasserbewegung dienen.

Die hauptsächliche Abfilterung grobdisperser Stoffe erfolgt im Boden selbst, der Boden wirkt als Tiefenfilter. In den groben Poren werden Partikel mit dem Sickerwasser abwärts verlagert. In kleineren Poren dagegen mechanisch abgefiltert. Dabei kommt es neben dem Zurückhalten von Teilchen (innere Kolmation) auch zum Losreißen von Teilchen (innere Suffusion). Dieser Wechselwirkungsprozeß strebt einem Gleichgewicht zu [16]. Typisch für den Vorgang der inneren Kolmation ist es, daß sich zunächst gröbere Teilchen in den Porenkanälen verklemmen und so diese Engstellen weiter vermindern. Dadurch können nachfolgend immer feinere Teilchen zurückgehalten werden. Allerdings wird bei diesem Vorgang das Filtermedium rückschreitend, d.h. entgegen der Strömungsrichtung, verstopft. Der Prozeß wird als Selbstabdichtung bezeichnet. Tiere, wie z.B. Rädertierchen und Ziliaten (s. Bild 13) nutzen das abgefilterte Material als Nahrung und reinigen dadurch die Porenkanäle, so daß die Filterleistung des Bodens erhalten bleibt [89]. Bevor Stoffe ausgefiltert werden können, müssen sie zunächst in unmittelbare Nähe zu den Bodenkörnern, an denen die Anlagerung erfolgt, transportiert werden. In der ungesättigten Bodenzone verläuft Sickerwasserströmung vorwiegend in dünnen Schichten über das Bodenkorn. Durch Strömungsverhältnisse den Kornberührungspunkten, an Stofftransport zur Kornoberfläche begünstigt. Daher können auch Partikel mit einer Größe < 0,2 µm in feinkörnigen Böden ausgefiltert werden. Im wassergesättigten Bereich dagegen findet der Stofftransport zur Kornoberfläche nur sehr langsam statt. Das führt zu einer geringeren Filterwirkung als in der ungesättigten Zone. [41]

Die Filterung grobdisperser Stoffe kann nur in ausreichend groben Hohlräumen erfolgen, die aber gleichzeitig klein genug sein müssen, um eine Remobilisierung zu vermeiden. Günstig ist daher ein möglichst hoher Anteil der Poren zwischen 1 und 100 μ m Durchmesser. Ein Hohlraumvolumen mit einem Anteil der genannten Poren von über 40 % ist als äußerst filterwirksam anzusehen. Werte unter 10 % haben dagegen eine extrem niedrige Filterleistung zur Folge. Tabelle 17 zeigt die Bewertung der Filterfähigkeit von Böden in Abhängigkeit des Anteils der Poren zwischen 1 und 100 μ m. Der Porenanteil wurde anhand der Beziehung nFK + 1/3 LK geschätzt [16]. Darin bedeuten nFK die nutzbare Feldkapazität und LK die

Luftkapazität im Boden. In [22] werden für verschiedene Bodenarten die Luftkapazität und die nutzbare Feldkapazität sowie die von der organischen Substanz abhängigen Zuschläge angegeben.



- 1 Rädertierchen (Rotatorien)
- 2 große Ziliaten
- 3 Bärtierchen (Tardigraden)
- 4 Fadenwürmer (Nematoden)
- 5 Ruderfußkrebs (Harpacticiden)

Bild 13 Schnitt durch die belebte Boden- bzw. Grundwasserzone mit der Darstellung von Bakterien (Punkte auf den Feststoffteilchen) und tierischen Kleinorganismen [89]

Für eine gute Filtration sind lockere, humose, lehmig bis schluffig sandige Böden am besten geeignet. In dichten, tonreichen Böden verstopft der Filter durch die langsame Wasserbewegung sehr schnell, in grobkörnigen Böden werden die Stoffe nur unzureichend zurückgehalten [112].

Tabelle 17 Bewertung der Filterleistung (Filterung grobdisperser Stoffe d > 0,1 μm) von Böden [16]

Bewertung				sehr gering	gering	mittel	hoch	sehr hoch	äußerst hoch
nFK	+	1/3	LK	< 15	15 - 20	20 - 25	25 - 30	30 - 40	> 40
(Vol.	%)								

4.2.2 Kolmationseffekte

Unter Siebwirkung wird im Folgenden das mechanische Festhalten eines Teilchens in einer Porenverengung aufgrund der Teilchengröße verstanden. Zusätzlich können physikalische und chemische Bindungskräfte mitwirken. Bei erheblichen Größenunterschieden ist Unterteilung in absiebbare und nicht absiebbare Stoffe relativ einfach möglich.

[87] beschreibt zum Beispiel die Konzentration abgesiebter Teilchen in den oberen Schichten von Sandfiltern durch zwei Exponentialfunktionen. Durch das Anlagern eines Teilchens in einer Porenverengung wird die Porengrößenverteilung verändert, was über verringerte Durchgangswahrscheinlichkeiten zu einer Erhöhung der Wirksamkeit der oberen Siebebenen führt. Auf der obersten Siebebene kann auch ein Filterkuchen als Sekundärfilter abgeschieden werden. Insbesondere aus der Beobachtung der Filterhydraulik leitete [87] zwei Phasen ab:

- 1. Die *Invasionsphase*, bei der die oberen Siebebenen bis zur merklichen Veränderung ihres Siebverhaltens mit abgesiebten Stoffen beladen werden.
- 2. Die *Kolmationsphase*, bei der die beladene Schicht als Sekundärfilter auf den oberen Siebebenen wächst.

Tabelle 18	Symbole und Einheiten zur Beschreibung der Invasions- und Kolmationsphase
1 abelie 16	Symbole and Emilenen zur Deschiebung der mydsions- und Konnationsphase

Größe	Einh.	Bedeutung
f_L, f_o	1	Korrekturfaktoren für Porenlänge und Kornform
n_P	1	Spezifisches Porenvolumen des Sandes
Н	m	Durchgeflossene Wassermenge, auf die Fläche bezogen
H_K	m	Kolmationspunkt
L	m	Schichtlänge
$v_{\rm f}$	m/d	Filtergeschwindigkeit
$d_{\rm w}$	mm	Wirksamer Korndurchmesser des Filtermaterials
γ	h/mm	Kolmationsbeiwert
g	m/s²	Erdbeschleunigung
ν , ν_T		Kinematische Viskosität (bei der Temperatur T)

Der Filterwiderstand h_f unverschmutzter Sandfilter berechnet sich unter Zugrundelegung laminarer Strömungsverhältnisse nach [90]:

$$h_f = 72 \cdot \frac{v}{g} \cdot \frac{f_L^2}{f_O^2} \cdot \frac{(1 - n_P)^2}{n_P^3} \cdot \frac{v_f \cdot L}{d_W^2}$$

Unter Berücksichtigung der dynamischen Viskosität bei 10°C und der Erdbeschleunigung ergibt sich:

$$h_{\rm f} = 2,65 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{mm^2 \cdot m}{m \cdot m / h} \cdot \frac{v_{\rm T}}{v_{\rm 10^{\circ}C}} \cdot \frac{f_{\rm L}^2}{f_{\rm O}^2} \cdot \frac{(1 - n_{\rm p})^2}{n_{\rm p}^3} \cdot \frac{v_{\rm f} \cdot L}{d_{\rm W}^2}$$

Die Viskositätsunterschiede zu abweichenden Temperaturen sind zu berücksichtigen. Die durchgeflossene Wassermenge berechnet sich aus dem Integral der Filtergeschwindigkeit nach der Zeit:

$$H(t) = \int_{0}^{t} v_{f} \cdot dt$$

Im einfachsten Fall bei konstanter Filtergeschwindigkeit gilt:

$$H(t) = v_f \cdot t$$

Während der Invasionsphase werden hauptsächlich die obersten Siebebenen verstopft. Mit dem Verstopfen eines Porenkanals wird dieser bis auf einen geringen Rest nicht mehr durchströmt; eine zweimalige Verstopfung eines Kanals ist in der Anfangsphase sehr unwahrscheinlich. Die zunehmende Ablagerung von abgesiebten Stoffen ähnelt der Reduzierung des freien Strömungsquerschnittes.

Unter laminaren Strömungsverhältnissen und konstantem Druckverlust (Filterwiderstand) sollte die Filtergeschwindigkeit mit zunehmender Verschmutzung abnehmen, was experimentell bestätigt wurde [107].

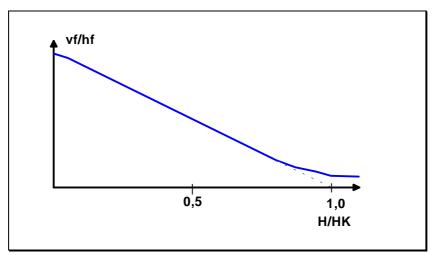


Bild 14 Hydraulik der Invasionsphase

Die stetige Abnahme des Strömungsquerschnittes entspricht auch dem linearen Abnehmen des Quotienten v_F/h_F in Abhängigkeit der durchflossenen Wassermenge H mit einer bestimmten Konzentration verstopfender Partikel.

Die theoretische vollständige Verstopfung ($H = H_K$) ist nicht möglich. Bei einer mehr als 80%-igen Einengung des Strömungsquerschnittes geht die Invasionsphase in die Kolmationsphase über. In dieser Phase steigt bei konstanter Filtergeschwindigkeit v_f der Filterwiderstand linear an, im Gegensatz zu Modellen mit exponentiellen Anstieg. [17] [117]

Die zugehörigen Bemessungsgleichungen werden in [31] vorgeschlagen und bereits in [105] angewendet.

Aus der Überlegung, daß bei $H=H_K$ der gesamte Strömungsquerschnitt theoretisch mit abgesiebten Stoffen belegt ist, kann man eine Konzentration absiebbarer Partikel definieren. Diese Größe charakterisiert die Konzentration verstopfender Querschnittsfläche in der Suspension.

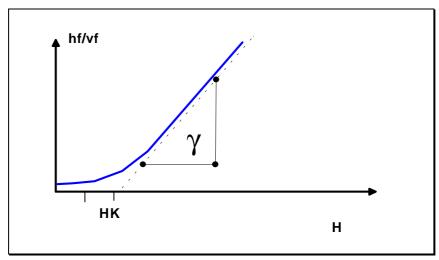


Bild 15 Hydraulik der Kolmationsphase

Die Konzentration querschnittsverstopfender Teilchen ist natürlich von dem jeweiligen Siebdurchmesser abhängig. Aus einer Reihe von Versuchen läßt sich eine "Siebkurve" als Verteilungsfunktion konstruieren.

Verwendet man zur Bestimmung des Kolmationspunktes H_K die Filteranordnung nach [87] mit der man das Ablauf-Zeit-Verhalten bei konstantem Überstau (= Schichtlänge) bestimmt, kann die für die Suspensionsfiltration charakteristische Eindringtiefe aus dem Filterwiderstands-Schichtlänge-Verhalten abgelesen werden.

Die die Kolmation beschreibenden Größen sind allgemein nicht aus der Konzentration der abfiltrierbaren Stoffe oder der Trübung berechenbar. Die objektspezifischen Zusammenhänge zwischen der Beschaffenheit des zu infiltrierenden Wassers und der Kolmationsentwicklung sind durch Versuche aufzuklären. Aus zuverlässigen Wertepaaren (h_f/v_f , H) von Siebprozessen können prinzipiell über graphische oder numerische Auswertungsverfahren die den Siebprozeß beschreibenden Größen ermittelt werde. Das eigentliche Problem besteht darin, diese Daten mit möglichst geringem Aufwand und hoher Repräsentanz zu gewinnen. Häufig ist eine kombinierte Vorgehensweise von Vorteil.

- 1. Auswertung vorhandener Anlagen, die dieses Rohwasser aufbereiten.
- 2. Häufige Durchführung von Vor-Ort-Tests über eine längere Zeitspanne und statistische Bearbeitung des gewonnenen Datenmaterials.
- 3. Durchführung von kleintechnischen Versuchen oder Betrieb von Pilotanlagen mit der während der Versuchszeit angetroffenen Rohwasserqualität.

Durch die längerfristig angelegten Tests ist eine statistische Bewertung der aufwendigen Versuche möglich, bei denen nicht alle möglichen Rohwasserzustände erfaßt wurden. Aus dem Filtertest nach [117], der von einem exponentiellen Filterwiderstandsanstieg ausgeht, wurde von [106] der Schnelltest nach Bild 16 für vorgegebene Maschenweiten und Körnungen zur Ermittlung des Kolmationspunktes H_K entwickelt.. Der Test ist häufig und gegenüber kleintechnischen Versuchen mit geringem Aufwand durchführbar. Der Kolmationsbeiwert γ kann nicht mit erforderlicher Genauigkeit bestimmt werden und muß nach Erfahrung geschätzt werden.

Die Apparatur besteht aus einem kalibrierten durchsichtigen 1"-Kunststoffrohr, einer Verschraubung mit Ablauf zum einspannen der Prüfsiebe oder des Testfilters und diversem Zubehör.

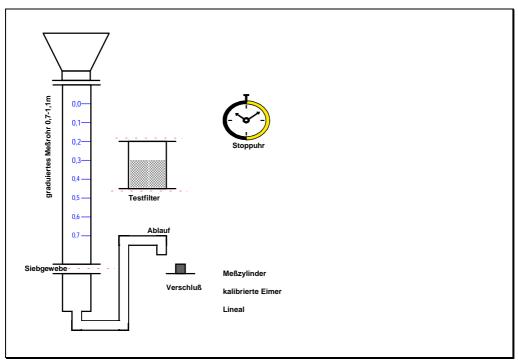


Bild 16 Anordnung zum Sieb/Filtertest [106]

Mit dieser Apparatur kann das Filterwiderstands-Durchflußmengen-Verhalten in einem sehr breiten Bereich bestimmt werden. Für diese eignen sich Prüfsiebgewebe mit 0,05 bis 1,0 mm Maschenweite oder Glasfaserpapier. Die Siebe können über den gesamten Rohrquerschnitt oder mit einer Maske (bis 5mm Durchmesser) angeordnet werden. Dadurch kann der Versuchsablauf entscheidend verkürzt werden.

4.2.3 Sorption

Unter Sorption werden alle Reaktionen gelöster Stoffe mit der Oberfläche der festen Phase verstanden. Man unterscheidet Adsorption (Stoffbewegung von der Lösung zur Festphase) und Desorption (Stoffbewegung von der Festphase zur Lösung) [41]. Adsorbiert werden anorganische und organische Kationen, Anionen und neutrale Moleküle [16]. Je stärker die Schadstoffe adsorbiert werden, desto weniger werden sie im Bodenprofil verlagert. [2]

Die Sorption ist der wichtigste Prozeß bei der Immobilisierung von Schwermetallen und organischen Schadstoffen im Boden. Als Sorbenten fungieren:

- Tonminerale
- Sesquioxide (= Fe-, Al- und Mn-Oxide)
- organische Substanz.

Je höher die Gehalte der Sorbenten im Boden sind, umso bessere Pufferungseigenschaften besitzt der Boden [16]. In Tabelle 19 ist das Adsorptionsvermögen verschiedener Bodenarten angegeben.

Bodenart

- Grobsand, Kies

- Feinsand, Mittelsand

- Sandige Schluffe, schwach lehmige, schluffige und tonige Sande, Hoch- und Niedermoortorfe

- Tonige und lehmige Schluffe, mittel und stark lehmige Sande

- Tone

Adsorption

sehr gering

mittel

mittel

groß

sehr groß

Tabelle 19 Adsorptionsvermögen verschiedener Böden [37]

Nach der Art und Intensität der Bindung von Stoffen an der Festphase wird zwischen physikalischer und chemischer Sorption unterschieden. [41]

Physikalische Sorption:

Bei der physikalischen Sorption werden Ionen an Grenzflächenschichten aufgrund hoher molekularer Wechselwirkungen angelagert. Da die wirkenden Kräfte (Coulomb'sche und van der Waals'sche Kräfte) relativ schwach sind, sind diese Sorptionsvorgänge im allgemeinen stark reversibel. [112]

Chemische Sorption- Ionenaustausch:

Dieser Vorgang ist durch wesentlich höhere Bindungsenergien gekennzeichnet. Der chemischen Sorption liegen Ionen- und Ligandenaustausch- Prozesse zugrunde. [41] Beim Ionenaustausch findet die Adsorption eines Kations oder Anions durch Desorption eines sorbierten Kations oder Anions statt. Der Austausch erfolgt in äquivalenten Mengen.

Die Ionenaustauschkapazität (Kationenaustauschkapazität KAK, Anionenaustauschkapazität AAK) ist die Stoffmenge aller Ionen, die das Adsorbens als Adsorbat zu binden vermag. Sie wird in mmol_c / kg oder cmol_c/ kg angegeben. [16]

Unterschieden wird weiterhin zwischen der unspezifischen Adsorption, bei der alle Kationen oder Anionen um die vorhandenen Austauschplätze konkurrieren, und der spezifischen Adsorption, bei der diese Konkurrenz (weitgehend) nicht vorhanden ist. [16]

4.2.3.1 Einfluß der Oberflächenladung für den Ionenaustausch

Die Bindung von Ionen an eine Oberfläche erfordert eine dem Ion entgegengesetzte Ladung, die sogenannte Oberflächenladung. Die Ladung erzeugt ein elektrisches Feld, in welches die Ionen hineingezogen werden. Ladungen könne auf verschiedene Weise entstehen:

- 1. durch isomorphen Ersatz der Kristallstruktur des Sorbenten
- 2. durch Abdissoziation von H⁺- Ionen von OH- und OH₂- Gruppen der Oberfläche des Sorbenten.

Der isomorphe Ersatz von höherwertigen durch niederwertige Kationen in den Silicatschichten der Tonminerale bedingt eine negative Schichtladung. Die Schichtladung ist vom pH-Wert unabhängig, sie wird als permanent bezeichnet.

Die zweite Art der Ladung entsteht, wenn die Protonen funktioneller Gruppen mit steigendem pH zunehmend dissoziieren. Die funktionellen Gruppen beteiligen sich am Kationenaustausch um so eher, je leichter das H-Ion abdissoziiert werden kann, d.h. je höher ihre Säurestärke ist. Mit steigendem pH werden deshalb zunehmend schwächer saure Gruppen am Kationenaustausch teilnehmen. Daher steigt die Kationenaustauschkapazität auch mit steigendem pH-Wert an. Funktionelle Gruppen sind SiOH, AlOH, AlOH, AlOH, FeOH, FeOH)₂ und COH. Die Ladung der funktionellen Gruppen wird als variabel bezeichnet, da sie pH-Wert abhängig ist. Während die funktionellen Gruppen AlOH und FeOH bei höherem pH-Wert ein Proton abspalten, lagern sie bei tieferen pH-Werten ein zusätzliches Proton an und werden dadurch positiv geladen. Zum Ausgleich dieser Ladung kann dann ein Anion adsorbiert werden. Die Kationensorption steigt also mit zunehmendem pH an, die Anionensorption mit sinkendem pH- Wert. Je nach Art und Zahl der Gruppen können manche Austauscher bei einem gegebenen pH- Wert negativ und positiv geladene Gruppen haben. Der Punkt, bei dem die Zahl der negativ geladenen Gruppen gleich der positiv geladenen Gruppen ist, heißt Ladungsnullpunkt. In ihm sind die Nettoladung und das elektrische Potential der Oberfläche gleich Null, der Austauscher hat in diesem Zustand minimale chemische Aktivität (z.B. Löslichkeit) und daher maximale Stabilität.

4.2.3.2 Qualitative Beschreibung des Sorptionsprozesses

Der Zusammenhang zwischen Ausgangskonzentration des jeweiligen Schadstoffes und der Adsorption wird durch Adsorptionsisothermen nach FREUNDLICH und LANGMUIR dargestellt. Beide sagen aus, daß die sorbierte Menge mit steigender Konzentration des Sorbats in der Gleichgewichtslösung degressiv wächst, die relative Sorption also abnimmt. Der Grund dafür ist, daß sich die Oberfläche mehr und mehr absättigt und dadurch die weitere Sorption erschwert wird.

Gleichung nach FREUNDLICH: $x / m = k \cdot c^{1/n}$

Gleichung nach LANGMUIR: $x / m = k \cdot b \cdot c / (1 + k \cdot c)$

x / m ist dabei die pro Gewichtseinheit des Adsorbens adsorbierte Stoffmenge bei der Gleichgewichtskonzentration in der Bodenlösung, b und c charakterisieren die maximalen Mengen von Ionen, die von einem bestimmten Adsorbat gebunden werden können, k und n sind Konstanten. Die LANGMUIR- Isotherme enthält also im Gegensatz zu der nach FREUNDLICH einen errechenbaren Wert für ein Adsorptionsmaximum. [103]

4.2.3.3 Ursachen und Ausmaß der Kationensorption

Die Kationenaustauschkapazität (KAK) stellt die Menge der austauschbar gebundenen Kationen (vor allem Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺, Na⁺, NH₄⁺, H⁺, Al³⁺) eines Bodens dar. Art und Mengenanteile der Tonminerale und der organischen Substanz bedingen im wesentlichen die KAK eines Bodens. [22]

Als potentielle KAK wird nach [103] die KAK bei pH 7 - 7,5 und nach [22] die KAK bei pH 8,2 bezeichnet. Dies ist der maximale pH- Wert, den Böden humider Klimate aufgrund der Anwesenheit von CaCO₃ erreichen. Die KAK beim jeweiligen pH-Wert wird als effektive Kationenaustauschkapazität bezeichnet. Sie ist in carbonathaltigen Böden identisch mit der potentiellen KAK, in sauren Böden kleiner als die potentielle KAK. [103]

Spezifische Oberfläche:

Als spezifische Oberfläche der festen Bodenbestandteile wird die Summe aller Grenzflächen fest- flüssig und fest- gasförmig bezeichnet. Die aufweitbaren Tonminerale (Smectit und Vermiculit) haben neben ihrer äußeren auch eine innere Oberfläche. Diese befindet sich zwischen den Silicatschichten der Tonmineralkristalle. Alle anderen Bodenminerale haben nur eine äußere Oberfläche. Ihre Größe ist von der Größe der Bodenteilchen abhängig. Die spezifische Oberfläche und die KAK_{pot} wichtiger Bodenaustauscher sind in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20 Potentielle Kationenaustauschkapazität in Abhängigkeit der spezifischen Oberfläche wichtiger Bodenaustauscher [103]

Bodenaustauscher	spezifische Oberfläche	potentielle Kationenaustauschkapazität
	m²/g	cmol _c / kg
Kaolinite und Halloysite	10 - 150	3 - 15
Illite	50 - 200	20 - 50
Vermiculite	600 - 700	150 – 200
Smectite	600 - 800	7 – 130
Allophane	700 – 1.100	10 - 50
Huminstoffe	800 – 1.000	18 - 30

Organische Substanz:

Huminstoffe sind durch die Dissoziation von Protonen an Carboxyl, phenolischen OH- und Enolgruppen zur Kationenadsorption fähig. Diese Ladung ist stets variabel. Die Säurestärke sinkt in der angegebenen Reihenfolge. Daher sind die Carboxylgruppen an der Kationenaustauschkapazität der organischen Substanz von Böden am stärksten beteiligt. Die KAK_{pot} gut zersetzter organischer Substanz liegt meist im Bereich von 1,8 - 3 mmol_c/ kg. Noch höher ist die KAK_{pot} isolierter Huminstofffraktionen. Bei Fulvosäuren liegt sie mit 5 - 7,5 mmol_c/ kg höher als bei Huminsäuren mit 3 - 5 mmol_c/ kg.

Tonminerale:

Die silikatischen Tonminerale haben sehr unterschiedliche Ladungsverhältnisse. Bei den Schichtsilikaten herrscht die permanente Ladung vor. Ihre Nettoladung ist im gesamten pH-Bereich der Böden negativ und unterhalb pH 5 konstant.

Neben der permanenten Ladung treten bei Tonmineralen an den Seitenflächen variable Ladungen auf, die durch Dissoziation der Protonen von SiOH-, AlOH- und Al(OH)₂-Gruppen entstehen. Diese Gruppen entstehen dadurch, das die Zentralatome Si, Al u.a. nach außen hin ihre Ligandenhülle entsprechend ihrer Koordinationszahl (4 bei Si, 4 und 6 bei Al) mit OH- und (OH)₂-Gruppen auffüllen. Die O- Ionen werden dabei durch das Zentralkation polarisiert, die Protonen gelockert. Daher können diese leichter abdissoziieren. Allerdings ist die Dissoziationsfähigkeit und damit die Säurestärke dieser Gruppen nur sehr gering, so daß sie nur sehr wenig und erst oberhalb pH 5 - 7 zur Kationenaustauschkapazität beitragen.

In der Tonfraktion der Böden treten fast immer Gemenge von Mineralen mit unterschiedlicher KAK auf. In den Böden der gemäßigten Klimazone überwiegen meist illitische Tonminerale mit einer mittleren KAK von 45 cmol_c/ kg Ton. [22]

Sesquioxide:

Die Sesquioxide besitzen ausschließlich variable Ladungen. Das bedeutet, daß sie zum Kationenaustausch nur durch Protonendissoziation von M-OH, M-(OH)₂-Gruppen beitragen. Auch hier werden, wie bei den Tonmineralen, zur Vervollständigung der Koordination OH-und (OH)₂-Gruppen angelagert. Der Ladungsnullpunkt liegt für Si- bei pH 2 ... 3,5 und für Mn- Oxide bei pH 3 ... 5. Der Ladungsnullpunkt der Fe- und Al- Oxide dagegen liegt mit pH 7 ... 10 sehr viel höher. [103]

4.2.3.4 Die Ableitung der Kationenaustauschkapazität aus der Bodenart und dem Humusgehalt

Ableitung der potentiellen KAK aus der Bodenart:

Die KAK des humusfreien Mineralbodens läßt sich näherungsweise aus der Bodenart ableiten. Die Angaben in Tabelle 21 gelten für die in Mitteleuropa vorherrschenden Böden mit illitreichem Tonmineralbestand. Die Berechnung erfolgt nach der Gleichung:

$$KAK_{pot} = 0.5 \cdot Tongehalt + 0.05 \cdot Schluffgehalt.$$

Für Böden mit einem anderen Tonmineralbestand muß eine Korrektur vorgenommen werden. [22] Bei kaolinitreichen Böden werden die Werte mit 0,3, bei smectitreichen Böden mit 2,5 multipliziert. [103]

Tabelle 21 Orientierungswerte der Kationenaustauschkapazität in mmol_c/kg Boden der Bodenarten, berechnet aus ihrem mittleren Ton- und Schluffgehalt [22]

KAK _{pot}	Bodenart
20	G, Ss, Su2
40	Su3, Su4, Sl2
50	Us
60	St2, S13, Uu
90	Slu, Sl4, Ut2, Uls
110	Ut3, St3
120	Ls3, Ls4
130	Ls2
140	Ut4
150	Lu, Ts4

KAK _{pot}	Bodenart
170	Lt2
180	Tu4
190	Lts
200	Ts3
210	Tu3
220	Lt3
280	Ts2
290	Tl, Tu2
390	Т

Ableitung der potentiellen KAK von Mineralböden aus dem Humusgehalt:

Die Berechnungsgrundlage für die Ableitung der KAK aus dem Humusgehalt beruht auf der folgenden Gleichung:

KAK_{pot} je Masse% Humus = 2 cmol_c/ kg.

In Tabelle 22 wird die Beziehung zwischen dem Humusgehalt und der potentiellen KAK dargestellt.

Tabelle 22 Beziehung zwischen KAK_{pot} (cmol_c/ kg) und dem Humusgehalt [22]

Bezeichnung Humusgehalt [Kurzzeichen]	h1	h2	h3	h4	h5	h6
Humus [Masse-%]	< 1	1 - 2	2 - 4	4 - 8	8 – 15	15 - 30
KAK _{pot} [cmol _c /kg]	0	3	7	15	25	50

Damit ergibt sich die potentielle Kationenaustauschkapazität für Mineralböden aus der Summe der KAK_{pot} der Bodenart und der KAK_{pot} des Humusanteils.

Ableitung der effektiven Kationenaustauschkapazität:

Die effektive KAK des Humusanteils eines Mineralbodens ergibt sich durch Multiplikation der KAK_{pot} mit einem pH- Wert abhängigen Faktor (Tabelle 23).

Die KAK_{eff} der Bodenart ist außer bei allophanhaltigen Böden aus vulkanischen Tuffen weitgehend identisch mit der KAK_{pot} der Bodenart. Daher ergibt sich die KAK_{eff} eines Bodens aus der Summe der KAK_{pot} der Bodenart und der KAK_{eff} des Humusanteils. [22]

Tabelle 23 Ableitung der KAK_{eff} des Humusanteils aus der KAK_{pot} in Abhängigkeit des pH- Wertes [22]

pH- Wert (CaCl ₂)	> 7,5	7,5 - 6,5	6,5 - 5,5	5,5 - 4,5	4,5 3,5	< 3,5
Umrechnungsfaktor	1	0,8	0,6	0,4	0,25	0,15

Die KAK_{eff} liegt um so mehr unterhalb der KAK_{pot} , je tiefer der pH- Wert und je höher die Anteile variabler Ladungen sind. Der Unterschied ist besonders bei sauren, humosen Sandböden und bei allophanreichen Böden groß. Erhöht sich der pH- Wert saurer Böden, steigen je nach dem Anteil variabler Ladung die KAK_{eff} und damit die Menge austauschbarer Kationen an.

Die KAK variiert nicht nur von Boden zu Boden sondern auch innerhalb eines Bodenprofils. Dies hängt sehr oft eng mit der Bodenentwicklung zusammen. Die Bildung von Tonmineralen und Humus ist die Ursache dafür, daß ein Boden meist eine höhere KAK aufweist als sein Ausgangsmaterial. Höhere KAK- Werte in den Ah- Horizonten sind auf einen höheren Gehalt an Huminstoffen zurückzuführen. Die KAK kann aber auch abnehmen, z.B. wenn aufweitbare Dreischichtminerale Hydroxy-Al-Polymere zwischen den Schichten einlagern, Dreischichtminerale zu Zweischichtmineralen desilifizieren und Tonminerale sich im stark sauren Bereich zersetzen.

Zusammenhang zwischen KAK und Basensättigung:

Ähnlich wie die KAK verhält sich die Basensättigung im Boden. Sie nimmt mit steigendem pH- Wert zu (Tabelle 24). Die Basensättigung der organischen Austauscher ist bei gleichem pH- Wert geringer als die der anorganischen Austauscher, da organische Bestandteile einen hohen Anteil schwach saurer Gruppen haben, die erst bei höherem pH-Wert H⁺ gegen Ca²⁺ und andere Kationen austauschen. Bei pH-Wert 7 ist die gesamte potentielle durch Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ und Na⁺ Kationenaustauschkapazität gesättigt. Hier ist KAK_{pot} = KAK_{eff}. Nimmt der pH-Wert ab, werden zunächst die Alkali- und Erdalkali-Ionen an den variablen Ladungen gegen undissoziierten Wasserstoff eingetauscht. Damit sinkt die KAK_{eff} entsprechend ab. Ab pH 5 beteiligt sich zunehmend Al^{3+} am Ionenbelag. Im sauren bis stark sauren Bereich erreicht die KAKeff ihr Minimum. Sie beruht dann nur noch auf permanenter Ladung, weil die variable fast vollständig protoniert ist. Der Kationenbelag variiert auch mit der Bodentiefe. Der Anteil an H⁺ und Al³⁺ nimmt von unten nach oben zu, die Basensättigung dagegen ab. Das zeigt, das Ca²⁺ und Mg²⁺ sowie andere Nährstoffe durch Wasserstoff verdrängt werden. Mit der Zeit dringt die Versauerungsfront in den Unterboden vor. [22]

Ableitung des Basensättigungsgrades aus der Bodenreaktion:

Die Äquivalentwerte (cmol_c/ kg) der austauschbar gebundenen, basischen Kationen (vor allem Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ , NH_4^+) werden in ihrer Summe als S-Wert bezeichnet, die Äquivalentwerte der austauschbar gebundenen, sauren Kationen (vor allem H^+ , Al^{3+} , Fe^{3+}) als H-Wert. Danach berechnet sich die KAK nach folgender Gleichung:

 $KAK [cmol_c/kg] = S-Wert + H-Wert.$

Der prozentuale Anteil der basischen Kationen an der KAK wird als Basensättigungsgrad [BS] bezeichnet:

$$BS = (S-Wert / KAK) \cdot 100$$

Zwischen den Kationen in der Bodenlösung und den adsorbierten Kationen besteht ein Gleichgewicht. Je höher der Anteil der H⁺ (Al³⁺)-Ionenkonzentration in der Bodenlösung ist, desto höher ist der Anteil saurer Kationen am Sorptionskomplex. Daher läßt sich der Anteil des H-Wertes bzw. des S-Wertes an der KAK am pH-Wert des Bodens bestimmen.

	\ 2/	
Bezeichnung	BS [%]	рН
sehr basenarm	< 5	< 3,3
basenarm	5 – 20	3,3 - 3,8
mittelbasisch	20 – 50	3,8 - 4,8
basenreich	50 – 80	4,8 - 6
sahr hasanrajah his hasangasättigt	80 100	> 6

Tabelle 24 Beziehung zwischen pH-Wert (CaCl₂) und Basensättigungsgrad BS [22]

4.2.3.5 Wesen der Anionensorption

Als Adsorbentien fungieren vor allem die Hydroxide und Oxide des Fe und Al und Tonminerale mit zahlreichen (Al, Fe)-OH und –(OH)₂-Gruppen an der Oberfläche, z.B. Allophan. Die unspezifische Anionensorption erfolgt durch positive Ladungen an der Oberfläche der Adsorbentien. Sie entsteht durch Anlagerung eines zusätzlichen Protons an eine (Al, Fe)- OH- Gruppe der Oberfläche, d.h. an Positionen variabler Ladung. Die entstandenen positiven Ladungen werden durch Anlagerung von Anionen neutralisiert. Unter den verschiedenen Anionen wird auch Chlorid aus Auftausalzen unspezifisch und damit relativ locker gebunden. Die spezifische Anionensorption beruht auf einer spezifischen Wechselwirkung zwischen bestimmten Anionen und Adsorbentien. Dazu gehören die Oxide des Al und Fe und einige Tonminerale, mit deren oberflächennahen Al- und Fe- Atomen die Anionen reagieren. Spezifisch adsorbiert werden Phosphat, Molybdat, Silikat, Arsenat, zum Teil auch Sulfat und Borat. Die Anionensorption ist für den Schutz des Grundwasser durch die Rückhaltung von Schadstoffen im Boden nicht von entscheidender Bedeutung.

4.2.3.6 Einflußgrößen auf die Sorption von Schadstoffen im Boden

4.2.3.6.1 Adsorption organischer Substanzen

Organische Substanzen werden an der Oberfläche von Huminstoffen, Tonmineralen und Sesquioxiden gebunden. Art und Menge der Sorbenten sind für Umfang und Stärke der Bindung entscheidend. Folgende Regeln werden für die Bindung organischer Substanzen im Boden aufgestellt:

- höhere Mengen einer Substanz werden relativ geringer gebunden als geringere;
- ungesättigte Chlorkohlenwasserstoffe werden stärker gebunden als gesättigte;
- ein zunehmender Chlorierungsgrad fördert eine Bindung ebenso wie eine hohe Anzahl funktioneller Gruppen (z.B. OH, NH, COOH).

Innerhalb einer Substanzgruppe (z.B. PAK, PCB) werden

- unpolare Verbindungen stärker als polare,
- gut wasserlösliche weniger gering als wasserlösliche,
- große Moleküle stärker als kleine,
- längerkettige stärker als kurzkettige

gebunden. [41]

Einfluß des Stoffbestandes des Bodens:

Die Wirksamkeit des Rückhaltes der meisten organischen Schadstoffe durch die Sorbenten Huminstoffe, Tonminerale und Sesquioxide erfolgt in der Reihenfolge:

Huminstoffe >> Tonminerale > Sesquioxide

Somit stellt der humose Oberboden die entscheidende Barriere gegen das Eindringen von Schadstoffen in das Grundwasser dar.

Die Anlagerung der organischen Schadstoffe an die Huminstoffe kann zum einen unspezifisch durch van-der-Waals'sche-Bindungen erfolgen. Zum anderen werden auch Wasserstoffbrückenbindungen und besonders feste kovalente bzw. ionische Bindungen eingegangen. Durch die kovalenten bzw. ionischen Bindungen kann es zu einem zunächst irreversiblen Einbau in die organische Substanz kommen. Diese "versteckten" Rückstände werden in der Pestizidforschung als bound residues bezeichnet. Sie können zu einem späteren Zeitpunkt durch Mineralisierung der Humusfraktion wieder freigesetzt werden. [41] Als Hauptadsorbent der organischen Substanz treten die Huminsäuren auf. [78]

Die Tonminerale eines Bodens haben im allgemeinen eine geringere Bedeutung bei der Adsorption organischer Schadstoffe als die organische Substanz. Als Grund dafür wird die überwiegend permanente negative Ladung der Tonminerale im Vergleich zur variablen, pHabhängigen Ladung der organischen Stoffe angegeben. [78] An die Tonfraktion werden insbesondere kationische organische Schadstoffe angelagert. Die an den Tonen adsorbierten Substanzen können relativ leicht gegen andere Kationen ausgetauscht werden.

Sesquioxide spielen als Sorbenten organischer Stoffe eine untergeordnete Rolle. [41] Die Oxide und Hydroxide des Eisens und Aluminiums können aber bei niedrigen Gehalten an organischer Substanz effektive Adsorbenten sein. [78]

Einfluß des pH- Wertes:

Organische Substanzen verhalten sich gegenüber dem pH-Wert unterschiedlich. Bei einer Vielzahl der Verbindungen spielt der pH-Wert bei der Sorption keine oder nur eine unbedeutende Rolle. Ein Teil der Substanzen wird bei niedrigen pH- Werten stärker gebunden als bei höheren. Dabei handelt es sich um Verbindungen, die in dem genannten pH-Bereich teilweise zu Anionen dissoziieren. Einige der organischen Stoffe, die bei niedrigen pH-Werten kationisch reagieren, werden in höheren Bereichen stärker adsorbiert.

Einfluß der Bodentemperatur:

Für die Sorptionsprozesse ist die Bodentemperatur von wesentlicher Bedeutung, läßt sich aber nach Literaturangaben [41] noch nicht sinnvoll mathematisch beschreiben.

Der Einfluß der Temperatur kann aber qualitativ beschrieben werden, wobei hier zwischen physikalischer und chemischer Adsorption unterschieden wird.

Bei steigender Temperatur sinkt die physikalische Adsorption, gleichzeitig ist mit einer Zunahme der Desorption zu rechnen. Der Grund ist die Zunahme der durchschnittlichen kinetischen Energien der Moleküle, so daß die elektrostatischen Anziehungskräfte, die bei der physikalischen Adsorption wesentlichen Einfluß haben, häufiger überwunden werden können.

Dagegen nimmt mit steigender Temperatur die chemische Adsorption zu, da hier größere Energien für die Bildung chemischer Bindungen zur Verfügung stehen. [41]

Einfluß des Boden-Wasserhaushaltes:

Ad- und Desorptionsprozesse sind Gleichgewichtsreaktionen zwischen der festen und der flüssigen Phase. Daher ist der Bodenwasserhaushalt für diese Prozesse von Bedeutung, da er die Konzentration in der Lösung, die Transportgeschwindigkeit und damit die Möglichkeit zum Eintausch sowie die Transportrichtung steuert. Im allgemeinen führen geringe Wassergehalte zu geringerer Mobilität und damit zu stärkerer Adsorption und hohe Wassergehalte zu höherer Mobilität und damit geringerer Adsorption. [78]

Mit zunehmendem Wassergehalt kommt es bei gleicher Stoffmenge zur Verdünnung. Wird daraufhin ein neues Stoffgleichgewicht hergestellt, gehen Substanzen aus der adsorbierten Phase in das Bodenwasser über. Bei zunehmenden Sickerraten werden Schadstoffe in Richtung Grundwasser transportiert, was wiederum Desorptionsprozesse auslöst. Abhängig sind diese Prozesse von der Lage des Sorptionsgleichgewichtes. Liegt es bei hydrophoben Verbindungen auf der Seite der adsorbierten Phase, gibt es auch bei großen Sickerwassermengen keine nennenswerten Desorptionen. Typisch ist ein solches Verhalten für einige PAK und PCB. Polare bzw. dissoziierbare oder ionische Moleküle lagern dagegen aufgrund ihrer Ladung bzw. ihres Dipolmomentes Wassermoleküle an und umgeben sich mit einer Hydrathülle. Diese vermindert die Adsorptionsfähigkeit. Auch Bodenbestandteile, die negativ geladene Oberflächen besitzen, adsorbieren bevorzugt Dipole, so daß eine

Wechselwirkung mit unpolaren Verbindungen (z.B. LCKW) nur bei geringen Wassergehalten stattfinden kann. [41]

4.2.3.6.2 Adsorption von Schwermetallen

Schwermetalladsorptionen sind zum großen Teil Austauschprozesse, d.h. für eine bestimmte Menge adsorbierten Metalls geht eine äquivalente Menge Kationen in Lösung. Konkurrierende Ionen sind vor allem andere Schwermetalle und Erdalkali- Ionen (Kalzium, Magnesium). [41] Inwieweit Metallionen durch Adsorption gebunden werden, hängt von den spezifischen Eigenschaften der betreffenden Metalle (Oxidationszustand, Radius, Ausmaß der Hydrathülle, Bindung mit Sauerstoff), dem pH- Wert, den Redoxbedingungen, den Konzentrationen und Eigenschaften anderer vorhandener Metalle und vom Vorhandensein löslicher Liganden in den umgebenden Flüssigkeiten ab. [2]

Einfluß des Stoffbestandes des Bodens:

Die Adsorption erfolgt an spezifischen und unspezifischen Bindungspositionen von Bodenkomponenten. [27]

An den Huminstoffen werden Metalle als metallorganische Komplexe gebunden. Die Stärke der Bindung nimmt in der Reihenfolge Zn < Co < Ni << Pb ≤ Cu zu. Bei saurer Bodenreaktion ist die Bindungsstärke an Huminstoffe im Vergleich zur Bindung an mineralische Bodenbestandteile besonders für Cadmium und Blei deutlich höher. Bei ausreichender Adsorptionszeit kann ein Einbau der Schwermetalle in die Molekülstruktur der Huminstoffe erfolgen. Die so festgelegten Metalle können nur beim Abbau der Huminstoffe wieder freigesetzt werden. Schwermetalle binden sich unterschiedlich an verschiedene Arten bzw. Fraktionen organischer Substanz. Blei, Chrom und Kupfer werden gleichermaßen an die nieder- und die hochmolekulare Fraktion adsorbiert, Zink dagegen bindet sich bevorzugt an die niedermolekulare Fraktion. Die an der hochmolekularen Fraktion adsorbierten Metalle sind weitgehend immobil. [41]

Nicht alle organischen Bestandteile des Bodens tragen zur Festlegung von Metallen bei. Lösliche organische Komplexbildner, die in gewissem Umfang in sauren Böden (z.B. Podsol) vorkommen, bewirken eine verstärkte Mobilisierung der Schwermetalle. [27]

Die Sorptionskapazität von Ton ist geringer als die der organischen Substanz. Da Tonminerale aber in Böden häufig auftreten, ist auch dieses Adsorbens für den Rückhalt der Schwermetalle von Bedeutung. [41] Die meist unspezifische Adsorption an Ton weist eine relativ geringe Bindungsstärke auf. [27] Daher sind die Schwermetalle relativ leicht wieder desorbierbar. Bei langer Adsorptionszeit können die Metalle jedoch in die Zwischenschichten der Tonminerale diffundieren und somit langfristig immobil eingebaut werden. Die Freisetzung kann nur durch eine Zerstörung der Tonminerale erfolgen. Die Diffusionsraten der Schwermetalle nehmen mit abnehmendem Ionendurchmesser in folgender Reihe Cd < Zn < Ni zu. In tiefen pH- Bereichen bei geringer Gesamtadsorption ist auch nur mit geringen Diffusionsraten zu rechnen. [78] Schwermetalle lagern sich in der Reihenfolge

 $Cd \le Zn < Cu < Pb$ an Tonminerale an. Desweiteren besitzen die verschiedenen Tonminerale unterschiedliche Sorptionskapazitäten:

Kaolinit < Chlorit < Illit < Montmorillonit < Vermiculit [41]

An Sesquioxiden erfolgt die Adsorption spezifisch und damit sehr fest. Dabei werden vor allem die Hydroxokomplexe der Metalle adsorbiert. Aus diesem Grund steigt die Adsorption an Sesquioxide mit zunehmender Neigung der Metalle zur Bildung von Hydroxokomplexen und Hydroxiden in der Reihenfolge $Cd < Ni < Zn << Cu \le Pb$ an.

Diese Form der Bindung nimmt im Boden generell mit dem Tongehalt zu, weil Fe-, Al- und Mn- Oxide Tonmineraloberflächen bedecken. [27]

In Tabelle 25 wird die substratbedingte Bindungsstärke verschiedener Metalle durch Humus, Tonminerale und Sesquioxide dargestellt. Die Angaben beziehen sich auf einen mäßig sauren, gut durchlüfteten Boden und Schwermetallgehalten im Bereich der als normal angesehenen Konzentrationen. Weiterhin wird ein Grenz- pH angegeben, oberhalb dessen die Mobilität der Schwermetalle stark abnimmt. [27]

Tabelle 25 Relative Bindungsstärke von Schwermetallen an Humus, Ton und Sesquioxiden im Boden bei pH- Werten unterhalb des Grenz- pH (CaCl₂) [27]

		Substratbedingte Bindungsstärke unterhalb des Grenz-pH durch:					
Metall	Grenz-pH	Humus Ton Sesquioxide					
Cd	6	4	2	3			
Cu	4,5	5	3	4			
Pb	4	5	4	5			
Zn	5,5	2	3	3			
Cr	4,5	5	4	5			
Ni	5,5	3-4	2	3			

Relative Bindungsstärke: 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel, 4 = stark, 5 = sehr stark

Einfluß des pH- Wertes:

Die Bindung von Schwermetallen im Boden ist stark vom pH- Wert abhängig. Je niedriger der pH- Wert, desto geringer sind die Schwermetallmengen, die adsorbiert werden. Zu erkennen ist dieser Sachverhalt in Bild 17 Hier sind Zink- Sorptionsisothermen für einen Ton und verschiedene pH-Werte dargestellt. [41] Die Reihenfolge des pH-Einflusses auf die Löslichkeit der Schwermetallionen ergibt sich wie folgt: Pb < Cu < Ni < Zn ≤ Cd [19]. Der Grund für den Mobilitätsanstieg liegt in der Minderung der effektiven Kationenaustauschkapazität durch Versauerung. Der variable negative Ladungsüberschuß der Sorbenten des Tons, Humus und der Oxide nimmt ab, es kommt zur Desorption der positiv geladenen Metallionen. [78] Die Schwermetalllöslichkeit nimmt bei sinkendem pH-Wert nicht gleichmäßig, sondern zunächst langsam und dann in einem engen pH- Bereich sehr schnell zu (Bild 18).

Die mit steigenden pH- Wert zunehmenden Adsorptionsraten sind darauf zurückzuführen, daß die Schwermetalle in zunehmenden Anteilen als Hydroxo-Komplexe vorliegen. Diese Hydroxo-Komplexe werden vorwiegend spezifisch und damit sehr fest gebunden. Allerdings unterscheiden sich hierin die Metalle sehr stark voneinander. Beispielsweise überwiegt bei Cd bereits im schwach sauren Milieu die unspezifische Adsorption. Es kann hier leicht wieder desorbiert werden. Pb dagegen liegt erst in stark saurem Milieu in unspezifisch adsorbierter Form vor.

Bei einigen Metallen ist ein Wiederanstieg der Schwermetalllöslichkeit im alkalischen Bereich zu erkennen. Dieser ist auf die Bildung wasserlöslicher, metallorganischer Komplexe zurückzuführen. [41] Der Mobilisierungseffekt ist bei Kupfer und Blei aufgrund ihrer höheren Affinität zur organischen Substanz stärker als bei Cadmium und Zink. [78]

Die Abnahme der gebundenen Schwermetallmenge an die Tonfraktion bei sinkendem pH-Wert, ist für die unspezifischen Bindungspositionen aus einer verstärkten Konkurrenz durch Al³⁺, Mn²⁺, Fe³⁺ und H⁺ um die Sorptionsplätze zu erklären. Der Beitrag der variablen Ladung zum Kationenaustausch ist erst im schwach alkalischen Bereich von Bedeutung.

Die spezifische Adsorption findet dagegen schon bei pH- Werten von 4 für Zink und 5 bei Nickel und Cadmium statt. Dies wird auf Hydroxokomplexe zurückgeführt, die durch oberflächeninduzierte Hydrolyse direkt auf der Oberfläche von Tonmineralen gebildet werden. Außerdem werden im Bereich der Grenzflächen von Lösung und Partikeloberfläche stets höhere pH- Werte als in der freien Lösung vermutet. Bei pH- Werten, die unter 4 liegen, sind mineralische Komponenten dann kaum noch in der Lage, zur Schwermetalladsorption beizutragen. [78]

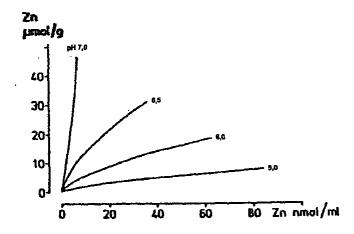


Bild 17 Zink- Sorptionsisothermen für einen Ton über verschiedene pH- Werte [41]

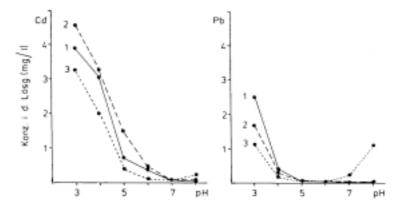


Bild 18 Cadmium- und Bleikonzentrationen in der Gleichgewichtslösung verschiedener Bodenproben aus Ap-Horizonten in Abhängigkeit vom eingestellten pH-Wert [41]

Einfluß des Redoxpotentials:

Nach DVWK [27] ist der Einfluß des Redoxpotentials von wesentlicher Bedeutung für die Bindung der Metalle. Ein sauerstoffreicher Boden besitzt ein Redoxpotential von über 400 mV, ein sauerstoffarmer bis -freier dagegen ein niedriges bis negatives Potential. Vor allem die Löslichkeit von Mn und Fe ist stark potentialabhängig. Mn liegt bereits bei einem Potential von + 400 mV in zweiwertiger Form vor und ist dann sehr mobil. Fe dagegen erst bei einem Redoxpotential von + 150 mV. Die höherwertigen Ionen Fe³⁺, Mn³⁺ und Mn⁴⁺ kommen erst oberhalb der angegebenen Potentiale vor. Sie neigen zur Bildung wenig löslicher Hydroxide. Bei negativen Redoxpotentialen bilden viele Metalle schwer lösliche Sulfide. Sulfidhaltige Böden vermögen diese Metalle fest zu binden. Zu beachten ist, daß diese Angaben für neutrale Bodenreaktionen gelten. Weiterhin ist wichtig, daß sich vor allem die Redoxpotentiale aber auch die pH- Werte eines Bodens bereits im Jahresverlauf ändern können, d.h. keine festen Größen darstellen. [27]

Einfluß der Schwermetallkonzentration:

Mit zunehmendem Gehalt des Schwermetalls im Boden steigt die unspezifisch adsorbierte und damit leicht lösliche Menge des Elementes an. Bei Zink, Nickel und Cadmium wurde der Effekt über einen weiten Konzentrationsbereich festgestellt, bei Kupfer und Blei dagegen erst bei hohen Gesamtgehalten.

Salzgehalt der Bodenlösung:

Der Salzgehalt wirkt sich auf verschiedene Weise auf die Bindung von Schwermetallen im Boden aus. Zum einen ist es möglich, daß Kationen mit dem Schwermetall am Austauscher in Konkurrenz treten. Dabei können bindungsschwache Metalle wie Cadmium teilweise verdrängt werden. Besonders der Kalziumgehalt in der Bodenlösung wird als wesentliche Einflußgröße auf die Mobilität von Cadmium angesehen. Zum anderen können Anionen wie Chlorid als Komplexbildner die Löslichkeit der Schwermetalle erhöhen. Besonders drastisch

ist dabei die Zunahme der Cadmiummobilität. Bei pH 5 und einem Chloridgehalt von 10⁻¹ mol/l in der Lösung wird die Cadmium-Adsorption um 50 bis 75 % herabgesetzt. Bereits bei Chloridgehalten > 10⁻³ mol/l ist dieser Effekt erkennbar, wobei er bei niedrigen pH- Werten noch stärker zum Tragen kommt. Grund dafür ist die Verschiebung des Gleichgewichts zwischen Chloro- und Hydroxo- Komplexen bei sinkendem pH- Wert in Richtung Chloro-Komplexe. Auch bei Blei ist eine Abnahme der Adsorption durch Bildung von Chloro-Komplexen festgestellt worden.

Zusammenfassend läßt sich sagen, daß eine Erhöhung des Salzgehaltes eine zunehmende Schwermetallmobilisierung nach sich zieht.

4.2.4 Fällung

Fällungsreaktionen sind, in Bezug auf die angegebenen Schadstoffe, nur bei Schwermetallen relevant. Die Fällung von Stoffen in der Bodenlösung erfolgt, wenn das Löslichkeitsprodukt überschritten wird. Beim Erreichen oder Überschreiten des Löslichkeitsproduktes einer Verbindung, wird jede weiter zugeführte Metallmenge ausgefällt. Die Konzentration des Metalls in der Bodenlösung bleibt dabei konstant. Der Beitrag der Fällung zum Gesamtrückhalt von Schwermetallen spielt nur unter reduzierenden Bedingungen eine Rolle [4]. Beim Eintrag von Schwermetallen in den Boden können Hydroxide, Carbonate und Sulfide ausfallen. Deren Löslichkeit ist sehr gering. In anaeroben Bereichen kann es durch mikrobielle Tätigkeit zur Bildung von H₂S kommen, was eine Ausfällung schwerlöslicher Sulfide (H₂S- Falle) nach sich zieht. [112]

Durch Komplexierung und Adsorption werden große Mengen des jeweiligen Schwermetalls dem Fällungsmechanismus entzogen. [41]

4.2.5 Abbauprozesse

Organische Schadstoffe werden im Boden nicht nur adsorbiert, sie unterliegen auch biologischen und chemischen Abbauprozessen. Die Prozesse sind dabei sehr komplex. [37]

Chemischer Abbau in Form von Photodekomposition, Oxidation, Reduktion, Substitution, Hydrolyse und mikrobieller Abbau organischer Schadstoffe können nur schwer voneinander getrennt werden. Der biologische Abbau findet vorwiegend in der Wurzelzone statt, der chemische Abbau dagegen unterhalb des belebten Raumes auf dem Weg zum bzw. im Grundwasser. [78]

Der biologische Abbau wird im wesentlichen durch die Umweltbedingungen (Feuchte, Temperatur, Redoxverhältnisse, pH, Licht, Nährsalze und das vorhandene Substrat) bestimmt. Sie beeinflussen die Zusammensetzung und Biomasse der Mikrobengemeinschaften. Während Feuchte, Temperatur, Nährsalze und Substrat vor allem die Abbaugeschwindigkeit beeinflussen, können die Redoxbedingungen die Abbauwege selbst stark verändern. Von großer Bedeutung ist weiterhin die Struktur des Bodens, insbesondere seine Porigkeit. Bei einem durchschnittlichen Durchmesser der Bakterien von ca. 500 bis 1000 nm benötigen sie entsprechende Porenradien zum Wachstum und zur Ausbreitung. Daher sind bindige,

tonreiche Böden nur sehr schwer besiedelbar. In bindigen Böden ist ein weiterer limitierender Faktor die Versorgung der Mikroorganismen mit Sauerstoff. [39]

Der photochemische Abbau findet häufig bei chlorierten Kohlenwasserstoffen wie z.B. PCB statt. Die Bedeutung des photochemischen Abbaus bei der Eliminierung von PCB's ist vermutlich ebenso groß wie die des biologischen Abbaus. Durch photochemischen Abbau werden PCB bzw. PCB-Metaboliten gasförmig abgespalten und in die Atmosphäre freigesetzt.

Der mikrobielle Abbau ist ein Prozeß, der ausschließlich durch mikrobeneigene Enzyme eingeleitet und mit Hilfe vielfältiger enzymatischer Reaktionen abläuft. [78] Der biologische Abbau kann metabolisch oder cometabolisch erfolgen. Die mikrobielle Transformation organischer Schadstoffe führt zu Stoffen anderer Aggregatzustände und anderer chemischer Zusammensetzung. Diese Stoffe besitzen meist keine Schadstoffwirkung mehr. Vereinzelt können jedoch auch Metabolite gebildet werden, die eine größere Toxizität als die Ausgangsstoffe aufweisen. [103] Durch eine starke Sorption ist es möglich, daß Stoffe dem biologischen Abbau entzogen werden, damit erhöht sich deren Persistenz. [41]

Der biologische Abbau wird durch die folgenden Komponenten beeinflußt:

- Verfügbarkeit eines Schadstoffes für die Organismen
- Menge der Mikroorganismen, die am Abbau teilnehmen und
- die Aktivität der Organismen.

Tabelle 26 Verteilung von Mikroorganismen in verschiedenen Bodentiefen [77]

Tiefe [cm]	Organismen / g Boden	in %
3 – 8	$1,2 \cdot 10^{7}$	79
20 – 25	$2,5 \cdot 10^6$	16
35 – 40	6,3 · 10 ⁵	4
65 – 75	$2,2 \cdot 10^4$	
135 – 145	$4,0 \cdot 10^3$	< 1

Wie Tabelle 26 zeigt, befindet sich die höchste Anzahl an Mikroorganismen in den oberen Zentimetern des Bodens, in denen auch die höchste Abbaurate zu verzeichnen ist.

Die Zusammenstellung der oben genannten Faktoren ist bestimmend für die Geschwindigkeit des Abbaus und damit für die Persistenz eines Stoffes im Boden.

- Eine geringe Biomasse und eine hohe Verfügbarkeit des Stoffes, d.h. eine geringe Adsorptionskonstante, bewirken einen hohen Anteil an der Verdunstung und damit nur einen kleinen Anteil, der mikrobiell abgebaut werden kann.
- Eine geringe Biomasse und eine geringe Verfügbarkeit der Stoffe, d.h. eine hohe Adsorptionskonstante, führen zu einer hohen Persistenz der Substanzen.
- Eine große Biomasse und eine hohe Verfügbarkeit bewirken einen schnellen Abbau durch Mikroorganismen.
- Eine große Biomasse und eine geringe Verfügbarkeit ziehen eine mittlere Persistenz nach sich. [78]

4.2.5.1 Mechanismen des biologischen Abbaus

Metabolischer Abbau:

Bei metabolischem Abbau kann die Substanz als einzige Energiequelle genutzt werden. Sie induziert das Wachstum der Bakterienkultur. Für den Verlauf des metabolischen Abbaus (Bild 19) ist die Lag-Phase typisch, in der keine oder nur eine geringfügige Konzentrationsabnahme erfolgt. In dieser Zeit passen sich die Organismen durch Synthese der entsprechenden Enzyme an das Substrat an. Wird das Substrat in kurzen Zeitabständen angeboten, entfällt die Lag-Phase.

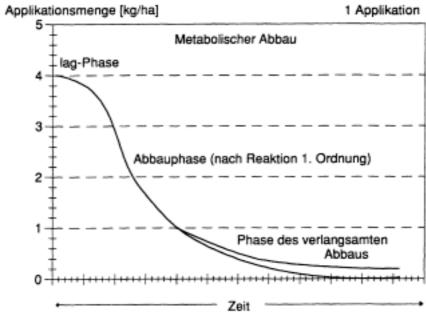


Bild 19 Metabolischer Abbau (Prinzipskizze) [41]

Nach der Lag-Phase setzt für viele Substanzen ein Abbau 1. Ordnung ein. Zwischen der Lag-Phase und dem Abbau 1. Ordnung liegt eine Übergangsphase. Nimmt die Substratkonzentration während des Abbaus ab, kann eine Phase des verlangsamten Abbaus folgen. Grund ist die abnehmende Verfügbarkeit der Substanz für Mikroorganismen, wenn die leicht verfügbaren Anteile abgebaut sind und lediglich die Anteile verbleiben, die stark an den Boden gebunden und damit nur noch zum Teil zugänglich sind.

Cometabolischer Abbau:

Hierbei kann eine Substanz nur abgebaut werden, wenn ein Co- Substrat vorliegt, welches das Bakterienwachstum ermöglicht. Die Substanz reicht als alleinige Energiequelle nicht aus, wird aber mit abgebaut. Vor allem Stoffe wie PCB, Dioxine und Furane werden als "naturfremde" Substanzen cometabolisch abgebaut. Dabei gilt, daß der Abbau umso langsamer erfolgt, je stärker der naturfremde Charakter der Substanzen ausgeprägt ist. Der Abbauprozeß erfolgt als Reaktion 1. Ordnung, eventuell kann sie in eine Phase des verlangsamten Abbaus nach Konzentrationsabnahme übergehen (Bild 20). [41]

Für die Geschwindigkeit des Abbaus ist die Bodentemperatur von großer Bedeutung. Die Erhöhung der Bodentemperatur um 10°C bewirkt nach der Vant Hoffschen Regel eine Zunahme der Reaktionsgeschwindigkeit um das Doppelte. Im allgemeinen gilt diese Regel auch für die mikrobielle Tätigkeit, allerdings ist hier darauf zu achten, daß Mikroorganismen bestimmte Temperaturoptima besitzen, bei deren Überschreiten die Reaktionen wieder eingeschränkt ablaufen und schließlich zum Erliegen kommen können [41]. In [103] wird angegeben, daß Biozide unterhalb von 5°C nicht mehr abgebaut werden. Bei einer Zunahme der Temperatur dagegen um 10°C erhöht sich die Abbauintensität um das dreifache. Insgesamt konnte beobachtet werden, daß der Abbau im Sommer schneller verläuft als im Winter. [78]

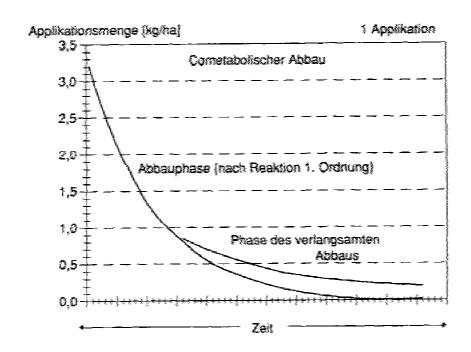


Bild 20 Cometabolischer Abbau (Prinzipskizze) [41]

Weiterhin ist für den Abbau der Wasser- und Lufthaushalt des Bodens wichtig. Hierbei ist allerdings eine differenzierte Betrachtung verschiedener Schadstoffgruppen notwendig. Unter aeroben Bedingungen werden viele organische Schadstoffe schneller abgebaut als unter anaeroben. Dabei ist eine gewisse Bodenfeuchte erforderlich, damit Hydrolysen stattfinden können und der Transport der Stoffe zu den Mikroorganismen möglich ist. Ein Wassergehalt von 50 - 80 % der maximalen Feldkapazität wird für den Abbau von Pestiziden als günstig angesehen. Bei Wassergehalten < 5 % der Feldkapazität kommt der Abbau zum Erliegen, bei Werten > 80 % der Feldkapazität wird ein Abfallen der Abbauleistung infolge Luftmangels beobachtet. In anaeroben Bereichen dagegen verläuft die Dechlorierung relativ persistenter chlorierter Kohlenwasserstoffe und auch der Abbau schweren Schmieröls erheblich rascher ab. Die Spaltung chlor- und nitrosubstituierter aromatischer Kerne erfolgt nur unter aeroben Bedingungen. Daher sind für den Abbau chlorierter Aromaten wechselfeuchte Bedingungen vorteilhaft. [41]

Ebenfalls bedeutsam für den Abbauprozeß ist der pH-Wert des Bodens. Bei sinkenden pH-Werten nimmt die Aktivität der Mikroorganismen ab. Im Gegensatz dazu kann der

hydrolytische Zerfall einiger Verbindungen mit sinkendem pH-Wert beschleunigt werden [41].

Eine weitere Einflußgröße ist das Nährstoffangebot. Bei Nährstoffmangel wird der mikrobielle Abbau erschwert. Eine gute Nährstoffversorgung regt die Aktivität der Bodenlebewesen an, dadurch kann die Persistenz von Schadstoffen gesenkt werden. Bei Mineralölverunreinigungen gilt ein C/ N/P- Verhältnis von 25/ 1/ 0,3 als optimal. [41]

Dauerhumus und leicht abbaubare organische Substanz wirken sich hemmend auf den Abbau von Schadstoffen aus. Durch den Humus werden Schadstoffe verstärkt adsorbiert und somit dem Abbau entzogen. Leicht abbaubare organische Substanz dagegen wird von den Mikroorganismen eher aufgenommen als die in den Boden eingetragenen Schadstoffe. [41]

4.2.6 Komplexierung

Lösliche organische Substanzen mit niedrigem Molekulargewicht können mit Metallen stabile Komplexe bilden, die im Bodenwasser beweglich und biologisch verfügbar sind, weil das Metall durch den organischen Liganden vor der Adsorption an die Kolloidoberflächen des Bodens geschützt ist. Höher polymerisierte, feste Huminstoffe fungieren dagegen durch die Bildung von Chelatkomplexen als bedeutendes Adsorbens für Metalle und reduzieren so deren Mobilität und somit auch deren Bioverfügbarkeit. [2]

Die organischen Komplexbildner entstehen bei der Humusbildung und sind somit Bestandteil der bodeneigenen organischen Substanz. [41] Bedeutend für den Ablauf der Komplexierung ist der pH-Wert des Bodens. Im schwach sauren bis alkalischen Bereich liegen die Schwermetalle größtenteils in Hydroxo-Komplexen vor. Diese werden stärker adsorbiert als freie Ionen. Dadurch kann die Löslichkeit des Schwermetalls herabgesetzt werden. In schwach alkalischen Bereichen bilden sich bei Vorhandensein organischer Substanz Organo-Metall-Komplexe, die einen Wiederanstieg der Schwermetallöslichkeit bewirken können. Schwach alkalische Bereiche liegen allerdings in Böden kaum vor. [41]

5 Schadstoffe im Boden

5.1 Natürliche Stoffgehalte im Boden und Grundwasser

Grundwasser:

Schwermetallgehalte sind geogen bedingt immer im Grundwasser vorhanden. In Tabelle 27 sind Orientierungswerte für Hintergrundbelastungen angegeben. Die Werte aus SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL [103] sind Konzentrationsbereiche, in denen sich die Schwermetallkonzentrationen im Grundwasser normalerweise bewegen. Die Angaben von VAN LITH DE JEUDE sind Meßwerte von Grundwasserproben aus den Niederlanden. Hier wird der Bereich angegeben, in dem sich die Schwermetallkonzentrationen von 90% der Grundwasserproben bewegten. [41]

Tabelle 27 Hintergrundbelastung von Grundwässern mit Schwermetallen [41] [119]

Schwermetall	SCHEFFER/ SCHACHTSCHABEL [41]	VAN LITH DE JEUDE [41]	Grundwassergehalte in Düsseldorf [119]
	μg/l	μg/l	μg/l
Cadmium	<5, oft <1	<0,05 - 1	0,1 - 0,2
Kupfer	-	<1 - 50	2 - 3
Blei	1 - 6	<0,5 - 6	2 - 3
Zink	10 – 50	<5 - 80	10 - 20
Nickel	1 - 6	<1 - 10	3 - 4
Chrom	<1	<0,5 - 5	- 2

Boden:

Wie im Grundwasser sind auch im Boden anorganische und organische Schadstoffe vorhanden. Schwermetalle zählen zu den natürlichen Bestandteilen des Bodens. Die natürlichen Hintergrundgehalte schwanken in größeren Spannen. Grund dafür sind zum einen die unterschiedlichen Gehalte von Ausgangsgesteinen bzw. Lockersedimenten. Zum anderen werden im Verlauf der Bodenbildung Schwermetalle vertikal im Profil und lateral in der Landschaft umverteilt. Dadurch wird der geogene Schwermetallgehalt verändert. In Tabelle 28 werden Schwermetallgehalte in Böden nach [103] und [16] angegeben, die als normal angesehen werden.

Tabelle 28 Schwermetallgehalte in Böden [103] [16]

Schwermetall	SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL [103]	BLUME [16]	
	(mg/kg)	(mg/kg)	
Cadmium	< 0,5	0,01 - 0,07	
Kupfer	2 - 40	1 – 40	
Blei	2 - 60	0,1 - 60	
Zink	10 - 80	3 – 50	
Nickel	5 - 50	2 – 50	
Chrom	5 - 100	2 – 50	

Tabelle 29 gibt die durchschnittlichen Schwermetallgehalte nach [41] an, die in den vorherrschenden Gesteinstypen der Bundesrepublik vorhanden sind.

Tabelle 29	Schwermetallgehalte in verschiedener Fest- und Lockergesteine [41]

Boden	Cadmium	Kupfer	Chrom	Nickel	Blei	Zink
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
Ultrabasite	0,05	20	2000	2000	0,1	30
Basite	0,19	100	200	160	8	130
Granite	0,01	20	25	8	20	60
Tonige Gesteine	0,3	57	100	95	20	80
Sandsteine	0,0x	X	35	2	7	15
Kalksteine	0,035	4	11	20	9	20
Schwarzschiefer	-	310	200	425	28	400
Löß	<0,03	15	67	28	34	53
Bimstuff	<0,3	9	41	19	28	133
Sand	<0,3	<3	1,5	5	10	11
Geschiebelehm	<0,3	9	20	15	20	36

In der Klärschlammverordnung wurden Grenzwerte für Böden erlassen, die bei der Ausbringung von Klärschlamm nicht überschritten werden dürfen. Diese Grenzwertfestlegungen müssen allerdings kritisch gesehen werden, da diese Werte bereits durch das natürliche Vorhandensein von Schwermetallen überschritten sein können. [49] Außerdem sind für die Beurteilung des tatsächlichen Gefährdungspotentials höher belasteter Böden die Bindungsformen sowie das Löslichkeits- und Sorptionsverhalten des jeweiligen Stoffes am Standort von Bedeutung. Die meisten Schadstoffe liegen nicht als Element, sondern in verschiedenen Bindungsformen vor. [26] Bei der Verwendung von Grenzwerten muß beachtet werden, daß diese wenig über eine mögliche Gefährdung von Wasser und Boden aussagen. [27]

Messungen in Hessen haben gezeigt, daß hohe geogene Schwermetallbelastungen von Böden nicht gleichbedeutend mit hohen Grundwasserbelastungen sind. Mit zunehmendem Anteil anthropogen eingetragener Schwermetalle dagegen steigt die Belastung des Grundwassers. Offensichtlich sind natürlich vorkommende Schwermetallgehalte überwiegend fest gebunden [41].

5.2 Ausbreitung von Schadstoffe an Straßen

Im Bereich von Fahrbahnen hat infolge der Baumaßnahme ein tiefes Auskoffern der Böden, ein Auffüllen mit mechanisch stark belastbaren Schottern, ein Verdichten sowie ein Versiegeln mit einer wasser- und luftundurchlässigen Decke stattgefunden. Ein Bodenleben ist dadurch nicht mehr möglich (Bild 21) [16]. Auch an den Straßenrändern kommt es zu tiefgreifenden Veränderungen. Bei Straßenrandböden handelt es sich um in starken Maße durch Abtrag, Aufschüttung und Versiegelung überformte Böden. Charakteristisch sind Auftragsböden, deren Profilbereich vorwiegend aus grobkörnigen und carbonathaltigen bzw. alkalisierenden Ausgangssubstanzen (z.B. Kalkstein, Bauschutt, Schlacken) aufgebaut ist und

mit einer humosen Deckschicht versehen wird. Ein weiteres Kennzeichen für diese Böden ist eine starke Verdichtung infolge der Druckbelastung während der Bauphase sowie der von fahrenden Fahrzeugen ausgehenden Vibration. Folgen der Bodenverdichtung sind ein verminderter Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre und eine damit verbundene Abnahme des Sauerstoffgehaltes im Boden. Weiterhin wird die Versickerung des Niederschlagswassers vermindert. [20] Dieser stein- und carbonatreiche, oft verdichtete, oben bereits mit Humus angereicherte Boden wird als Depo-Pararendzina bezeichnet. (Die Vorsilbe Depo kennzeichnet die Entwicklung aus einen anthropogenen Auftrag.)

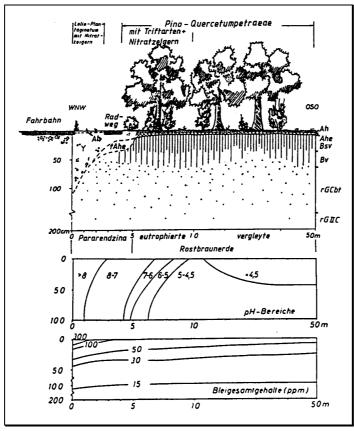


Bild 21 Boden neben einer Straße [16]

Mit dem Regenwasser fließt ein Teil der Schadstoffe in gelöster Form, an Schwebstoffen sorbiert oder als Feststoff von der Fahrbahn ab. In den Straßenabflüssen werden dabei nur solche Stoffe erfaßt, deren Transport durch den zeitweise wirksamen Wasserpfad erfolgt, d.h. an Tagen, mit Niederschlagshöhen von mehr als 0,5-1mm.

Mit zunehmendem Abstand von der Straße nimmt die Belastung der Böden mit straßenspezifischen Schadstoffen ab. Die Ausbreitung der Schadstoffe führt im Umfeld der Straßen zu drei unterschiedlich belasteten Bodenbereichen. Die Bereiche der Bodenbelastung durch Straßenablaufwasser sind in Bild 22 dargestellt.

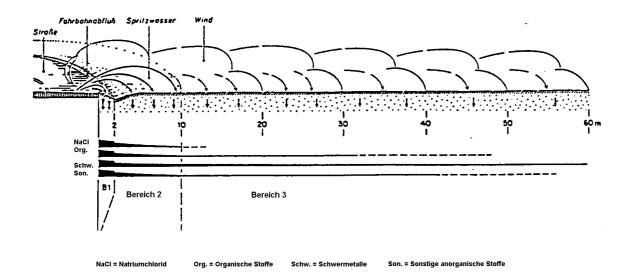


Bild 22 Bereiche der Bodenbelastung durch Straßenablaufwasser [91]

Bereich 1 (0 - 2 m): Der Bereich 1 grenzt außerhalb von Ortschaften in der Regel an den Rand der undurchlässig befestigten Straße an. Hier versickern der Fahrbahnabfluß und das Spritzwasser. Da der Straßenabfluß feste, gelöste und suspendierte Stoffe enthält, ist der Boden in diesem Bereich zeitweilig mit Auftausalzen und ständig mit organischen Substanzen, Schwermetallen und anderen straßenspezifischen anorganischen Stoffen verunreinigt. In diesem Bereich ist die Belastung des Grundwassers durch Schadstoffe möglich. [38] [20]

Bereich 2 (2 - 10 m): Im Bereich 2 versickert vorwiegend das Spritzwasser, bei großem Wasseranfall auch der Straßenabfluß. In diesem Bereich nimmt an der Erdoberfläche und mit zunehmender Tiefe die Belastung mit straßenspezifischen Stoffen rasch ab. Aus diesem Bereich gelangen Schadstoffe nur in geringer Konzentration in das Grundwasser. [38]

Bereich 3 (>10 m): Hier werden Stoffe mit dem Wind flächenhaft abgelagert, die in den Bereichen 1 und 2 nicht zur Ablagerung kamen. Bei Kreisstraßen, Landesstraßen und Bundesstraßen nimmt bis etwa 50 m ab Straßenrand die Belastung der Böden mit Schadstoffen und damit auch deren Eintrag in das Grundwasser weitgehend ab. An stark befahrenen Bundesstraßen und Autobahnen kann der Boden in einem Bereich bis 100 m mit Schwermetallen verunreinigt sein. In Mitteleuropa ist in einem Bereich von 500 m die Belastung von straßenspezifischen Schadstoffen noch vorhanden, kann aber keiner bestimmten Straße mehr zugeordnet werden, sondern ist auf die Summenwirkung mehrerer Emissionsquellen zurückzuführen. [38]

Das Phänomen der Ausbildung unterschiedlicher Belastungsbereiche wurde in einer Forschungsarbeit der Staatlichen Landwirtschaftlichen Untersuchungs- und Forschungsanstalt Augustenberg belegt. Hier wurden an Autobahnen, Bundes- und Land- bzw. Kreisstraßen im Großraum um Karlsruhe beiderseits der Fahrbahnen aus Längsprofilen im 1m breiten, den Straßen benachbarten Geländestreifen und aus Querprofilen von $4-6\,\mathrm{m}$ bis $50-100\,\mathrm{m}$

5 Schadstoffe im Boden 67

Entfernung Proben aus den obersten 10 cm der anstehenden Böden entnommen und auf Bleiund Cadmiumgehalte untersucht. Die Beschreibung der Probenahmestandorte ist [48] zu entnehmen.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse ist in Tabelle 30 und Tabelle 31 dargestellt.

Tabelle 30 Bleigehalte (mg/kg Boden) in Querprofilen der Straßentypen Autobahn, Bundes-, Landes-, Kreisstraße [48]

Straßentyp	Entfernung vom Straßenrand in Metern					
	0 – 1	4 – 6	8 - 10	20 - 25	25 - 50	50 – 100
Autobahn	466	88	68	48	44	41
Bundesstraße	168	42	32	38	39	37
Kreis- bzw.	139	42	53	38	39	37
Landstraße						

Tabelle 31 Cadmiumgehalte (mg/kg Boden) in Querprofilen der Straßentypen Autobahn, Bundes-, Landes-, Kreisstraße [48]

Straßentyp	Entfernung vom Straßenrand in Metern					
	0 – 1	4 – 6	8 - 10	20 - 25	25 - 50	50 - 100
Autobahn	2,48	0,30	0,23	0,16	0,18	0,17
Bundesstraße	1,10	0,25	0,17	0,19	0,20	0,21
Kreis- bzw.	0,82	0,22	0,21	0,18	0,20	0,21
Landstraße						

Aus den Tabellen ist ersichtlich, daß sich die höchsten Schwermetallkonzentrationen bei allen 3 Straßentypen auf den schmalen Bereich von 0 - 1 m neben den Fahrbahnen konzentrieren. Von dort aus sinken sie abrupt ab und streben ab 8 - 10 m in völlig abgeflachten Kurven den natürlichen vorhandenen Gehalten von Böden zu.

5.3 Einteilung der Schadstoffe nach ihrem Verhalten bei der Versickerung

Bezüglich ihres Verhaltens im Untergrund lassen sich die Wasserinhaltstoffe in drei Gruppen einteilen:

- **Perseverante Stoffe**: Stoffe, die weder chemischen noch biologischen Reaktionen ausgesetzt sind und keinerlei Eliminationsmechanismen unterliegen
- **Persistente Stoffe**: Substanzen, die nicht abgebaut, aber durch Anlagerung an das Korngerüst eliminiert werden können
- **Abbaubare Substanzen**: Wasserinhaltsstoffe, die durch chemische oder biologische Prozesse umgewandelt oder abgebaut werden

Die Wirkung der Eliminationsprozesse ist von den spezifischen Stoffeigenschaften und von der physikalischen Zustandsform der Stoffe abhängig.

Die Vorgänge der Schadstoffentfernung bzw. -beseitigung sind bis auf den Abbau i.a. reversibel. Bei Änderungen des physiko-chemischen Milieus im Boden kann eine

Remobilisierung der zuvor angelagerten Stoffe stattfinden. Auch mit der Aufnahme durch Pflanzen wird ein Teil der Schadstoffe dem Boden wieder entzogen.

Örtlich kann es über Makroporen zu Schadstoffdurchbrüchen in tiefer gelegene Bodenschichten und ins Grundwasser kommen. Im Grundwasser unterliegen die eingetragenen Stoffe dann nur noch stark verlangsamten Eliminationsprozessen [41]. In Bild 23 wird das Verhalten straßenspezifischer Stoffgruppen im Untergrund dargestellt.

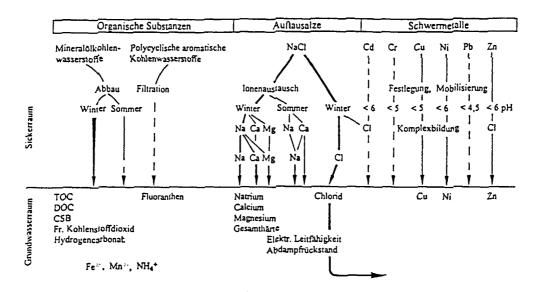


Bild 23 Verhalten straßenspezifischer Stoffgruppen im Untergrund [38]

5.4 Verhalten ausgewählter Schadstoffgruppen im Boden

5.4.1 Organische Schadstoffe

5.4.1.1 Polychlorierte Biphenyle (PCB)

Der Abbau von PCB verläuft im Boden nur sehr langsam und zu 50 % abiotisch. Die Abbaurate hängt von der Sorption und dem Chlorierungsgrad, die Metabolisierung vom Substitutionsmuster ab. [41] In Tabelle 32 sind biotische Abbauzeiten für verschiedene PCB im aeroben Milieu dargestellt.

Tabelle 32	Halbwartzeiten ver	on PCB im Boden [41]	
rabene 52	namwertzeiten vo	on PCD iiii boaen 1411	

PCB-Typ	Halbwertzeit	
Monochlor- PCB	6 - 10 Tage	
Dichlor- PCB	6 - 10 Tage	
Trichlor- PCB	12 - 30 Tage	
Pentachlor- PCB	1 Jahr	

Die Halbwertzeiten für Hepta-, Octa-, Nona-, und Decachlor-PCB sind noch höher. Nachgewiesene Metabolite sind Hydroxyverbindungen, Metaspaltungsprodukte und Chlorbenzoate. [41] PCB werden hauptsächlich an Humus gebunden. Sie gehen mit der organischen Substanz eine hydrophobe Bindung ein. Dabei ist die Sorptionsstärke direkt proportional dem Chlorierungsgrad der Verbindung. Die Verdampfung von PCB stellt einen relativ bedeutenden Eliminationsprozeß dar. Die Mobilität ist aufgrund starker Wechselwirkungen mit dem Boden und der geringen Wasserlöslichkeit sehr gering. Die unter Feldbedingungen in 60 - 90 cm Tiefe gefundenen Spuren sind auf Verlagerungen in Trockenspalten zurückzuführen. [16]

5.4.1.2 Polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)

PAK reichern sich in Böden sehr stark an, da sie ausgesprochen hydrophob sind. Die bevorzugte Sorption erfolgt dabei vor allem an die organische Substanz. [2] Dabei gilt, je hydrophober und je weniger polar die Substanz ist, umso größer ist die Sorption. Tongehalt und pH- Wert haben dagegen keinen wesentlichen Einfluß auf die PAK- Sorption.

Eine Verlagerung der PAK ist durch die hohe Bindungsstärke und geringe Wasserlöslichkeit fast unmöglich, trotzdem konnten Grundwasserkontaminationen beobachtet werden. Grund dafür ist, daß die Beweglichkeit und Löslichkeit der PAK durch Lösungsvermittler erhöht werden kann. Als Lösungsvermittler dienen lösliche Huminstoffe, Mineralöl oder Tenside.

Nach [16] sind Grundwasserkontaminationen unter nicht extrem belasteten Böden mit Humusauflage nicht zu erwarten. Der mikrobielle Abbau der PAK im Boden wird durch die geringe Wasserlöslichkeit und die starke Sorption behindert [16]. Bild 24 zeigt ein Schema der möglichen Eliminierungspfade beim biologischen Abbau der PAK.

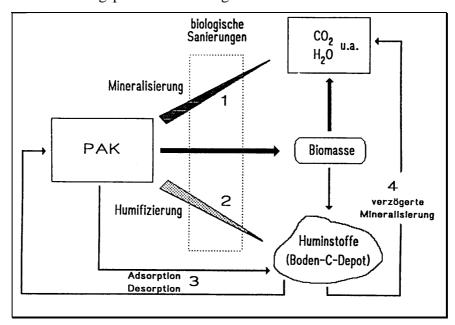


Bild 24 Mögliche Eliminierungspfade beim biologischen Abbau der PAK [77]

5.4.1.3 Pflanzenschutzmittel (PSM)

Die Anzahl der eingesetzten Pflanzenschutzmittel ist sehr groß. Daher ist es nicht möglich, allgemeine Angaben zum Verhalten dieser Stoffklasse im Boden zu machen. PSM können im Boden gefiltert werden. Weiterhin werden PSM sehr unterschiedlich an die Bodenmatrix adsorbiert. Dabei erfolgt die Bindung vor allem an Huminstoffe, weil diese eine recht große Oberfläche besitzen und die verschiedensten Bindungsmöglichkeiten aufweisen [16]. PSM können mit Bodenbestandteilen kovalente (> 80 KJ/mol) oder Dipol-, Wasserstoffbrückenund van-der-Waalssche-Bindungen (10 - 40 KJ/mol) eingehen. Bei ionischen Verbindungen, deren Dissoziation vom pH-Wert unabhängig ist, können Ionen aus den Huminstoffen gegen Ionen aus den Pestizidverbindungen ausgetauscht werden. Daneben gibt es aber auch Verbindungen, deren Dissoziation und damit die Bindung an Huminstoffe vom pH-Wert abhängig ist. Pestizide werden weiterhin biologisch und chemisch abgebaut, wobei in Böden der mikrobielle Abbau überwiegt. Dieser erfolgt metabolisch oder cometabolisch. [41] Allerdings kann der Abbau von der Alterung der PSM negativ beeinflußt werden, d.h. er verlangsamt sich. Dieses Phänomen wird darauf zurückgeführt, daß die PSM-Rückstände stärker im Boden gebunden werden und so dem Abbau weniger zugänglich sind. [94] Ein witerer wesentlicher Eliminationsprozeß ist die Verflüchtigung.

Die Mobilität der PSM und damit die Gefahr einer Grundwasserkontamination ist in [16] dargelegt. Neben den dort genannten Eigenschaften der Stoffe hängt die Gefahr der Grundwasserverschmutzung außerdem vom Grundwasserstand und den Eigenschaften der Filterstrecke ab. Schließlich ist die Persistenz der Schadstoffe noch von Bedeutung. Je leichter abbaubar ein Pestizid ist, je langsamer es sich in einem Boden bewegt und je länger die Filterstrecke ist, desto größer ist die Möglichkeit eines vollständigen Abbaus vor Erreichen des Grundwassers. Entscheidenden Einfluß hat hierbei die Bodentemperatur. Sie bestimmt sowohl den Abbau als auch die Sickerrate.

5.4.1.4 Leichtflüchtige chlorierte Kohlenwasserstoffe (LCKW)

LCKW sind im Boden und Grundwasser sehr mobil. Ihre Ausbreitung im Grundwasser beträgt bis zu 2 km. Dementsprechend stellt die Verdünnung den wesentlichen Mechanismus der Verringerung von Konzentrationen dar. Da die meisten LCKW eine höhere Dichte als Wasser aufweisen, sinken sie im Aquifer ab. [122]

Die C-Cl- Bindung kann nur von wenigen Mikroorganismen gespalten werden, daher ist die Persistenz der LCKW sehr hoch. In Tabelle 33 ist die biologische Abbaubarkeit der häufigsten Verbindungen aufgeführt.

Tabelle 33 Biologische Abbaubarkeit von LCKW [41]

LCKW	Biologische Abbaubarkeit
TRI, PER, Dichlormethan	2 - 18 Monate
Dichlorethan	3 - 12 Monate
Chloroform, Tetrachlorkohlenstoff	24 Monate

Der Abbau erfolgt aerob schneller als anaerobe. [41] LCKW werden im Boden nur gering gebunden. Laut [41] ist die Bindung an Humus sehr gering, an Tonminerale dagegen höher. Da die Tonminerale negativ geladene Oberflächen besitzen und somit stark hydrolisiert sind, ist die Adsorptionsfähigkeit der LCKW vom Wassergehalt des Bodens abhängig. Nach [16] werden LCKW durch Humus mehr gebunden als durch Tonminerale. Sie sind aber in der Lage, in die Zwischenschichten der Tonminerale einzudringen. Das Sorptionsverhalten der LCKW kann durch das Vorhandensein anderer CKW beeinflußt werden, indem Konkurrenz an den Bindungsstellen auftritt. Zwischen den Humusgehalten und der Sorbierbarkeit bestehen Zusammenhänge: ungesättigte LCKW werden stärker gebunden als gesättigte, eine geringere Wasserlöslichkeit bedingt eine stärkere Sorption. Die Verlagerung der LCKW erfolgt im Boden schneller mit der Bodenluft als mit dem Sickerwasser. Da viele LCKW schwerer sind als Wasser und sich teilweise kaum mit Wasser mischen, wird eine vertikale Bewegung zum Grundwasser gefördert, die zusätzlich durch die geringe Polarität unterstützt wird. Da LCKW verschiedene Dichten im Vergleich zum Wasser besitzen, gibt es auch eine unterschiedliche Ausbreitung und Bewegung mit dem Sicker- und Grundwasserstrom. Manche LCKW (z.B. Methylenchlorid) bilden in Wasser eine eigene Phase aus und sammeln sich am Boden des Wasserkörpers. Andere mit höheren Molekulargewichten und einer geringeren Dichte liegen dem Grundwasserkörper auf.

Tabelle 34 Versickerung, Verflüchtigung, Sorption und Halbwertzeit des Abbaus verschiedener LCKW im Boden [16]

Substanz	Halbwertzeit	Verflüchtigung	Versickerung	Sorption
	Monate	%	%	K _{oc}
Ethane				
1,1- Dichlorethan	1 – 5	-	-	-
1,2- Dichlorethan	1 – 5	~ 50	~ 50	19 - 71
1,2- Dichlormethan	1 – 5	-	-	7 - 36
1,1,1- Trichlorethan	> 9	~ 73	25	55 - 178
1,2,2- Trichlorethan	> 9	~ 90	~ 10	81 - 220
Trichlormethan	5 – 10	-	-	60 - 80
Ethene				
1,1- Dichlorethen	< 1	-	1	10 - 20
1,2- Dichlorethen	< 1	-	-	10 - 20
Tetrachlorethen	< 1	13	5	100 - 200
Trichlorethen	0,2 - 18	90	< 1	50 - 360
Sonstige				
Tetrachlorkohl.	10 – 20	~ 56	35	71
Vinylchlorid	> 9	~ 5	36	10 - 12

Verdampfungsverluste tragen zur Verminderung der LCKW- Belastung in Böden bei. Sie sind teilweise genauso groß wie die Auswaschungsverluste.

In Tabelle 34 sind für verschiedene LCKW im Boden die Anteile der Versickerung, Verflüchtigung und Sorption sowie die Halbwertzeit des Abbaus aufgeführt.

5.4.1.5 Aromatische Kohlenwasserstoffe (AKW)

In Böden werden Benzole, Toluole, Phenole, Styrol und Xylol nur mäßig an Humus oder Tonminerale gebunden. Die Bindungsformen werden stark durch die Substituenten der Aromaten bestimmt. OH- Gruppen in ortho- Stellung bewirken eine Zunahme, OH- Gruppen in meta- Stellung eine Abnahme der Sorption. Die Mobilität der AKW ist sehr verschieden. Chlorierte Phenole wandern langsamer und werden stärker gebunden als die Aromaten Benzol, Xylol und Toluol. Nitrobenzol und Toluol werden als hoch mobil bzw. mäßig mobil eingestuft, m- und p- Xylol als wenig mobil und o- Xylol als mäßig mobil. Dem Xylol ähnlich verhält sich auch Styrol. Beachtet werden muß, daß diese Einstufung anhand physikalischchemischer Daten vorgenommen wurde, aber ein Transport der Verbindungen nicht nur in gelöster Form, sondern auch an mobile Fulvosäuren gebunden erfolgen kann. In Tabelle 35 sind für verschiedene AKW die Anteile der Sorption, Verflüchtigung, Versickerung, des Abbaus sowie die Mobilität dargestellt.

Tabelle 35 Verhalten verschiedener AKW im Boden [16]

Substanz	Koc	HWZ	Abbau	Verflüchtigung	Versickerung	$\mathbf{R}_{\mathbf{f}}$
		d	%	%	%	
Benzol	38 – 83	35	-	-	-	1.34
Ethylbenzol	600	-	-	-	-	-
Toluol	80 – 100	< 7	2	86 – 98	-	-
Xylol	210	88	50 - 80	1 – 4	1 - 35	2.15
Phenol	27	7 - 36	24	23	< 1	-

R_f = Retentionskoeffizient als Maß der Mobilität

HWZ - Halbwertzeit

5.4.1.6 Petrochemische Produkte, Kraftstoffe, Öle und Schmiermittel

Die Sorption hydrophober Öle und verschiedener Mixturen langkettiger, gesättigter und ungesättigter Alkane, Naphthalene, Benzole usw. wird wesentlich durch die chemischen Eigenschaften und die Zusammensetzung der Einzelstoffe beeinflußt. Die Verbindungen sind wenig wasserlöslich und gehen mit Bodenbestandteilen hydrophobe Bindungen ein. Diese basieren auf Verteilungsprozessen zwischen der organischen Phase des Adsorbens und der Ölmixtur. Mixturen sind Verbindungen verschiedener organischer Bestandteile mit unterschiedlichen chemischen Eigenschaften. Diese können sich teilweise kompetitiv hinsichtlich der Sorption verhalten. Durch Ölverunreinigungen wird die Sorption und die Filterwirkung gegenüber anderen organischen Schadstoffen verändert, der Boden wird hydrophob, wobei die Wirkung auf sandigen Böden größer ist als auf lehmigen. Öle und

Petroleumprodukte versickern im Boden in Abhängigkeit ihres spezifischen Gewichts, der dynamischen Viskosität und der Permeabilität. Dieselkraftstoff, Schwer-, Heiz- und Rohöl versickern langsamer als Wasser. Das maximale Aufnahmevermögen entspricht in etwa der Feldkapazität beim Wasser. Hoch viskose Verunreinigungen werden von grobsandigen Materialien besser aufgenommen als von feinkörnigen. Die Restsättigung ist in Tabelle 36 für verschiedene Bodenarten dargestellt.

Tabelle 36	Restsättigung R nach 30 Tagen an Mineralölen in natürlichen Lockergesteinen [16]	

Bodenart	k _f - Wert (m/s)	R (l/m³)
Kies	<1 x 10 ⁻²	5
Sandiger Kies, kiesiger Sand	1 x 10 ⁻² - 1 x 10 ⁻³	8
Kiesiger Sand, Grob- und Mittelsand	1 x 10 ⁻³ - 1 x 10 ⁻⁴	15
Mittel-, Feinsand	1 x 10 ⁻⁴ - 1 x 10 ⁻⁵	25
Feinsand, schluffiger Sand	1 x 10 ⁻⁵ - 1 x 10 ⁻⁶	40

Das Bild 25 zeigt die Ausbreitung und Versickerung von Ölen. Da das spezifische Gewicht von Rohölprodukten < 1 ist, bildet sich auf dem Grundwasserkörper eine Ölphase aus. In der gesättigten Zone tritt eine Mischphase trotz der geringen Wasserlöslichkeit der Verbindungen auf. In der ungesättigten Zone ist die Versickerung von der Porosität des Bodens abhängig. Petroleumprodukte haben ein anderes Versickerungsverhalten als Rohöl. Besonders leichtsiedende Derivate wie Benzin bilden im Boden zusätzlich eine gasförmige Phase aus. Die Tiefenverlagerung von Rohöl erfolgt langsamer als die Horizontale Ausbreitung. Benzin dagegen wandert wegen der geringeren Viskosität schneller.

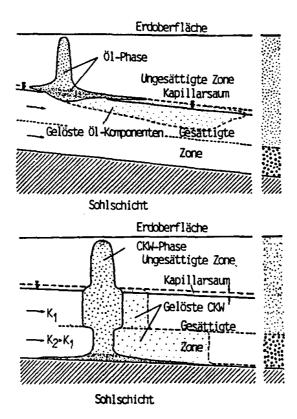


Bild 25 Verhalten organischer Fluidphasen mit niedrigerer (a) und höherer (b) Dichte als Wasser im Boden [16]

Die meisten Ölbestandteile können an Humus gebunden werden, trotzdem kommt es zu tiefreichenden Verlagerungen in den Unterboden. Bei Erreichen des Grundwassers bildet sich dort auf der Oberfläche ein Ölfilm aus.

Der vollständige Abbau von Mineralölen erfolgt in einem Zeitraum von 40 - 50 Jahren. Dabei haben Standortbedingungen einen bedeutenden Einfluß auf die Abbaugeschwindigkeit. Aerobe Bedingungen und höhere Temperaturen (20 - 30°C) beschleunigen den Abbau. In sandigen Böden erfolgt der Abbau rascher als in tonreichen. Die Abbaurate wird bei Dieselöl stark durch die Konzentration im Boden bestimmt. Eine Zunahme der Konzentration von 1 auf 10% bewirkt eine Zunahme des Abbaus um das 1,7fache [16]. Aus Tabelle 37 kann das Abbauverhalten von Erdölprodukten entnommen werden.

Tabelle 37	Abbauverhalten v	on Erdölprodukten [16]

Substanz	g/kg	Bodenart	Abbau na	Temperatur	
			%	d	°C
Kerosen	7,0	S	100	60 – 100	-
Petroleum	1,5	LS	23 - 33	49 - 56	22 – 25
Diesel	10,1	-	90	42	28
Schweröl	3,5	SL	14 - 17	450	-

Untersuchungen durch [39] haben ergeben, daß die auf Straßen anfallenden organischen Schadstoffe sich im Untergrund nicht so weit ausbreiten wie anorganische. Grund dafür ist, daß sie im Gegensatz zu anorganischen Stoffen einem mikrobiellen Abbau unterliegen. Bei hydrogeologischen Gegebenheiten, die mit denen des Untersuchungsgebietes vergleichbar sind, kann nach [39] davon ausgegangen werden, daß die Reichweite des Einflußbereiches von Straßen auf das Grundwasser nicht von organischen sondern von anorganischen straßenspezifischen Stoffen bestimmt wird.

5.4.2 <u>Verhalten von Schwermetallen im Boden</u>

Forschungsergebnisse zur Charakterisierung der Bindungsformen von Schwermetallen zeigen, daß in Böden eine sehr große Zahl fester und gelöster Verbindungen auftreten können. Mögliche Bindungsformen sind in der folgenden Übersicht dargestellt. [26]

Tabelle 38 Bindungsformen der Metalle in Böden [26]

fest	Grenze			gelöst	
	Konv	entionell			
	0,4	-5 μm			
im Silikatgitter primärer N	anorganische Komplexe				
		(Aquokomplexe,	Oxo-,	Hydroxo-,	Carbonato-,
		Chlorokomplexe)			
schwerlösliche Metallsalze	und Oxide	organische Kompl	exe		
(Sulfide, Carbonate, Phosp	hate, Silikate, Cyanide,	, (einfache Komplexe, mehrzählige Komplexe (Chelate))			
Oxide, u.a.)					
an Oberflächen adsorbiert					
(unspezifisch und spezifisch	adsorbiert)				

5.4.2.1 Cadmium

Cadmium ist im Boden besonders bei niedrigen pH- Werten als sehr mobil einzustufen. Es wird mineralisch und organisch gebunden. Bei pH < 6.5 ist der organisch gebundene Anteil weniger leicht mobilisierbar als der mineralisch gebundene.

Bei erhöhten Chloridgehalten kommt es zur Bildung von Cadmium-Chloro-Komplexen. Diese vermindern die Cadmiumbindung im Boden. Bei stark reduzierten Bedingungen ist eine Ausfällung als Sulfid möglich. Bei pH > 7,5, sehr hohem Cadmiumgehalt (> 50 mg/kg) und kalkhaltigem Boden kann Cadmium als Karbonat ausfallen. [41]

5.4.2.2 Blei

Blei ist im Boden sehr immobil und weist bei pH- Werten > 5 eine sehr geringe Löslichkeit auf. Erst bei pH < 4 nimmt die Löslichkeit und damit die Verlagerbarkeit zu. Bodenproben mit hohem Gehalt an organischer Substanz weisen eine wesentlich geringere Löslichkeit von Blei auf als Proben mit niedriger organischer Substanz.

Der Humusgehalt wirkt also in stark sauren Bereichen stärker löslichkeitserniedrigend als mineralische Bestandteile des Bodens. Blei wird von allen Schwermetallen am stärksten durch spezifische Adsorption gebunden. Insbesondere die Sesquioxide weisen eine hohe, mit dem pH- Wert steigende Bindungskapazität für Blei auf. Das so gebundene Blei kann nur zu geringen Anteilen gegen Alkali- und Erdalkaliionen ausgetauscht werden. Bei pH < 4,5...4 überwiegt die Bindungskapazität der Huminstoffe, so daß der größte Teil des Bleis an die organische Substanz gebunden ist. Die Bleifestlegung durch organische Substanzen erfolgt vor allem durch die Bildung unlöslicher metallorganischer Komplexe, die eine sehr hohe Stabilität aufweisen. Dagegen können lösliche organische Komplexbildner eine Mobilisierung des Bleis bewirken. Besonders bei pH > 6 wird die Bleilöslichkeit durch die Bildung von Chelatkomplexen erhöht. Eine Erhöhung der Mobilität durch die Bildung löslicher organischer Komplexe findet außerdem unter stark reduzierenden Bedingungen statt.

In Böden mit hohem Blei- und Phosphorgehalten bilden sich schwerlösliche Bleiphosphate. In carbonathaltigen Böden wird die Existenz von Bleicarbonat oder bleihaltigen Carbonaten vermutet. Unter reduzierenden Bedingungen und bei Anwesenheit von Sulfidionen fällt Blei als Sulfid aus. Eine Verlagerung von Blei erfolgt nur in sehr geringem Maße. Ca. 80 % des immittierten Bleis werden in den oberen 20 cm des Bodens festgelegt. Simulationen haben ergeben, daß selbst unter stark sauren Bedingungen nach 10 Jahren noch 99 % des zugeführten Bleis in den oberen 50 cm des Bodens festgelegt waren. [103] [26]

5.4.2.3 Nickel

Nickel kann als relativ mobil eingestuft werden. Die Bindung im Boden erfolgt insbesondere an Sesquioxide und Tonminerale. Weiterhin ist ein Einbau in mineralische Komponenten möglich, was eine Immobilisierung bewirkt. Bei pH < 5,5 nehmen die Gehalte an

wasserlöslichem und austauschbarem Nickel zu, damit steigen auch die Verlagerbarkeit und Verfügbarkeit. Die Bildung löslicher organischer Komplexe kann ebenfalls zu einer Mobilisierung des Nickels führen, besonders unter reduzierenden Bedingungen. [103]

5.4.2.4 Chrom

Chrom ist weitgehend immobil. Die Bindung erfolgt vor allem an Sesquioxide und Tonminerale. Organisch gebundenes Chrom kommt wahrscheinlich nur in sehr geringen Anteilen vor. Chrom liegt unter natürlichen Bedingungen hauptsächlich in dreiwertiger Form vor. Aber auch Cr (VI)- Verbindungen sind möglich. $HCrO_4^-$ und CrO_4^{2-} werden in sauren Bereichen innerhalb von 1 - 2 Wochen im Austausch gegen OH^- Ionen durch Eisenoxide festgelegt und damit weitgehend immobilisiert. Im neutralen bis alkalischen Bereich dauert dieser Prozeß länger. Bei pH < 4,5 liegt Chrom als Cr^{3+} - Ion vor und wird vor allem durch Fe (III)-Oxide adsorbiert. Bei höheren pH-Werten können $Cr(OH)_3$ und teilweise auch $Cr_2O_3 \cdot H_2O$ als schwerlösliche Verbindungen vorhanden sein. Die Gehalte an wasserlöslichem und austauschbarem Chrom sind dagegen sehr gering. Sie steigen nur im stark sauren Bereich an. [103]

5.4.2.5 *Kupfer*

Die Bindung von Kupfer erfolgt bei pH < 6 vor allem an Huminstoffe und im neutralen Bereich an Sesquioxide. Das an Sesquioxide adsorbierte Kupfer ist nur sehr schwer wieder desorbierbar. Kupfer wird von allen hier betrachteten Schwermetallen am stärksten in löslichen Organo-Komplexen gebunden. Bei pH > 6 kann dieser Anteil 99 % betragen. Unter reduzierenden Bedingungen kann eine Fällung als Sulfid erfolgen. [41]

5.4.2.6 Zink

Zink gilt als relativ mobil. Es wird sowohl an die organischen als auch an die mineralischen Bestandteile des Bodens gebunden. Bei pH > 7 wird Zink besonders an Sesquioxide gebunden, im mäßig bis schwach sauren Bereich dagegen an Huminstoffe. Bei pH- Werten < 5 nimmt die Affinität gegenüber diesen Bodenbestandteilen stark ab, bleibt aber gegenüber Tonmineralen in relativ hohem Maß erhalten. Bei pH > 6 liegt Zink zu 60 - 80 % in löslichen organischen Komplexen, bei pH > 5 vor allem als Zn²⁺- Ion vor. Unter reduzierenden Bedingungen kann Zink als Sulfid ausgefällt werden. [41]

5 Schadstoffe im Boden 77

5.4.2.7 Die Beurteilung der relativen Bindungsstärke der Böden für Schwermetalle [27]

Einschätzung der relativen Bindungsstärke im Oberboden (FSMo):

Zur Einschätzung der Bindungsstärke wird für den 30 cm starken Oberboden der pH- Wert bestimmt. Dazu werden 10 g Boden mit 25 ml 0,01 M CaCl₂- Lösung versetzt und nach der Gleichgewichtseinstellung der pH-Wert gemessen. Tabelle 39 ist der Ausgangswert der Bindungsstärke in Abhängigkeit vom pH- Wert zu entnehmen. Als Ausgangsbodenart wird Sand mit einem Tongehalt < 5 % und einem Humusgehalt < 2% festgelegt.

Der Einfluß höherer Ton-, Sesquioxid- und Humusgehalte wird durch entsprechende Zuschläge berücksichtigt. Dabei wird für das jeweilige Element die relative Bindungsstärke aus Tabelle 25 entnommen. In Abhängigkeit zum Humus-, Sesquioxid- oder Tongehalt kann dann aus Tabelle 40, Tabelle 41 und Tabelle 42 der Zuschlag abgelesen werden.

Der Tongehalt kann mittels Fingerprobe ermittelt werden [22] Bei Vorherrschen von kaolinitischen Tonmineralen wird der Zuschlag um eine halbe Einheit verringert.

Der Humusgehalt kann aus der Bodenfarbe nach [28] abgeleitet werden. Besteht der Humuskörper aus Streustoffen, d.h. bei geringem Humifizierungsgrad (z 1 - 2), wird der Zuschlag um eine Einheit verringert.

Der Sesquioxidgehalt wird normalerweise schon über den Tongehalt mit berücksichtigt. Allerdings führen hohe Eisenoxidgehalte zu Zuschlägen nach Tabelle 42. Sie lassen sich aus der intensiven Braun- bzw. Rotfärbung nach einer Munsell-Tafel [22] bestimmen.

Liegt die Summe der Werte nach den Tabelle 39 bis Tabelle 42 über 5, gilt die Bindungsstärke 5.

Treten sehr hohe Sulfidgehalte auf, erkennbar an schwarzen Reduktionsfarben und H₂S-Geruch, weisen alle Elemente die sehr hohe Bindungsstärke 5 auf.

Bei Rostfleckigkeit und gleichzeitig häufiger Vernässung mit zeitweiligen Reduktionserscheinungen, wie sie bei Gleyen mit hohen Grundwasserständen und stark vernäßten Pseudogleyen auftreten, kann zeitweilig eine höhere Mobilität von Schwermetallen, die an Fe/Mn-Oxide gebunden sind, auftreten. Bei der Vernässungsstufe 4 [22] ist der Zuschlag aus Tabelle 42 um eine Einheit zu verringern, bei den Vernässungsstufen 5 und 6 entfällt er ganz.

Bei dem aus den Tabellen ermittelten Ergebnis gilt, je geringer die Bindungsstärke ist, umso empfindlicher reagiert ein Boden auf Metallbelastungen. Dabei ist zu beachten, daß die Auswertung nur für Böden mit geringer Vorbelastung gilt. Ist die Vorbelastung höher (Werte Tafel DVWK 212 zwischen normal und den Grenzwerten nach Klärschlammverordnung), wird die Wertung der Bindungsstärke nach Tabelle 39 um mindestens eine Einheit vermindert. Die Vorbelastung läßt sich über Laboranalysen ermitteln. Das gleiche gilt für antagonistische und synergistische Wirkungen zwischen den verschiedenen Schwermetallen; z.B. vergrößern hohe Pb- Gehalte die Cd- Mobilität.

TE 1 11 00 D 1				** *** /	~ ~1 \
Tabelle 39 Rela	ative Bindungsstärke der .	Ausgangsbodenart in	Abhängigkeit vom	nH-Wert (CaCl ₂)

Metall	Relative Bindungsstärke FSM bei pH-Werten von									
	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6	6,5	7 - 8
Cd	0	0 - 1	1	1 - 2	2	3	3 – 4	4	4 - 5	5
Mn	0	1	1 - 2	2	3	3 - 4	4	4 - 5	5	5
Ni	0	1	1 - 2	2	3	3 - 4	4	4 - 5	5	5
Co	0	1	1 - 2	2	3	3 - 4	4	4 - 5	5	5
Zn	0	1	1 - 2	2	3	3 - 4	4	4 - 5	5	5
Al	1	1 - 2	2	3	4	4 - 5	5	5	5	5
Cu	1	1 - 2	2	3	4	4 - 5	5	5	5	5
Cr(III)	1	1 - 2	2	3	4	4 - 5	5	5	5	5
Pb	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5
Hg	1	2	3	4	5	5	5	5	5	5
Fe(III)	1 - 2	2 - 3	3 - 4	5	5	5	5	5	5	5

Wertung der FSM: 0 = keine, 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch

Tabelle 40 Zuschläge zur Berücksichtigung des Humusgehaltes

Humusstufe	Humusgehalt	Bindungsstärke des Humus nach Tabelle 25					
Н	%	2	3	3 – 4	4	5	
1 – 2	< 2	0	0	0	0	0	
3 – 4	2 - 8	0	0 - 1	0 – 1	0 – 1	0	
5	8 – 15	0 - 1	0 - 1	1	1	1 – 2	
6	> 15	0 - 1	1	1	1 – 2	2	

Tabelle 41 Zuschläge zur Berücksichtigung des Tongehaltes bzw. der Bodenart 1)

Tongehalt	Bodenart	Bindungsstärke des Tones nach Tabelle 25					
%		2	3	4	5		
< 5 (8)	S, Su2	0	0	0	0		
5 - 15 (17)	St2, S12, S13, Su, Us, U	0	0	0 – 1	0 – 1		
17 – 25	S14, U1, Uls, Ls, Lu, St3, Ts4	0	0 – 1	0 – 1	1		
24 – 45	T1, Ts2,3, Tu, Lts, Lt	0	0 – 1	1	1 – 2		
> 45	Т	0	1	1 – 2	2		

1) Je 25 Gew.-% Kies bzw. Steinen ist der Zuschlag um 0,5 zu erniedrigen.

Tabelle 42 Zuschläge zur Berücksichtigung höherer Eisenoxidgehalte

Sesquioxideinfluß nach Tabelle 25	Einfluß höherer Eisenox Value	idgehalte auf FSM bei H	ue ≤ 7.5 YR u. Chroma:
	0 – 1	1 - 1,5	> 1,5
3	0	0 – 1	1
4	0	1	1-2
5	0	1 – 2	2

5 Schadstoffe im Boden 79

Beurteilung der Gefährdung des Grundwassers mit Schwermetallen:

Neben der Schwermetallbindung im Oberboden sind für die Gefährdung des Grundwassers auch die Eigenschaften des Unterbodens und des Untergrundes bis zum grundwasserfreien Bodenraum sowie die Sickerraten von Bedeutung.

Zur Ermittlung der relativen Bindungsstärke des grundwasserfreien Bodenraumes FSMt wird zunächst nach Tabelle 39 die relative Bindungsstärke des jeweiligen Elementes in Abhängigkeit vom pH-Wert herausgesucht. Der Zuschlag zur Berücksichtigung des Humusgehaltes (Tabelle 40) und der Bodenart (Tabelle 41) des Oberbodens wird entsprechend des Humusgehaltes bzw. der Bodenart des Unterbodens nach (Tabelle 43) erhöht. Erhöhte Eisenoxidgehalte werden durch Zuschläge nach Tabelle 42 berücksichtigt. Bei stark quellenden oder schrumpfenden Böden (Spaltenbreite in 5 dm Tiefe zeitweilig > 1 cm) wird der Zuschlag nach Tabelle 41 und Tabelle 43 und um eine Stufe niedriger angesetzt, als sich aus der jeweiligen Bodenart ergeben würde.

Der Einfluß der jährlichen klimatischen Wasserbilanz KWBa wird nach Tabelle 44 berücksichtigt. Die KWBa kann für ebene Lagen bei der nächstgelegenen Station des Deutschen Wetterdienstes erfragt werden. Sie ist die Differenz von Jahresniederschlag und Verdunstung.

Die Grundwassergefährdung mit Schwermetallen hängt weiterhin von der Länge der Filterstrecke über dem mittleren Grundwasserhochstand ab. Die Grundwassergefährdungsstufe kann in Abhängigkeit von der Bindungsstärke FSMt und der Grundwasserstufe [22] aus Tabelle 45 entnommen werden.

Tabelle 43 Zuschläge zur Berücksichtigung des Humusgehaltes und der Bodenart des Unterbodens bzw. des Untergrundes

Unterbodeneigenschaft	Zuschlag
h3 - h6 bzw. > 2% Humus	bis zu 1
Ul, Uls, St3, Sl4, L, T	bis zu 1

Tabelle 44 Einfluß der klimatischen Wasserbilanz

KWBa		Bindungsstärke FSMt nach Tabelle 39 bis Tabelle 43					
Kurzzeichen	mm/ Jahr	0	1	2	3	4	5
1	0 - 100	0 - 1	2	3 - 4	4 – 5	5	5
2	100 - 200	0	1 – 2	3	4	4 - 5	5
3 – 4	200 - 400	0	1 – 2	2 - 3	3 – 4	4 - 5	5
5 – 6	> 400	0	1	2	3	4	5

Wertung der FSMt: 0 = keine, 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch

		Grundwasserstufen					
FSMt	1	2	3	4	5	6	7 ²⁾
0 – 1	5	5	5	5	5	5	5 – 4
2	5	5	4	4	4	4	3
3	5	5	4	3	3	3	2
4	5	5	4	3	3	2	1
5	5	5	3	2	2	1	1

Tabelle 45 Grundwassergefährdung FSMw¹⁾

Beeinflussung der Bindungsstärke:

Wie die Tabellen zeigen, ist die Bindungsstärke vom pH- Wert des Bodens sowie dem Gehalt an organischer Substanz, an Tonmineralen und Sesquioxiden abhängig. Daher kann sie in einem gewissen Maße beeinflußt werden, vor allem durch die Erhöhung des pH- Wertes aber auch durch die Erhöhung der Gehalte an organischer Substanz, Sesquioxiden und Tonmineralen. Die Erhöhung des pH- Wertes kann durch Ausbringen basisch wirkender Ca-Dünger, die der Sesquioxide durch Zufuhr von Eisenoxid (Rotschlamm), die der Tonminerale durch Beimengen von Bentonit oder tonreichen Boden- bzw. Sedimentmaterials erfolgen. Die Ausbringung von Tonmergel erhöht neben dem Tongehalt auch den pH- Wert.

5.4.3 Verhalten von Auftausalzen im Boden

Zur Erhöhung der Verkehrssicherheit werden nach Schneefall oder bei Vereisung Auftausalze, vorwiegend Natriumchlorid, bei Temperaturen unter - 10 °C auch Kalzium- und Magnesiumchlorid, auf die Straßen gebracht. [48]

Die NaCl-Zufuhr bewirkt einen Austausch von vorwiegend Ca- und Mg-Ionen durch Na-Ionen. Dadurch findet ein Anstieg der pH-Werte bis in den alkalischen Bereich statt. Im humiden Klimabereich erfolgt vom Frühjahr bis Herbst eine Auswaschung des leichtlöslichen NaCl wie auch der durch Na-Eintausch freigesetzten Kationen Ca, Mg und K. Durch die hohe Na-Belegung der Austauscher besitzen Straßenrandböden die Neigung zur Verschlämmung und Dichtlagerung und werden dann durch einen ungünstigen Luft- und Wasserhaushalt sowie eine behinderte Durchwurzelung und Nährstoffaufnahme gekennzeichnet. [103] Chlorid belastet das Grundwasser am stärksten, da es als Anion sehr schlecht im Boden zurückgehalten wird. Bei dem Versickerbecken des Bundesautobahnabschnittes der A3 zwischen dem Frankfurter Kreuz und Frankfurt Süd wurde eine über 500 m lange Chloridfahne gemessen. Das Wasser mit erhöhten Chloridgehalten sinkt aufgrund der höheren Dichte in den unteren Teil des Grundwasserleiters ab und wird im Unterstrom von weniger belastetem Grundwasser überschichtet und verdünnt. Die Chloridgehalte des belasteten Grundwassers zeigen einen deutlichen jahreszeitlichen Verlauf mit erhöhten oder hohen Werten im Februar, März und April und mit geringen Werten im Oktober und November.

¹⁾ FSMw- Stufen: 1 = sehr gering, 2 = gering, 3 = mittel, 4 = stark, 5 = sehr stark

²⁾ von Grundwasser weitgehend unbeeinflußte Böden (mittlerer Grundwasserhochstand tiefer 2 m)

Natrium ist im Grundwasser ebenfalls zeitweilig erhöht. Im Gegensatz zu den Chloridionen erfolgt bei den Natriumionen auf dem Weg zum Grundwasser aber ein zeitweiliger Kationenaustausch. Allerdings wird das Natrium aufgrund seiner großen Hydrathülle nicht sehr fest an Bodenkolloide gebunden und bleibt nur vorübergehend erhalten, wenn es in größeren Mengen wie über Auftausalze in den Boden eingebracht wird und der Boden kolloidreich ist. [38] [48]

Daß Natrium langsamer ausgewaschen wird als Chlorid, zeigen die Tiefenverteilungen (Tabelle 46) beider Substanzen an der Bundesstraße 3. Die Messungen erfolgten im Herbst 1984 nach der Streusalzanwendung im Winter 1983.

Tabelle 46 Tiefenverteilung von Natrium und Chlorid an der B3 [48]

Entfernung zur Straße	0,8 m		0,8 m	
Probenahmestelle und Schadelement	B 9		B 10	
Tiefe [cm]	Natrium	Chlorid	Natrium	Chlorid
0 – 10	39	62	45	72
10 – 20	58	45	99	70
20 – 30	68	43	107	75
30 – 40	74	42	118	73
40 – 50	60	41	125	68

Zu erkennen ist, daß das Chlorid die Profile bereits verlassen hat. Die etwa gleichen Gehalte über alle Tiefenstufen kennzeichnen den natürlichen Grundwert. Natrium dagegen ist noch mit höheren Gehalten in den tieferen Bodenschichten vorhanden. [48]

6 Modellierung des Schadstoffverhaltens im Boden

6.1 Grundlagen der Modellierung

Mit Hilfe von Simulationsmodellen, die die maßgebenden Vorgänge im Boden beschreiben, können unter Berücksichtigung der jeweiligen spezifischen Randbedingungen und Belastungen Prognosen des Schadstoffverhaltens im Boden erstellt werden.

Die beim Wasser- und Stofftransport in der ungesättigten Bodenzone auftretenden Phänomene sind bereits im Kapitel 4.1 beschrieben worden. Bei der Modellierung des Schadstofftransportes müssen die einzelnen Transportphänomene formuliert und in ein Gesamtkonzept integriert werden. Nach [41] unterscheidet man zwei Gruppen von Stofftransportmodellen:

- Stofftransportmodelle auf der Grundlage der Transportgleichung
- Kompartiment-, Platten- oder Speicherzellenmodelle.

Die Modelle der ersten Gruppe beinhalten eine analytische oder numerische Lösung der Transportgleichung. Meist wird nur der eindimensionale vertikale Wasser- und Stofftransport betrachtet. Reaktive Transportmodelle bestehen meist aus einer Kombination von Transportmodellen mit chemischen Reaktionssystemen. Bei den mehrdimensionalen geochemischen Modellen wird der Chemismus des Grundwasserleiter/Grundwasser-Systems meist auf wesentliche Prozesse reduziert. Umgekehrt werden kompliziertere chemische einfachen Zusammenhänge mit Transportprozessen verknüpft. Anpassungsrechnungen können auch unvollständig erkundete, komplizierte hydraulische Verhältnisse in adäquate, prognostisch zuverlässige Modelle übertragen werden. Die Einbeziehung chemischer und biochemischer Prozesse ist bisher nur für relativ einfache Systeme gelungen. Bei der Modellierung geochemischer Prozesse, u.a. auch bei der Regenwasserinfiltration, müssen zunächst die elementaren Reaktionen einzeln verstanden werden. Dazu gehören:

- Säure-Base-Reaktionen,
- •Lösungs-Fällungs-Reaktionen,
- •Sorptionsreaktionen,
- •Redoxreaktionen.

Diese Reaktionen wurden bereits in der vorliegenden Arbeit erläutert. Desweiteren sind umfassende Ausführungen diesbezüglich in [104] nachzulesen. Als zweites müssen für die beteiligten Stoffe und Reaktionen die zugehörigen Reaktionskonstanten vorliegen.

Den Modellen der zweiten Gruppe liegt die Vorstellung einer Kaskade von Wasser- und Stoffspeichern zugrunde. Über ein Zeitintervall wird der Wasserhaushalt jeder einzelnen Zelle bilanziert. In jeder Zelle wird von einer vollständigen Durchmischung des Stoffgehaltes ausgegangen. Dispersionsvorgänge werden nicht extra berücksichtigt. Wechselwirkungen zwischen fester und flüssiger Phase der einzelnen Zellen können mit Hilfe von Adsorptions-Isothermen berechnet werden.

In [41] werden Ansätze der Stofftransportmodelle auf Grundlage der Transportgleichung beschrieben. Betrachtet wird dabei nur die eindimensionale Wasserströmung. Die eindimensionale Betrachtung ist eine Vereinfachung der physikalischen Vorgänge, da neben der vertikalen Strömung in Richtung Grundwasser auch eine seitliche Bewegung stattfinden wird. Durch die Vernachlässigung der seitlichen Ausbreitung erhält man für den Bodenkörper unterhalb der Versickerungsanlage eine etwas zu hohe hydraulische und stoffliche Belastung. Die Auswirkungen dieser Vereinfachung können vernachlässigt werden.

Mit Verfahren und Modellen zur Belastungs- und Risikoabschätzung von Schadstoffeinträgen in Böden und Grundwasser beschäftigt sich auch [78]. Hier werden stoffunspezifische Modelle und Modellansätze sowie Modelle und Modellansätze für die Schadstoffgruppen Schwermetalle, Säurebildner und organische Schadstoffe zusammengestellt.

6.2 Übersicht von Stofftransportmodellen

Stofftransportmodelle wurden ursprünglich für eine Vorhersage des Schadstoffverhaltens in der Landwirtschaft entwickelt. Seither gibt es eine große Zahl neu entwickelter oder modifizierter Programme, die den verschiedensten Anwendungsgebieten zuzuordnen sind.

Bei [41] ist eine sehr umfassende Übersicht über die verschiedenen Stofftransportmodelle zu finden. Diese Modelle dienen u.a der Beschreibung von Schwermetalltransporten und –anreicherungen, Nitrat- und Pestizidverlagerung oder auch zur Beschreibung der Verlagerung organischer Stoffe im Boden. Die Charakterisierung erfolgt nach ihrem originärem Einsatzbereich, dem Konzept des Stoff- und Wassertransportes, nach der Art der implementierten Adsorptions-Isotherme und nach der Modellierung des Abbaus. Diese Übersicht ist im folgenden dargestellt.

Nach [41] hängt die Entscheidung, wie gut ein Modell ist, von mehreren Faktoren ab:

- Plausibilität des Ansatzes für die vorliegende Problemstellung
- zu erwartende Genauigkeit der Simulationsergebnisse
- Umfang und Verfügbarkeit der erforderlichen Eingabedaten
- Art und Umfang der Ausgabe
- Handhabbarkeit des Modells/Stabilität der Berechnungen

Tabelle 47 Übersicht über Stofftransportmodelle

Name	Titel	Bemerkungen	
VAN GENUCHTEN/WIERENGA (1975),		Stofftransportmodelle auf Basis der Transportgleichung	
SELIM et al. (1977), FLUEHLER/JURY (1983)		Sorption: Lineare oder FREUNDLICH-Isotherme	
(zitiert in SCHMITT/STICHER 1986)		– Wassertransport: stationär	
MAYER (1978)	Modell, entwickelt zur Beschreibung des	Stofftransportmodell auf Basis der Transportgleichung	
	Schwermetalltranportes	- Sorption: FREUNDLICH-Isotherme (Besonderheit: Hysteresis bei der Sorption	
		kann mit einem konstanten Faktor berücksichtigt werden)	
		– Wassertransport: stationär	
SCHMITT/STICHER (1983, 1985, 1986)	Zwei Modelle, entwickelt zur Trendanalyse der	Modell 1:	
	Schwermetallanreicherung in	Kompartimentmodell (sehr einfach)	
	klärschlammbeschickten Böden	- Sorption: LANGMUIR-Isotherme (in der Version von 1985: modifizierte	
		LANGMUIR-Isotherme mit sigmoidem Verlauf)	
		Wassertransport: nicht explizit formuliert	
		Modell 2:	
		Stofftransportmodell auf Basis der Transportgleichung	
		Sorption: Modifizierte LANGMUIR-Isotherme	
		Wassertransport: stationär	
CXTFIT 1984 (PARKER/VAN GNUCHTEN)	Programmpaket zur Bestimmung der	Stofftransportmodell auf Basis der Transportgleichung	
hier aus: SCHNEIDER/GÖTTNER (1989):	Stofftransportparameter mit verschiedenen	- Wassertransport stationär	
	Modellansätzen	- besondere Optionen: Mobil-Immobil-Konzept, Anionenausschluß-Konzept, A	
		und Produktion	
DUYNISVELD (1984)	Stofftransportmodell zur Simulation der	Stofftransportmodell auf Basis der Transportgleichung	
	Nitratverlagerung im Boden	- keine Soption	
		– Wassertransport: stationär	
		- Besondere Option: Mobil-Immobil-Konzept	
PRZM (1984, EPA) Quellen: CARSEL et al.	Modell der US-amerikanischen Umweltbehörde	Stofftransportmodell auf Basis der Transportgleichung	
(1984), PENNEL et al. (1990), HARTER (1989)	EPA zur Vorhersage der Pestizidverlagerung im	- Wassertransport: Speicherzellenmodell	
	Boden	Sorption: Lineare Adsorptions-Isotherme	
		- Abbau: Kinetik 1. Ordnung	
		- besondere Optionen: Simulation von Evapotranspiration, Wasserentzug durch	
		Pflanzen, Oberflächenabfluß	

Name	Titel	Bemerkungen
LEACHM (1987 Cornell-University) (Quelle: HUTSON/WAGENET (1989), PENNEL et al. (1990), HARTER (1989)	Sehr komplexes Modell mit drei Teilmodellen für die Stoffgruppen Pestizide, Stickstoff und anorganische Ionen Ein reines Kompartimentmodell zur Vorhersage	Teilmodell LEACHP (Pestizide): - Stofftransportmodell auf Basis der Transportgleichung - Wassertransport: instationär, basierend auf der RICHARDS-Gleichung - Sorption: Lineare Isotherme - Abbau: Kinetik 1. Ordnung - besondere Optionen: Simulation von Evapotranspiration, Wasserentzug durch Pflanzen, Oberflächenabfluß, Erosion und Metabolitenbildung - Kompartiment-Modell - Wassertransport Berechnung mit Speicherzellenmodell - Soption: Lineare Adsorptions-Isotherme - Abbau: Kinetik 1. Ordnung
EXSOL (1987, Gesellschaft für Strahlen- und Umweltforschung, Neuherberg) (Quelle: SCHERNEWSKI et al.: 1990):		 besondere Optionen: Simulation von Evapotranspiration, Wasserentzug durch Pflanzen, Oberflächenabfluß, Erosion und Metabolitenbildung Stofftransportmodell auf Basis der Transportgleichung Wassertransport: stationär pro Horizont. EXSOL kann aber mit einem instationären Wassertransportmodell gekoppelt werden Sorption: Lineare Adsorptions-Isotherme Abbau: Verschiedene Kinetiken: 0., 1., 2. Ordnung und 0., 1., 2. Wurzelordnung Besondere Optionen: Berechnung des Übergangs in die Gasphase nach HENRY-DALTON sowie der Stoffausbreitung in der Gasphase
STOMOD (1987) (FRÄNZLE et al., 1987):	Modell zur Berechnung der Stoffverlagerung im Boden. Von den Autoren eingesetzt zur Simulation der Verlagerung von Pestiziden, Cadmium und Phosphat	
SWARTJES (1990)	Modell zur Simulation der Schwermetallverlagerung im Boden. Anwendung erfolgte für die Nachsimulation der Schwermetallverlagerung bei der Abwasserverrieselung	 Stofftransportmodell auf der Basis der Transportgleichung Wassertransport. Instationäre Berechnung auf Grundlage der RICHARDS-Gleichung Sorption: FREUNDLICH-Isotherme

Bislang wurden von verschiedenen Autoren Stofftransportmodelle miteinander verglichen. So führte bspw. Pennell et al. [35] einen Vergleich fünf verschiedener Modelle durch, bei dem der Pestizidtransport getestet wurde. Weitere Vergleiche von Stofftransportmodellen findet man bei :

- Harter 1989 [36]
- Schernewski et al. (1990) [37]
- Schneider/Göttner (1989) [38]

Nach Angaben von [41] können die Erfahrungen mit der Anwendung unterschiedlicher Stofftransportmodelle wie folgt ausgewertet werden:

- Wenn die Modellergebnisse nach der Modellierung mit entsprechenden Meßdaten kalibriert werden, führt dies zu recht befriedigenden Ergebnissen.
- Die Simulation mit im Labor bestimmten und nicht nachkorrigierten Parametern (z.B. Adsorptions-Koeffizienten) ist unter Umständen mit großen Unsicherheiten behaftet.
- Aufgrund der angegebenen Veröffentlichungen läßt sich kein Modellkonzept allgemein favorisieren. Es erscheint durchaus wahrscheinlich, daß die jeweils geeignetere Konzeption auch von dem zu simulierenden Stoff abhängt. Bspw. ist eine sehr genau formulierte Transportkomponente bei einem schwach adsorbierenden Stoff von größerer Bedeutung als bei einem stark adsorbierenden.

6.3 Stofftransportmodell LEACHP

Eine interessante Studie zur Anwendbarkeit von Stofftransportmodellen auf die Schadstoffproblematik bei der Regenwasserversickerung ist bei [41] zu finden. Das dabei benutzte Modellierungsprogramm LEACHP ist eine modifizierte Form des Programms LEACHM, welches ursprünglich für die Belange der Landwirtschaft entwickelt wurde.

[41] beschreibt zuerst den **Modellansatz**. Hier werden die Bedingungen für möglichst realitätsnahe Modelldaten definiert. So muß der Wassertransport mit Hilfe einer Differentialgleichung zweiter Ordnung bestimmt werden Die Wechselwirkung zwischen Boden und Bodenlösung wird in LEACHP durch die lineare Adsorptions-Isotherme beschrieben und der Abbau mit einem Ansatz 1. Ordnung definiert. Anschließend erfolgt eine **Sensitivitätsanalyse**, d.h. es wird untersucht, inwieweit sich die einzelnen Modellparameter auf das Berechnungsergebnis auswirken. Dies geschieht indem die Meßdaten mit den berechneten Werten verglichen werden. Letztlich wird noch eine langfristige Prognose des Verhaltens von Schwermetallen in einer Versickerungsanlage aufgestellt.

Die Arbeit von [41] zeigt, daß die mittels LEACHP simulierten Konzentrationen für Cu, Zn und Pb eine sehr gute Übereinstimmung mit den gemessenen Daten aus den Lysimeteruntersuchungen der Versickerungsanlage Nienburg/Langendamm ergaben. Auch für Cd ergab die Simulation befriedigende Ergebnisse, wobei für dieses Element die höchsten Abweichungen zwischen Simulationswert und Meßwert auftraten.

⇒ Das Modell ist in der Lage das Adsorptionsverhalten von Schwermetallen hinreichend genau zu beschreiben.

Neben der Eignung für die Beschreibung des Adsorptionsverhaltens wurde bereits bei HARTER (1989) [36] dokumentiert, daß sich das Modell LEACHP für die Beschreibung des Verhaltens von organischen Schadstoffen eignet.

6.4 Modellierung mit PHREEQC [29]

Die geochemische Gleichgewichtsmodellierung bildet neben der Simulation von Grundwasserströmungs- und Transportvorgängen eine wichtige Säule bei der Prognose von Beschaffenheitsänderungen von Grundwässern.

Geochemische Rechenprogramme modellieren umfangreiche Wechselwirkungen gelöster Stoffe untereinander und in Wechselwirkung mit definierten Fest- und Gasphasen von in Wasser gelösten Stoffen. Sie bestehen aus drei wesentlichen Teilen:

- dem chemischen Modell
- der mathematischen Behandlung und Umsetzung des chemischen Modells
- der Datenbasis.

Das chemische Modell fast aller gegenwärtig benutzten geochemischen Rechenprogramme geht von der Ionenassoziationstheorie aus. Weitere Voraussetzungen sind die Massenerhaltung und die Annahme des Gleichgewichts im System. Das nichtlineare Gleichungssystem der Komplexbildungs-, Fällungs-, Oberflächenkomplex- und Redoxgleichgewichte wird unter der Berücksichtigung der Massenerhaltung iterativ gelöst [79].

Bezüglich dieses Programms liegen dem Herausgeber umfangreiche Erfahrungen vor.

7 Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswässern

7.1 Theoretische Grundlagen der Versickerung

Versickerung ist nach DIN 4047 der "abwärts gerichtete Abzug des Wassers in den Boden". In der DIN 4049 wird zwischen Infiltration (Zugang von Wasser in die Erdrinde), Durchsickerung (Durchgang des Wassers durch den Sickerraum) und Zusickerung (Zugang von Wasser durch die Grundwasseroberfläche) unterschieden. [112] Die Begriffe der Wasserbewegung im Boden werden in Bild 26 dargestellt.

Das Wasser ist im Boden den physikalischen Einflüssen Gravitation, Kapillarität und Viskosität unterworfen. Nach den Erscheinungsformen und der unterschiedlichen Bindungsintensität wird das Wasser in Sickerwasser, Haftwasser, Kapillarwasser und Grundwasser unterteilt. Zum Sickervorgang kommt es erst, wenn in Abhängigkeit von der Korngröße die elektrostatischen Anziehungskräfte dem Wassertropfen den Weg durch Poren und Hohlräume freigeben. [40]

Bei der Wasserbewegung unterscheidet man zwischen der Bewegung im gesättigten und ungesättigten Bereich. Bei der gesättigten Strömung, die auch als Einphasenströmung bezeichnet wird, strömt nur Wasser durch die Poren des Bodens. Der vorhandene Porenraum ist vollständig mit Wasser gefüllt.

Bei der ungesättigten Wasserbewegung dagegen befindet sich neben dem durchströmenden Wasser noch Luft im Porenraum. Daher spricht man auch von einer Mehrphasenströmung.

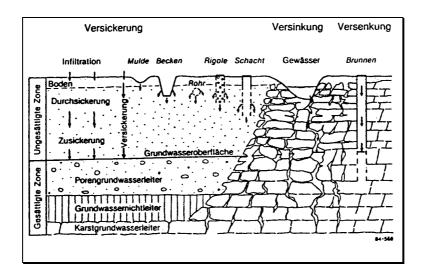


Bild 26 Begriffe der Wasserbewegung im Boden [112]

7.1.1 <u>Einphasenströmung</u>

Die Wasserbewegung in der gesättigten Bodenzone kann durch die Darcy-Gleichung beschrieben werden.

$$Q = k_f \cdot F \cdot I$$

O - Durchflußrate in m³/s

k_f - Durchlässigkeitsbeiwert in m/s

F - durchflossene Fläche in m²

I - hydraulisches Gefälle

Das Filtergesetz gilt nur bei laminarer, stationärer und wirbelfreier Strömung. Der auf den durchströmten Querschnitt bezogene Volumenstrom ist als Filtergeschwindigkeit definiert:

$$v_f = Q / F = k_f \cdot I$$

Die Filterströmung gilt nur solange als laminar, wie die Filtergeschwindigkeit einen bestimmten Schwellenwert nicht überschreitet, da sonst der Einfluß der Trägheitskräfte nicht mehr vernachlässigt werden kann. [112]

7.1.2 Mehrphasenströmung

Die teilweise Wassersättigung des Bodens ist der übliche Zustand bei der Versickerung. Die Höhe der Versickerungsrate ist abhängig vom Durchmesser der leitenden Poren. Durch Entwässerung eines Teils der Poren reduziert sich die Wassersättigung des Bodens. Da die Grobporen zuerst entwässert werden, sinkt die Wasserleitfähigkeit zu Beginn des Entwässerungsvorganges besonders stark. Der Durchlässigkeitsbeiwert k_u der ungesättigten Bodenzone ist somit kein bestimmter Wert wie der k_f-Wert, sondern ist eine Funktion der Sättigung.

Die Wasserbewegung im ungesättigten Bereich kann durch die Darcy-Gleichung und den Vorgang der Diffusion beschrieben werden. [112]

7.1.3 Die Abflußbildung in der Bodenzone

In [118] wird ein Konzept vorgestellt, das eine Unterscheidung der Bodenporensysteme in Makro- und Mikroporen vornimmt. Makroporen sind dadurch charakterisiert, daß das in den Poren befindliche Wasser nicht maßgeblich durch Kapillarkräfte beeinflußt wird. Die Wasserbewegung in den Makroporen verläuft turbulent, heterogen und anisotrop (Fließgeschwindigkeiten bis mehrere cm/s). Bei den Mikroporen dagegen ist die Bewegung laminar und homogen. Die Mikroporen dienen im Wesentlichen der Wasserspeicherung. Die Aufteilung in nur zwei Porensysteme ist zwar eine starke Vereinfachung, aber sie bietet die Möglichkeit, die beobachteten Fließprozesse im Boden zu erklären. Bei der Versickerung wird ein Zusammenspiel der beiden Porensysteme in Gang gesetzt.

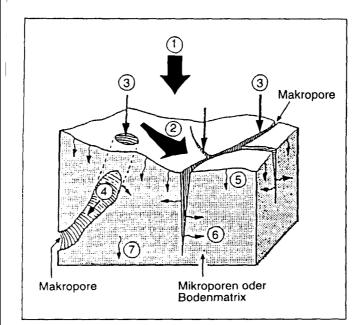


Bild 3 Abflußbildung in der Bodenzone: 1) Niederschlag, 2) Oberflächenabfluß, 3) Versickerung in eine Makropore, 4) Makroporenfluß, 5) Versickerung in Mikroporen, 6) Übertritt von einer Makropore in die Bodenmatrix, 7) Matrixfließen (nach [33] verändert)

Bild 27 Abflußbildung in der Bodenzone [118]

Ob es überhaupt zu einer Wasserbewegung in den Makroporen kommt, hängt von den bestehenden Feuchtebedingungen im Boden, der Niederschlagsintensität und der gesamten Niederschlagsmenge ab. Wenn die Bodenmatrix trocken ist, wird das in die Makroporen infiltrierende Wasser, bedingt durch das hohe Saugspannungspotential der Matrix, seitlich aus den Makroporen weggeführt. Bei einem positiven Matrixpotential ist auch der Übertritt von Wasser aus einer gesättigten Bodenmatrix in die Makroporen möglich. Dieses Zusammenspiel der Porensysteme macht die Bedeutung der Mikroporen deutlich. Sie speichern das Wasser und sorgen damit für unterschiedliche Vorfeuchten. Diese haben dann wiederum einen Einfluß auf den Makroporenfluß.

Niederschlagswasser, das in den Makroporen versickert, wird erst in größeren Tiefen von der ungesättigten Bodenmatrix aufgenommen. Besonders gute Infiltrationsraten werden erreicht, wenn das verfügbare Wasser nur kurzfristig die Mikroinfiltrationsraten überschreitet und das überschüssige Wasser als Oberflächenwasser in das Makroporensystem gelangt. Je mehr Makroporen in einem Boden ausgebildet sind, umso besser kann das Wasser infiltrieren. [118]

Tabelle 48 zeigt die Größenbereiche für Makro- und Mikroporen sowie ihre Wasserleitfähigkeit.

LL - 37 L 33		
Porengrößenbereich	Porendurchmesser [µm]	Wasserleitfähigkeit
Gröbst- Poren	> 1000	schnelldränend
Grobporen, weite	50 - 1000	schnelldränend
Grobporen, enge ¹⁾	50 - 10	langsamdränend
Mittelporen ¹⁾	10 - 0,2	wasserhaltend

< 0,2

Tabelle 48 Einteilung der Porengrößenbereiche und der Wasserleitfähigkeit nach dem Porendurchmesser [[16], [37]]

Die Poren größer $d=50~\mu m$ werden nach [100] als Makroporen, die Poren kleiner $d=50~\mu m$ als Mikroporen klassifiziert. Der Anteil an Grobporen in einem Boden ist in der Regel um so größer, je grobkörniger, d.h. je sand- oder kiesreicher der Boden ist. Der Anteil der Feinporen ist umso größer, je feinkörniger, d.h. je tonreicher er ist. In Tabelle 49 wird der Porenanteil bei verschiedenen Bodenarten angegeben.[103]

Tabelle 49 Anteil des Porenvolumens und der Porengrößenbereiche am Gesamtvolumen von Mineralböden und organischem Boden [103]

Bodenart	Porenvolumen	Grobporen	Mittelporen	Feinporen
	%	%	%	%
Sande	46 ± 10	30 ± 10	7 ± 5	5 ± 3
Schluffe	47 ± 9	15 ± 10	15 ± 7	15 ± 5
Tone	50 ± 15	8 ± 5	10 ± 5	35 ± 10
Anmoore	70 ± 10	5 ± 3	40 ± 10	25 ± 10

7.2 Eignung von Standorten für die Versickerung

Der ökologische Gedanke, der der Versickerung zugrunde liegt, beinhaltet, daß das Regenwasser durch die Bodenschichten gereinigt wird, bevor es den Grundwasserkörper erreicht. Dazu muß der Boden die Fähigkeit aufweisen, das anfallende Wasser schnell aufzunehmen sowie Schadstoffe zu filtern, zu puffern und zu transformieren. Zu diesem Zweck ist eine gewisse Sickerstrecke und eine bestimmte Sickergeschwindigkeit erforderlich. Gleichzeitig darf es zu keiner Verunreinigung des Wassers im Boden kommen. [113]

Neben den im Kapitel 3.3 dargelegten Bodeneigenschaften ist eine weitere notwendige Voraussetzung für die Versickerung von Niederschlagsabflüssen ein ausreichend mächtiger und hydraulisch ausreichend leitfähiger Grundwasserleiter, damit das zusickernde Wasser rasch abgeleitet werden kann, ohne daß es zu örtlichen Anhebungen des Grundwasserspiegels kommt. Außerdem ist eine Verdünnung eventuell durchdringender Schadstoffe erwünscht. Hierbei muß zwischen Porengrundwasserleitern und Kluftgrundwasserleitern unterschieden werden. Porengrundwasserleiter haben aufgrund einer relativ großen Oberfläche die wesentlich höhere Reinigungswirkung als Kluftgrundwasserleiter. Dieser Nachteil kann aber durch eine ausreichend mächtige Deckschicht ausgeglichen werden.

¹⁾ Durch einige Autoren (z.B. [27]) wird die Größe der Mittelporen mit 50 - 0,2 μm angegeben.

7.2.1 Bodenart

Die Bodenart liefert wichtige Hinweise für die Beurteilung der Versickerungsfähigkeit des Untergrundes. Die Bestimmung der Bodenart kann durch Auswerten von Kartenmaterial (Bodenkarte, Bodenschätzungskarte) und/oder durch Felduntersuchungen nach den Methoden der Bodenkundlichen Kartieranleitung [22] erfolgen. In [22] wird die Einteilung und Bestimmung der Bodenarten beschrieben. Die Reinigungswirkung nimmt vom kiesigen Sand über Grobsand, Mittelsand, bindigen Sand, Feinsand, Schluff bis zum Ton hin zu. In Tabelle 50 ist eine dreistufige Bewertung verschiedener Kombinationen von Grundwasserdeckschichten und Grundwasserleitern angegeben. [112]

Bei einer Mächtigkeit der Grundwasserdeckschicht über 4 m sind die Bedingungen für eine Versickerung unabhängig von der Beschaffenheit des Grundwasserleiters günstig. Bei einer zu geringen Mächtigkeit der Sickerstrecke ist die Beschaffenheit des Grundwasserleiters ausschlaggebend für die Eignung zur Versickerung. [46]

Tabelle 50 Eignung zur Versickerung verschiedener Kombinationen von Grundwasserdeckschichten und Grundwasserleitern [112]

	Grand-Masser Terrer [112]				
Eignung zur Versickerung	Grundwasserdecks	Grundwasserleiter			
	Mächtigkeit (m)	Beschaffenheit	k _f (m/s)		
Günstig	≥ 1	Ton, Schluff	< 10 ⁻⁶		
	≥ 2,5	Feinsand,	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶		
		bindiger Sand			
	≥ 4	Mittelsand, Grobsand,	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴		
		kiesiger Sand			
Mittel	< 1	Ton, Schluff	< 10 ⁻⁶		
	< 2,5	Feinsand,	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	Sande	
		bindiger Sand			
	< 4	Mittelsand, Grobsand,	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	Festgesteine,	
		kiesiger Sand		feinklüftig	
ungünstig	< 1	Ton, Schluff	< 10 ⁻⁶	Grobkies	
	< 2,5	Feinsand,	10 ⁻⁴ - 10 ⁻⁶	Festgestein mit weiten	
		bindiger Sand		Klüften und Spalten	
	< 4	Mittelsand, Grobsand,	10 ⁻³ - 10 ⁻⁴	Festgesteine,	
		kiesiger Sand		verkarstet	

7.2.2 <u>Durchlässigkeit</u>

Die Wasserleitfähigkeit des Untergrundes ist das entscheidende Kriterium für die Versickerungsleistung. Die Durchlässigkeit ist nicht nur von der Bodenart sondern auch von der Wassersättigung des Bodens abhängig. Als Vergleichsgröße gilt der k_f -Wert, der die Leitfähigkeit bei Sättigung angibt.

Die Wasserleitfähigkeit kann nicht nur durch die Körnung eines Bodens charakterisiert werden. Wurmgänge, Wurzelgänge oder Schrumpfungsrisse, die sogenannten Sekundärporen,

können die Wasserleitfähigkeit erhöhen. In Tabelle 51 werden Spannbreiten der Durchlässigkeitsbeiwerte verschiedener Bodenarten unter Einfluß von Primär- und Sekundärporen dargestellt.

Tabelle 51 Durchlässigkeitsbeiwerte von wassergesättigten Böden verschiedener Körnung [37]

Bodenart	k _f [m/s]
Sandböden	$4 \cdot 10^{-3} \text{bis } 10^{-5}$
Schluffböden	$4 \cdot 10^{-3} \text{ bis } 5 \cdot 10^{-7}$
Lehmböden	$4 \cdot 10^{-3} \text{ bis } 1 \cdot 10^{-7}$
Tonböden	4 · 10 ⁻³ bis 1 · 10 ⁻⁹

Bei Ton- und Schluffböden mit vielen Sekundärporen gilt der größere k_f-Wert, bei sekundärporenfreien Böden der kleinere Wert. [37]

Weiteren Einfluß auf die Versickerungsleistung nimmt die Lagerungsdichte des Korngerüstes. Hierbei gilt, je geringer die Lagerungsdichte ist, umso größer ist die Wasserdurchlässigkeit, Erfahrungen haben gezeigt, daß durch das Verdichten des Bodens, vor allem während der Bauphase, selbst Sandböden nahezu wasserundurchlässig geworden sind [102]. In [22] sind weitere Ausführungen zur Wasserdurchlässigkeit im wassergesättigten Boden in Abhängigkeit von der Bodenart und der Lagerungsdichte enthalten. Um auch die örtlich stark schwankende Versickerungsleistung des Bodens zu berücksichtigen, sollte die Infiltrationsrate am besten vor Ort bestimmt werden. Die Ermittlung der Durchlässigkeit kann anhand verschiedener Methoden erfolgen [8].

Die Bestimmung kann beispielsweise mit Labormethoden erfolgen. Dabei ist jedoch zu beachten, daß selbst bei größter Sorgfalt die Entnahme ungestörter Bodenproben nicht möglich ist.

Die Ermittlung der Durchlässigkeit im Feld hat sich als das günstigste Verfahren herausgestellt. Dazu werden in der Literatur u.a. die Methode nach SCHAFFER/COLLINS, die Doppelrohrmethode nach BOUWER und der Open-End-Test des US Bureau of Reclamation angegeben [112]. Letztere Methode wird als Standardverfahren empfohlen [8]. Das Verfahren des Open-End-Tests wird in [113] beschrieben.

Bei sandigen Böden ist die Bestimmung der Durchlässigkeitsbeiwerte anhand von Sieblinienauswertungen möglich. Die Verfahren nach HAZEN, ZIESCHANG und BEYER werden in [112] vorgestellt.

Die nach den unterschiedlichen Methoden ermittelten k_f-Werte führen jedoch nicht zu gleichen Ergebnissen, so daß ein gegenseitiger Abgleich notwendig ist [112]. In Tabelle 52 sind entsprechende Faktoren zur Bestimmung des Bemessungs- k_f-Wertes aufgeführt.

Tabelle 52 Bemessungs- k_f- Wert in Abhängigkeit der Bestimmungsmethode [112]

Bestimmungsmethode	Bemessungs- k _f - Wert
Abschätzung aufgrund der Bodenart gemäß Bild 28	${ m k_f}$
Laborversuche an ungestörter Bodenprobe	$k_{\rm f}/2$
Sieblinienauswertung	k _f /5
Feldversuche	2 k

Bei der Bemessung von Versickerungsanlagen nach [10] wird der Durchlässigkeitsbeiwert in der Berechnung mit $k_f/2$ berücksichtigt. Daher erfolgt für den bei Feldversuchen bestimmten k_f -Wert, mit denen die tatsächliche Versickerungsrate gemessen wird, die Berechnung mit dem Wert 2 k. [112]

Nach [10] sollte der Boden für eine Versickerung k_f-Werte im Bereich von 1*10⁻³ m/s bis 1*10⁻⁶ m/s aufweisen. Bei größeren k_f-Werten sickert der Regenwasserabfluß so schnell dem Grundwasser zu, daß eine ausreichende Aufenthaltszeit und damit eine genügende Reinigungswirkung nicht erreicht werden kann. Bei zu kleinen Durchlässigkeitsbeiwerten ist durch die damit verbundene lange Einstandsdauer zeitweise mit anaeroben Verhältnissen in der ungesättigten Bodenzone zu rechnen. Hierdurch kann der mikrobielle Abbau eingeschränkt oder ganz unterbunden werden. [46] In Bild 28 ist der versickerungsfähige Bereich dargestellt.

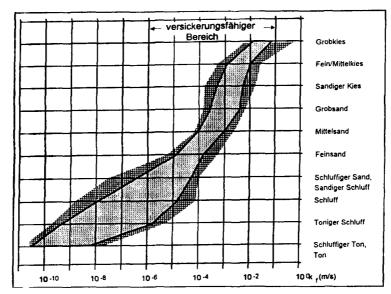


Bild 28 Wasserdurchlässigkeit von Lockergesteinen und versickerungsfähiger Bereich [46]

7.2.3 Sickerraum / Schichtdicke

Der Sickerraum bzw. die Mächtigkeit des Bodenfilters ist durch den Abstand zwischen der Sohle der Versickerungsanlage und dem höchstem Grundwasserstand definiert. Für die biologische Reinigung des Regenwassers ist die Durchsickerung humoser Deckschichten besonders wirksam. Vor allem der ca. 30 cm mächtige Oberboden weist das entscheidende Rückhaltevermögen auf [12].

Gegenüber persistenten Stoffen bietet der Boden in Abhängigkeit seiner Sorptionscharakteristik nur ein endliches Aufnahmevermögen [8]. Daher besteht die Gefahr, daß Bodenfilter bei dauerhafter Durchsickerung vor allem mit schwermetallhaltigen Abflüssen mit zunehmenden Alter in ihrer Wirksamkeit nachlassen. Es ist also langfristig unsicher, inwieweit Schadstoffe auf Dauer im Bodenkörper gehalten werden können [19]. Bei zentralen Versickerungsbecken mit $A_{red}: A_s > 15:1$ sollten daher, die Schadstoffkonzentrationen in der oberen Bodenschicht in regelmäßigen Abständen (etwa alle 10 Jahre) geprüft werden [41].

In [48] wurde die Tiefenverteilung von Blei und Cadmium an verschiedenen Straßentypen untersucht. Die Ergebnisse werden in Tabelle 53, Tabelle 54 und Tabelle 55dargestellt. Unabhängig vom Typ der Straße wurde eine Abnahme der Blei- und Cadmiumgehalte mit zunehmender Bodentiefe festgestellt. Von der Schicht 0 - 10 cm zur Schicht 10 - 20 cm verminderte sich die Belastung in der Regel auf die Hälfte, gleichgültig wie hoch die Konzentration in der Oberkrume war.

Tabelle 53 Tiefenverteilung verkehrsbedingter Schadstoffe im Boden an Autobahnen (mg/kg)

Entfernung zur Straße	2 m		2 m		1,5 m	
Probenahmestelle u. Schadelement	A 3		A 3 A 4		A 7	
Tiefe [cm]	Blei Cadmium		Blei	Cadmium	Blei	Cadmium
0 - 10	125	0,39	136	0,51	439	0,24
10 – 20	64	0,19	88	0,28	228	1,2
20 – 30	51	< 0,1	51	0,17	173	0,83
30 – 40	28	< 0,1	27	< 0,1	54	0,13
40 – 50	11	< 0,1	22	< 0,1	24	< 0,1

Tabelle 54 Tiefenverteilung verkehrsbedingter Schadstoffe im Boden an Bundesstraßen (mg/kg)

Entfernung zur Straße	0,8 m		0,8 m	
Probenahmestelle und Schadelement	I	В 9		10
Tiefe [cm]	Blei	Blei Cadmium		Cadmium
0 – 10	266	1,6	162	0,88
10 – 20	161	0,94	126	0,64
20 – 30	81	0,67	57	0,19
30 – 40	44	0,35	39	0,18
40 – 50	43	0,31	25	0,17

Tabelle 55 Tiefenverteilung verkehrsbedingter Schadstoffe im Boden an Kreisstraßen (mg/kg)

Entfernung zur Straße	0,	0,8 m		,5 m
Probenahmestelle und Schadelement	K	X 17		K 24
Tiefe [cm]	Blei	Blei Cadmium		Cadmium
0 – 10	81	0,39	48	0,13
10 – 20	41	0,11	40	< 0,1
20 – 30	28	< 0,1	35	< 0,1
30 – 40	19	< 0,1	28	< 0,1
40 – 50	38	< 0,1	29	< 0,1

Tabelle 56 zeigt die Schadstoffbelastungen in $0-4\,\mathrm{cm}$ und in $15-25\,\mathrm{cm}$ Tiefe (Bodenart: Mittelsand) sowie im Grundwasser an der Start- und Landebahn Süd des Frankfurter Flughafens. Das Grundwasser ist von einer $12-13\,\mathrm{m}$ mächtigen Grundwasserdeckschicht aus Mittel- bis Grobsand bzw. kiesigem Sand überlagert. Auch bei dieser Untersuchung wurde der größte Abbau bzw. Rückhalt bereits bis zu einer Tiefe von 25 cm festgestellt. Die im Grundwasser ermittelten Konzentrationen unterschreiten in jedem Fall die in Tabelle 11 angegebenen Grenzwerte.

	ę i i							
Schadstoff	Во	Boden						
	0 - 4 cm	0 - 4 cm 15 - 25 cm						
	mg/kg	mg/kg mg/ kg						
Blei	367 - 23	30 - 12	5 -< 2					
Cadmium	8,7 - 0,1	0,46 -<0,1	1 -<1					
Zink	1520 - 37	115 - 29	55 -< 5					
Benzo(a)pyren	21 - 0,26	0,39 - 0,03	0,002 - < 0,002					
Fluoranthen	44 - 11	0.82 - 0.21	0.031 - < 0.002					

Tabelle 56 Konzentrationen ausgewählter Spurenstoffe in Boden- und Grundwasserproben an der Startund Landebahn Süd des Frankfurter Flughafens. [112]

Die Abnahme der Schadstoffkonzentration mit der Tiefe wird auch in [116] und [21] beschrieben.

Um einen sicheren Schutz des Grundwassers zu gewährleisten, wird nach [41] eine Mächtigkeit des Sickerraumes von mindestens 1 m gefordert. In [19] wird ein Abstand von 2 m für eine gefahrlose Versickerung angegeben. In Hessen muß der Mindestabstand zwischen Flur und Grundwasser 1,50 m betragen [35]. Nach [113] ist eine Versickerungsstrecke von mindestens 80 cm ausreichend. Sie sollte hauptsächlich adsorptionsfähige Bodenpartikel vorweisen (lehmigen Sand, Feinsand und Schluff). Feinere Partikel (Ton und toniger Lehm), die eine höhere Bindungsfähigkeit besitzen, gehen mit einer geringeren Durchlässigkeit einher. Laut [10] muß für die Versickerung die Grundwasseroberfläche mindestens 1 m tiefer liegen als die Sohle der Versickerungsanlage.

Die Anwendungsbereiche für verschiedene Versickerungsanlagen sind in Tabelle 57 in Abhängigkeit vom Grundwasserflurabstand aufgeführt.

Tabelle 57	Mögliche Anwendungsbereiche von Versickerungsverfahren in Abhängigkeit vom
	Grundwasserflurabstand [46]

Grundwasser- flurabstand [m]	Versickerungsverfahren						
	Flächen	Mulden Rohr Schacht Becker Rigolen					
< 1	-	-	-	-	-		
1,0 - 1,5	+	-	-	-	-		
1,5 - 2,0	+	+	-	-	-		
2,5 - 3,5	+	+	+	-	-		
3,5 - 4,5	+	+	+	+	-		
> 4,0	+	+	+	+	+		

Bei Planung und Betrieb der Anlagen ist sicherzustellen, daß die erforderliche Bodenpassage dauerhaft wirksam bleibt, und nicht durch hydraulische Kurzschlüsse infolge von Trockenrissen oder tieferwurzelnden Pflanzen umgangen wird [42].

7.2.4 pH- Wert des Bodens

Der pH-Wert des Bodens hat einen wesentlichen Einfluß auf die Mobilität von Schwermetallen im Sickerwasserraum und im Grundwasser (s. Kapitel 4.2.3.6). Bei niedrigen pH- Werten können bei gleicher Bodenbeschaffenheit deutlich geringere Schwermetallfrachten im Boden festgelegt werden als bei höheren pH- Werten. Allerdings kann sich in alkalischen Böden die Mobilität mancher Metalle (Kupfer, Blei) durch die Bildung wasserlöslicher metallorganischer Komplexe erhöhen. Daher wird für die oberen 30 cm der Bodenschicht ein pH- Wert zwischen 6 und 8 empfohlen [108]. Für Versickerungsanlagen ohne Oberbodenpassage sollte dieser pH-Wert im gesamten Sickerwasserraum eingehalten werden.[41]

7.2.5 Bodenbelastung

Flächen mit vorhandenen Altlasten können eine Gefährdung für das Grundwasser darstellen. Durch eine Versickerung auf Altlastenstandorten kann ein zusätzlicher Stoffaustrag hervorgerufen werden Daher ist bei der Versickerung darauf zu achten, daß sich im Untergrund keine Kontaminationen aus bisherigen Geländenutzungen befinden [119]. In Verdachtsfällen sind Untersuchungen erforderlich, um eine schadlose Versickerung gewährleisten zu können [108].

In jüngster Zeit werden im Straßenbau immer mehr Recyclingstoffe verwendet. Besonders industrielle Abfallstoffe wie Hochofenschlacken werden für die Ausbildung der Tragschichten von Straßen eingesetzt. Bei gepufferten Baugründen ist aufgrund der zumeist alkalischen Reaktion dieser Stoffe nicht mit einer Lösung eventuell vorliegender Schwermetalle zu rechnen. Anders verhält es sich bei sauren Böden, da hier eine Mobilisierung der in den Schlacken enthaltenen Schwermetalle möglich ist. Eine Verwendung derartiger Stoffe ist daher auf staunassen und auf sauren Böden nicht zu empfehlen. [19]

Alle in den Sickerraum der Versickerungsanlage eingebauten Materialien (z.B. Füllmaterial der Rigolen, aufgebrachter Mutterboden) dürfen auch im Dauerbetrieb der Anlage keine nachteiligen Veränderungen des Sickerwassers hervorrufen. Dazu sind ggf. Qualitätsprüfungen vorzunehmen. [80]

7.3 Art und Aufbau von Versickerungsanlagen

7.3.1 Zentrale Versickerungsanlagen

Aufgrund der hohen hydraulischen Belastung werden bei zentralen Anlagen fast ausschließlich Versickerungsbecken verwendet. Das Verhältnis der angeschlossenen befestigten Fläche (A_{red}) zur versickerungswirksamen Fläche A_s ist in der Regel größer als

- 15:1. Um eine lange Betriebsdauer einer solchen Anlage gewährleisten zu können, ist es zumeist erforderlich Absetzbecken vorzuschalten oder eine spezielle Absetzzone zu integrieren, denn die im Regenabfluß mitgeführten Schwebstoffe verursachen eine Selbstabdichtung und somit eine Beeinträchtigung der Versickerungsleistung. Folgende Ausführungen können bei der Gestaltung von Versickerungsbecken unterschieden werden:
- ⇒ Versickerungsbecken mit vorgeschaltetem gedichteten Absetzbecken als Naßbecken
- ⇒ Versickerungsbecken mit vorgeschaltetem Absetzbecken
- ⇒ Versickerungsbecken mit integrierter Absetzzone
- ⇒ Versickerungsbecken mit vorgeschaltetem gedichteten Absetzbecken als Trockenbecken

Die Planungsgrundsätze und die Bemessung dieser Becken sind [9] und [12] zu entnehmen.

7.3.2 <u>Dezentrale Versickerungsanlagen</u>

Erfolgt die Versickerung auf den Grundstücken selbst, auf denen der Niederschlagsabfluß entsteht, handelt es sich um dezentrale Anlagen. Nach [10] gibt es derzeit 4 verschiedene dezentrale Versickerungsanlagen, welche auch in Kombination miteinander auftreten können:

- Flächenversickerung
 - durchlässig befestigte Flächen
 - \Rightarrow Mineralbeton
 - ⇒ wasserdurchlässige Pflasterungen
 - ⇒ wasserdurchlässiger Asphalt
 - undurchlässig befestigte Flächen mit seitlich angeordneten ebenen Versickerungsflächen
- Muldenversickerung
- Rigolen- und Rohrversickerung
- Schachtversickerung

Kombinationsmöglichkeiten:

- Retentionsraumversickerung
- Kombination von Mulden- und Rohr-/Rigolenversickerung
- Kombination von Schacht- und Rohr-/Rigolenversickerung

Eine genaue Beschreibung des Aufbaus und der Funktionsweise erfolgt in [10]. Die kombinierten Anlagen sind in [37] beschrieben. Die mathematische Bemessung ist u.a. in [10], in [112] oder [37] ausgeführt.

Eine Übersicht über die einzelnen zentralen und dezentralen Versickerungsanlagen ist in Tabelle 58 aufgezeigt.

Tabelle 58 Übersicht über Versickerungsanlagen

	Rohrversickerung	Retentionsraumversickerung	Mulden- und Rohr-/ Rigolenversickerung	Schacht- und Rohr-/ Rigolenversickerung
Prinzip	perforiertem Versickerungsrohr in einem überdeckten Graben überdeckten Graben mit nachgeschaltetem Versickerungsstreifen Kombination von einem gegen den Untergrund abgedichteten Teich oder Graben mit nachgeschaltetem Versickerungsstreifen		Retention durch Mulden und stark verzögerte Ableitung und Versickerung durch darunter oder danebenliegende Rigolen	Verbindung von Versickerungsschächten durch Rohr-/Rigolenanlagen, direkte Infiltration in die sickerfähige Schicht
Reinigungsleistung	Keine	sehr gut	sehr gut	Keine
Wartung	nur Säuberung und Rohrspülung beschränkt möglich	Regelmäßige Reinigung und Kontrolle, Mahd und Rückschnitt der Wasserpflanzen, Vertikutierung	Regelmäßige Reinigung und Kontrolle, übliche Grünflächenwartung, Reinigung der Schächte	Regelmäßige Kontrolle und Reini-gung der dichtenden Bodenauflagen und Schlamm- schichten im Schacht, bedingt Rohrspülungen möglich
Zielgröße der Dimensionierung	Länge der Anlage	Speichervolumen	Speichervolumen der Mulde und Länge der Rigole	Speichervolumen der Schächte und der erforderliche Querschnitt der Rigole
Durchlässigkeit des Untergrundes	Gut bis mäßig gut	gut bis mäßig gut	auch gering möglich	Gut bis mäßig gut
Einsatzgebiet	Umgehung oberflächennaher undurchlässiger Bodenschichten	Kleinklimaverbesserung	-Retentionsraum bei Einleitung in ein Gewässer - Mulden-Rigolen-System auch bei konta- miniertten Standorten anwendbar	In Baugebieten, in denen kein Platz für offene Versickerungsanlagen ist
Anforderungen an das zu versickernde Wasser	keine Schwebstoffe	Gering	Gering	Hoch. Wasser muß schadstofffrei und nahezu schwebstofffrei sein
Vorteile	- geringer Flächenbedarf	- relativ geringer Flächenbedarf	- relativ geringer Flächenbedarf	- hohe Sickerleistung
	- guter Rückhalt	- gute Retention	- gutes Retentions- und Ableitungs-	- sehr geringer Flächenbedarf
	-schnelle Verteilung punktueller Einleitungen	- Gestaltung als Biotop	vermögen	- Erweiterung möglich
	- Anlage bedingt überschaubar	- gute Wartungsmöglichkeiten		- auch bei oberflächennahen undurchlässigen Schichten möglich
				- schnelle Verteilung punktueller Einleitungen
Nachteile	- kaum Wartungs- und Kontrollmöglichkeiten	- regelmäßige Wartung	- keine Wartung möglich	- keine Reinigungsleistung
	- keine Reinigungsleistung			- hohe qualitative Anforderungen an das zu
	- Wasser muß frei von Schwebstoffen sein			versickernde Wasser
TZ 11 .1	W. I. I.	W. I.I.	W 11 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1 1	- nur beschränkte Wartung möglich
Kombinationen	- Vorschaltung von Retentions- und	- Vorschaltung von anderen Retentions- anlagen	- Vorschaltung anderer Reinigungsanlagen	- Vorschaltung von Retentions- und
	Reinigungsanlagen	- Vorschaltung von Leichtstoffabscheidern	- Kombination mit anderen Retentions- und Versickerungsanlagen	Reinigungsanlagen
	- Kombination als Schacht-/Rohrversick- erung, Mulden-/Rohr-/Rigolenversickerung	- Nachschaltung von anderen Reinigungs- und	Versiekerungsamagen	- Ausbau mit Filtersack aus Geotextilien im Schacht
	- Ausbau als Versickerungsfeld (mehrere Stränge)	Versickerungsanlagen		Schaent

	Flächenversickerung	Muldenversickerung	Beckenversickerung	Schachtversickerung	Rigolenversickerung
Prinzip	breitflächige Versickerung und Infiltration	- wie bei Flächenversickerung mit zusätzlicher Speicherung	flächige Versickerung über die belebte Bodenschicht in einem humusiertem Becken und Infil- tration über feinkörnige Deck- schichten oder direkt in die sickerfähige Schicht	Punktförmige Einleitung mit Hilfe eines Versickerungs- schachtes durch künstlich eingebrachte Filterschichten	Über einen künstlich eingebrachten Kieskörper mit großer aktiver Versickerungsfläche und hohem Reinigungs-vermögen wird oberflächennah versickert und zusätzlich über die feinkörnigen Deckschichten geführt
Reinigungsleistung	sehr gut bis gut	sehr gut	gut, Erhöhung durch Absetzzonen bzw. –becken	Keine	sehr gering
Wartung	regelmäßige Mahd	regelmäßige Reinigung, Kontrolle und Vertikulierung	Regelmäßige Reinigung und Kontrolle, eine Grünflächenwartung und die Beseitigung von Bodenauflagen und Schlammschichten	Regelmäßige Kontrolle und Rei- nigung der dichtenden Bodenauf- lagen und Schlammschichten im Schacht	keine Wartungsmöglichkeit, Kontrolle nur über zwischengeschaltete Schächte (Abstand ca. 50 m möglich)
Zielgröße der Dimensionierung	Flächenbedarf	Muldenvolumen	Beckenvolumen	Schachtvolumen	Rigolenlänge
Durchlässigkeit Untergrund	gut bis mäßig	mäßig		mäßig gut bis gut	mäßig gut
Einsatzgebiet	Hofflächen, Rettungswege, Parkwege, Sportplätze	wenn der Platz für die Flächen- versickerung nicht ausreichend	Bei Einzugsgebieten > 1 ha	innerhalb von Städten bei gering. Flächenangebot, Einzelobjekte	Umgehung oberflächennaher undurchlässiger Boden-schichten
Anforderungen an das zu versickernde Wasser	Gering	gering	gering	keine Schwebstoffe	keine Schwebstoffe
Vorteile	- sehr gute bis gute Reinigungs- leistung, d.h. auch stärker ver- schmutztes Wasser kann ver- sickert werden - geringer Wartungsaufwand - geringer technischer Aufwand	- gute Retention - einfache Wartung - geringer technischer Aufwand - gute Integration in Grünbereichen - vielfältige Bepflanzung mögl.	- gute Reinigungsleistg. u. Rückhalt - geringe Anforderung an das zu versickernde Wasser, Schwan- kungen werden abgepuffert - als Biotop gut integrierbar in die Landschaft - gute Wartungsmöglichkeiten	- sehr geringer Platzbedarf - nur geringe Nutzungsbeschränkungen des Grundstückes - Anwendung auch bei oberflächennahen undurchlässigen Schichten - gute Kontrollmöglichkeiten	 geringer Flächenbedarf gutes Rückhaltevermögen nur gering eingeschränkte Nutzbarkeit des Grundstückes
Nachteile	- geringe Speicherfähigkeit - großer Flächenbedarf	 häufig Mißbrauch, z.B. Abladen von Müll Flächenbedarf 10-20% der angeschlossenen Fläche 	- evtl. Gefahr für spielende Kinder, deshalb Einfriedung - Selbstdichtung der Sohle bei nachlässiger Wartung	 keine Reinigungsleistung beschränkte Wartungsmöglichk. Anforderungen an das zu versickernde Wasser, z.B. keine Schwebstoffe hohe Sanierungskosten bei Verstopfung der Anlage 	- keine Wartunsmöglichkeit - sehr geringe Reinigungs- leistung - im Wasser dürfen keine Schwebstoffe enthalten sein
Kombinationen	 Vorschaltung von Retentions- und Reinigungsanlagen Kombination mit Mulde, Rigole oder Rohr Bepflanzung Oberflächenbefestigung 	- Kombination mit Rigolen, - Vorschaltung von Retentions- oder Reinigungsanlagen	 Vorschaltung von Reinigungs- anlagen, Zulauf über Mulden, Becken mit integrierter Absetzzone und Becken mit Dauerstau 	Vorschaltung von Retentions- und Reinigungsanlagen Ausbau mit Filtersack aus Geo- textilien im Schacht Kombination mit Mulden- Rigolen-System Sickergalerie	- oberflächennahe oder unterirdische Anordnung der Rigole - mit oder ohne Einleitschacht - linienförmig, fadenförmig, abgewinkelte, vernetzte Anlagenformen - Kombination mit Mulde - Vorschaltung von Retentionsund Reinigungsanlage

7.4 Planung von Versickerungsanlagen

Die Bestimmungsgrößen zur Planung von Anlagen zur Regenwasserversickerung sind:

- Durchlässigkeitsbeiwerte der in Betracht kommenden Bodenschichten k_f [m/s],
- Maximaler Grundwasserstand unter der Geländeoberkante (Flurabstand) [m],
- Bemessungsregen, Vorgaben nach Reinhold oder örtliche Regenreihen
- pH-Wert des Bodens

Diese müssen aus Planungsdaten oder durch Untersuchungen bestimmt werden und ermöglichen die Ermittlung der erforderlichen Geometrie und des Flächenbedarf einer Versickerungsanlage.

Für die Einschätzung, welche Art von Versickerungsanlage man in Abhängigkeit der herrschenden Randbedingungen und unter Berücksichtigung des Gewässerschutzes betreiben kann, stehen derzeit keine allgemeingültigen Regelungen zur Verfügung. Nachfolgend wird auf zwei Konzepte zur Entscheidungsfindung näher eingegangen.

7.4.1 <u>Planungshilfe I</u>

Dieses Beispiel zählt zu der am häufigsten in der Literatur dokumentierten Herangehensweisen zur Planung einer naturnahen Regenwasserbewirtschaftung.

Tabelle 59 zeigt die Entscheidungsmatrix, welche von der ATV-Arbeitsgruppe 1.4.1 [12] entwickelt wurde. Ähnliche Darstellungen werden in [8], [41] und [81] vorgestellt.

Diese Entscheidungsmatrix stellt die Einsatzmöglichkeiten der unterschiedlichen Anlagen zur Regenwasserversickerung in Abhängigkeit der abflußliefernden Fläche und der hydraulischen Belastung dar. Unterschieden wird zwischen dezentralen und zentralen Versickerungsanlagen.

"Damit soll einer möglichen Anreicherung unerwünschter oder schädlicher Stoffe im Niederschlagsabfluß bei der Versickerung gegenüber der natürlichen Versickerung pro Infiltrationsfläche begegnet bzw. das Risiko eines Ausspülens von vorher zurückgehaltenen Stoffen durch erhöhte hydraulische Beschickung der Anlage verringert werden." [14]

Mit einer Oberbodenpassage läßt sich der wirkungsvollste Reinigungseffekt bei der Versickerung erzielen. Diese Versickerungsart ist deshalb immer den Möglichkeiten ohne Oberbodenpassage vorzuziehen.

Bei vielen Kombinationen ist zu erkennen, daß sie nur dann zulässig sind, wenn geeignete Vorbehandlungsmaßnahmen ergriffen werden, um Stoffe vor dem Eintritt in den Sickerraum umfassend und dauerhaft zurückzuhalten. Weiterhin sollten nach [12] die Nutzungseinschränkungen für Grundwasserschutzzonen nach den Bestimmungen des DVGW-Arbeitsblattes W 101 [30] eingehalten werden.

		dezentrale V	esickerungsa/	anlagen		entrale Versi	ckerungsanlag	e	
					A _{red} : A _s < 15:1		A _{red} : A _s > 15:1		
	Fläche/Gebietsdefinition	ohne Ober- bodenpassage	breitflächige Versickerung	(Seiten)- Mulde	ohne Ober- bodenpassage	Vesickerungs- becken	ohne Ober- bodenpassage	Versickerungs- becken	
	1	2	3	4	5	6	7	8	
1	Dachflächen in Wohn- und vergleichbaren Gewerbegebieten	++	++	++	++	++	•	++	
2	Rad- und Gehwege in Wohngebieten								
3	Hofflächen in Wohn- und vergleichbaren Gewerbegebieten		1						
4	Straßen DTV < 2.000 Kfz	-	++	++	-	++	-	+	
5	Dachflächen in sonstigen Gewerbe-/Industriegebieten								
6	Straßen mit DTV 2.000 bis 15.000 Kfz								
7	Parkierungsflächen	-	++	+	•	+	-	+	
8	Straßen mit DTV < 15.000 Kfz	-	++	+	-	+	Ł	+	
9	Landwirtschaftliche Hofflächen	•	++	+	-	-	-	-	
10	Hofflächen und Straßen in sonstigen Gewerbe-/Industriegebieten	nicht zulässig		-	nicht zulässig		nicht zulässig		

Erläuterungen: ++ in der Regel zulässig

Mit der hier aufgeführten Verfahrensweise wird die Qualität der Niederschlagsabflüsse, die Reinigungseffektivität der Versickerungsanlagen und die Einsatzbereiche in Abhängigkeit der abflußliefernden Flächen bewertet. Leider bleiben die Belastbarkeit der Gewässer, in welche das Sickerwasser eingeleitet werden soll, und die Art der Vorbehandlungsmaßnahmen bei dieser Betrachtungsweise außen vor.

7.4.2 Planungshilfe II

Eine weitere Variante zur Auswahl des Versickerungsverfahren bietet der 2. Arbeitsbericht der ATV-Arbeitsgruppe 1.4.3 "Regenwasserbehandlung" [14]. Der Grundgedanke dieser Planungshilfe bezieht sich darauf, im Rahmen der Generalentwässerungsplanung die betroffenen Gewässer als eigenständige Systeme gezielt zu untersuchen und zu bewerten, um den jeweiligen örtlichen wasserwirtschaftlichen Bedingungen und Anforderungen des Gewässerschutzes zumindest tendenziell gerecht zu werden. Da die Beschaffenheit des Regenabflusses von befestigten Flächen sehr stark differiert, müßte man theoretisch anhand von Modellrechnungen den örtlichen und zeitlichen Verlauf der Abflußbelastung beschreiben, um eine wirklichkeitsnahe Gewässerbelastung vorherzusagen. Dieses Vorgehen wird als viel zu aufwendig erachtet. Deshalb wurde die nachfolgende Planungshilfe erarbeitet, mittels derer möglich ist, die Notwendigkeit und den **Umfang** einer sinnvollen Regenwasserbewirtschaftung anhand der Bewertungskriterien:

- ⇒ Belastbarkeit des Gewässers
- ⇒ Verschmutzung des Niederschlags
- ⇒ Verschmutzung der Oberflächen
- ⇒ Wirkung der Regenwasserbehandlung einzuschätzen.

in der Regel zulässig mit der Möglichkeit der Entfernung von Stoffen

nur in Ausnahmefällen zulässig Versickerung nur nach Vorbehandlung in Sonderanlagen zulässig

So sollte unbehandelter Niederschlagsabfluß aus der Summe der Einleitungen eines Siedlungsgebietes nicht stärker belastet sein, als das Selbstreinigungsvermögen des aufnehmenden Gewässers. Andernfalls sind Reinigungsmaßnahmen vorzuschalten oder die Maßnahme kann nicht durchgeführt werden.

Bei jeder Behandlungsmaßnahme wird nur ein Teil der stofflichen Belastung zurückgehalten. Aus diesem Grund ist die Restbelastung in Abhängigkeit der Art des betrachteten Stoffes und der gewählten Behandlung unterschiedlich hoch. Dies wird in der Planungshilfe in pauschaler Vereinfachung mit sogenannten Durchgangswerten D für die einzelnen Behandlungsmaßnahmen eingeschätzt. "Sie haben keine physikalische oder chemisch-Grundlage, mit der auf eine meßbare Reinigungsleistung Behandlungsanlage geschlossen werden könnte. Die Durchgangswerte sind Kenngrößen, mit deren Hilfe eine pauschale Wertung einzelner Behandlungsmaßnahmen möglich wird." [15] Diese Pauschalisierungsgrößen sind aus Gründen der Vereinfachung für die Einschätzung des Reinigungspotentials der jeweiligen Behandlungsmaßnahme eingeführt worden. Die Bewertung erfolgt auf Grundlage empirischer, heuristisch erarbeiteter Kriterien für die Abflußbelastung, die Gewässerbelastbarkeit und die Behandlungsmaßnahmen. ausreichender Gewässerschutz kann daher mit dieser Planungshilfe nicht nachgewiesen, sondern nach derzeitigem Kenntnisstand nur angenommen werden.

7.4.2.1 Bewertungskriterien

Gewässerbelastbarkeit:

In Tabelle 60 und Tabelle 61 ist unter allgemeinen Gesichtspunkten, wie z.B. Fließgeschwindigkeit, Größe, Gefälle oder besonderer Schutzbedürfnisse, die Belastbarkeit der verschiedenen Gewässertypen bewertet worden. Für den Fall, daß in ein Gewässer eingeleitet wird, das in ein anderes Gewässer mündet, bevor die Belastungen weitgehend abgebaut wurden, ist auch dieses Gewässer zu betrachten.

Tabelle 60 Bewertung der Belastbarkeit von Gewässern I [14]

Gewässerbelastbarkeit (G)						
Gewässertyp	Beispiele	Тур	Punkte			
Meer	offene Küstenregion	G1	33			
Fließgewässer	großer Fluß	G2	27			
	kleiner Fluß	G3	22			
	Bergbach '	G4	20			
	Flachlandbach	G5	18			
Seen und sehr langsam fließende Gewässer	abgeschlossene Meeresbucht gestauter großer Fluß großer See	G6	18			
	gestauter kleiner Fluß Marschgewässer	G7	16			
	gestauter Bergbach	G8	14			
	gestauter Flachlandbach (siehe auch G15) kleiner See, Weiher	G9	12			
Grundwasser	außerhalb von Trinkwasser- einzugsgebieten	G10	10			
	Karstgebiete ohne Verbindung zu Trinkwassergewinnungs- gebieten (Nachweis erforderlich)	G11	8			

Tabelle 61 Bewertung der Belastbarkeit von Gewässern II [14]

Gewässerbelastbarkeit (G)						
Gewässertyp	Beispiele	Тур	Punkte			
Fließgewässer	weniger als 2 h Fließzeit bei MQ bis zum nächsten Wasserschutz- gebiet mit Uferfiltratgewinnung	G12	14			
	weniger als 2 h Fließzeit bei MQ bis zum nächsten See					
	Einleitung innerhalb eines Wasserschutzgebietes mit Uferfiltratgewinnung	G13	11			
•	Badegewässer					
Seen und gestaute Gewässer	Einleitung in einen See in unmittelbarer Nähe von Erholungsgebieten	G1,4	11			
V.	Fließgeschwindigkeit bei MQ unter 0,10 m/s, ausgenommen Marschgewässer (siehe G7)	G15	10			
Grundwasser	Wasserschutzzone III B	G16	9			
	Wasserschutzzone III A	G17	5			
	Karstgebiete (siehe auch G11)	G18	0			
	Wasserschutzzone I und II] 318				
Gewässer mit Güteklasse I	In Gewässer mit Güteklasse I und in Quellregionen soll grund- sätzlich nicht eingeleitet werden	G19	0			

Niederschlagsverschmutzung:

Da nach [14] eine differenzierte Bewertung zur Gesamtbeurteilung des abfließenden Niederschlagswassers aus Siedlungsgebieten im allgemeinen nicht notwendig ist, wurde die Belastung des fallenden Niederschlags infolge Luftverschmutzung in gering bis sehr stark

verschmutzt eingeteilt. Die stoffliche Belastung kann in gelöster Form (z.B. saurer Regen) oder in partikulärer Form (z.B. Ruß) enthalten sein.

Tabelle 62 Bewertung der Niederschlagsbelastung [14]

Niederschlagsbelastung (N)				
Luftverschmutzung	Beispiele	Тур	Punkte	
gering	offene Bebauung in Gebieten mit geringem Verkehrsaufkommen	N1	1	
	Landstraßen außerhalb von Siedlungen			
normal	geschlossene Bebauung in Siedlungsgebieten mit normalem Verkehrsaulkommen	N2	3	
stark	Siedlungsgebiete mit starkem Verkehrsaufkommen	ки	5	
	Gewerbe- und Industriegebiete mit Abluft- und Staubemission			
	Siedlungsgebiete mit regelmäßi- gem Hausbrand			
sehr stark	im Einflußbereich von Gewerbe und Industrie mit besonders starken Emissionen	N4	9	

Oberflächenverschmutzung:

Auch hier bedient man sich je nach Verschmutzungsgrad der Oberflächen einer pauschalen Bewertung. Bei abweichenden örtlichen Gegebenheiten müssen die vorgeschlagenen Punkte entsprechend modifiziert werden. Zur Bewertung wurden die Niederschlagsabflüsse hinsichtlich ihrer Stoffkonzentration und der damit einhergehenden potentiellen Grundwassergefährdung in drei Kategorien eingeteilt:

- gering belastet
- normal belastet
- stark belastet

Neben diesen drei Kategorien wurde die Flächenbelastung nach Punkten unterteilt, so daß eine stärkere Differenzierung erreicht wird.

Tabelle 63 Bewertung der Flächenbelastung [14]

	Flachenbelastung (F)				
Belastung	Beispiele	Тур	Punkte		
	Gründächer	FI	5		
	Dach- und Terrassenflächen (mit Ausnahme von metalige-deckten	F2	9		
	Dachflächen, z.B. mit Kupfer, Zink oder Blei)	١.			
	Rad- und Gehwege				
	Spielstraßen	F3	12		
	kaum befahrene Verkehrsflächen in Wohngebieten	7			
	Strußen bis zu 2000 DTV		17		
	Hof- und Verkehrsflächen, Anliegerstraßen sowie nicht ständig	F4			
	frequentierte Parkplätze in Wohn- und vergleichbaren				
	Gewerbegebieten				
	Straßen von 2000 bis 15000 DTV				
	Sammel- und Hauptstraßen	7			
normal	Verkehrsflächen u. nicht ständig frequentierte Parkplätze in	F5	27		
	Misch-, Dorf-, Gewerbe- und Industriegebieten				
	Straßen über 15000 DTV				
stark	Autobahnen, sehr stark befahrene Hauptverkehrsstraßen,	7			
	Durchgangsstraßen mit überregionaler Bedeutung				
	Straßen, Plätze und Höfe mit starker Verschmutzung (z.B.	F6	35		
	Landwirtschaft, Fuhrunternehmen, Reiterhöfe, Fischmärkte)				
	stark frequentierte PkW-Parkplätze (z.B. Einkaufszentren)	7			
	metallgedeckte Dücher, z.B. mit Kupfer, Zink oder Blei	7			
	nicht überdachte Lager- und Umschlagplätze für nicht				
	wassergefährdende Stoffe				
	stark befahrene LkW-Zufahrten in Gewerbe-, Industrie oder	F7	45		
	Shnlichen Gebieten (z.B. Deponien)				
	LkW-Park- und Stellplätze	7			

Wirkung der Regenwasserbehandlung:

Um Anlagen hinsichtlich ihrer Reinigungseffektivität einschätzen zu können, wurden eine Hierarchie entwickelt. Tabelle 64 stellt eine Art Ranking von Anlagen dar, bei dem die Reinigungseffektivität der aufgelisteten Versickerungsanlagen von oben nach unten abnimmt. Voraussetzung dafür ist, daß überall die gleichen Bodenverhältnisse herrschen. Ein wichtiges Unterscheidungskriterium stellt hier die Aufgliederung nach der Mächtigkeit der Oberbodenpassage dar. Aus diesem Grund wird den Versickerungsanlagen, bei denen der Niederschlagsabfluß über den Oberboden versickert wird, eine höhere Reinigungseffektivität gegenüber eingetragenen Schmutzstoffen zugeschrieben, als bei Anlagen ohne Oberbodenpassage.

Als weiteres wichtiges Unterscheidungsmerkmal wurde die hydraulische Belastung herangezogen. Sie bestimmt bei gleicher Schadstoffkonzentration der Niederschlagsabflüsse die in die Versickerungsanlage eingetragene Schadstofffracht. Da der Boden gegenüber persistenten Stoffen, wie z.B. Schwermetallen ein endliches Aufnahmevermögen aufweist, sind hydraulisch und damit auch von der Stofffracht geringer belastete Versickerungsanlagen hinsichtlich des Grundwasserschutzes höher eingeschätzt und bei der Auswahl des Versickerung zu bevorzugen. Zur Quantifizierung der hydraulischen Belastung ist das

Verhältnis zwischen der angeschlossenen Fläche A_{red} zur versickerungswirksamen Fläche A_S entscheidend. Den besten Grundwasserschutz bietet demnach die dezentrale Flächenversickerung mit hydraulischen Belastungen von A_{red} : A_S von etwa 1:1 bis 2:1.

Bei der Muldenversickerung kann man in Abhängigkeit von der Bodendurchlässigkeit von einer hydraulischen Belastung von A_{red} : A_S von etwa 5:1 bis 10:1 ausgehen.

Zentrale Anlagen weisen die höchsten hydraulischen Belastungen auf. Sie liegen meist bei Verhältnissen A_{red} : $A_S > 15$: 1.

Die Werte, die den verschiedenen Bodenpassagen von Versickerungsanlagen zugeordnet wurden, beschreiben pauschal den Anteil der nicht zurückgehaltenen Abflußbelastung, welcher sowohl in gelöster als auch in partikulärer Form vorliegen kann.

"Ein meßbarer Wirkungsgrad für einen beliebigen Stoff kann daraus nicht abgeleitet werden, da z.B. Salze, organische Verbindungen oder mineralische Sedimente vollkommen unterschiedlich zurückgehalten werden. Die Durchgangswerte dienen lediglich einer qualitativen Reihung der Behandlungsanlagen, um eine ausreichende Reinigung zu erzielen, bevor das Niederschlagswasser eingeleitet wird." [15]

Tabelle 64 Auflistung von Versickerungsanlagen entspr. ihrer Reinigungseffektivität [14]

Durchgangswerte bei Bodenpassagen (D)						
Beispiele	Тур	Fischenbelastung A _e : A _b				
			ь	e	d	
Versickerung durch 30 cm bewachsenen Oberboden	DI	0,10	0,20	•)		
Versickerung durch 20 cm bewachsenen Oberboden	D2	0,20	0,35	0,60		
Versickerung durch 10 cm bewachsenen Operboden	D3	0,45	0,60	0,80		
Versickerung durch 5 cm bewachsenen Oberboden	D4	0,70	0,80	0,90		
Bodenpassage unter Mulden, Rigolen, Schächten o. 8. durch flächerhaft durchgehende Decksichten von mindestens • 1,0 m Mächtigkeit bei einer Durchlässigkeit k _t < 10 ⁴ m/s (z.0. Schluff, toniger Schluff) • 2,5 m Mächtigkeit bei einer Durchlässigkeit k _t von 10 ⁴ bis 10 ⁴ m/s (Feinsand, schluffiger Sand, sandiger Schluff) • 4,0 m Mächtigkeit bei einer Durchlässigkeit k _t von 10 ³ bis 10 ⁴ m/s (z.0. sandiger Kies, Grobsand, Mittelsand)	D5	0,35	0,45	0,60	0,80	
Biodenpassage unter Mulden, Rigolen, Schächten o. 3. durch flächenhaft durchgehende Decksichten von mindestens 60% der Mächtigkeit der Gruppe D5	D6	0,60	0,70	0,80	0,90	
Versickerung ohne Berücksichtigung weiterer Bodenpassagen durch • geringere Deckschichten als in der Gruppe Dö • poröse Dockbeläge ohne Bewachs • Pflaster mit nicht bewachsenen, durchl. Fugen • Rigolen, Versickerungsschächte, Schotterpackungen o 3.	D7		1,00			

bewachsener Oberboden dieser M\u00e4chtigkeit ist ohne unzul\u00e4assig hohe S\u00e4ndbeimischung
f\u00fcr die hydraulische Belastung nicht ausreichend durch\u00e4stigs;

Ebenfalls wurden den Sedimentationsanlagen in Tabelle 65 Durchgangswerte zugeordnet, um sie somit nach ihrer Reinigungseffektivität ordnen zu können.

Tabelle 65 Auflistung von Sedimentationsanlagen entsprechend ihrer Reinigungseffektivität [14]

Benpiele	Тур	k	t. Regene	billuDspen	de
		•	ь	ŧ	- 4
Anlagen mit maximal 9 m/h Oberfächenbeschickung beim					
Bemessungsregen mit der Regunspende r _{10.65}	DB	•)	*)	">	0.20
a.B. Abscheider für Leichtfüssigkeiten		١.			
Anlagen mit Learung und Reimgung nach Regenende und					
maximal 10 nuts Oberflächenbeschiekung bei r _{bite}	D9	0,50	0,40	0,35	•
2.B. trockese Regenklarbecken					
Anlagen mit max. 10 m/h Oberflathenbeschickung und max. 0,05					
m's Horizontalgeschwindigkeit bei r _{teit}	D10	0,60	0,50	0,45	0,25
z.B. trockung bewachsone Schengräben oder		1			
Vegetationapassagen (Länge > 50 m)					
Anlagen mit Deuerstau oder uttneliger Wasserführung und					
maximal 10 m/h Oberfitchenbeschickung bei r _{eite}	DII	0,65	0,55	0,50	•
z.B. Teiche, nasse Regenklärbecken					
Anlagen mit Decenture and maximal 18 m/s Ober-		-			
flachenbeschickung bei t _{om}					
z.B. Absetzanlagen vor Versickerungsbecken oder	D12	0,80	0,70	0,65	0,35

^{*)} die Bemessung dieser Anlagen ist für die vorgegebenen Regenspenden unüblich

7.4.2.2 Auswertung

Das Ziel dieser Herangehensweise besteht darin, eine Behandlungsmaßnahme zu finden, bei der verunreinigtes Niederschlagswasser vor der Einleitung in ein Gewässer (auch Grundwasser) soweit gereinigt wird, daß die Belastbarkeit des Gewässers nicht überschritten wird:

Emissionswert E ≤ Gewässerbelastbarkeit G

Dabei ergibt sich der Emissionswert von abfließenden Flächen aus der Verschmutzung des abfließenden Niederschlagswassers und seiner Restverschmutzung nach der Behandlung. Findet keine Regenwasserbehandlung statt, wird der Durchgangswert D = 1 gesetzt:

Emissionswert E = Abflußbelastung B * Durchgangswert D

Die Abflußbelastung B setzt sich aus der Verschmutzung des fallenden Niederschlags N_i (Tabelle 62) und der Verschmutzung der abflußwirksamen Flächen F_i (Tabelle 63) zusammen.

$$B = \sum f_i (N_i + F_i)$$

Die errechnete Abflußbelastung B wird mit der Gewässerbelastbarkeit G (Tabelle 60 und Tabelle 61) verglichen. Für B > G ist die Notwendigkeit einer Regenwasserbehandlung genauer zu überprüfen:

Die Durchgangswerte D der Behandlungsmaßnahmen werden Tabelle 64 und Tabelle 65 entnommen. Da die maximal zulässige Restverschmutzung nach einer Behandlung die Belastbarkeit des aufnehmenden Gewässers nicht überschreiten darf, ergibt sich für den größten zulässigen Durchgangswert:

 $D_{max} = Gew$ ässerbelastbarkeit G / Abflußbelastung B

Mischflächen:

Bei einem modifizierten Entwässerungssystem soll Regenwasser von stark unterschiedlich verschmutzten Flächen nicht vermischt, sondern "sauberes" Wasser ohne weitere Behandlung dezentral in den Wasserkreislauf zurückgeführt und stärker verschmutztes Wasser je nach Bedarf vor der Einleitung behandelt werden.

"Das Bewertungsverfahren könnte dazu verleiten, den Abfluß von stark belasteten Flächen mit dem Abfluß von größeren Anteilen gering belasteter Flächen zu verdünnen. Einen solche Verdünnung oder Vermischung bei der Ermittlung der Behandlungsbedürftigkeit des abfließenden Niederschlagswassers ist unzulässig." [15]

"Im Bewertungsverfahren dürfen daher grundsätzlich nur die benachbarten Belastungsgrade *gering* und *normal* oder *normal* und *stark* miteinander kombiniert werden, wenn das Wasser derselben Reinigungsanlage zugeführt werden soll (s. Tabelle 63)." [15]

Hintereinanderschaltung von Behandlungsanlagen:

Die Durchgangswerte hintereinandergeschalteter Behandlungsanlagen werden in der Regel bei folgenden Kombinationen miteinander multipliziert:

- Sedimentationsanlage mit nachgeschalteter Versickerung
- Versickerung durch mehrere Deckschichten

Bei der Kombination mehrerer Sedimentationsanlagen wird nur der niedrigste Durchgangswert der besten Einzelanlage berücksichtigt.

"Eine Versickerung in zentralen Versickerungsbecken ohne Oberboden ist nur in Ausnahmefällen zulässig, auch wenn in der Kombination mit einer Absetzanlage ein ausreichend niedriger Durchgangswert errechnet wurde. Nur das Niederschlagswasser von Dachflächen aus Wohn- und vergleichbaren Gewerbegebieten kann in hydraulisch geringer belasteten Becken ($A_u: A_S < 15: 1$) auch ohne Oberbodenpassage versickert werden." [14]

7.4.3 Zusammenfassung

Da Niederschlagsabflüsse ein nicht unerhebliches Schadstoffpotential beinhalten, war es in der Vergangenheit erforderlich festzulegen, welche Standorte für eine Versickerung geeignet sind und welche aus Gründen des Grund- und Trinkwasserschutzes nicht in Betracht kommen. Diese Richtlinien sind bereits 1990 im ATV-Arbeitsblatt A 138 [10] festgelegt worden. Diese Werte erscheinen jedoch im Zuge von Untersuchungen an verschiedenen Versickerungsanlage als zu streng gewertet, so daß es mittlerweile eine Aufweichung der Einschränkungen gegeben hat. So kann nach DVGW W 101 [30] bspw. auch in der Schutzzone II versickert werden, wenn es sich um Dachabflüsse aus Wohngebieten oder ähnlich gearteten Gewerbegebieten handelt. Diese Entwicklung ist nicht zuletzt aufgrund neuer Erkenntnisse im Bereich der Abbau- und Transportvorgänge im Boden zurückzuführen.

Auch auf der Grundlage von Meßergebnissen wurde eine Zuordnung von Abflüssen verschiedener Flächennutzungen vorgeschlagen. So sind die Kategorien unbedenklich, tolerierbar und nicht tolerierbar eingeführt worden, wobei unbedingt anzumerken ist, daß eine pauschale Anwendung der Tabelle 62 in vielen Fällen nicht möglich ist, sondern Einzelfallentscheidungen durch Fachleute und zuständige Behörden notwendig sind.

Auch bei Anwendung der vorgestellten Planungshilfen ist eine vollständige Erfassung aller bei der Versickerung wirksamen Prozesse nicht möglich. Trotzdem sind diese eine wertvolle Hilfe bei der Auswahl der am besten geeigneten Versickerungsanlage in Abhängigkeit von der Flächenbelastung, der Niederschlagsverschmutzung, der Belastbarkeit des Gewässers und von Vorbehandlungsmaßnahmen. Auch der Wirkung hier wurden anhand veröffentlichten Meßergebnissen Tabellen erstellt, die eine Zuordnung der Bewertungsfaktoren im Sinne des Gewässerschutzes ermöglichen. Insbesondere die Planungshilfe Π stellt eine deutliche Vereinfachung bei der Versickerungsanlagen dar.

7.5 Betrieb von Versickerungsanlagen

7.5.1 <u>Pflege und Unterhaltung</u>

Versickerungsanlage Da durch den stetigen Stoffeintrag latentes Gefährdungspotential aufweist, ist es unabdingbar die Funktions- und Betriebssicherheit der Anlage über 25 Jahre und mehr zu gewährleisten. So ist vor allem die Überwachung einer möglichen Akkumulation von nicht abbaubaren, sorbierbaren Schadstoffen im obersten Infiltrationsbereich notwendig. Dies betrifft sowohl das Reinigungspotential der Anlage in Form von Schadstoffrückhaltung als auch das Risiko der Mobilisierung der dadurch angereicherten Stoffe und ihren Austrag in die Umwelt. Diese beiden gegenläufigen Ziele müssen durch geeignete Unterhaltungs- und Kontrollmaßnahmen gesichert werden. Folglich ist im Rahmen von Pflege- und Unterhaltungsmaßnahmen eine dauerhafte Funktionsfähigkeit der Bodenpassage in den Versickerungsanlagen sicherzustellen. Dies beinhaltet die Vermeidung von hydraulischen Kurzschlüssen, wie z.B. durch Trockenrisse oder Auskolkungen, sowie bei Bewuchsrückgang oder Vegetationsschäden eine Erneuerung der Bepflanzung. Sollte die Versickerungsleistung abnehmen sind Reinigungsmaßnahmen durchzuführen. Dazu zählt die Aufrechterhaltung des Rückhaltevermögens der oberen Bodenzone durch Entfernung von akkumulierten Schadstoffen in regelmäßigen Abständen, z.B. durch Abschälen. Die entfernten Stoffe sind ordnungsgemäß zu entsorgen und die entfernten Bodenschichten in den Versickerungsanlagen sowie der Bewuchs sind zu ergänzen bzw. zu erneuern. [37] Weiterhin kann die oberste Schicht durch Einfräsen von Sand aufgelockert werden.

Auf folgende Aspekte ist ebenfalls Wert zu legen:

- Freihalten der versickerungswirksamen Fläche vor größeren Stoffanreicherungen (Laub und tierische Exkremente)
- Freihalten von Zuläufen zu Versickerungsanlagen
- Übliche Grünpflegemaßnahmen

In [41] wird festgestellt, daß bei Versickerungsbecken, die nach Niederschlagsereignissen nicht mehr trockenfallen, die sich an der Beckensohle bildende Schlammschicht nicht ausgeräumt werden sollte, auch wenn diese hohe Schadstoffgehalte aufweist. Diese Schlammschichten weisen mit ihrem organischen Anteil hohe Sorptionskapazitäten auf. Im Hinblick auf die Betriebsweise von Trockenbeeten sollte demnach ein Abschälen der oberen Bodenschicht auch bei hoher Schadstoffbefrachtung möglichst unterbleiben, da auch hier mit dem Niederschlagsabfluß eingetragene Feinstoffe für hohe Sorptionskapazitäten sorgen. Nur wenn sich eine Schadstoffverlagerung in tiefere Bodenschichten abzeichnet oder wenn die hydraulische Leistungsfähigkeit des Beckens nicht mehr ausreicht, ist die obere Bodenschicht auszutauschen.

Eine Schadstoffverlagerung ist dann zu erwarten, wenn die Sorptionskapazität der Oberbodenschicht gegenüber persistenten Stoffen erschöpft ist. Es empfiehlt sich daher, bei zentralen Versickerungsanlagen mit $A_{red}:A_S>15:1$ die Schadstoffkonzentration in den oberen Bodenschichten in regelmäßigen Abständen (etwa alle 10 Jahre) zu prüfen. Das zu untersuchende Parameterspektrum richtet sich nach dem potentiellen Stoffinventar, das sich aus der Besiedlungs- und Nutzungsstruktur der angeschlossenen Entwässerungsflächen ableiten läßt. Nach dem Abschälen der oberen Bodenschicht ist der neu eingebrachte Boden unverzüglich zu begrünen.

7.5.2 Bauliche und betriebliche Aspekte

- Baustellenfahrzeuge sollten nicht später zur Versickerung genutzte Flächen befahren, da es sonst zu unerwünschten Bodenverdichtungen kommt.
- Aushubarbeiten sind so auszuführen, daß Durchlässigkeit erhalten bleibt.
- Inbetriebnahme der Versickerungsanlage sollte erst nach Beendigung der Baumaßnahmen erfolgen.
- Abstand von Gebäuden sollte ca. 6 m betragen, allerdings anhängig von Grundwasserständen und Art des Untergrundes.
- Maßnahmen bei Frost, wie Freihaltung der Zu- und Überläufe

7.6 Regenwasservorbehandlungsmaßnahmen

7.6.1 Möglichkeien einer Regenwasservorbehandlung

Regenwasser beinhaltet vor allem durch das Auswaschen von Staubpartikeln aus der Atmosphäre insbesondere Kohlenmonoxid, Schwefeldioxid, Stickoxide, Kohlenwasserstoffverbindungen und Staub. Diese Stoffe wirken sich in zweierlei Hinsicht negativ aus.

- 1. Wenn hohe Stoffkonzentrationen in eine Anlage eingetragen werden besteht immer die Gefahr, daß sich Schadstoffe, trotz aller Sicherheitsvorkehrungen, bis ins Grundwasser verlagern. Aus diesem Grund sollte von vornherein versucht werden, die Belastung der Anlage möglichst gering zu halten.
- 2. Der permanente Eintrag von Staubpartikeln kann zu einer Beeinträchtigung der Versickerungsleistung in Form von innerer und/oder äußerer Kolmation führen.

Die Tabelle 66 und Tabelle 67 zeigen einige Vorbehandlungsmaßnahmen eingeteilt in physikalische und biologische Verfahren mit ihrer Wirkungsweise und den jeweiligen Vorund Nachteilen dieser Anlagen.

Die Wirkungsweise der physikalischen Behandlungsanlagen konzentriert sich vor allem auf die Prinzipien:

- Sedimentation
- Filterwirkung

Die Sedimentation bietet eine gute Reinigungsleistung, da viele Schadstoffe an Partikel angelagert sind. Desweiteren werden beim Absinken von Schwebeteilchen auch gelöste Stoffe angelagert und somit zurückgehalten. Zu beachten ist bei der Sedimentation, daß es in der Anlage nicht zu großen Turbulenzen kommen darf, damit sich auch Teilchen, deren Dichte nicht viel größer als die des Wasser ist, absetzen können.

Eine Filterwirkung ist meistens durch das Vorhandensein einer Bodenpassage gegeben, kann aber auch durch ein Vlies erreicht werden.

Wenn von biologischer Behandlung gesprochen wird, erfolgt diese meist in Verbindung mit einer mechanischen Reinigungswirkung. Der biologische Abbau findet hauptsächlich durch aerobe und anaerobe Prozesse statt.

Desweiteren stehen auch übliche Reinigungsverfahren (ursprünglich für die Abwasserreinigung konzipiert) zur Verfügung. Dazu zählen:

- ⇒ Wirbelabscheider
- ⇒ Siebe
- ⇒ Flotation
- ⇒ Filtration

Tabelle 66 Physikalische Vorbehandlungsmaßnahmen

Physikalische	Vorbehandlung
Absetzschacht:	
Zwischenspeicherung von Regenwasser und mechanische Reingr	ang durch Sedimentation
Rückhalt von Schwimm- und Leichtstoffen durch Tauchwand	
Rücklösung und Ausschwemmung bereits abgelagerter Partikel	
VORTEILE	NACHTEILE
Sehr geringer Flächenbedarf	Reinigungsleistung auf gut absetzbare Stoffe beschränkt
Keine bzw. geringe Nutzungsbeschränkungen des Grundstücks	Turbulenzen behindern Sedimentation
Versickerungsschacht mit Schlammfang durch tiefliegende Schae	chtsohle:
Reinigung durch Sedimentation	
Reduzierung des Schwebstoffeintrages in Filterkies durch Umma	intelung des Schachtes mit Geotextilfilter
VORTEILE	NACHTEILE
Geringer Flächenbedarf	beschränkte Wartungsmöglichkeiten
 Anwendung auch bei oberflächennahen undurchlässigen 	Reinigungsleistung auf gut absetzbare Stoffe beschränkt
Schichten	
Geringer Investitionsaufwand	
Geotextiler Filtersack für Versickerungsschächte:	
Wasser wird infolge der mechanischen Filterwirksamkeit des Vli	eses gereinigt
VORTEILE	NACHTEILE
- Geringere Reinigungsleistung als Ausführung mit Schlammfang	- kein wesentlicher Rückhalt von gelösten Stoffen
- Vlies mehrfach verwendbar und einfacher Aus- und Einbau	
geringer Flächenbedarf	
Regenklärbecken:	
Sedimentation	
Rückhalt von Schwimm- und Leichtstoffen durch Tauchwand	1
VORTEILE	NACHTEILE
Gute Reinigung bei absetzbaren Stoffen	Gefahr für Kinder
 Gute Retentionswirkung bei nicht ständig gefülltem Becken 	- hoher Flächenbedarf
	- hoher Wartungsaufwand
Wirbelabscheider:	
Trennung von spezifisch leichten und schweren Stoffen	
VORTEILE	NACHTEILE
Geringer Flächenbedarf	- schlechter Wirkungsgrad bei Stoffen mit geringer Steig- und
Gute Reinigungsleistung	Sinkgeschw.
Leichtstoffabscheider:	
Ausnutzung der unterschiedlichen Dichten	
• Kombination von Schlammfang, Benzin- Ölabscheider u/o. Koal	eszenzschacht
VORTEIL	NACHTEILE
Hohe Reinigungsleistung bei Leichtstoffen	wenig wirksam bei Stoßbelastungen

Tabelle 67	Biologische	Vorbehandlungsmaßnahmen

Biologische Vorbehandlung								
Vegetationspassage:								
Reinigung durch aerobe und anaerobe Prozesse								
Adsorption der Schadstoffe an Bodenteilchen	Adsorption der Schadstoffe an Bodenteilchen							
Mechanische Reinigung durch Filtrierung								
VORTEIL	VORTEIL NACHTEILE							
 hohe Reinigungsleistung bzgl. gelöster org. Stoffe max. Wirkungsgrad nur bei kontinuierlichen Zufluß 								
 gute Kontrollmöglichkeiten hoher Flächenbedarf 								
 ohne Geruchsbelästigung 	Vorschaltung von Retentionsräumen							
Absetzteich:								
Biologischer Abbau durch anaerobe und aerobe Prozesse								
bei ausreichender Aufenthaltszeit gute Sedimentationsleistung bei	d > 0,1 mm							
VORTEILE	NACHTEILE							
gute Reinigung bei ungelösten, und auch gelösten Stoffen	Gefahr für Kinder							
Speichermöglichkeit bei gedrosseltem Abfluß	hoher Flächenbedarf							
	 hoher Wartungsaufwand 							

7.6.2 <u>Wirksamkeit von Vorbehandlungsmaßnahmen</u>

In verschiedenen Untersuchungen wurden die Reinigungsleistungen von Anlagen zur Vorbehandlung von Straßenoberflächenabflüsse überprüft. Beispielsweise wurden solche Betrachtungen von [80] und [114] durchgeführt.

Im Zuge der Untersuchungen hinsichtlich der Wirksamkeit von Absetzbecken bei der Versickerung wurden sehr unterschiedliche Ergebnisse erzielt.

Wenn Feststoffpartikel als potentielle Träger von Schadstoffen wirkungsvoll abgeschieden werden sollen, so daß durch sie eine äußere Kolmation bei der anschließenden Versickerung des behandelten Straßenoberflächenwassers nicht zu besorgen ist, so müssen die Anlagen zur Abscheidung der Feststoffe die dafür erforderlichen hydraulischen Voraussetzungen erfüllen. So sollte sich die Dimensionierung des Absetzbeckens nach Möglichkeit an der verfahrenstechnisch definierten Trennkorngröße orientieren.

$$\begin{split} d_T &= \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot v_S}{\left(\rho_F - \rho_W\right) \cdot g}} \qquad \qquad d_T = \sqrt{\frac{18 \cdot \eta \cdot q_A}{\left(\rho_F - \rho_W\right) \cdot g}} \\ \text{mit} \qquad d_T : \qquad &\text{Trennkorngröße in m} \\ \eta : \qquad &\text{dynamische Viskosität in Pa} \cdot s \\ \rho_F - \rho_W : &\text{Dichtedifferenz zwischen Feststoffpartikel und Wasser in kg/m}^3 \\ q_A : \qquad &\text{Oberflächenbeschickung in m}^3/(m^2 \cdot h) \\ v_S : \qquad &\text{Sinkgeschwindigkeit in m/h} \end{split}$$

So wird für die Sedimentation von Abwasserinhaltsstoffen als erforderliche Trenngröße ein Wert zwischen 70 µm und 80 µm als zweckmäßig erachtet. Bei Berücksichtigung dieser

Werte ergibt sich dann nach [33] eine notwendige Sinkgeschwindigkeit von 1,8 m/h bis 2,5 m/h.

Diese Betrachtung allein genügt jedoch nicht. Um möglichst langfristig die Durchlässigkeit der Sickerbeckensohle aufrechtzuerhalten, ist es von Bedeutung die Ursachen für eine Selbstabdichtung zu kennen. In [85] ist beschrieben, daß die mechanische Kolmation, bei der Partikel zwischen Bodenteilchen eingeklemmt werden oder in Hohlräumen und Taschen des Bodengefüges abgelagert werden, hauptsächlich bei Partikelgrößen über 10 µm auftritt. Zur Abscheidung von Partikelgrößen von 10 µm sind Oberflächenbeschickungen von weniger als 0,29 m/h für Quarzsand bzw. 0,072 m/h für Kohlepartikel erforderlich. Die Oberflächenbeschickung der in [80] untersuchten Anlage liegt im Bereich von 0,08 m/h bis 0,13 m/h. Legt man die Korngrößenverteilung von Partikeln des SOW zugrunde, so beträgt der Korngrößenanteil über 10 µm 80 % bzw. über 20 µm 62 %. Somit sollten in dieser Anlage die Partikel entsprechend ihrer Korngrößenverteilung (80 % bzw. 62%) abgeschieden werden. Demgegenüber weisen die Meßergebnisse jedoch nur einen Abscheidegrad für Feststoffe von 7 % (Konzentration) bzw. 26 % (Fracht) auf. Daraus ist nach Angabe der Autoren zu entnehmen, daß die für den laminaren Strömungszustand gültigen Gesetzmäßigkeiten für das untersuchte Absetzbecken nicht zutreffen.

7.6.3 <u>Vergleich von 3 Absetzbecken</u>

In Tabelle 68 sind Angaben zu den in [114] untersuchten Absetzbecken zusammengestellt. Diese Absetzbecken unterscheiden sich in Aufbau und Funktion nur geringfügig voneinander. Bei der Untersuchung wurden die Konzentration an Schwermetallen und organischen Schadstoffen im Zu- und im Ablauf der Absetzbecken bestimmt und daraufhin der Wirkungsgrad der Anlagen ermittelt. Außerdem erfolgte die Bestimmung der Schlammablagerungsrate im Becken.

Tabelle 68 Ü	Übersicht über	Standort und	Aufbau von 3	3 zu vergleichenden	Absetzbecken
--------------	----------------	--------------	--------------	---------------------	--------------

	A81 Stuttgard/Würzburg A6 Heilbronn/Mannheim (Pleidelsheim) (Obereisesheim)		Kreuzung A8 und B10 (Ulm-West)		
Regenrückhaltebed	·	/	,		
Volumen m ³	194	500	1090	1000	
max. Zufluß 1/s	266	600	1013		
max. Abfluß l/s	266	50	100		
Betriebsart	Dauerstau	Dauerstau	teilw. gestaut	Dauerstau	
Benzin- und Ölabs	cheider				
Oberfläche m²	107	10	40		
Oberflächenbe- schickung m/h					
DimensioniertGemessen	9	18	9		
50 th percentile	0,2	11,5	0,7		
80 th percentile	0,3	16	4		
90 th percentile	0,7	19	9,5		

Die Tabelle 69 beinhaltet die Konzentrationen für die eingetragenen und ausgetragenen Stoffe und Tabelle 70 stellt den erreichten Wirkungsgrad der jeweiligen Anlage dar. Deutlich zu erkennen ist die gute Abscheideleistung aller Anlagen bei Schwebstoffen. Ein Vergleich der Wirkungsgrade zeigt, daß das Absetzbecken in Pleidelsheim außer bei P_{tot} mindestens einen Reinigungsgrad von 50 % erzielte. Diese sehr guten Abscheideraten sind auf mehrere Faktoren zurückzuführen:

- Beckentiefe >1,79 m → keine permantente Aufwirbelung abgelagerter Sedimente
- Oberflächenbeschickung bei 50 % aller Ereignisse $0.2 \text{ m/h} \rightarrow \text{gutes Absetzverhalten}$
- homogene Beckenstruktur

Tabelle 69 Konzentrationen an ein- und ausgetragenen Stoffen in der jeweiligen Anlage [114]

,	-		Ulm	-West		Pleide	lsheim	Oberei	sesheim
		1	I II						
		In	Out	In	Out	In	Out	In	Out
SS	(mg/l)	270	148	187	86	140	21	181	91
COD	(mg/l)	79	65	110	67	107	40	119	87
NH ₄ ⁺ -N	(mg/l)	.59	.51	.25	.89	.76	.49	.89	.75
P _{tot}	(mg/l)	.32	.31	.25	.22	.25	.17	.35	.32
Cq	(µg/l)	2.1	1.8	5.5	2.2	5.9	2.2	5.9	5.1
Cr	(pg/l)	5.0	8.0	5.6	5.2	9.6	3.3	20.4	16.0
Cu	(pg/l)	60	88	52	43	97	27	117	82
Pb	(pg/l)	165	111	157	76	202	40	245	150
Zn	(pg/l)	290	220	420	300	360	180	620	370
Fe	(mg/l)	2.15	1.64	2.26	1.39	3.42	0,89	5.16	4.71
motor fuel	(mg/l)	1.68	1.41	2.72	1.83	6.82	1.43	5.17	3.67
mineral oil	(mg/l)	1.81	1.51	2.88	1.93	7.02	1.50	5.51	3.9

Tabelle 70 Wirkungsgrade der jeweiligen Anlagen [114]

	Ulm-West		Pleidelsheim	Obereisesheim
	I	II 🔩		
SS	45	54	85	50
COD	18	39	63	26
NH, +-N	10	- 72	36	16
P 4 tot	3 ,	12	32	9
Cd	14	60	63	28
Cr	-60	7	66	33
Cu	-13	17	73	26
Pb	. 33	52	79	39
Zn	24	29	50	37
Fe	24	38	74	45
motor fuel	16	33	80	29
mineral oil	17	33	80	29

Die Anlage in Obereisesheim wurde mit der doppelten Oberflächenbelastung beschickt, deshalb war hier mit einer viel niedrigeren Rückhalterate zu rechnen. Das war jedoch nicht der Fall. Die Unterschiede bei den Eliminationsraten für Schermetalle sind auf die Vielzahl der verschiedenen physiko-chemischen und biochemischen Mechanismen und ihre pH-Wertabhängige Löslichkeit zurückzuführen. Außerdem hängt die Elimination der Feststoffe von der Fraktion der organischen Stoffe in den Feststoffen und der Sedimentationsrate ab. Die mineralische Fraktion der Feststoffe in Ulm/West betrug 88 %, bzw. für die Becken in

Obereisesheim und Pleidelsheim 80 % und 79 %. Die Hauptpartikelfraktion d_{50} betrug 0,03 mm (Obereisesheim und Pleidelsheim) und 0,017 mm (Ulm/West). Dieser hohe Gehalt an Feinststoffen wirkte sich negativ auf die Sedimentation ($v_s = 0.8$ m/h) aus. Bei den anderen beiden Anlagen betrug die Sinkgeschwindigkeit durchschnittlich 2,4 m/h.

Im Hinblick auf den Vergleich zwischen den Betriebsarten "Dauerstau" und "teilweise gestaut" ist zu vermerken, daß die Ergebnisse von Ulm/West eine deutliche höhere Effektivität bei dem im Dauerstau betriebenen Becken aufweisen. Bei nur teilweise gestauten Becken kommt es bei jedem Regenereignis zu einer erneuten Aufwirbelung der Sedimente, welche dann teilweise aus dem Absetzbecken mit ausgetragen werden.

Als nahezu exzellent könnte man die Ergebnisse der Anlage von Pleidelsheim beschreiben. Die sehr gute Wirkung des Regenklärbeckens an der A81, welches für eine Oberflächenbeschickung von 9 m/h bemessen wurde, aber in 50 % aller Abflußereignisse lediglich eine Oberflächenbeschickung von $q_A=0.2$ m/h erreicht wurde. Unter diesen hydraulischen Bedingungen eliminierte dieses Regenbecken Benzin und Mineralöl zu 80 %. Schwerkraftsedimentation und Leichtstoffabscheidung sind demnach bei einer Oberflächenbeschickung von 0.2 m/h effektiv.

Bislang werden für die Bemessung von Absetzbecken wesentlich höhere Oberflächenbeschickungen angesetzt, wie Tabelle 71 zeigt.

Tabelle 71 Bemessungswerte für die Oberflächenbeschickung von Anlagen zur Reinigung von Straßenoberflächenwasser [80]

Anlagentyp	qA in m/h	nach
Absetzanlagen vor Versickerungsbecken	18 Sinkgeschwindigkeit vs = 0,005 m/s Trennkorndurchmesser dT = 100 µm	RAS-Ew, 1987
Leichtflüssigkeits- abscheider	in Anlehnung an DIN 1999, Teil 1	RAS-Ew; 1987
Leichtflüssigkeits- abscheider in Wassergewinnungsge- bieten	9 .´. Sinkgeschwindigkeit vs = 0,0025 m/s Trennkorndurchmesser dT = 70 μm	, RiStWag, 1982
Regenklärbecken ohne Regenrückhalte- becken	9	VwV-Straßen- oberflächenwasser Baden-Württemberg (1980)
Regenklärbecken mit Regenrückhalte- becken	9* SQRT (Qab/Qkrit)	VwV-Straßen- oberflächenwasser Baden-Württemberg (1980)
Regenklärbecken in Trennsystemen	10	VwV- Regenentlastungs- und Regenwasser- behandlungsanlagen MNLU-Schleswig- Holstein (1993)

Auf der anderen Seite würde eine Bemessung des Absetzbeckens mit einer Oberflächenbeschickung von $q_A = 0.2$ m/h zu unverhältnismäßig großen Becken führen. Aus diesem Grund wird von Krauth [80] folgende Vorgehensweise vorgeschlagen.

- 1. Rückhalt sämtlicher Regenabflüsse in einem Regenrückhaltebecken (RRB). Weiterleitung eines gedrosselten Abflusses Q_{ab,RRB}. Dieses Becken kann naturnah ausgebaut, bepflanzt und mit Folie gegen den anstehenden Untergrund abgedichtet werden.
- 2. Behandlung des gedrosselten Ablaufes aus dem eben erwähnten RRB in einem konventionellen Absetzbecken (RKB), das auf eine Oberflächenbeschickung von 0,2 m/h ausgelegt wird. In diesem Becken darf beim Bemessungszufluß $Q_{ab,RRB}$ die Fließgeschwindigkeit an der Sohle des Beckens einen Wert von $v_h = 0,05$ m/s nicht überschreiten. Die maßgebende Wassertiefe soll bei Betonbecken einen Wert von 2m und bei naturnah ausgestalteten Absetzbecken einen Wert von 1,80 m nicht unterschreiten.

Obwohl die Tiefe eines Beckens sich theoretisch nicht auf die Sedimentation auswirkt, sollte eine gewisse Mindesttiefe bei Absetzanlagen eingehalten werden. Die Verwaltungsvorschrift aus Schleswig Holstein des MNLU hat dafür einen Wert von 2 m vorgesehen. Dieser Wert sollte für Betonbecken ebenso angewandt werden, wie in aufgabengleichen naturnahen Becken.

Desweiteren ist unbedingt darauf zu achten, daß die Fließgeschwindigkeit des Regenabflusses durch ein geeignetes Einlaufbauwerk herabgesetzt wird, wobei das zufließende Wasser gleichmäßig über die gesamte Beckenbreite verteilt werden sollte. Der Auslaufbereich ist gleichermaßen strömungsgünstig zu gestalten.

7.7 Beispiele für bestehende Versickerungsanlagen

Aufgrund der Tatsache, daß eine ökonomisch und ökologisch sinnvolle Regenwasserbewirtschaftung heutzutage mehr und mehr in das Bewußtsein von Ländern, Kommunen und Behörden gerät, gibt es mittlerweile zahllose Beispiele, wie eine solche Aufgabe bewältigt werden kann. Nachfolgend sind eine Reihe von Projekten aufgezählt, anhand derer zu sehen ist, wie sich eine solche Umsetzung gestalten kann.

- Niederschlagswasserversickerung am Beispiel des Pilotprojektes "Am Donewald" in Köln-Dünnwald [86]
- Neue Wege für das Regenwasser im Emschergebiet [88]
- Praktischer Einsatz der Regenwasserbewirtschaftung am Beispiel Baugebiet "Großer Seddiner See" bei Potsdam [99]
- Der Umgang mit dem Regenwasser in der Schweiz an Beispielen aus dem Kanton Zürich [33]
- Richtungsweisende Entwässerungstechnik Versickerung von Regenwasser [34]

Die oben genannten Punkte und die Auswertung der Beispielprojekte verschiedener Gemeinden zeigen, daß in den letzten Jahren die Regenwasserversickerung durchaus an Einfluß gewonnen hat und mit Erfolg angewendet wird. Dabei ist jedoch zu beachten, daß es sich dabei hauptsächlich um die Versickerung von Dachabflüssen handelt. Laut Umfrage der ATV [8] existieren etwa zweimal mehr Kommunen in denen Versickerungsanlagen für Dachabflüsse betrieben werden als für Verkehrsflächenabflüsse. Für die Versickerung von Dachabflüssen werden meist Sickerschächte bevorzugt, gefolgt von Teichen, Mulden und Rigolen. Bei der Versickerung von Verkehrsflächenabflüssen werden, neben den ebenfalls häufig anzutreffenden Sickerschächten, Mulden und Erdbecken bevorzugt.

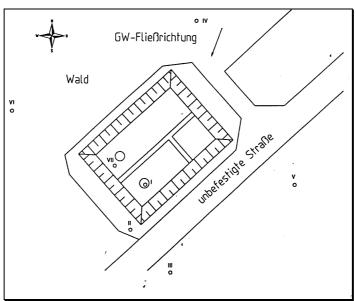
Weiterhin zeigt die Umfrage der ATV [8], daß selbst bei der zukünftigen Planung von Versickerungsanlagen die Versickerung von Verkehrsflächen eher skeptisch beurteilt wird. Dies rührt zum einen aus mangelnder Kenntnis über die technischen Möglichkeiten bei der Versickerung von Verkehrsflächenabflüssen, aus dem erhöhten Kostenaufwand im Gegensatz zur Versickerung von Dachabflüssen und auch aus bisher aufgetretenen Betriebsproblemen mit bestehenden Anlagen.

Im nachfolgenden Kapitel wird stellvertretend die Untersuchung einer Versickerungsanlage ausführlich vorgestellt.

7.7.1 Das Versickerungsbecken Nienburg/Langendamm

7.7.1.1 Beschreibung der Anlage

Das Versickerungsbecken Nienburg/Langendamm wird seit 1984 zur Versickerung von Regenwasser benutzt, nachdem es ursprünglich als Regenrückhaltebecken konzipiert wurde. Das Einzugsgebiet ist 32,7 ha groß und stellt ein reines Wohnviertel mit geringem Durchgangsverkehr dar. Die angeschlossene abflußwirksame Fläche beträgt 3,52 ha. Davon entfallen ca. 70 % auf Verkehrsflächen, der Rest auf Hausdächer. "Das rechteckige Becken ist im Rahmen des Forschungsvorhabens 1989 durch einen Längsdamm in zwei Versickerungsbecken geteilt worden, wobei dem einen Beckenteil noch ein Absetzbecken mit Dauerstau vorgeschaltet wurde.



Die Sohle und die Böschungen der beiden Versickerungsbecken sind mit 20 cm Mutterboden bedeckt und mit Rollrasen begrünt worden. Durch ein neu gestaltetes Einlaufbauwerk wird die zulaufende Regenwassermenge geteilt und den beiden Beckenteilen zu gleichen Teilen zugeführt. Das mit Röhricht bepflanzte Absetzbecken ist mit einer Teichfolie gegen den Untergrund abgedichtet. Das max. Beckenvolumen (inklusive Absetzbecken) beträgt 840 m³, die max. versickerungswirksame Fläche 800 m² bezogen auf beide Beckenteile." [41]

Physikalische Bodenkenndaten

Das Einzugsgebiet liegt am Rande einer Grundmoräne aus der Saale-Kaltzeit mit vorgelagerten glazifluvitalen Ablagerungen. Der Boden weist z.T. schluffige Einschlüsse auf. Die Sieblinien des Bodenmaterials aus unterschiedlichen Tiefen unterhalb der Sohle des Versickerungsbeckens kennzeichnen den Boden als einen über die Tiefe homogenen mittelsandigen Feinsand.

• k_f -Wert der ungesättigten Bodenzone: $1\cdot 10^{-5}$ m/s
• Grundwasserflurabstand: 9 m

Grundwasserfließrichtung:
 Richtung SSO

Darüber hinaus wurden auch noch die Niederschlagsmenge, der Zulaufwasserstand, die Wasserstände in den Becken und die Grundwasserstände der Pegel I bis VI bestimmt.

Probenahmeintervalle und -ort

Einmal pro Woche sind an allen Grundwasserpegeln (I bis VII) in unterschiedlichen Tiefen die Wassertemperatur, die elektrische Leitfähigkeit, der pH-Wert und der O₂-Gehalt ermittelt worden. Die Beprobung des Zulaufes erfolgte mit einem vom Mikrocomputer gesteuerten Probenehmer, während die Wasserproben aus dem Versickerungsbecken manuell entnommen wurden. Die zur Bodenanalyse notwendigen Proben wurden mittels eines Pürckhauer Bohrstockes flächendeckend aus 1m Tiefe des Versickerungsbeckens entnommen. Im März 1991 wurden die gesamten Deckschichten im Versickerungsbecken bis hinein in den Grundwasserleiter beprobt. Die beiden Bodensäulen für die Lysimeterversuche sind aus der Böschung des Versickerungsbeckens entnommen worden. Anhand des Übersichtsplanes der Anlage in 0 sind die oben angegebenen Daten gut nachvollziehbar.

7.7.1.2 Ergebnisse der Wasseranalysen

Die Versickerungsanlage Nienburg/Langendamm wurde 1½ Jahre mit einer Wassermenge von rund 19.000 m³ beaufschlagt, was bei einer mittleren versickerungswirksamen Fläche von 500 m² einer Wassersäule von 38 m entspricht. Die Messungen im Zulauf haben ergeben, daß es sich um ein sehr weiches Wasser handelt mit einer geringen Säurekapazität. Der pH-Wert liegt überwiegend zwischen 7 und 8. Dabei ist der pH-Wert des Regens bevor er die "Erde"

erreicht eher sehr niedrig und wird erst nach dem Abfluß von Dach- und Straßenflächen und beim Durchfließen der aus Betonrohren bestehenden Regenwassersammler in den neutralen Bereich angehoben. Die Leitfähigkeit liegt im Mittel bei 138 μ S/cm, wobei jeweils zu Beginn eines Regenereignisses ein deutlich höherer Wert zu verzeichnen ist.

Schwermetalle im Zulauf und im Becken

Die ermittelten Schwermetallkonzentrationen sind in Tabelle 72 dargestellt. Die gemessenen Werte zeigen keine Auffälligkeiten und stimmen mit Untersuchungsergebnissen vergleichbarer Anlagen gut überein.

Tabelle 72 Schwermetallgehalte im Zulauf und im Becken der Versickerungsanlage Nienburg/Langendamm [41]

Element	Nachweis- grenze	Zulauf (frachtgemittelt)	Absetzbecken (n=5)	Becken 1 (n=18)	Becken 2 (n=17)	
Cadmium	0,0002	0,001	0,0002	0,0003	0,0003	mg/l
Kupfer	0,001	0,020	0,0029	0,006	0,007	
Blei	0,001	0,025	0,0014	0,003	0,004	
Zink	0,05	0,232	0,067	0,112	0,116	
Nickel	0,003	0,004	0,003	0,004	0,003	
Chrom	0,005	0,003	0,0012	0,002	0,001	

Es ist festzustellen, daß die Konzentrationen im Zulauf sich deutlich von denen im Becken unterscheiden. Dies ist auf die Art der Probenahme (Schöpfproben) zurückzuführen, so daß ein Teil der an Feststoffpartikel gebundenen Fraktion der Schwermetalle durch die Sedimentation im Versickerungsbecken nicht mit erfaßt sind. Interessant ist, daß sich die Werte beider Becken nicht unterscheiden, obwohl dem einen Becken ein Absetzbecken mit Dauerstau vorgeschaltet wurde. Eine Wirkung dieses Beckens ist offenbar nicht gegeben. Nach [41] kann eine deutliche Verringerung der Fließgeschwindigkeit, die für eine Sedimentation der für den partikulären Schwermetalltransport maßgeblichen sehr feinen Teilchen notwendig ist, nicht erzielt werden.

Schwermetalle im Grundwasser

Bei der Auswertung wurden die mittleren Schwermetallgehalte im Grundwasser (Bild 30) den Zulauf- und Beckenwasserkonzentrationen gegenübergestellt.

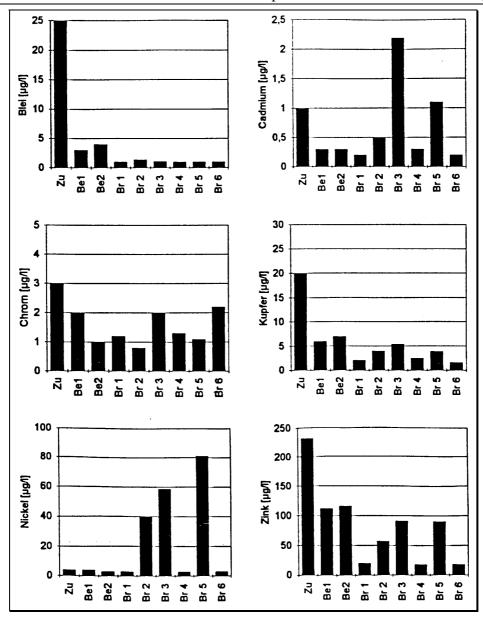


Bild 30 Schwermetallkonzentrationen im Grundwasser der Versickerungsanlage Nienburg/Langendamm [41]

Die Mittelwerte der Schwermetallkonzentrationen unterschreiten in allen Pegeln mit Ausnahme des Parameters Nickel in Brunnen 3 und 5 die zulässigen Grenzwerte nach der TrinkwV (1990) bzw. der EG-Trinkwasserrichtlinie 80/778EGW (1980). [41]

7.7.1.3 Ergebnisse der Bodenanalysen

Die Probenahme aus den Becken erfolgte mit einem Bohrstock (Pürckhauer). Becken 1 wurde für die Probenahme in 3, Becken 2 in 2 Parzellen aufgeteilt. Bis zu einer Tiefe von 1,00 m wurde das Bohrgut aus den Becken 1 und 2 in 5 Fraktionen von 0,20 m Profiltiefe unterteilt. Die jeweils 1. Fraktion (0,20 m) stammt aus der nachträglich aufgebrachten Mutterbodenauflage. Pro Teilfläche wurde aus 9 Einzelproben der jeweiligen Tiefe eine Mischprobe gebildet. Die Probenahmen erfolgten im November 1990, August 1991 und Dezember 1991.

Die mittleren pH-Werte schwanken im Becken zwischen 6,2 und 7, wobei in den tieferen Bodenschichten tendentiell geringere pH-Werte gemessen wurden.

Schwermetalle

In Bild 31 sind die Schwermetallkonzentrationen der Bodenbeprobungen des Versickerungsbeckens dargestellt. Dabei wurden Mischproben aus allen Beckenteilen untersucht, je Bodentiefe sind 45 Einzelproben gemischt worden.

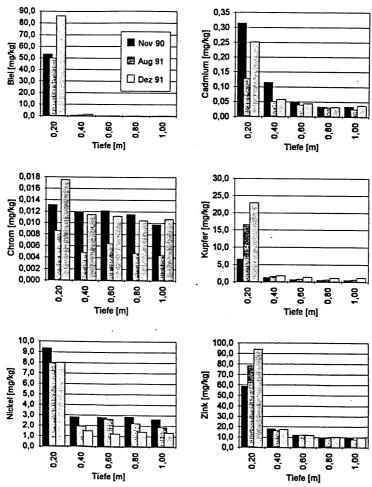


Bild 31 Schwermetallkonzentrationen der Bodenbeprobungen im Versickerungsbecken [41]

Die Schwermetallkonzentrationen im Sandboden unterhalb der Mutterbodenschicht (0,4-1,0 m) sind über die Tiefe recht konstant und liegen im Bereich der normalen Schwermetallgehalte im Boden. Im Untersuchungszeitraum zwischen November 1990 bis Dezember 1991 konnte im Bereich unterhalb der Mutterbodenschicht keine Akkumulation der betrachteten Metalle festgestellt werden. Erwartungsgemäß sind die Schwermetallgehalte in der sorptionsstarken Mutterbodenschicht (0,2 m) deutlich höher als in den darunter liegenden Schichten. Zu beachten ist jedoch, daß die Mutterbodenschicht erst Ende 1989 aufgebracht wurde, während der darunter anstehende gewachsene Boden bereits seit Anfang der 70er Jahre mit Regenabflüssen beaufschlagt worden ist. Eine Anreicherung über den Beobachtungszeitraum kann für die Metalle Kupfer und Zink festgestellt werden. Der hohe Wert für Blei im Dezember 1991 wird nicht auf das eingetragene Regenwasser zurückgeführt,

es handelt sich vielmehr um "...einen punktuell sehr hohen Bleigehalt in der aufgebrachten Mutterbodenschicht" [41].

Wie aus Bild 31 ersichtlich wird, kann bei Cd, Cr, und Ni keine eindeutige Aussage hinsichtlich einer Anreicherung getroffen werden. "Teils werden steigende, teils fallende Metallgehalte im Boden festgestellt. Bei den geringen Konzentrationen dieser Metalle im Zulauf zur Versickerungsanlage und unter der Annahme, daß die gesamte eingetragene Schwermetallfracht in der Mutterbodenschicht absorbiert wird, liegt die daraus errechnete Konzentrationserhöhung von November 90 bis Dezember 91 im Bereich von 0,1 mg/kg. Derart geringe Veränderungen im Schwermetallgehalt lassen sich innerhalb Untersuchungszeitraumes kaum nachweisen. Die Schwermetallkonzentrationen zu einem Probenahmezeitpunkt schwanken in den unterschiedlichen Parzellen des Versickerungsbeckens z.T. in deutlich höheren Spannen." [41]

PAK und PCB

Untersuchungen der Bodenproben auf die 6 PAK der TrinkwV (1990) und auf 5 PCB unterschiedlichen Chlorierungsgrades (Bild 32) ergaben nur in der Mutterbodenschicht der Nachweisgrenze. ..Die Konzentrationen oberhalb Summe Versickerungsbecken liegt mit unter 1 mg/kg im Bereich unbelasteter Ackerböden. Fluoranthen ist dabei immer die häufigste Verbindung. Eine gewisse PAK-Akkumulation in der Mutterbodenschicht im Untersuchungszeitraum ist festzustellen. Weiter werden im November 1990 und Dezember 1991 insgesamt höhere PAK-Gehalte im Boden ermittelt als im August. Da PAK hauptsächlich durch unvollständige Verbrennung entstehen, ist eine höhere Konzentration im Herbst und Winter (Hausbrand) durchaus plausibel. Die niedrigen Werte im August besonders für Fluoranthen sind auf Abbauvorgänge zurückzuführen, die in der warmen Jahreszeit wesentlich schneller ablaufen als im Winter." [41]

Die PCB-Belastung der Mutterschicht ist mit unter 5 μ g/kg für die einzelnen Substanzen gering. Dabei ist ähnlich wie bei den PAK ein Ansteigen der Konzentration im Dezember zu verzeichnen. Laut der Autoren ist eine jahreszeitliche Abhängigkeit der PCB-Emissionen nicht zu erwarten, da diese in der Bundesrepublik Deutschland seit 1983 nicht mehr hergestellt werden und nur noch innerhalb von geschlossenen Systemen eingesetzt werden dürfen. Als mögliche Ursache für den Anstieg der PCB-Konzentrationen im Dezember 1991 wird deshalb der Laubeintrag im Herbst in das Versickerungsbecken angesehen. Laub stellt einen Filter für in der Luft vorhandene Schadstoffe dar.[41]

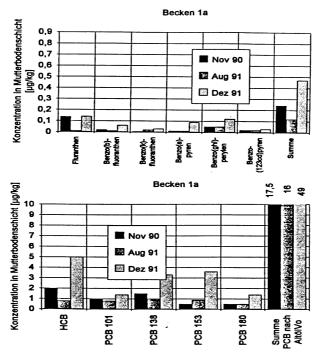


Bild 32 PAK und PCB der Bodenproben [41]

7.7.1.4 Zusammenfassung

Wie aus der Untersuchung ersichtlich wurde, sind keine signifikanten Erhöhungen der Schwermetallgehalte gemessen worden. Die Grenzwerte der TrinkwV wurden von den Mittelwerten der Schwermetallkonzentrationen im Grundwasser deutlich unterschritten.

In den Schichten mit sehr hohem Anteil an organischer Substanz finden augenscheinlich die maßgebenden Rückhalteprozesse für die hier betrachteten Schadstoffe statt. Nur für Pb, Zn und Cu ist ein Ansteigen der Konzentrationen im Untersuchungszeitraum meßbar. Jedoch die Grenzwerte nach AbfKlärV (1992) sind in keinem Fall erreicht oder überschritten. Die geringe stoffliche Belastung des Zulaufwassers der Anlage Nienburg/Langendamm wird auch an den PAK und PCB-Gehalten im Boden deutlich. Nur in der Mutterbodenschicht konnten Konzentrationen oberhalb der Nachweisgrenze ermittelt werden.

Insgesamt weisen sowohl die beschriebenen Felduntersuchungen als auch die halbtechnischen Lysimeterversuche ein hohes Rückhaltevermögen der Böden gegenüber den hier betrachteten eingetragenen Schadstoffen nach.

Jedoch stehen noch Untersuchungen über längere Zeiträume zur Grundwasser- und Bodenbeeinflussung durch Regenwasserversickerungsanlagen aus. Es ist demnach noch nicht vollständig abzuschätzen, ob der langfristige Eintrag von Schadstoffen über das Regenwasser zu Belastungen des Grundwassers führt.

Nach Ansicht der Autoren kann die gezielte Regenwasserversickerung auch unter Berücksichtigung des Grundwasserschutzes eine ernsthafte Alternative zur Regenwasserableitung darstellen.

8 Rechtliche Grundlagen der Versickerung von Straßenoberflächenwasser

8.1 Recht der Europäischen Gemeinschaft

8.1.1 <u>EU - Allgemeine Regelungen</u>

8.1.1.1 Vertrag zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft

Im Vertrag zur Gründung der Europäischen Gemeinschaft vom 25. März 1957 sind die Ziele und Prinzipien der gemeinschaftlichen Umweltpolitik in den Artikeln 130 r und 130 s festgelegt. Ausgehend davon sind die darauf aufbauenden Richtlinien und Verordnungen der EG zu betrachten.

Die Ziele der Umweltpolitik der Gemeinschaft sind nach Artikel 130 r Abs. 1:

- "Erhaltung und Schutz der Umwelt sowie Verbesserung ihrer Qualität;
- Schutz der menschlichen Gesundheit;
- umsichtige und rationelle Verwendung der natürlichen Ressourcen;
- Förderung von Maßnahmen auf internationaler Ebene zur Bewältigung regionaler oder globaler Umweltprobleme."[56]

Die Umweltpolitik beruht nach Artikel 130 r Abs. 2 "auf den Grundsätzen der Vorsorge und Vorbeugung, auf dem Grundsatz, Umweltbeeinträchtigungen mit Vorrang an ihrem Ursprung zu bekämpfen, sowie auf dem Verursacherprinzip."[56] Dabei tragen nach Artikel 130 s Abs. 4: "unbeschadet bestimmter Maßnahmen gemeinschaftlicher Art … die Mitgliedstaaten für die Finanzierung und Durchführung der Umweltpolitik Sorge."[56]

Der Artikel 189 legt unter anderem die Rechtsverbindlichkeit der Richtlinien für die einzelnen Staaten fest.:

"Zur Erfüllung ihrer Aufgaben und nach Maßgabe dieses Vertrags erlassen das Europäische Parlament und der Rat gemeinsam, der Rat und die Kommission … Richtlinien … . … Die Richtlinie ist für jeden Mitgliedstaat, an den sie gerichtet wird, hinsichtlich des zu erreichenden Zieles verbindlich, überläßt jedoch den innerstaatlichen Stellen die Wahl der Form und der Mittel."[56]

"Die Richtlinie der Europäischen Union über einen bestimmten Sachbereich ändert an der innerstaatlichen Verteilung der Zuständigkeiten zwischen Bund und Ländern nichts. Regelt die Richtlinie einen Komplex, der in die Gesetzgebungszuständigkeit der Länder fällt, müssen diese die Ausführung der Richtlinie sicher stellen."[23]

Kommt der Staat seiner Verpflichtung der Umsetzung der Richtlinie nicht nach, so greift automatisch Artikel 171:

"(1) stellt der Gerichtshof fest, daß ein Mitgliedstaat gegen eine Verpflichtung aus diesem Vertrag verstoßen hat, so hat dieser Staat die Maßnahmen zu ergreifen, die sich aus dem Urteil des Gerichtshofs ergeben.

(2) Hat nach Auffassung der Kommission der betreffende Mitgliedstaat diese Maßnahmen nicht ergriffen, so gibt sie, nachdem sie ihm Gelegenheit zur Äußerung gegeben hat, eine mit Gründen versehene Stellungnahme ab, in der sie aufführt, in welchen Punkten der betreffende Mitgliedstaat dem Urteil des Gerichtshofs nicht nachgekommen ist. Hat der betreffende Mitgliedstaat die Maßnahmen, die sich aus dem Urteil des Gerichtshofs ergeben, nicht innerhalb der von der Kommission gesetzten Frist getroffen, so kann die Kommission den Gerichtshof anrufen. Hierbei benennt sie die Höhe des von dem betreffenden Mitgliedstaat zu zahlenden Pauschalbetrags oder Zwangsgelds, die sie den Umständen nach für angemessen hält. Stellt der Gerichtshof fest, daß der betreffende Mitgliedstaat seinem Urteil nicht nachgekommen ist, so kann er die Zahlung eines Pauschalbetrags oder Zwangsgelds verhängen."[56]

8.1.2 Europäisches Wasserrecht

8.1.2.1 Einleitung

"Die Europäische Gemeinschaft und seit dem Vertrag von Maastricht die Europäische Union hat beginnend Anfang der siebziger Jahre und in den letzten zehn Jahren stark zunehmend, Vorschriften auf dem Gebiet des Wasserhaushalts erlassen. Diese ergehen regelmäßig als Richtlinie des Rates und dienen meist dem Gewässerschutz. … Die einzelnen Länder haben dabei zu entscheiden, ob ihr bisheriges Wasserrecht zum Erfüllen der Richtlinie ausreicht. In diesem Fall genügt oft eine Anweisung an die Verwaltung, mit dem Instrumentarium des gegebenen Wasserrechts den Auftrag der Richtlinie zu erfüllen. Andernfalls muß das Land sein Wasserrecht ergänzen." [23]

"Für den Bereich Gewässerschutz und Bewirtschaftung der Wasserressourcen gelten derzeit zahlreiche Richtlinien, Verordnungen und Ratsentscheidungen der Europäischen Union. Sie überschneiden sich zum Teil, sind teilweise nicht aufeinander abgestimmt und lassen kein schlüssiges Gesamtkonzept der Gewässerschutzpolitik erkennen. Die Notwendigkeit der Konsolidierung des EU-Wasserrechts wurde daher allgemein gesehen. Auf verschiedenen Ebenen werden und wurden daher Überlegungen zur Reform des europäischen Wasserrechts angestellt…". [76]

Vorläufiges Ergebnis dieser Entwicklung ist eine vom Umweltrat am 16./17. Juni 1998 in Luxemburg erzielte politische Einigung zum vom Rat vorgeschlagenen Entwurf der Wasserrahmenrichtlinie. Im September 1998 befaßte sich das Europäische Parlament in einer ersten Lesung mit dieser Rahmenrichtlinie. Auf die Kernaussagen der Richtlinie nach neuestem Stand soll im Verlauf dieser Arbeit noch näher eingegangen werden.

8.1.2.2 Richtlinie des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe (80/68/EWG)

"Die Richtlinie soll der Vereinheitlichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten der EG auf dem Gebiet des Gewässerschutzes dienen und bezweckt einen verstärkten Schutz des

Grundwassers. Die Richtlinie enthält insbesondere Verbote für das Einleiten von den in der Liste I der Anlage zur Richtlinie aufgeführten besonders gefährlichen Stoffen (Art. 4). Für die in der Liste II der Anlage zur Richtlinie enthaltenen weiteren gefährlichen Stoffe wird vor dem Einleiten eine eingehende Prüfung verlangt (Art. 5 und 7). Eine Überwachung des Grundwassers bei genehmigten Einleitungen (Art. 8) wie auch eine Bestandsaufnahme der Einleitungen (Art. 15) werden vorgeschrieben." [23]

Hier sollen nur die für diese Aufgabenstellung erforderlichen Punkte aufgezeigt werden. Konkret bezweckt diese Richtlinie nach Artikel 1 Abs. 1:

"... die Verschmutzung des Grundwassers durch Stoffe, die zu den in den Listen I oder II des Anhangs aufgeführten Stoffgruppen und Stoffamilien gehören - nachstehend 'Stoffe aus der Liste I oder II' genannt - zu verhüten und die Folgen seiner bisherigen Verschmutzung soweit wie möglich einzudämmen oder zu beheben."[58]

Dabei sind im Sinne dieser Richtlinie nach Artikel 1 Abs. 2:

- " a. Grundwasser: alles unterirdische Wasser in der Sättigungszone, das in unmittelbarer Berührung mit dem Boden oder dem Untergrund steht;
- b. direkte Ableitung: Einleitung von Stoffen aus der Liste I oder II in das Grundwasser ohne Boden- oder Untergrundpassage;
- c. indirekte Ableitung: Einleitung von Stoffen aus der Liste I oder II in das Grundwasser nach Boden- oder Untergrundpassage;
- d. Verschmutzung: direkte oder indirekte Ableitung von Stoffen oder Energie durch den Menschen in das Grundwasser, wenn dadurch die menschliche Gesundheit oder die Wasserversorgung gefährdet, die lebenden Bestände und das Ökosystem der Gewässer geschädigt oder die sonstige rechtmäßige Nutzung der Gewässer behindert werden." [58]

Nach Artikel 3 müssen die Mitgliedstaaten die erforderlichen Maßnahmen ergreifen, um

- "a. die Ableitung von Stoffen aus der Liste I in das Grundwasser zu verhindern und
- b. die Ableitung von Stoffen aus der Liste II in das Grundwasser zu begrenzen, damit die Verschmutzung des Grundwassers durch diese Stoffe verhütet wird."[58]

Artikel 4 Abs.1 verbietet den Mitgliedstaaten

• "jegliche direkte Ableitung von Stoffen aus der Liste I"[58]

Außerdem

- "führen die Mitgliedstaaten vor den Maßnahmen zur Beseitigung oder zur Lagerung zwecks Beseitigung dieser Stoffe, die zu einer indirekten Ableitung führen können, eine Prüfung durch. Aufgrund der Ergebnisse dieser Prüfung verbieten die Mitgliedstaaten diese Maßnahme oder erteilen eine Genehmigung, sofern alle technischen Vorsichtsmaßnahmen eingehalten werden, die nötig sind, um diese Ableitung zu verhindern:
- ergreifen die Mitgliedstaaten die von ihnen für notwendig erachteten geeigneten Maßnahmen, um die indirekte Ableitung von Stoffen aus der Liste I, die aus anderen als den unter dem zweiten Gedankenstrich genannten Tätigkeiten auf dem oder im Boden

herrührt, zu verhindern. Sie unterrichten hiervon die Kommission, die im Lichte dieser Information dem Rat Vorschläge zur Änderung dieser Richtlinie unterbreiten kann."[58]

Artikel 4 Abs. 2 besagt jedoch:

"Ergibt sich bei einer vorherigen Prüfung, daß das Grundwasser, in das die Ableitung von Stoffen aus der Liste I vorgesehen ist, auf Dauer für andere Nutzungen, insbesondere für Haushalts- oder landwirtschaftliche Zwecke, untauglich ist, so können die Mitgliedstaaten die Ableitung dieser Stoffe genehmigen, sofern das Vorhandensein dieser Stoffe die Nutzung von Bodenschätzen nicht behindert. Diese Genehmigungen können nur unter der Voraussetzung erteilt werden, daß alle technischen Vorsichtsmaßnahmen durchgeführt werden, damit diese Stoffe nicht andere Wassersysteme erreichen oder andere Ökosysteme schädigen können."[58]

Nach Artikel 5 Abs. 1 müssen die Mitgliedsstaaten eine Prüfung durchführen:,,

- vor jeder direkten Ableitung von Stoffen aus der Liste II, um diese Ableitungen zu begrenzen;
- vor Maßnahmen zur Beseitigung oder Lagerung zwecks Beseitigung dieser Stoffe, die zu einer indirekten Ableitung führen können. Aufgrund der Ergebnisse dieser Prüfung können die Mitgliedstaaten eine Genehmigung erteilen, sofern alle technischen Vorsichtsmaßnahmen eingehalten werden, mit denen die Verschmutzung des Grundwassers durch diese Stoffe verhindert werden kann."[58]

Außerdem haben die Mitgliedsstaaten nach Artikel 5 Abs. 2 die Pflicht zur Ergreifung der

"von ihnen für notwendig erachteten geeigneten Maßnahmen, um jede indirekte Ableitung von Stoffen aus der Liste II, die aus anderen als den in Absatz 1 genannten Tätigkeiten auf dem oder im Boden herrührt, einzuschränken."[58]

Artikel 7 beschreibt den Umfang der durchzuführenden Prüfungen wie folgt:

"Die vorherigen Prüfungen … müssen eine Untersuchung der hydrogeologischen Bedingungen der betreffenden Zone, der etwaigen Reinigungskraft des Bodens und des Untergrundes sowie der Gefahren einer Verschmutzung und einer Beeinträchtigung der Qualität des Grundwassers durch die Ableitung umfassen und die Feststellung ermöglichen, ob die Ableitung in das Grundwasser vom Gesichtspunkt des Umweltschutzes aus eine angemessene Lösung darstellt."[58]

Genehmigungen für die direkte oder indirekte Ableitung von Stoffen aus der Liste I bzw. II können nach Artikel 8 "...nur erteilt werden, nachdem die zuständigen Behörden der Mitgliedstaaten festgestellt haben, daß die Überwachung des Grundwassers und insbesondere seiner Qualität gewährleistet ist."[58]

Artikel 9 besagt, wenn direkte Ableitungen genehmigt werden oder "...eine Abwasserbeseitigung, die zwangsläufig zu einer indirekten Ableitung führt..."[58], "so ist in der Genehmigung insbesondere folgendes festzulegen:

- Ort der Ableitung,
- Ableitungsverfahren,

- zu ergreifende Vorsichtsmaßnahmen, insbesondere unter Berücksichtigung der Art und Konzentration der in der Ableitung vorhandenen Stoffe, der Eigenschaften des Aufnahmemilieus sowie der in der Nähe liegenden Wasserentnahmestellen, insbesondere für Trinkwasser, Thermalwasser und Mineralwasser,
- die zulässige Höchstmenge eines Stoffes in der Ableitung während einer oder mehrerer bestimmter Zeitspannen und angemessene Bedingungen in Bezug auf die Konzentration dieser Stoffe,
- Vorkehrungen, die die Überwachung der Ableitung in das Grundwasser ermöglichen,
- erforderlichenfalls Maßnahmen zur Überwachung des Grundwassers, insbesondere seiner Qualität."[58]

Diese Genehmigungen dürfen nach Artikel 11 "...nur für einen begrenzten Zeitraum erteilt werden; sie werden mindestens alle vier Jahre überprüft. Sie können verlängert, geändert oder widerrufen werden."[58]

Artikel 15 schreibt eine Bestandsaufnahme der "....zuständigen Behörden der Mitgliedstaaten... der nach Artikel 4 erteilten Genehmigungen für Ableitungen von Stoffen aus der Liste I, der nach Artikel 5 erteilten Genehmigungen für direkte Ableitungen von Stoffen aus der Liste II und der nach Artikel 6 erteilten Genehmigungen vor."[58]

Stoffe aus der Liste I, deren Ableitung gemäß dieser Richtlinie verhindert werden soll, sind laut Anhang:

- "1. organische Halogenverbindungen und Stoffe, die im Wasser derartige Verbindungen bilden können
- 2. organische Phosphorverbindungen
- 3. organische Zinnverbindungen
- 4. Stoffe, die im oder durch Wasser krebserregende, mutagene oder teratogene Wirkung haben
- 5. Quecksilber und Quecksilberverbindungen
- 6. Cadmium und Cadmiumverbindungen
- 7. Mineralöle und Kohlenwasserstoffe
- 8. Cyanide"[58]

Stoffe aus der Liste II, deren Ableitung nach dieser Richtlinie begrenzt werden soll, sind laut Anhang: "

1. folgende Metalloide und Metalle und ihre Verbindungen:

1. Zink 11. Zinn 2. Kupfer 12. Barium 3. Nickel 13. Beryllium 4. Chrom 14. Bor 5. Blei 15. Uran 6. Selen 16. Vanadium 7. Arsen 17. Kobalt 8. Antimon 18. Thallium 9. Molybdän 19. Tellur 10. Titan 20. Silber

- 2. Biozide und davon abgeleitete Verbindungen, die nicht in der Liste I enthalten sind;
- 3. Stoffe, die eine für den Geschmack und/oder den Geruch des Grundwassers abträgliche Wirkung haben, sowie Verbindungen, die im Grundwasser zur Bildung solcher Stoffe führen und es für den menschlichen Gebrauch ungeeignet machen können;
- 4. giftige oder langlebige organische Siliciumverbindungen und Stoffe, die im Wasser zur Bildung solcher Verbindungen führen können, mit Ausnahme derjenigen, die biologisch unschädlich sind oder sich im Wasser rasch in biologisch unschädliche Stoffe umwandeln;
- 5. anorganische Phosphorverbindungen und reiner Phosphor;
- 6. Fluoride:
- 7. Ammoniak und Nitrite."

8.1.2.3 Richtlinie des Rates 76/464/EWG vom 4. Mai 1976 betreffend die Verschmutzung infolge der Ableitung bestimmter gefährlicher Stoffe in die Gewässer der Gemeinschaft

"Die Richtlinie … soll der Vereinheitlichung der Rechtsvorschriften der Mitgliedstaaten der EG auf dem Gebiet des Gewässerschutzes dienen und bezweckt einen verstärkten Schutz des Oberflächenwassers. Die Richtlinie strebt insbesondere Beschränkungen für das Einleiten von den in der Liste I der Anlage zur Richtlinie aufgeführten besonders gefährlichen Stoffen an (Art. 3). Für die in der Liste II der Anlage zur Richtlinie enthaltenen weiteren gefährlichen Stoffen wird vor dem Einleiten eine eingehende Prüfung verlangt (Art. 7). Eine Bestandsaufnahme der Einleitungen (Art. 11) wird vorgeschrieben.

Die in Art. 4 enthaltenen Regelungen für das Grundwasser sind durch die Richtlinie des Rates über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe ... gegenstandslos geworden."[23] Artikel 4 dieser Richtlinie legt dazu konkret fest:

"...Die das Grundwasser betreffenden Bestimmungen dieser Richtlinie treten mit Beginn der Anwendung einer besonderen Richtlinie über Grundwasser außer Kraft."[57]

Damit ist eine Bearbeitung dieser Richtlinie entsprechend der Aufgabenstellung hinfällig geworden.

8.1.2.4 Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser

"Die Richtlinie fordert neben bestimmten Abwasserbehandlungsarten auch die Einrichtung ordnungsgemäßer Kanalisation innerhalb bestimmter Fristen, die je nach der Empfindlichkeit der Gebiete, besser wohl der Gewässer, durch die Mitgliedstaaten variiert werden können. …

Die Richtlinie ist wie die meisten Gewässerschutzregelungen der EG an die Mitgliedstaaten gerichtet; sie muß deshalb erst von den Mitgliedstaaten - und zwar spätestens bis zum 30. Juni 1993 - in nationales Recht umgesetzt werden, soweit nicht dort schon gleichartiges oder strengeres vorhanden ist. Durch die von der EG gesetzten Endfristen können aber Verschärfungen des bestehenden Rechtszustandes nicht ausgeschlossen werden."[23]

Bearbeitet werden hier nur die für diese Arbeit erforderlichen Punkte.

Nach Artikel 1 betrifft diese Richtlinie: "... das Sammeln, Behandeln und Einleiten von kommunalem Abwasser und das Behandeln und Einleiten von Abwasser bestimmter Industriebranchen. Ziel dieser Richtlinie ist es, die Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen dieses Abwassers zu schützen."[59] Dabei sind im Sinne dieser Richtlinie nach Artikel 2 u.a.

- "1. 'Kommunales Abwasser': häusliches Abwasser oder Gemisch aus häuslichem und industriellem Abwasser und/oder Niederschlagswasser.
- 2. 'Häusliches Abwasser': Abwasser aus Wohngebieten und den dazugehörigen Einrichtungen, vorwiegend menschlichen Ursprungs und der Tätigkeiten in Haushaltungen.
- 3. 'Industrielles Abwasser': Abwasser aus Anlagen für gewerbliche oder industrielle Zwecke, soweit es sich nicht um häusliches Abwasser und Niederschlagswasser handelt ...
- 7. 'Erstbehandlung': physikalische und/oder chemische Behandlung des kommunalen Abwassers mit Hilfe eines Verfahrens, bei dem sich die suspendierten Stoffe absetzen, oder anderer Verfahren, bei denen bezogen auf die Werte im Zulauf der BSB5 um mindestens 20 % und die suspendierten Stoffe um mindestens 50 % verringert werden.
- 8. 'Zweitbehandlung': Abwasserbehandlung durch eine biologische Stufe mit einem Nachklärbecken oder ein anderes Verfahren, bei dem die Anforderungen nach Anhang I Tabelle 1 eingehalten werden.
- 9. 'Geeignete Behandlung': Behandlung von kommunalem Abwasser durch ein Verfahren und/oder Entsorgungssystem, welches sicherstellt, daß die aufnehmenden Gewässer den maßgeblichen Qualitätszielen sowie den Bestimmungen dieser und jeder anderen einschlägigen Richtlinie der Gemeinschaft entsprechen...."[59]

Anforderungen an kommunale Abwässer sind im Anhang I formuliert. Dazu gehören auch die "...Einleitungen aus kommunalen Abwässerbehandlungsanlagen in Gewässer..."[59].

Hierbei müssen "Abwasserbehandlungen … so ausgelegt oder umgerüstet werden, daß vor dem Einleiten in Gewässer repräsentative Proben des zugeleiteten Abwassers und des behandelten Abwassers entnommen werden können. …

Die Stelle, an der kommunales Abwasser eingeleitet wird, ist möglichst so zu wählen, daß die Auswirkungen auf das aufnehmende Gewässer auf ein Minimum beschränkt werden."[59]

Bei der Durcharbeitung dieser Richtlinie bezüglich der Aufgabenstellung wird ersichtlich, daß diese Richtlinie sich mit der "Richtlinie des Rates über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe" zum Teil überschneidet bzw. beide nicht aufeinander abgestimmt sind, wobei die zuerst betrachtete Richtlinie als die geeignetere angesehen wird.

8.1.2.5 Die Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union

Kernaussagen:

Ziel des Entwurfes ist : "...ein gemeinschaftlicher Rahmen für den Schutz aller Oberflächengewässer und des Grundwassers einschließlich der Küstengewässer der Güte und der Menge nach (Art. 1). Ausreichend gutes Wasser für eine nachhaltige ausgeglichene Nutzung soll gewährleistet werden. ...

Umweltziele sind der "gute Zustand" aller Gewässer, der innerhalb 16 Jahre nach Inkrafttreten der Richtlinie (Art. 4) erreicht werden muß. Das sind nach Art. 4 unter Bezug auf Anhang V:

...

der gute chemische Zustand für Oberflächengewässer und Grundwasser

..

- die Umkehrung steigender signifikanter Aufwärtstrends bei Schadstoffkonzentrationen im Grundwasser

Ausnahmen sind möglich (Art. 4 Abs. 3, 4, 6 und 7):

- zeitlicher Aufschub bei Unverhältnismäßigkeit um 12 Jahre sowie um weitere 6 Jahre, wenn die Kommission zustimmt (Begründung notwendig) (Abs. 3)
- schwächere Umweltqualitätsziele, wenn Verbesserungen nicht möglich oder unverhältnismäßig teuer, sofern nicht andere Gewässer beeinträchtigt werden (Abs. 4).

••

• Der neu aufgenommene Art. 12 a fordert die Anwendung des kombinierten Ansatzes.

Unter dem kombinierten Ansatz ist dabei folgendes zu verstehen: In einem ersten Schritt werden Abwassereinleitungen auf Grundlage von Emissionsstandards entsprechend dem Stand der Technik begrenzt. In einem zweiten Schritt wird geprüft, ob die hieraus

resultierende Gewässergüte den Gewässergütezielen gem. Art. 4 des Richtlinienentwurfs genügt und ob weitere Maßnahmen über den Stand der Technik hinaus erforderlich sind.

• Um die Umweltziele zu erreichen, sind Maßnahmenprogramme aufzustellen, bestehend aus grundlegenden und ergänzenden Maßnahmen (Art. 13). Die Maßnahmenprogramme müssen bis 10 Jahre nach Inkrafttreten der Richtlinie aufgestellt und bis 13 Jahre nach Inkrafttreten umgesetzt sein.

...

Unter den grundlegenden Maßnahmen sind zwingend vorgesehen:

...

- Vermeidung bzw. Begrenzung signifikanter nachteiliger Auswirkungen auf Gewässer, z.B. durch allgemein verbindliche Regeln
- Verbot der Direkteinleitung von Schadstoffen ins Grundwasser (mit Ausnahmen)
- Maßnahmen zur Beseitigung der Verschmutzung durch prioritäre Stoffe und zur Verringerung der Verschmutzung durch andere Stoffe

...

Eine nicht erschöpfende Liste ergänzender Maßnahmen ist in Anhang VI aufgelistet.

...

Der Rat soll Strategien zum Schutz der Gewässer aufstellen und durchsetzen (Art. 21). Besonders bedeutend ist hier die Festlegung, daß die Kommission bis Ende 1998 eine erste Prioritätsliste von Schadstoffen zur Annahme durch den Rat vorschlagen muß. Für die prioritären Stoffe sind Vermeidungsmaßnahmen und Emissionsbegrenzungen auszuarbeiten." [76]

Grundwasserschutz:

Der nunmehr vorliegende Entwurf nach der "politischen Einigung" im Umweltrat stimmt mit den Ergebnissen des EU-Ministerseminars überein; das gilt insbesondere für

- das Verschlechterungsverbot
- den guten quantitativen Zustand und den guten qualitativen Zustand,
- die Sanierungsverpflichtung und
- die gesamtheitliche Behandlung des Wasserhaushalts.

Grundsätzlich positive Bewertung

Gegenüber dem ursprünglichen Konzept der Wasserrahmenrichtlinie konnten erhebliche Verbesserungen durchgesetzt werden:

- a) So wurde auf die anfangs vorgesehene mengen- und gütemäßige Klassifizierung von Grundwasser in 5 Klassen verzichtet. Jetzt wird nur der "gute Zustand" definiert, der zu erreichen ist. ...
- b) Danach ist das Ziel eines "guten Zustandes" ein anthropogen nur geringfügig belastetes Grundwasser. Hinsichtlich geogener Inhaltsstoffe kann dieses Ziel weder für die Mitgliedsstaaten noch auch für alle Grundwasserbereiche einheitlich festgelegt werden, da die Beschaffenheit des Grundwassers wesentlich vom jeweiligen Grundwasserleiter bestimmt ist, z.B. weiche Urgesteinswässer, harte Kalkschotterwässer. Stoffe anthropogener Herkunft sollten eigentlich im Grundwasser nicht vorkommen. Eine Stoffe ist jedoch nicht auszuschließen. geringfügige Belastung durch diese LAWA-Prüfwerte Orientierungswerte hierfür könnten die sein. die den Trinkwassergrenzwerten entsprechen.

...

c) Letztlich konnte sich die auch im Sondergutachten des Rates von Sachverständigen für Umweltfragen vertretene Meinung durchsetzen, wonach eine Grenzwertfestlegung für die Grundwasserqualität abzulehnen ist, da sie grundsätzlich schwierig, teilweise gar nicht zu bewältigen sei. Die Betrachtung des Grundwassers als ökologischer Standortfaktor fordert nach Ansicht des Rates ein wesentlich differenzierteres Vorgehen.

...

- d) Anstelle von Umweltqualitätsstandards für Grundwasser werden Vermeidungsmaßnahmen an der Quelle in den Vordergrund gestellt wie das Verbot der direkten Einleitung von Schadstoffen (Art. 13 Abs. 3g)....
- e) Die Zustandsbeschreibung des Grundwassers wird aufgeteilt in "quantitativen" und "chemischen" Zustand. ...

Der gute chemische Zustand ist gegeben, wenn keine Salzintrusionen (gekennzeichnet durch die Leitfähigkeit) vorhanden sind und die Qualitätsstandards bestehender Richtlinien (d.h. 50 mg/l NO₃ und 0,1 mg/l Pflanzenschutzmittel-Einzelstoff bzw. 0,5 mg/l in der Summe) eingehalten werden. Abhängige Oberflächengewässer oder Ökosysteme dürfen nicht durch das Grundwasser beeinflußt werden.

Noch offene Probleme

Trotz der grundsätzlich positiven Bewertung scheinen Verbesserungen noch erforderlich.

Dies sind für den Bereich Grundwasser:

- Das Ziel eines guten chemischen Zustands des Grundwassers, ein anthropogen nur geringfügig verschmutztes Grundwasser, ist im Richtlinienentwurf noch nicht ausreichend verankert. ...
- Die in der Grundwasserrichtlinie 80/68/EWG vorgesehene Ausnahmeregelung für geringfügige Konzentrationen ist nicht übernommen worden. Das muß nachgebessert werden.

Gesamtbewertung und Ausblick:

Wasserrahmenrichtlinie die schafft Voraussetzung für eine einheitliche Gewässerschutzpolitik in der Europäischen Union. Etliche bestehende ältere Richtlinien zum Gewässerschutz (Oberflächenwasser für Trinkwasser. gefährliche Stoffe Tochterrichtlinien, Fischgewässer, Probenahme, Muschelgewässer und Grundwasser) werden aufgehoben. Ihr Inhalt geht harmonisiert in die Wasserrahmenrichtlinie ein. Damit kommt die Kommission einer deutschen Forderung nach.

Ziel der Richtlinie ist es, den heutigen hohen Stand des Gewässerschutzes in Deutschland zu sichern und europaweit eine verbesserte Qualität der Gewässer zu erreichen. In enger Zusammenarbeit zwischen den Ländern (LAWA) und dem Bund (BMU) konnten wesentliche Anliegen durchgesetzt werden, wenn auch noch einige Regelungen in der politischen Einigung des Umweltrates aus deutscher Sicht verbesserungsbedürftig sind.

Kleinere Änderungen scheinen durchaus noch möglich. Im September 1998 wird sich das Europäische Parlament in einer ersten Lesung mit der Rahmenrichtlinie befassen.

Unter der österreichischen Präsidentschaft soll bis Ende des Jahres der gemeinsame Standpunkt erreicht werden und unter der deutschen Präsidentschaft soll die Richtlinie verabschiedet werden." [76]

8.2 Recht der Bundesrepublik Deutschland

8.2.1 Gesetze des Bundes

8.2.1.1 Wasserhaushaltsgesetz (WHG)

Als Rahmengesetz des Bundes, das sich auf dessen Gesetzgebungskompetenz aus Art. 75 Nr. 4 GG [53] stützt, ist das Wasserhaushaltsgesetz auf ergänzende Regelungen durch die Landeswassergesetze angelegt. Die Landeswassergesetze als rahmenausfüllende Gesetze enthalten vor allem Bestimmungen zur Konkretisierung und zum Vollzug des Wasserhaushaltsgesetzes. In § 1 des Wasserhaushaltsgesetzes werden zu Beginn alle Gewässer aufgeführt, die zum sachlichen Geltungsbereich dieses Gesetzes gehören, darunter auch das Grundwasser.[73]

Nach § 1a Abs. 1 sind die Gewässer: "....als Bestandteil des Naturhaushaltes... so zu bewirtschaften, daß sie dem Wohl der Allgemeinheit ... dienen und vermeidbare Beeinträchtigungen ihrer ökologischen Funktionen unterbleiben."[73] Gemäß Abs. 2 ist: "Jedermann ... verpflichtet, bei Maßnahmen, mit denen Einwirkungen auf ein Gewässer verbunden sein können, die nach den Umständen erforderliche Sorgfalt anzuwenden, um eine Verunreinigung des Wassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften zu verhüten ..."[73] Grundeigentum berechtigt nicht nach Abs. 3: "zu einer Gewässerbenutzung, die nach diesem Gesetz oder nach den Landeswassergesetzen einer Erlaubnis oder Bewilligung bedarf..."[73] Nach § 2 Abs. 1 bedarf eine Benutzung der

Gewässer: "...der behördlichen Erlaubnis (§ 7) ... , soweit sich nicht aus den Bestimmungen dieses Gesetzes oder aus den im Rahmen dieses Gesetzes erlassenen landesrechtlichen Bestimmungen etwas anderes ergibt."[73] In § 3 werden konkret die Einwirkungen auf ein Gewässer, aufgezeigt, die eine Benutzung darstellen. Dazu gehört auch das: "...5. Einleiten von Stoffen in das Grundwasser..."[73]

Die Versickerung von Niederschlagswasser wird hier zwar nicht ausdrücklich erwähnt, aber es kann davon ausgegangen werden, daß das Wasser auch als "Stoff" anzusehen ist.: "... denn der Begriff des Stoffes i. S. des § 3 Abs. 1 Nr. 5 WHG erfaßt jede Materie, die vor dem Einleiten in das Grundwasser nicht vorhanden war. Dazu gehört auch Wasser selbst, gleichgültig, ob es rein, verschmutzt, erhitzt oder gekühlt ist."[43]

Die Erlaubnis und die Bewilligung können nach § 4 Abs.1: "... unter Festsetzung von Benutzungsbedingungen und Auflagen erteilt werden. Auflagen sind auch zulässig, um nachteilige Wirkungen für andere zu verhüten oder auszugleichen."[73] Nach § 4 Abs.2 können durch Auflagen unter anderem: "

- 1. Maßnahmen zur Beobachtung oder zur Feststellung des Zustandes vor der Benutzung und von Beeinträchtigungen und nachteiligen Wirkungen durch die Benutzung angeordnet werden, ...
- 2. Maßnahmen angeordnet werden, die zum Ausgleich einer auf die Benutzung zurückzuführenden Beeinträchtigung der ... chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers erforderlich sind,
- 3. dem Unternehmer angemessene Beiträge zu den Kosten von Maßnahmen auferlegt werden, die eine Körperschaft des öffentlichen Rechts trifft oder treffen wird, um eine mit der Benutzung verbundene Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit zu verhüten oder auszugleichen."[73]
- § 5 regelt Vorbehalte, unter welchen eine Erlaubnis erteilt wird. In diesem Falle zutreffende nachträglich mögliche Anordnungen sind:
- "...zusätzliche Anforderungen an die Beschaffenheit einzubringender oder einzuleitender Stoffe ..."
- "...Maßnahmen der in § 4 Abs. 2 Nr. ...2a ... genannten Arten ...". Das sind in diesem Falle Maßnahmen, "...die zum Ausgleich einer auf die Benutzung zurückzuführenden Beeinträchtigung der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers erforderlich sind..."
- "...Maßnahmen für die Beobachtung der Wasserbenutzung und ihrer Folgen ..."[73]

Zusätzliche Anforderungen an die Beschaffenheit einzubringender oder einzuleitender Stoffe dürfen nach § 5 Absatz 1: "...nicht gestellt werden, wenn der mit der Erfüllung der Anforderung verbundene Aufwand außer Verhältnis zu dem mit der Anforderung angestrebten Erfolg steht; dabei sind insbesondere Art, Menge und Gefährlichkeit der einzubringenden oder einzuleitenden Stoffe sowie Nutzungsdauer und technische Besonderheiten der Anlage zu berücksichtigen. Die Anforderungen nach § 7 a dürfen nicht unterschritten werden."[73]

Nach § 7 a Abs.1 darf eine Erlaubnis für das Einleiten von Abwasser nur erteilt werden,: "... wenn die Schadstofffracht des Abwassers so gering gehalten wird, wie dies bei Einhaltung der jeweils in Betracht kommenden Verfahren nach dem Stand der Technik möglich ist....Die Bundesregierung legt durch Rechtsverordnung mit Zustimmung des Bundesrates Anforderungen fest, die dem Stand der Technik entsprechen."[73]

Hierbei muß erwähnt werden, daß im WHG der Abwasserbegriff verwendet wird, ohne ihn aber genau zu definieren.: "Es ist davon auszugehen, daß der Abwasserbegriff des WHG auf eine im abwassertechnischen Sprachgebrauch und in abwassertechnischen Regelwerken enthaltene 'historische' Begriffsbestimmung aufbaut. Die Reichweite des Abwasserbegriffes im einzelnen ist umstritten. Unstreitig ist jedoch, daß auch Niederschlagswasser Abwasser im Sinne des WHG ist. Ebenso wie beim Abwasserbegriff des WHG ist auch beim Niederschlagswasserbegriff des WHG eine 'historische', abwassertechnische Betrachtungsweise anzulegen. Danach versteht man unter Niederschlagswasser das aus jeder Art von atmosphärischen Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen abfließende Wasser."[43]

Nach § 7a Abs. 5 ist: "Stand der Technik im Sinne des Absatzes 1 ... der Entwicklungsstand technisch und wirtschaftlich durchführbarer fortschrittlicher Verfahren, Einrichtungen oder Betriebsweisen, die als beste verfügbare Techniken zur Begrenzung von Emissionen praktisch geeignet sind."[73]

Pflicht und Pläne zur Abwasserbeseitigung behandelt der § 18 a.: U.a. ist nach Abs. 1: "Abwasser ... so zu beseitigen, daß das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird. ... Abwasserbeseitigung im Sinne dieses Gesetzes umfaßt das ... Versickern...von Abwasser,[73]

§ 21 Abs.1 legt fest: "Wer ein Gewässer benutzt oder einen Antrag auf Erteilung einer Erlaubnis oder Bewilligung gestellt hat, ist verpflichtet, eine behördliche Überwachung der Anlagen, Einrichtungen und Vorgänge zu dulden, die für die Gewässerbenutzung von Bedeutung sind. Er hat dazu, insbesondere zur Prüfung, ob eine beantragte Benutzung zugelassen werden kann, welche Benutzungsbedingungen und Auflagen dabei festzusetzen sind, ob sich die Benutzung in dem zulässigen Rahmen hält und ob nachträglich Anordnungen aufgrund des § 5 oder ergänzender landesrechtlicher Vorschriften zu treffen sind,

- 1. das Betreten von Betriebsgrundstücken und -räumen während der Betriebszeit,
- 2. das Betreten von Wohnräumen sowie von Betriebsgrundstücken und –räumen außerhalb der Betriebszeit, sofern die Prüfung zur Verhütung dringender Gefahren für die öffentliche Sicherheit und Ordnung erforderlich ist, und
- 3. das Betreten von Grundstücken und Anlagen, die nicht zum unmittelbar angrenzenden befriedeten Besitztum von Räumen nach den Nummern 1 und 2 gehören, jederzeit zu gestatten; das Grundrecht der Unverletzlichkeit der Wohnung (Artikel 13 des Grundgesetzes) wird durch Nummer 2 eingeschränkt. Er hat ferner zu dem gleichen Zweck Anlagen und Einrichtungen zugänglich zu machen, Auskünfte zu erteilen, Arbeitskräfte, Unterlagen und Werkzeuge zur Verfügung zu stellen und technische Ermittlungen und Prüfungen zu ermöglichen...."[73]

"Benutzer von Gewässern, die an einem Tag mehr als 750 Kubikmeter Abwasser einleiten dürfen…" haben nach § 21a Abs. 1, "…einen oder mehrere Betriebsbeauftragte für

Gewässerschutz (Gewässerschutzbeauftragte) zu bestellen."[73] Dabei kann gemäß Abs. 2 die: "zuständige Behörde ... anordnen, daß die Einleiter von Abwasser in Gewässer, für die die Bestellung eines Gewässerschutzbeauftragten nach Abs. 1 nicht vorgeschrieben ist, ... einen oder mehrere Gewässerschutzbeauftragte zu bestellen haben."[73]

Laut § 33 Abs.2 Punkt 3 können die Länder: "...allgemein oder für einzelne Gebiete bestimmen, daß ... für das Einleiten von Niederschlagswasser in das Grundwasser zum Zwecke seiner schadlosen Versickerung eine Erlaubnis nicht erforderlich ist."[73]

Nach § 34 darf eine: " Erlaubnis für das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser … nur erteilt werden, wenn eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist."[73]

8.2.1.2 Abwasserabgabengesetz (AbwAG)

Zweck des Gesetzes über Abgaben für das Einleiten von Abwasser in Gewässer (Abwasserabgabengesetz), ist die Einführung einer Abgabenpflicht für Abwassereinleiter in Form einer Sonderabgabe. Für das Thema dieser Arbeit interessant sind lediglich die Begriffsdefinitionen zu Beginn des Gesetzes.

Im § 2 werden die wichtigsten im Abwasserabgabengesetz verwendeten Begriffe definiert. "Sie sind auf das Abwasserabgabengesetz bezogen und können nicht ohne weiteres auf Begriffe, die im Wasserhaushaltsgesetz vorkommen, angewendet werden, sondern lehnen sich teilweise umgekehrt an Begriffe des Wasserhaushaltsgesetzes an. Etwas anderes gilt dann, wenn das Landesrecht einen Begriff des Abwasserabgabengesetzes ausdrücklich auch für andere allgemeine wasserrechtliche Tatbestände verwendet...."[23] So ist nach § 2 Abs. 1 AbwAG: "...das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen abfließende und gesammelte Wasser (Niederschlagswasser)..." als Abwasser zu qualifizieren.

"Der Begriff des Abwassers wird in § 2 Abs. 1 AbwAG erstmals bundesgesetzlich definiert...".[23] Gemäß § 2 Abs. 2 ist das: "Einleiten im Sinne dieses Gesetzes ... das unmittelbare Verbringen des Abwassers in ein Gewässer; das Verbringen in den Untergrund gilt als Einleiten in ein Gewässer..."[60] "Abwasser wird im Sinne des § 2 Abs. 2 AbwAG in den Untergrund auch schon dann verbracht, wenn es vorsätzlich auf den Boden aufgebracht wird; das Eindringen in den Untergrund braucht vom Vorsatz nicht erfaßt zu sein (so BVerwG in E 1.311)). Denn es ist davon auszugehen, daß auf den Boden aufgebrachtes Abwasser zumindest teilweise durch Versickern in den Untergrund gelangt."[23]

Eine Abwasserbehandlungsanlage im Sinne dieses Gesetzes ist nach § 2 Abs.3: "eine Einrichtung, die dazu dient, die Schädlichkeit des Abwassers zu vermindern oder zu beseitigen..."[60] "Voraussetzung für die Anwendung des Begriffs der Abwasserbehandlungsanlage ist ... in jedem Fall, daß erstens eine "Einrichtung" vorliegt, die zweitens dazu dient, die Schädlichkeit des Abwassers zu vermindern, zu beseitigen oder die Entstehung des Abwassers zu verhindern, also ihrer Zweckbestimmung nach darauf gerichtet ist, den gewässerfreundlichen Zweck zu erzielen."[23]

8.2.1.3 Bundes-Bodenschutzgesetz (BbodSchG)

"Der Bund hat ein Bundes-Bodenschutzgesetz - BBodSchG vom 17. März 1998 (BGBl. I S. 502), das zum 1. März 1999 in Kraft treten wird, erlassen. Die Bundesregierung will die Zeit bis zum Inkrafttreten des Bundes-Bodenschutzgesetzes … nutzen und die notwendigen Rechtsverordnungen, insbesondere zur Festlegung von Bodenwerten, verabschieden. Die Länder werden ergänzende Vorschriften erlassen und vor allem die Vollzugszuständigkeiten regeln."[23]

Zweck dieses Gesetzes ist es nach § 1: "... nachhaltig die Funktionen des Bodens zu sichern oder wiederherzustellen. Hierzu sind schädliche Bodenveränderungen abzuwehren, der Boden und Altlasten sowie hierdurch verursachte Gewässerverunreinigungen zu sanieren und Vorsorge gegen nachteilige Einwirkungen auf den Boden zu treffen. Bei Einwirkungen auf den Boden sollen Beeinträchtigungen seiner natürlichen Funktionen sowie seiner Funktion als Archiv der Natur- und Kulturgeschichte so weit wie möglich vermieden werden."[55]

In § 2 Abs. 1 wird der Begriff Boden definiert und unterschieden zwischen der Bodenlösung einerseits und dem Grundwasser andererseits: "Boden im Sinne dieses Gesetzes ist die obere Schicht der Erdkruste, soweit sie Träger der in Absatz 2 genannten Bodenfunktionen ist, einschließlich der flüssigen Bestandteile (Bodenlösung) und der gasförmigen Bestandteile (Bodenluft), ohne Grundwasser und Gewässerbetten."[55]

"Versickerndes Wasser (im Boden, der Verf..) staut sich an schwer wasserdurchlässigen Bodenschichten, sammelt sich dort an und bildet wasserführende Schichten; diese Bodenzonen sind mit Wasser gesättigt." Im hydrogeologischen Sprachgebrauch wird nur das Wasser in dieser gesättigten Bodenzone als Grundwasser bezeichnet. Der wasserrechtliche Sprachgebrauch war bisher anders: Nach herrschender wasserrechtlicher Auffassung wurde das gesamte unterirdisch natürlich vorkommende Wasser als Grundwasser bezeichnet. Zu diesem weiten Grundwasserbegriff des Wasserrechts zählte sowohl das Wasser in der gesättigten Zone als auch alles übrige im Boden natürlich vorkommende Wasser, wie Haftwasser, Kapillarwasser, Sickerwasser usw. …

§ 2 Abs. 1 BBodSchG unterscheidet nun für Boden im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetzes zwischen der zum Boden gehörenden Bodenlösung einerseits und dem aus dem Bodenbegriff ausgenommenen Grundwasser andererseits.

Allerdings hat diese Begriffsbestimmung nur für den Vollzug des Bundes-Bodenschutzgesetzes, nicht aber für den Vollzug des Wasserrechts unmittelbare Gültigkeit. Dennoch kann wohl der bisherige, weitgefaßte Grundwasserbegriff im Wasserrecht nicht mehr aufrechterhalten werden. Um zu einer klaren Abgrenzung zwischen Wasserrecht und Bodenschutzrecht zu kommen, ist eine Harmonisierung der Begriffsprägungen für Grundwasser auf der Grundlage des hydrogeologischen Sprachgebrauchs erforderlich."[23]

In § 2 Abs.2: "...werden die Bodenfunktionen eingeteilt und aufgezählt, die nach § 1 Satz 1 nachhaltig zu sichern oder wiederherzustellen sind. Die Bodenfunktionen sind das eigentliche Schutzgut des Bundes-Bodenschutzgesetzes (vgl. § 1 Satz 2 BBodSchG). Unter anderem erfüllt der Boden im Sinne dieses Gesetzes: "...natürliche Funktionen als

a. Lebensgrundlage und Lebensraum für Menschen, Tiere, Pflanzen und Bodenorganismen,

- b. Bestandteil des Naturhaushalts, insbesondere mit seinen Wasser- und Nährstoffkreisläufen,
- c. Abbau-, Ausgleichs- und Aufbaumedium für stoffliche Einwirkungen aufgrund der Filter-, Puffer und Stoffumwandlungseigenschaften, insbesondere auch zum Schutz des Grundwassers..."[55]

"Zwar ist das Grundwasser nicht Bestandteil des Bodens im Sinn des § 2 Abs. 1 BBodSchG, intakte Bodenschichten sind aber ein natürlicher Filter, Puffer, Stoffumwandler und damit ein wirksamer Schutz für das darunterliegende Grundwasser - oder anders ausgedrückt: Der Grundwasserschutz ist eine der natürlichen Funktionen des Bodens (vgl. Abs. 2 Nr. 1 Buchstabe b und c BBodSchG). Da das Bundes-Bodenschutzgesetz die Sicherung und erforderlichenfalls Wiederherstellung dieser (und der anderen) Funktionen des Bodens bezweckt, schützt es auf diese Weise auch das Grundwasser"[23]

Die Bodenfunktionen: "...werden im folgenden Absatz 3 zum wesentlichen Bestandteil des Begriffs schädliche Bodenveränderung und erlangen über diesen Begriff zentrale Bedeutung, insbesondere für Gefahrenabwehrpflichten nach § 4 BBodSchG und Vorsorgepflichten nach § 7 BBodSchG."[23]

§ 2 Abs.3: "Schädliche Bodenveränderungen im Sinne dieses Gesetzes sind Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen, die geeignet sind, Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen."[55]

"Die hier angegebene Definition für schädliche Bodenveränderungen hat zentrale Bedeutung für das Bundes-Bodenschutzgesetz; auf ihr bauen alle Pflichten des Gesetzes auf. …Der Begriff enthält zwei Elemente:

- Beeinträchtigungen der Bodenfunktionen
- ... Bodenfunktionen können durch stoffliche Bodenbelastung ... beeinträchtigt werden.
- Eignung, durch die Beeinträchtigung der Schutzgüter Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den Einzelnen oder die Allgemeinheit herbeizuführen.

Das Gesetz schützt die Gesundheit und das Eigentum des Einzelnen und im Interesse der Allgemeinheit auch die Funktionen des Bodens im Naturhaushalt. Damit sind auch die ökologischen Bodenfunktionen, etwa der Schutz des Grundwassers, Schutzgut der Allgemeinheit. Werden ökologische Bodenfunktionen beeinträchtigt, so ist dies grundsätzlich geeignet, eine Gefahr für die Allgemeinheit herbeizuführen."[23]

"Ergibt die Prüfung nach § 3 BBodSchG, daß der Anwendungsbereich des Bundes-Bodenschutzgesetzes eröffnet ist, kann die Beeinträchtigung jeder einzelnen Bodenfunktion zu einer schädlichen Bodenveränderung im Sinne des § 2 Abs. 3 BBodSchG und zu Maßnahmen und Pflichten nach §§ 4, 7 BBodSchG führen. ...

Das Wasserrecht ist in § 3 BBodSchG nicht genannt mit der Folge, daß das Bundes-Bodenschutzgesetz und die Wassergesetze nebeneinander anzuwenden sind."[23]

§ 4 regelt die Pflichten zur Gefahrenabwehr:

"(1) Jeder, der auf den Boden einwirkt, hat sich so zu verhalten, daß schädliche Bodenveränderungen nicht hervorgerufen werden."[55]

"Die Pflicht nach Absatz 1 soll dem Entstehen von schädlichen Bodenveränderungen vorbeugen. Sie ist an jeden gerichtet, der auf eigenen oder fremden Boden, unmittelbar durch Maßnahmen auf dem Grundstück selber oder mittelbar … sei es alleine oder sei es als Mitverursacher, einwirkt. Verpflichtet sind sowohl natürliche Personen als auch juristische Personen (z.B. eine Firma, eine Gemeinde usw.). Droht durch das Verhalten einer Person eine schädliche Bodenveränderung, dann muß das Verhalten so abgeändert werden, daß eine schädliche Bodenveränderung nicht hervorgerufen wird. Voraussetzung ist, daß im konkreten Einzelfall eine Prognosesicherheit für das Entstehen einer schädlichen Bodenveränderung besteht; ist keine Prognosesicherheit gegeben, kann allenfalls eine Vorsorgepflicht nach § 7 Satz 1 BBodSchG bestehen. … In Erfüllung seiner Vermeidungspflicht nach Absatz 1 ändert der Einwirkende in eigener Verantwortung sein Verhalten so, daß keine schädlichen Bodenveränderungen mehr hervorgerufen werden können. Eine Beteiligung der Behörden ist nicht erforderlich. Die nach Landesrecht zuständige Behörde kann jedoch im Bedarfsfall eingreifen und zur Erfüllung dieser Vermeidungspflicht Anordnungen für den Einzelfall erlassen (§ 10 Abs. 1 BBodSchG)."[23]

"(2) Der Grundstückseigentümer und der Inhaber der tatsächlichen Gewalt über ein Grundstück sind verpflichtet, Maßnahmen zur Abwehr der von ihrem Grundstück drohenden schädlichen Bodenveränderungen zu ergreifen."[55]

"Droht die schädliche Bodenveränderung aufgrund des Zustands eines Grundstücks, müssen vorbeugend Abwehrmaßnahmen nach § 4 Abs. 2 BBodSchG ergriffen werden. Beispiele: Wasserlösliche Schadstoffe können über das Grundwasser Nachbargrundstücke belasten Wie bei der Vermeidungspflicht nach Absatz 1 muß für das Entstehen der schädlichen Bodenveränderung eine Prognosesicherheit gegeben sein."[23]

- "(3) Der Verursacher einer schädlichen Bodenveränderung oder Altlast sowie dessen Gesamtrechtsnachfolger, der Grundstückseigentümer und der Inhaber der tatsächlichen Gewalt über ein Grundstück sind verpflichtet, den Boden … sowie durch schädliche Bodenveränderungen … verursachte Verunreinigungen von Gewässern so zu sanieren, daß dauerhaft keine Gefahren, erhebliche Nachteile oder erhebliche Belästigungen für den einzelnen oder die Allgemeinheit entstehen. Hierzu kommen bei Belastungen durch Schadstoffe neben Dekontaminations- auch Sicherungsmaßnahmen in Betracht, die eine Ausbreitung der Schadstoffe langfristig verhindern. Soweit dies nicht möglich oder unzumutbar ist, sind sonstige Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen durchzuführen. …
- (5) Sind schädliche Bodenveränderungen ... nach dem 1. März 1999 eingetreten, sind Schadstoffe zu beseitigen, soweit dies im Hinblick auf die Vorbelastung des Bodens verhältnismäßig ist.

Dies gilt für denjenigen nicht, der zum Zeitpunkt der Verursachung aufgrund der Erfüllung der für ihn geltenden gesetzlichen Anforderungen darauf vertraut hat, daß solche Beeinträchtigungen nicht entstehen werden, und sein Vertrauen unter Berücksichtigung der Umstände des Einzelfalles schutzwürdig ist."[55]

"Steht fest, daß eine schädliche Bodenveränderung … vorliegt, besteht kraft Gesetzes die Sanierungspflicht. Die Sanierungspflicht also nicht erst durch die behördliche Anordnung nach § 10 Abs. 1 BBodSchG. …

Es ist zu erwarten, daß die Landesausführungsgesetze, wie nach § 11 und nach § 21 Abs. 2 Nr. 1 BBodSchG vorgesehen, die behördliche Erfassung von ... schädlichen Bodenveränderungen regeln werden. Dann besteht eine Pflicht zur Unterrichtung der Behörden. ...

Die Sanierungspflicht besteht nicht nur für den Boden im Sinn von § 2 Abs. 1 BBodSchG. Sie erstreckt sich auch auf Gewässer, die aufgrund schädlicher Bodenveränderungen ... verunreinigt sind... Insbesondere bei stofflichen Bodenbelastungen können Schadstoffe in ein Gewässer (häufig in das Grundwasser, selten auch in oberirdische Gewässer) eingetragen werden. In einem solchen Fall muß die Sanierung nach einheitlichen Grundsätzen durchgeführt werden. Deshalb wurde die Sanierungspflicht auch auf Gewässer ausgedehnt. Wichtig ist, daß ein Zusammenhang zwischen der schädlichen Bodenveränderung ... und der Gewässerverunreinigung hergestellt werden kann.

Sanierungsziel ist bei schädlichen Bodenveränderungen ... die dauerhafte Beseitigung der Gefahr, der erheblichen Beeinträchtigung oder des erheblichen Nachteils; mit deren Beseitigung liegt keine schädliche Bodenveränderung ... mehr vor.

Sanierungsziel ist nicht die Wiederherstellung des vorherigen, unbelasteten Zustands. Bei der Erfüllung der Sanierungspflicht bestehen Einschränkungen nach Absatz 4 Sätze 1 und 2 zugunsten der planungsrechtlich zulässigen Nutzungen, allerdings nur soweit dies mit dem Schutz der natürlichen Bodenfunktionen und den Archivfunktionen des Bodens (§ 2 Abs. 2 Nr. 1 und 2 BBodSchG) vereinbar ist.

Die in Betracht kommenden Sanierungsmaßnahmen werden in § 4 Abs. 3 Sätze 2 und 3 BBodSchG genannt: Dekontaminationsmaßnahmen und Sicherungsmaßnahmen stehen gleichrangig nebeneinander, sie sind vorrangig gegenüber den sonstigen Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen.

Nähere Anforderungen sind in der Bodenschutzverordnung nach § 8 Abs. 1 Nr. 3 BBodSchG zu erwarten. ...

Eine Sonderregelung besteht für die Gewässersanierung in Absatz 4 Satz 3. Hiernach bestimmen sich die materiellen Anforderungen an die Sanierung nach Wasserrecht.

Die Gewässersanierung dient der Gefahrenabwehr (vgl. § 4 Abs. 3 Satz 1 BBodSchG). Die Berücksichtigung der planungsrechtlich zulässigen Nutzung nach § 4 Abs. 4 Sätze 1 und 2 BBodSchG ist für Gewässersanierungen nicht anzuwenden.

Bei Gewässern sind stets großräumigere Wirkungen zu berücksichtigen und komplexere Überlegungen anzustellen; es wäre in der Tat verfehlt, die Sanierungsanforderungen mit der planungsrechtlich zulässigen Nutzung einzelner Grundstücke zu verknüpfen.

Allerdings müssen die wasserrechtlichen Sanierungsanforderungen erst aus den materiellen Grundentscheidungen des Wasserhaushaltsgesetzes (z.B. § 1a, § 19g, § 26 Abs. 2, § 34 WHG) abgeleitet werden.

Die Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) hat 1994 Empfehlungen für die Erkundung, Bewertung und Behandlung von Grundwasserschäden, die Leitparameter, Prüfwerte und Maßnahmenschwellenwerte enthalten, herausgegeben. Zur Zeit wird in Zusammenarbeit mit der Länderarbeitsgemeinschaft Abfall (LAGA) und der Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Bodenschutz (LABO) eine Aktualisierung vorbereitet, die bis zum Inkrafttreten des Bundes-Bodenschutzgesetzes am 1. März 1999 vorliegen soll. Dabei werden bereits die Änderungen der EG-Trinkwasserrichtlinie, an der sich die Qualitätsanforderungen für das Grundwasser orientieren, berücksichtigt."[23]

Zu § 6, Auf- und Einbringen von Materialien auf oder in den Boden, bereitet die Bundesregierung eine Bodenschutzverordnung vor, die teilweise auch der Umsetzung von § 6 dient. Enthalten sein werden die: "... sich aus diesem Gesetz ergebenden Anforderungen an das Auf- und Einbringen von Materialien hinsichtlich der Schadstoffgehalte und sonstiger Eigenschaften, insbesondere

- Verbote oder Beschränkungen nach Maßgabe von Merkmalen wie Art und Beschaffenheit der Materialien und des Bodens, Aufbringungsort und -zeit und natürliche Standortverhältnisse sowie
- 2. Untersuchungen der Materialien oder des Bodens, Maßnahmen zur Vorbehandlung dieser Materialien oder geeignete andere Maßnahmen zu bestimmen."[55]

§ 7 BBodSchG regelt die Vorsorgepflicht:

"Besteht wegen der räumlichen, langfristigen oder komplexen Auswirkung einer Nutzung die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung, müssen der Grundstückseigentümer, der Grundstücksbesitzer und diejenigen, die Besorgnis auslösende Verrichtungen durchführen oder durchführen lassen (vgl. § 7 Satz 1 BBodSchG), die Bodeneinwirkungen vermeiden oder vermindern, soweit dies im Hinblick auf zulässige Grundstücksnutzungen verhältnismäßig ist (vgl. § 7 Satz 2 BBodSchG). Gemeint sind Einwirkungen auf den Boden, bei denen noch keine Prognosesicherheit für das Entstehen einer Gefahr gegeben ist. Das ist bei stofflichen Bodenbelastungen insbesondere der Fall, wenn Vorsorgewerte nach § 8 Abs. 2 Nr. 2 BBodSchG überschritten sind. Aber auch sonstige Eingriffe in die … biologische Bodenbeschaffenheit können die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung auslösen. Je langfristiger eine Einwirkung erfolgt, je langfristiger ein Schadstoff wirkt, desto eher besteht eine Besorgnis.

...Behördliche Anordnungen zur Erfüllung der Vorsorgepflicht sind nur zulässig, soweit in einer Verordnung nach § 8 Abs. 2 BBodSchG Anforderungen festgelegt sind (§ 7 Satz 4 BBodSchG). Es ist zu erwarten, daß die Bodenschutzverordnung des Bundes anfangs nur in einem stark eingeschränkten Umfang Vorsorgeanforderungen enthalten wird."[23]

"Die Vorsorge für das Grundwasser richtet sich nach wasserrechtlichen Vorschriften."[55]

"... in Betracht kommen insbesondere: § 1a Abs. 2 WHG, §§ 2 mit 7a WHG in Verbindung mit der Abwasserverordnung und der Grundwasserverordnung und die §§ 18a und 18c, 19, 19a mit 19 l, 21, 33 mit 35 WHG, jeweils in Verbindung mit landesrechtlichen Ausführungsbestimmungen."[23]

Zu § 8, Werte und Anforderungen, bereitet der Bund derzeit eine entsprechende Verordnung vor, in der gemäß § 8 Abs.1 "....Vorschriften über die Erfüllung der sich aus § 4 ergebenden boden- und altlastenbezogenen Pflichten sowie die Untersuchung und Bewertung von Verdachtsflächen, schädlichen Bodenveränderungen ..."[55] enthalten sein werden.

"Hierbei können insbesondere

- 1. Werte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der Bodennutzung eine einzelfallbezogene Prüfung durchzuführen und festzustellen ist, ob eine schädliche Bodenveränderung ... vorliegt (Prüfwerte),
- 2. Werte für Einwirkungen oder Belastungen, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung der jeweiligen Bodennutzung in der Regel von einer schädlichen Bodenveränderung ... auszugehen ist und Maßnahmen erforderlich sind (Maßnahmenwerte),
- 3. Anforderungen an
 - a. die Abwehr schädlicher Bodenveränderungen ...
 - b. die Sanierung des Bodens ..., insbesondere an
 - die Bestimmung des zu erreichenden Sanierungsziels,
 - den Umfang von Dekontaminations- und Sicherungsmaßnahmen, die langfristig eine Ausbreitung von Schadstoffen verhindern, sowie
 - Schutz- und Beschränkungsmaßnahmen festgelegt werden."[55]

Nach § 8 Abs.2 werden in der entsprechenden Rechtsverordnung auch: "zur Erfüllung der sich aus § 7 ergebenden Pflichten sowie zur Festlegung von Anforderungen an die damit verbundene Untersuchung und Bewertung von Flächen mit der Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung Vorschriften … erlassen, insbesondere über

- 1. Bodenwerte, bei deren Überschreiten unter Berücksichtigung von geogenen oder großflächig siedlungsbedingten Schadstoffgehalten in der Regel davon auszugehen ist, daß die Besorgnis einer schädlichen Bodenveränderung besteht (Vorsorgewerte),
- 2. zulässige Zusatzbelastungen und Anforderungen zur Vermeidung oder Verminderung von Stoffeinträgen."[57]

Gleichzeitig damit werden laut § 8 Abs.3: "Verfahren zur Ermittlung von umweltgefährdenden Stoffen in Böden, biologischen und anderen Materialien …"[55] festgelegt. "Diese Verfahren umfassen auch Anforderungen an eine repräsentative Probenahme, Probenbehandlung und Qualitätssicherung einschließlich der Ermittlung der Werte für unterschiedliche Belastungen."[55]

Zu § 9, Gefährdungsabschätzung und Untersuchungsanordnungen ist folgendes festzustellen:

"...Nach § 24 Abs. 1 des Verwaltungsverfahrensgesetzes wäre die Behörde verpflichtet, den Sachverhalt bis zur Entscheidungsstufe von Amts wegen zu ermitteln. § 9 BBodSchG schränkt die behördliche Ermittlungspflicht zu Lasten des vermuteten Verursachers einer schädlichen Bodenveränderung ein. Solange nur ein Anfangsverdacht in Form von allgemeinen Hinweisen auf eine schädliche Bodenveränderung vorliegt, soll die Behörde den Sachverhalt auf eigene Kosten nach Maßgabe des Absatzes 1 ermitteln. ...Bodenproben, die einen Prüfwert nach § 8 Abs. 1 Satz 2 Nr. 1 BBodSchG überschreiten, begründen erst einen

Anfangsverdacht, da die gemessene Belastung punktuell und damit ohne Gefahrenrelevanz oder auch geogen verursacht sein kann. Ziel der behördlichen Ermittlungen ist es, konkrete Tatsachen über die bisherigen Grundstücksnutzungen, über die dabei verwendeten Stoffe, über die früheren Betriebsverhältnisse und möglichst auch weitere Boden- und Grundwassermeßwerte und über die in Betracht kommenden Verantwortlichen zu finden, um festzustellen, ob sich der Anfangsverdacht zum hinreichenden Verdacht erhärtet. Je konkreter sich die Anhaltspunkte für eine schädliche Bodenveränderung ... auf den Einzelfall beziehen, desto mehr verdichtet sich der Anfangsverdacht zu einem hinreichenden Verdacht. ...Erst wenn die Behörde einen hinreichenden Verdacht begründen kann, darf sie nach § 9 Abs. 2 dem vermuteten Pflichtigen weitere Untersuchungen zur Gefährdungsabschätzung (= Gefahrerforschung) auferlegen. Es kann verlangt werden, daß die Untersuchungen von Sachverständigen oder Untersuchungsstellen nach § 18 BBodSchG durchzuführen sind. Die den betroffenen Dritten obliegende Duldungspflicht regelt das Landesrecht.

...Wenn sich der Verdacht nicht bestätigt, erhält der in Anspruch genommene vermeintlich Pflichtige die ihm durch die Untersuchungsanordnung nach § 9 Abs. 2 BBodSchG entstandenen Kosten erstattet (§ 24 Abs. 1 BBodSchG).

...Landesrechtlich kann bestimmt werden, daß Anhaltspunkte für das Vorliegen einer schädlichen Bodenveränderung ... der Behörde mitgeteilt werden müssen (vgl. § 21 Abs. 1 und Abs. 2 Nr. 2 BBodSchG - inwieweit die Länder hiervon Gebrauch machen werden, bleibt abzuwarten). Nach Maßgabe des Landesrechts sind Verdachtsflächen in Katastern zu erfassen (§ 11, § 21 Abs. 2 Nr. 1 BBodSchG)."[23]

§ 18 handelt von Sachverständigen und Untersuchungsstellen. Die ergänzenden Landesregelungen müssen dazu abgewartet werden.

8.2.1.4 Baugesetzbuch (BauGB)

8.2.1.4.1 Der Begriff des Niederschlagswassers

"Ebenso wie im WHG wird auch im BauGB der Begriff des Abwassers verwendet, ohne ihn zu definieren … Es ist anzunehmen, daß der Gesetzgeber auch im BauGB den Abwasserbegriff des WHG verwenden wollte. In den Landesbauordnungen wird dagegen häufig darauf hingewiesen, daß zur ordnungsgemäßen Abwasserbeseitigung auch eine ordnungsgemäße Beseitigung des Niederschlagswassers gehört. Hierbei wird vom Niederschlagswasserbegriff der Landeswassergesetze und damit des WHG ausgegangen."[43]

8.2.1.4.2 <u>Versickerungsanlagen im Bauplanungsrecht</u>

Nach § 1 Abs.1 ist es: "Aufgabe der Bauleitplanung …, die bauliche und sonstige Nutzung der Grundstücke in der Gemeinde nach Maßgabe dieses Gesetzbuchs vorzubereiten und zu

leiten."[54] Dabei ist sie eingebunden in die Raumordnung (§ 1 Abs.4 BauGB) und Landesplanung und die Gemeinde hat sich an diesen Vorgaben zu orientieren.

Das Baugesetzbuch sieht gemäß § 1 Abs.2 für die Durchführung der Bauleitplanung ein zweistufiges Verfahren vor: "Bauleitpläne sind der Flächennutzungsplan (vorbereitender Bauleitplan) und der Bebauungsplan (verbindlicher Bauleitplan)."[54]

Laut § 1 Abs.5 sollen die Bauleitpläne unter anderem dabei: "...dazu beitragen, eine menschenwürdige Umwelt zu sichern und die natürlichen Lebensgrundlagen zu schützen und zu entwickeln. Bei der Aufstellung der Bauleitpläne sind insbesondere zu berücksichtigen ...

7. gemäß § 1a die Belange des Umweltschutzes, ... des Naturschutzes und der Landschaftspflege, insbesondere des Naturhaushalts, des Wassers, der Luft und des Bodens ..."[54]

Zu den umweltschützenden Belangen gehören unter anderem nach § 1a Abs. 1: "Mit Grund und Boden soll sparsam und schonend umgegangen werden ..."[54]

"Angesichts dessen, daß Niederschlagswasser als Abwasser im Sinne des BauGB einzustufen ist und Versickerungssysteme der Niederschlagswasserbeseitigung und damit der Abwasserbeseitigung dienen, war es schon bislang zulässig, Flächen für Versickerungsanlagen auf der Basis des § 9 Abs.1 Nr.14 BauGB im Bebauungsplan (ist gleich verbindlicher Bauplan, der Verf.) festzusetzen."[43]:

- "§ 9 Inhalt des Bebauungsplans
- (1) Im Bebauungsplan können aus städtebaulichen Gründen festgesetzt werden: ...
- 14. die Flächen für die ... Abwasserbeseitigung, einschließlich der Rückhaltung und Versickerung von Niederschlagswasser ..."[54]

"Durch die Einfügung des Zusatzes: 'einschließlich der Rückhaltung und Versickerung von Niederschlagswasser' durch das BauROG (Bauraumordnungsgesetz, der Verf.) wird dies klargestellt. Durch die Neufassung des BauGB ist nunmehr auch eine Festsetzung der konkreten Zweckbestimmung einer Fläche als Versickerungsfläche möglich, die Bestandteil einer öffentlichen Entwässerungsanlage sind, da … nur die öffentliche Abwasserbeseitigung erfaßt wird."[43]

"Allerdings gibt es in den einzelnen Bundesländern unterschiedliche Auffassungen, inwieweit diese Festsetzungen bezüglich der Versickerung verbindlich sind."[11]

8.2.2 <u>Verordnungen und Verwaltungsvorschriften</u>

8.2.2.1 Abwasserverordnung (AbwV)

Der Anwendungsbereich der Verordnung über Anforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer wird in § 1 folgendermaßen definiert:,,

(1) Diese Verordnung bestimmt die Anforderungen, die bei der Erteilung einer Erlaubnis für das Einleiten von Abwasser in Gewässer aus den in den Anhängen bestimmten Herkunftsbereichen mindestens festzusetzen sind.

- (2) Anforderungen nach dieser Verordnung sind in die Erlaubnis nur für diejenigen Parameter aufzunehmen, die im Abwasser zu erwarten sind.
- (3) Weitergehende Anforderungen nach anderen Rechtsvorschriften bleiben unberührt."[61]

Der einzig mögliche zutreffende Herkunftsbereich des Abwassers ist im Anhang 1 formuliert als "Häusliches und kommunales Abwasser". Dabei gilt dieser Anhang nach Anhang 1 Abs.1 für dieses Abwasser:

- 1. "das im wesentlichen aus Haushaltungen oder ähnlichen Einrichtungen wie Gemeinschaftsunterkünften, Hotels, Gaststätten, Campingplätzen, Krankenhäusern, Bürogebäuden stammt (häusliches Abwasser) oder aus Anlagen stammt, die anderen als den genannten Zwecken dienen, sofern es häuslichem Abwasser entspricht,
- 2. das in Kanalisationen gesammelt wird und im wesentlichen aus den in Nummer 1 genannten Einrichtungen und Anlagen sowie aus Anlagen stammt, die gewerblichen oder landwirtschaftlichen Zwecken dienen, sofern die Schädlichkeit dieses Abwassers mittels biologischer Verfahren mit gleichem Erfolg wie bei häuslichem Abwasser verringert werden kann (kommunales Abwasser) ..."[61]

Nach Prüfung aller weiteren Herkunftsbereiche des Abwassers auch in der laut § 7 AbwV geltenden Übergangsregelung in der *Rahmen-Abwasser-Verwaltungsvorschrift (Rahmen-AbwasserVwV)*[72] über Mindestanforderungen an das Einleiten von Abwasser in Gewässer konnte festgestellt werden, daß die Vorschriften der AbwV sowie der Rahmen-AbwasserVwV für diese Arbeit nicht zutreffend sind, da weder Niederschlagswasser allgemein noch Niederschlagswasser, welches aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen abfließt als Abwasser definiert wird.

8.2.2.2 Grundwasserverordnung

"Die Grundwasserverordnung dient ausschließlich dazu, rechtsförmlichen EG-rechtlichen Verpflichtungen zum Grundwasserschutz nachzukommen. Sie trägt den vom EuGH im Urteil vom 28.02.1991 - C 131/88 - gestellten Anforderungen an die Form der rechtlichen Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17.12.1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe Rechnung. Die Richtlinie ist bisher - EG-rechtlich zwar nicht ausreichend, innerstaatlich aber dennoch für die Behörden verbindlich - durch Verwaltungsvorschriften in den wasserrechtlichen und abfallrechtlichen Vollzug eingeführt worden. Insofern hat die Grundwasserverordnung nur formale Bedeutung. Veränderungen in der Praxis infolge der Grundwasserverordnung sind nicht veranlaßt.

Die Grundwasserverordnung präzisiert und konkretisiert die Vorschriften des WHG zum Grundwasserschutz ... im Hinblick auf bestimmte gefährliche Stoffe. Diese Stoffe sind in den beiden Listen I und II des Anhangs zur Richtlinie, die in den Anhang zur Verordnung übernommen wurden, aufgezählt. Die Verordnung legt die hierzu notwendigen Überwachungspflichten und Anforderungen an den Inhalt von Zulassungen zur Einleitung ins

Grundwasser konkret fest. Sie begründet keine eigenen Erlaubnis- oder Genehmigungspflichten."

EG-Richtlinien bedürfen einer Umsetzung durch Rechtsvorschrift nur insoweit, als die einzelnen Vorschriften Außenwirkung haben. Vorschriften ohne Außenwirkung in Richtlinien, die sich z.B. auf die Rechtsbeziehung zwischen der Europäischen Kommission und der Bundesrepublik Deutschland beschränken oder nur verwaltungsintern gelten, sind von den zuständigen staatlichen Stellen unmittelbar anzuwenden.

Dies betrifft hier insbesondere den in der Richtlinie 80/68/EWG enthaltenen Art. 15 (Durchführung einer Bestandsaufnahme der erteilten Einleitungserlaubnisse durch die Behörden) und Art. 16 (Berichtspflichten der Bundesrepublik Deutschland gegenüber der Europäischen Kommission).

Anmerkung: Die Eintragungen in das Wasserbuch gelten als Bestandsaufnahme im Sinne des Art. 15 der Richtlinie."[23]

Nach § 1 ist es: "Zweck dieser Verordnung … , zur wirksamen Umsetzung der Richtlinie 80/68/EWG des Rates vom 17. Dezember 1979 über den Schutz des Grundwassers gegen Verschmutzung durch bestimmte gefährliche Stoffe …

- 1. näher zu regeln, wie die wasser- und abfallrechtlichen Vorschriften des Bundes zum Schutz des Grundwassers auf die Einleitung und den sonstigen Eintrag bestimmter gefährlicher Stoffe anzuwenden sind,
- 2. die dabei bestehenden Pflichten zur Untersuchung und Überwachung sowie bestimmte Mindestanforderungen an den Inhalt behördlicher Zulassungen näher zu bestimmen."[62]

Der Anwendungsbereich dieser Verordnung ist nach § 2 Abs.1 festgelegt: " ... Diese Verordnung gilt für das Einleiten von Stoffen der Listen I und II der Anlage zu dieser Verordnung in das Grundwasser sowie für sonstige Maßnahmen, die zu einem Eintrag dieser Stoffe in das Grundwasser führen können."[62]

"§ 2 Absatz 1 übernimmt den Anwendungsbereich der Richtlinie (80/68/EWG, der Verf.). Dabei sind Begriffsbestimmungen in der Verordnung nicht notwendig, weil die im deutschen Wasserrecht entwickelten Begriffe, die durch gefestigte Rechtsprechung bestätigt sind, zumindest nicht hinter den Definitionen der Richtlinie zurückbleiben.

Dies gilt sowohl für den Grundwasserbegriff (§ 1 Abs. 1 WHG), als auch für den Begriff 'Einleitung' (§ 3 Abs. 1 Nr. 5 WHG), der die direkte und indirekte Ableitung (Einleitung in das Grundwasser ohne/nach Boden- und Untergrundpassage) im Sinne des Art. 1 Abs. 2 Buchst. b und c der Richtlinie 80/68/EWG umfaßt. Der Verschmutzungsbegriff der Richtlinie ist in den Kriterien 'schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften' des § 34 WHG enthalten.

Der Begriff 'sonstige Maßnahmen' bezieht sich auf die in § 3 und § 4 der Grundwasserverordnung näher geregelten Tatbestände.

§ 2 Absatz 2 stellt klar, daß sonstige dem Grundwasserschutz dienende Rechtsvorschriften neben der Grundwasserverordnung unberührt bleiben. Diese betrifft vor allem das Wasserhaushaltsgesetz (insbesondere § 6 WHG) sowie die Landeswassergesetze, die Anlagenverordnung, das Pflanzenschutz- und Düngemittelrecht."[23]

Gemäß § 3 Abs.1 darf für: " ... das Einleiten von Stoffen der Liste I in das Grundwasser ... eine Erlaubnis nicht erteilt werden. ..."[62]

"Die Richtlinie 80/68/EWG geht im Grundsatz von einem Einleitungsverbot gefährlicher Stoffe (Null-Emission) aus. Deshalb darf auch nach § 3 Abs. 1 Satz 1 eine Erlaubnis für das Einleiten von Stoffen der Liste I in das Grundwasser nicht erteilt werden."[23]

Der Absatz 1 gilt nach § 3 Abs.3 nicht,: " ... wenn Stoffe der Liste I nur in so geringer Menge und Konzentration in das Grundwasser gelangen können, daß jede gegenwärtige oder künftige Gefahr einer Beeinträchtigung der Grundwasserqualität ausgeschlossen ist...."[62]

"§ 3 Abs. 3 der Grundwasserverordnung relativiert das generelle Verbot in § 3 Abs. 1 Grundwasserverordnung.

§ 3 Abs. 3 ist so zu verstehen, daß damit alle in Art. 2 Buchst. a und b und Art. 4 Abs. 2 und 3 der Richtlinie 80/68/EWG genannten Sonderfälle erfaßt werden. Die in § 3 Abs. 3 verwendeten Kriterien sind den Kriterien des § 34 WHG gleichwertig und unterscheiden sich in der Sache nicht von § 34 WHG. Für die bisherige Praxis ändert sich deshalb nichts. Dies gilt insbesondere für: ...

Versickerung von Niederschlagswasser

Unter den Voraussetzungen des Absatzes 3 kann die Versickerung von Niederschlagswasser vom Anwendungsbereich der Richtlinie ausgenommen werden (Art. 2 Buchst. b der Richtlinie).

Damit wird auch eine entsprechende Länderregelung durch Rechtsverordnung auf der Grundlage des § 33 Abs. 2 Nr. 3 WHG in der Fassung der 6. Novelle nicht ausgeschlossen; sie bleibt ggf. unberührt...."[23]

Laut § 3 Abs.6 darf für: "...andere als in den Absätzen 1 bis 5 genannte Maßnahmen, die eine Benutzung des Grundwassers nach § 3 des Wasserhaushaltsgesetzes darstellen und zu einem Eintrag von Stoffen der Liste I in das Grundwasser führen können, ... eine Erlaubnis nur erteilt werden, wenn eine Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen und auch eine anderweitige Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit nicht zu erwarten ist."[62]

"Absatz 6 stellt klar, daß andere als die in den Absätzen 1 bis 5 genannten Maßnahmen, wie beispielsweise das Aufbringen von Stoffen der Liste I auf den Boden, erlaubnispflichtige Benutzungen des Grundwassers nach § 3 Abs. 2 Nr. 2 WHG sein können, wenn sie zu einem Eintrag von Stoffen der Liste I in das Grundwasser führen können. Eine Erlaubnis darf nur erteilt werden, wenn eine Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen und auch eine anderweitige Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit nicht zu erwarten ist. Mit der Heranziehung der Besorgnis wird auf § 34 WHG Bezug genommen.

Auch im Rahmen des § 3 Abs. 6 ist § 3 Abs. 3 entsprechend zu beachten."[23]

In § 4 wird für Stoffe der Liste II folgendes festgelegt:

"Das Einleiten von Stoffen der Liste II in das Grundwasser sowie … das sonstige Beseitigen dieser Stoffe, das zu deren Eintrag in das Grundwasser führen kann, bedürfen als Gewässerbenutzung nach § 3 Abs. 1 Nr. 5 und Abs. 2 Nr. 2 des Wasserhaushaltsgesetzes der behördlichen Erlaubnis … Eine Zulassung darf nur erteilt werden, wenn eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften durch Stoffe der Liste II nicht zu besorgen ist, insbesondere wenn durch den Eintrag der Stoffe nicht die menschliche Gesundheit oder die Wasserversorgung gefährdet, die lebenden Bestände und das Ökosystem der Gewässer geschädigt oder die rechtmäßige Nutzung der Gewässer behindert werden…"[62]

"Die Begründung zu § 4 der Grundwasserverordnung geht davon aus, daß die einschlägigen Vorschriften des WHG ein höheres Schutzniveau gewährleisten als Art. 5 der Richtlinie, der für die Stoffe der Liste II die erforderlichen Bestimmungen trifft. Es wird in der Begründung aber ausdrücklich klargestellt, daß insbesondere auch bei Erfüllung der in der Definition des Art. 1 Abs. 2 Buchst. d der Richtlinie 80/68/EWG1) verwendeten Kriterien für die Verschmutzung des Grundwassers die Erlaubnisfähigkeit der Stoffeinträge ausgeschlossen ist.

Ebenso wie in § 3 Abs. 2 wird auch hier vom Vorrang abfallrechtlicher gegenüber wasserrechtlichen Zulassungsverfahren ausgegangen und festgelegt, daß die Anforderungen der Richtlinie bei allen einschlägigen Zulassungsverfahren verbindlich sind.

Eine dem § 3 Abs. 3 entsprechende Regelung ist im Rahmen des § 4 nicht notwendig, da § 4 der Grundwasserverordnung den Wortlaut des § 34 WHG wiedergibt."[23]

- § 5 regelt die Untersuchungs-, Überwachungs- und Konsultationspflichten: "
- (1) Vor der Erteilung einer Erlaubnis nach § 3 Abs. 1 Satz 2, Abs. 2 oder nach § 4 Abs. 1 sind mindestens die hydrogeologischen Bedingungen, die mögliche Reinigungskraft des Bodens und des Untergrundes sowie die Möglichkeiten einer schädlichen Verunreinigung des Grundwassers oder einer sonstigen nachteiligen Veränderung seiner Eigenschaften zu untersuchen.
- (2) Soweit das Grundwasser nicht bereits im Rahmen des § 7 insbesondere in seiner physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit behördlich überwacht wird, muß bei der Erteilung einer Erlaubnis nach § 3 Abs. 1 Satz 2, Abs. 2 oder nach § 4 Abs. 1 sichergestellt sein, daß das Grundwasser in anderer geeigneter Weise überwacht wird. ...
- (4) Im übrigen gelten für die Untersuchungs-, Überwachungs- und Beteiligungspflichten die landesrechtlichen Vorschriften." [62]
- a) Zu Absatz 1: § 5 Abs. 1 stellt klar, welche Kriterien vor Erteilung der Erlaubnis mindestens zu prüfen bzw. zu untersuchen sind. Dazu sind bei Bedarf Unterlagen vom Antragsteller vorzulegen. In diesem Zusammenhang ist anzumerken: Wie bisher ist bei der 'möglichen Reinigungskraft des Bodens und des Untergrundes' zu beachten, daß Beschaffenheit, Durchlässigkeit und Mächtigkeit der Deckschichten (Oberboden/Unterboden) auf die Reinigungskraft Einfluß haben.
- b) Zu Absatz 2: Diese Vorschrift dient der Umsetzung des Art. 8 der Richtlinie 80/68/EWG. Geeignete Überwachungen können auch Überwachungen im Rahmen der technischen Gewässeraufsicht oder Kontrollmaßnahmen Dritter sein. Wird von Dritten (z.B. einem Wasserversorger) aufgrund anderer Verpflichtungen oder im Rahmen der technischen

Gewässeraufsicht überwacht, kann insoweit auf eine Überwachung nach der Grundwasserverordnung verzichtet werden...."[23]

"Liste I der Stoffamilien und Stoffgruppen: Die Liste I umfaßt die einzelnen Stoffe der nachstehend aufgeführten Stoffamilien und -gruppen mit Ausnahme der Stoffe, die aufgrund des geringen Toxizitäts-, Langlebigkeits- oder Bioakkumulationsrisikos als ungeeignet für die Liste I angesehen werden. Stoffe, die im Hinblick auf Toxizität, Langlebigkeit oder Bioakkumulation für die Liste II geeignet sind, sind als Stoffe der Liste II zu behandeln.

- 1. Organische Halogenverbindungen und Stoffe, die im Wasser derartige Verbindungen bilden können
- 2. Organische Phosphorverbindungen
- 3. Organische Zinnverbindungen
- 4. Stoffe, die im oder durch Wasser krebserregende, mutagene oder teratogene Wirkung haben; dazu gehören auch Stoffe aus der Liste II, soweit sie diese Wirkungen haben
- 5. Quecksilber und Quecksilberverbindungen
- 6. Cadmium und Cadmiumverbindungen
- 7. Mineralöle und Kohlenwasserstoffe
- 8. Cyanid

Liste II der Stoffamilien und Stoffgruppen: Die Liste II umfaßt die einzelnen Stoffe und die Stoffkategorien aus den nachstehend aufgeführten Stoffamilien und Stoffgruppen, die eine schädliche Wirkung auf das Grundwasser haben können.

1. Folgende Metalloide und Metalle und ihre Verbindungen:

1.1 Zink	1.8 Antimon	1.15 Uran
1.2 Kupfer	1.9 Molybdän	1.16 Vanadium
1.3 Nickel	1.10 Titan	1.17 Kobalt
1.4 Chrom	1.11 Zinn	1.18 Thallium
1.5 Blei	1.12 Barium	1.19 Tellur
1.6 Selen	1.13 Beryllium	1.20 Silber
1.7 Arsen	1.14 Bor	

- 2. Biozide und davon abgeleitete Verbindungen, die nicht in der Liste I enthalten sind
- 3. Stoffe, die eine für den Geschmack oder den Geruch des Grundwassers abträgliche Wirkung haben, sowie Verbindungen, die im Grundwasser zur Bildung solcher Stoffe führen und es für den menschlichen Gebrauch ungeeignet machen können
- 4. Giftige oder langlebige organische Siliziumverbindungen und Stoffe, die im Wasser zur Bildung solcher Verbindungen führen können, mit Ausnahme derjenigen, die biologisch unschädlich sind oder sich im Wasser rasch in biologisch unschädliche Stoffe umwandeln
- 5. Anorganische Phosphorverbindungen und reiner Phosphor

- 6. Fluoride
- 7. Ammoniak und Nitrite"[62]

Die Landeswassergesetze sind mit Rücksicht auf das Wasserhaushaltsgesetz als rahmenausfüllende Gesetze neu erlassen worden. Sie enthalten unter anderem Bestimmungen zur Ausfüllung und zum Vollzug des Wasserhaushaltsgesetzes. Zu den landesgesetzlichen Regelungen kommen noch kommunale Satzungen, die vor allem die Abwasserbeseitigung über kommunale Abwasserbehandlungsanlagen zum Gegenstand haben. Es sollen zunächst die derzeit gültigen Gesetze, Verordnungen und Verwaltungsvorschriften zu diesem Thema zusammengestellt werden, um darauffolgend eine Zusammenfassung geben zu können.

8.3.1 <u>Baden-Württemberg</u>

- 8.3.1.1 Wassergesetz für Baden-Württemberg (BWWG)
- "§ 1 Einleitende Bestimmung (zu § 1 WHG)
- (1) Gewässer im Sinne dieses Gesetzes sind die in § 1 Abs. 1 des Gesetzes zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz WHG) genannten Gewässer.
- § 3a Grundsätze (Zu § 1a WHG)
- (1) Die Gewässer sind als Bestandteil des Naturhaushalts so zu bewirtschaften, daß sie dem Wohl der Allgemeinheit und im Einklang mit ihm auch dem Nutzen einzelner dienen. Natürliche oder naturnahe Gewässer sollen erhalten werden. Bei anderen Gewässern ist ein naturnaher Zustand anzustreben. ...
- (5) Bei allen Maßnahmen, mit denen Einwirkungen auf Gewässer verbunden sein können, ist die nach den Umständen erforderliche Sorgfalt anzuwenden, um eine Beeinträchtigung der Gewässer, insbesondere ihrer ökologischen Funktionen, zu vermeiden.

Gemeinsame Bestimmungen für die Benutzung der Gewässer

- § 13 Benutzungen
- (1) Die Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes und dieses Gesetzes über die Benutzung der Gewässer gelten auch für ...

Versickern, Verregnen und Verrieseln oder sonstiges Aufbringen von Abwasser und anderen Stoffen, welche die Eigenschaften von Wasser nachteilig verändern können ...

§ 14 Verpflichtungen der Benutzer

(1) Die Gewässer sind so zu benutzen, daß deren ökologische Funktionen möglichst wenig beeinträchtigt werden, alle Benutzer angemessene Vorteile aus dem Wasser ziehen können und jede vermeidbare Beeinträchtigung anderer unterbleibt. ...

Abwasserbeseitigung

§ 45a Grundsatz

(1) Abwasser ist so zu beseitigen, daß das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird. Dem Wohl der Allgemeinheit kann auch die Beseitigung von häuslichem Abwasser durch dezentrale Anlagen entsprechen.

- (2) Die Abwasserbeseitigung im Sinne dieses Gesetzes umfaßt das Sammeln, Fortleiten, Behandeln, Einleiten, Versickern, Verregnen und Verrieseln von Abwasser ...
- (3) Abwasser im Sinne dieses Gesetzes ist Wasser ... das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Grundstücken abfließt ...

§ 45b Verpflichtung zur Beseitigung

- (1) Die Abwasserbeseitigung obliegt den Gemeinden. Sie haben das Abwasser insbesondere zu sammeln, den Abwasserbehandlungsanlagen zuzuleiten, zu reinigen und die hierfür erforderlichen ... Regenwasser- und Abwasserbehandlungsanlagen herzustellen, zu unterhalten und zu betreiben. Die Gemeinden können sich zur Erfüllung dieser Pflicht Dritter bedienen. Das Abwasser ist von demjenigen, bei dem es anfällt, dem Beseitigungspflichtigen zu überlassen.
- (2) Die Pflicht der Gemeinden zur Abwasserbeseitigung entfällt für
 - 1. Straßenoberflächenwasser, das auf Bundes-, Landes- und Kreisstraßen außerhalb der Ortsdurchfahrten anfällt, ...
 - 3. Niederschlagswasser, welches dezentral beseitigt wird ... "[64]

Reinhalteordnung kommunales Abwasser (ROkA)

Verordnung des Ministeriums für Umwelt und Verkehr zur Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Reinhalteordnung kommunales Abwasser - ROkA -)

- "§ 1 Zweck, Begriffe
- (1) Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser ...
- (2) Im Sinne dieser Verordnung ist
- a) kommunales Abwasser: ... Niederschlagswasser ...
- § 4 Kommunale Einleitungen ...
- (4) Es ist sicherzustellen, daß Abwasserbeseitigungsanlagen so geplant, ausgeführt, betrieben und gewartet werden, daß sie unter allen normalen örtlichen Klimabedingungen ordnungsgemäß arbeiten. Bei der Planung der Anlage sind jahreszeitliche Schwankungen der Belastungen zu berücksichtigen. Abwasserbehandlungsanlagen müssen so ausgelegt oder umgerüstet werden, daß vor dem Einleiten in Gewässer repräsentative Proben des

zugeleiteten Abwassers und des behandelten Abwassers entnommen werden können. Die Stelle, an der kommunales Abwasser eingeleitet wird, ist möglichst so zu wählen daß die Auswirkungen auf das aufnehmende Gewässer auf ein Minimum beschränkt werden...."[23]

8.3.2 <u>Bayern</u>

8.3.2.1 Bayerisches Wassergesetz (BayWG)

"Art. 1 Sachlicher Geltungsbereich (zu § 1 WHG)

(1) Dieses Gesetz gilt für die in § 1 Abs. 1 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) bezeichneten Gewässer ...

Art. 41a Abwasserbegriff, Geltungsbereich

(1) Abwasser im Sinne dieses Gesetzes ist Wasser, ... das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen abfließt....

Art. 41b Zur Abwasserbeseitigung Verpflichtete (zu § 18a Abs. 2 WHG)

- (1) Zur Abwasserbeseitigung ... sind die Gemeinden verpflichtet, soweit nicht nach dem Abwasserbeseitigungsplan oder nach den Absätzen 3 und 5 ein anderer verpflichtet ist. Sie wird von den Gemeinden im eigenen Wirkungskreis wahrgenommen. ...
- (3) Den Trägern öffentlicher Verkehrsanlagen obliegt die Abwasserbeseitigung an Stelle der Gemeinden, soweit sie nach anderen Vorschriften zur Entwässerung verpflichtet sind und es sich nicht um die Abwasserbeseitigung von bebauten Grundstücken handelt. ..."[63]

8.3.2.2 Reinhalteordnung kommunales Abwasser (RokAbw)

"Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Reinhalteordnung kommunales Abwasser - ROkAbw -)

- § 1 Zweck, Begriffe
- (1) Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser ...
- (2) Im Sinn dieser Verordnung ist
- 1. kommunales Abwasser: ... Niederschlagswasser ...
- § 4 Kommunale Einleitungen...
- (5) Es ist sicherzustellen, daß Abwasserbeseitigungsanlagen so geplant, ausgeführt, betrieben und gewartet werden, daß sie unter allen normalen örtlichen Klimabedingungen ordnungsgemäß arbeiten. Bei der Planung der Anlagen sind saisonale Schwankungen der Belastungen zu berücksichtigen. Abwasserbehandlungsanlagen müssen so ausgelegt oder umgerüstet werden, daß vor dem Einleiten in Gewässer repräsentative Proben des zugeleiteten Abwassers und des behandelten Abwassers entnommen werden können. Die Stelle, an der kommunales Abwasser eingeleitet wird, ist möglichst so zu wählen, daß die Auswirkungen auf das aufnehmende Gewässer auf ein Minimum beschränkt werden."[23]

8.3.3 <u>Berlin</u>

- 8.3.3.1 Berliner Wassergesetz
- "§ 1 Einleitende Bestimmungen
- (1) Dieses Gesetz gilt für:
- 1. die in § 1 Abs. 1 des Wasserhaushaltsgesetzes ... bezeichneten Gewässer

Grundwasser ist unterirdisches Wasser, das Hohlräume der Erdrinde zusammenhängend ausfüllt und nur der Schwere unterliegt."[23]

- 8.3.3.2 Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates über die Behandlung von kommunalem Abwasser (KomAbwVO Bln)
- "§ 1 Zweck der Verordnung, Anwendungsbereich und Ausweisung empfindlicher Gebiete
- (1) Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie des Rates (91/271/EWG) vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (ABl. der EG Nr. L 135 S. 40) in das deutsche Recht. ...
- (3) Diese Verordnung findet Anwendung für das ... Behandeln und Einleiten von kommunalem Abwasser und das Behandeln und Einleiten von Abwasser bestimmter Industriebranchen. Ziel der Verordnung ist es, die Umwelt vor den schädlichen Auswirkungen dieses Abwassers zu schützen....
- § 2 Begriffsbestimmungen

Im Sinne dieser Verordnung ist:

- 1. Kommunales Abwasser: ... Niederschlagswasser ...
- 8. Abwasserbeseitigungspflichtiger: Im Land Berlin obliegt den Berliner Wasserbetrieben (BWB) die Abwasserbeseitigungspflicht für kommunales Abwasser im Sinne des § 18a des Wasserhaushaltsgesetzes.
- § 4 Kommunale Einleitungen
- (6) Es ist sicherzustellen, daß Abwasserbehandlungsanlagen so geplant, ausgeführt, betrieben und gewartet werden, daß sie unter normalen örtlichen Klimabedingungen ordnungsgemäß arbeiten. Bei der Planung der Anlagen sind saisonale Schwankungen der Belastungen zu berücksichtigen. Abwasserbehandlungsanlagen müssen so ausgelegt oder umgerüstet werden, daß vor dem Einleiten in Gewässer repräsentative Proben des zugeleiteten Abwassers und des behandelten Abwassers entnommen werden können."[23]
- 8.3.3.3 Bewertungskriterien für die Beurteilung stofflicher Belastungen von Böden und Grundwasser in Berlin (Berliner Liste 1996)

"Hinweis:

Die 'Berliner Liste 1996' enthält Bewertungskriterien, die als fachliche Grundlage für Maßnahmen der zuständigen Ordnungsbehörden zu verwenden sind. Bodenwerte für das Schutzgut menschliche Gesundheit konkretisieren den Begriff des Risikowertes im Sinne des § 3 Abs. 5 Berliner Bodenschutzgesetz fachlichinhaltlich, ohne zur Zeit die Verbindlichkeit

einer Rechtsverordnung zu haben. Die Gefahren- und Schadenswerte für Grundwasser ... können damit zur Grundlage von Anordnungen der Wasserbehörde werden...."[23]

8.3.4 <u>Brandenburg</u>

- 8.3.4.1 Brandenburgisches Wassergesetz
- "§ 1 Grundsätze und Ziel der Wasserwirtschaft (zu § 1a WHG)
- (1) Ziel und Aufgabe der Wasserwirtschaft ist es, ... zum Wohle der Allgemeinheit und im Einklang damit auch zum Nutzen einzelner vor vermeidbaren Beeinträchtigungen zu schützen, eingetretene Nachteile oder Schäden an Gewässern zu beseitigen ...
- (4) Das Wohl der Allgemeinheit erfordert insbesondere, daß ...
- 2. die Gewässer vor Verunreinigung geschützt werden, ...
- § 2 Sachlicher Geltungsbereich (zu § 1 WHG)
- (1) Dieses Gesetz regelt ... den Schutz der Gewässer ...
- (2) Dieses Gesetz gilt für die in § 1 Abs. 1 Nr. 1 und 2 WHG aufgeführten Gewässer sowie für Handlungen und Anlagen, die sich auf die Gewässer und ihre Nutzung auswirken oder auswirken können. ...
- § 4 Begriffsbestimmungen ...
- (3) Grundwasser ist das Wasser, das natürliche Hohlräume der Erdrinde ausfüllt und allein der Schwerkraft unterliegt.
- § 54 Bewirtschaftung des Grundwassers (zu § 1a WHG)...
- (5) Soweit eine Verunreinigung des Grundwassers nicht zu besorgen ist und sonstige Belange nicht entgegenstehen, ist Niederschlagswasser zu versickern. Die Gemeinden können durch Satzung vorsehen, daß Niederschlagswasser auf den Grundstücken, auf denen es anfällt, versickert werden muß. Niederschlagswasser von dem öffentlichen Verkehr gewidmeten Flächen ist zu fassen oder unter den Voraussetzungen nach Satz 1 oberflächig zu versickern. Die Satzung bedarf der Zustimmung der Wasserbehörde.
- § 64 Begriffsbestimmungen, Geltungsbereich (zu § 18a WHG)
- (1) Abwasser im Sinne dieses Gesetzes ist ... das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen gesammelt abfließende Wasser (Niederschlagswasser). ...
- (2) Abwasserbehandlungsanlage im Sinne dieses Abschnitts ist eine Einrichtung, die dazu dient, die Schädlichkeit des Abwassers zu vermindern oder zu beseitigen Sie ist öffentliche Abwasserbehandlungsanlage, wenn sie dem allgemeinen Gebrauch dient.
- § 66 Pflicht zur Abwasserbeseitigung (zu § 18a WHG)
- (1) Die Gemeinden haben das auf ihrem Gebiet anfallende Abwasser zu beseitigen und die dazu notwendigen Anlagen (Abwasseranlagen) zu betreiben oder durch Dritte betreiben zu lassen, soweit nicht nach den folgenden Vorschriften andere zur Abwasserbeseitigung verpflichtet sind oder ein für verbindlich erklärter Abwasserbeseitigungsplan andere zur Abwasserbeseitigung verpflichtete Träger ausweist. ...

(2) Anstelle der Gemeinden sind die Träger öffentlicher Verkehrsanlagen verpflichtet, Niederschlagswasser, welches von Verkehrsflächen außerhalb im Zusammenhang bebauter Ortsteile anfällt, zu beseitigen."[23]

8.3.4.2 Brandenburgische Kommunalabwasserverordnung (BbgKAbwV)

"Verordnung über die Behandlung von kommunalem Abwasser im Land Brandenburg (Brandenburgische Kommunalabwasserverordnung - BbgKAbwV)

§ 1 Zweck der Verordnung

Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (ABl. EG Nr. L 135 S. 40) und dem Schutz der Gewässer vor schädlichen Auswirkungen kommunalen Abwassers.

- § 2 Anwendungsbereich und Ausweisung empfindlicher Gebiete
- (1) Diese Verordnung betrifft das ... Einleiten von kommunalem Abwasser ...
- § 3 Begriffsbestimmungen

Im Sinne dieser Verordnung ist

1. Kommunales Abwasser: ... Niederschlagswasser ... "[23]

8.3.5 Bremen

- 8.3.5.1 Bremisches Wassergesetz (BrWG)
- "§ 1 Einleitende Bestimmung
- (1) Dieses Gesetz gilt
- 1. für folgende Gewässer: ...
- b) das Grundwasser ...
- § 2 Grundsatz
- (1) Die Gewässer sind als Bestandteil des Naturhaushaltes so zu bewirtschaften, daß sie dem Wohl der Allgemeinheit und im Einklang mit ihm auch dem Nutzen Einzelner dienen und daß jede vermeidbare Beeinträchtigung unterbleibt. ...
- (2) Jedermann ist verpflichtet, bei Maßnahmen, mit denen Einwirkungen auf ein Gewässer verbunden sein können, die nach den Umständen erforderliche Sorgfalt anzuwenden, um eine Verunreinigung des Wassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften zu verhüten
- § 4 Benutzungen
- (1) Benutzungen im Sinne dieses Gesetzes sind ...
- 5. Einleiten von Stoffen in das Grundwasser,...
- (2) Als Benutzungen gelten auch folgende Einwirkungen:
- 2. Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wasser herbeizuführen. ...

§ 127 Reinhaltung

(1) Eine Erlaubnis für das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser darf nur erteilt werden, wenn eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. ...

§ 132 Abwasserbeseitigung

- (1) Abwasser ist so zu beseitigen, daß das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird.
- (2) Abwasserbeseitigung im Sinne dieses Gesetzes umfaßt das ... Einleiten, Versickern ... von Abwasser ...
- (3) Abwasser im Sinne dieses Gesetzes sind ... das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen abfließende und gesammelte Wasser (Niederschlagswasser).

§ 133 Abwasserbeseitigungspflicht

- (1) Die Gemeinden haben das auf ihrem Gebiet anfallende Abwasser zu beseitigen, soweit nicht nach den folgenden Absätzen andere zur Abwasserbeseitigung verpflichtet sind. Sie nehmen diese Aufgabe als Selbstverwaltungsaufgabe wahr. ...
- (4) Abweichend von Absatz 1 obliegt anstelle der Gemeinden
- 1. den Trägern öffentlicher Verkehrsanlagen die Beseitigung des Niederschlagswassers, soweit sie nach anderen Rechtsvorschriften zur Entwässerung ihrer Anlage verpflichtet sind ..."[23]

8.3.5.2 Verordnung über die Behandlung von kommunalem Abwasser (KomAbwV)

"§ 1 Zweck der Verordnung

- (1) Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (ABl. EG Nr. L 135 S. 40).
- (2) Diese Verordnung gilt für das Sammeln, Behandeln und Einleiten von kommunalem Abwasser Ziel der Verordnung ist es, die Umwelt von den schädlichen Auswirkungen dieses Abwassers zu schützen. ...

§ 2 Begriffsbestimmungen

Im Sinne dieser Verordnung ist:

- 1. kommunales Abwasser; ... Niederschlagswasser;
- § 4 Kommunale Einleitungen ...
- (6) Es ist sicherzustellen, daß Abwasserbehandlungsanlagen so geplant, ausgeführt, betrieben und gewartet werden, daß sie unter allen normalen örtlichen Klimabedingungen ordnungsgemäß arbeiten. Bei der Planung der Anlagen sind saisonale Schwankungen der Belastungen zu berücksichtigen. Abwasserbehandlungsanlagen müssen so ausgelegt oder umgerüstet werden, daß vor dem Einleiten die Gewässer repräsentative Proben des zugeleiteten Abwassers und des behandelten Abwassers entnommen werden können."[23]

8.3.6 *Hamburg*

8.3.6.1 Hamburgisches Wassergesetz (HWaG)

- "§ 1 Geltungsbereich
- (1) Dies Gesetz gilt für die in § 1 Absatz 1 des Wasserhaushaltsgesetzes ... bezeichneten Gewässer"[67]

8.3.6.2 Hamburgisches Abwassergesetz (HmbAbwG)

- "§ 1 Grundsatz- und Begriffsbestimmungen
- (1) Abwasser ist so zu beseitigen, daß das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird, insbesondere die Gesundheit der Menschen nicht gefährdet wird und eine Verunreinigung der Gewässer und des Bodens oder eine sonstige nachteilige Veränderung ihrer Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Abwasserbeseitigung im Sinne dieses Gesetzes umfaßt das Sammeln, Fortleiten, Behandeln, Einleiten, Versickern ... von Abwasser ...
- (2) Abwasser im Sinne dieses Gesetzes ist ... das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen abfließt. ...
- § 2 Beseitigungspflichtige Körperschaft, Übertragung der Aufgabe

Soweit in diesem Gesetz oder aufgrund dieses Gesetzes nichts anderes bestimmt ist, ist die Freie und Hansestadt Hamburg beseitigungspflichtige Körperschaft im Sinne von § 18a Absatz 2 des WasserhaushaltsgesetzesDie Aufgabe der Abwasserbeseitigung für das im Gebiet der Freien und Hansestadt Hamburg mit Ausnahme von Neuwerk anfallende Abwasser obliegt der Stadtentwässerung. Dieser stehen die damit verbundenen hoheitlichen Rechte zu. Das Abwasser ist der Stadtentwässerung zu überlassen."[66]

- 8.3.6.3 Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates über die Behandlung von kommunalem Abwasser (KomAbwVO)
- "§ 1 Zweck und Geltungsbereich
- (1) Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften Nummer L 135 Seite 40).
- (2) Sie gilt für das Sammeln, Behandeln und Einleiten von kommunalem Abwasser
- § 2 Begriffsbestimmung

Im Sinne dieser Verordnung ist

- 1. Kommunales Abwasser: häusliches Abwasser oder Gemisch aus häuslichem und industriellem Abwasser mit oder ohne Niederschlagswasser ...
- § 4 Einleitung von kommunalem Abwasser
- (1) Ab dem 1. Januar 1999 gelten für Einleitungen von kommunalem Abwasser die Anforderungen nach § 7a Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) in der Fassung vom 12. November 1996 ... in Verbindung mit Anhang I der Abwasserverordnung vom 21. März ..."[23]

8.3.6.3.1 Anordnung über Zuständigkeiten für die Abwasserbeseitigung

"(1) Zuständig für die Abwasserbeseitigung, insbesondere für die Durchführung … ist … die Umweltbehörde."[23]

8.3.7 Hessen

- 8.3.7.1 Hessisches Wassergesetz (HWG)
- "§ 1 Gewässer (zu § 1 des Wasserhaushaltsgesetzes)
- (1) Dieses Gesetz gilt
- 1. für folgende Gewässer: ...
- b) das Grundwasser ...
- § 44 Erweiterung und Beschränkung der erlaubnisfreien Benutzung (zu § 33 des Wasserhaushaltsgesetzes) ...
- (3) Wenn eine Verunreinigung des Grundwassers nicht zu besorgen ist und sonstige Belange nicht entgegenstehen, können die Gemeinden durch Satzung regeln, daß Niederschlagswasser außerhalb von Wasserschutzgebieten auf den Grundstücken, auf denen es anfällt, oder auf besonders hierfür ausgewiesenen Flächen versickert werden kann. Die Satzung bedarf der Genehmigung der Wasserbehörde. Soweit die Satzung von der Wasserbehörde genehmigt ist, ist die mit der Versickerung verbundene Benutzung des Grundwassers erlaubnisfrei. Bei einer Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit oder sonstiger Belange kann die Benutzung durch die Wasserbehörde im Einzelfall untersagt werden.

§ 51 Abwasser

- (1) Abwasser im Sinne dieses Gesetzes ist ... das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder künstlich befestigten Flächen abfließende und gesammelte Wasser (Niederschlagswasser) sowie das sonstige zusammen mit Schmutzwasser oder Niederschlagswasser in Abwasseranlagen abfließende Wasser. ...
- (2) Abwasser, insbesondere Niederschlagswasser, soll von demjenigen, bei dem es anfällt, verwertet werden, wenn wasserwirtschaftliche und gesundheitliche Belange nicht entgegenstehen. Niederschlagswasser soll darüber hinaus in geeigneten Fällen versickert werden.

§ 52 Abwasserbeseitigungspflicht

- (1) Die Abwasserbeseitigung obliegt den Gemeinden, in denen das Abwasser anfällt, soweit sie nicht nach Abs. 4 anderen Körperschaften des öffentlichen Rechts übertragen wurde. Sie haben das in ihrem Gebiet anfallende Abwasser zu beseitigen, wenn nicht ein verbindlicher Abwasserbeseitigungsplan etwas anderes bestimmt. ...
- (3) Die Pflicht zur Abwasserbeseitigung nach Abs. 1 und zur Überlassung des Abwassers nach Abs. 2 entfällt
- 1. für Niederschlagswasser, das von öffentlichen Verkehrsflächen im Außenbereich abfließt,
- 2. für Niederschlagswasser, das verwertet oder versickert wird ... "[65]

8.3.7.2 Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (KomAbw-VO)

- "§ 1 Zweck und Geltungsbereich
- (1) Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (ABl. EG Nr. L 135 S. 40).
- (2) Sie gilt für das Sammeln, Behandeln und Einleiten von kommunalem Abwasser ...
- § 2 Begriffsbestimmung

Im Sinne dieser Verordnung ist

1. Kommunales Abwasser: häusliches Abwasser oder ein Gemisch aus häuslichem und industriellem Abwasser mit oder ohne Niederschlagswasser ..."[23]

8.3.8 Mecklenburg-Vorpommern

- 8.3.8.1 Wassergesetz des Landes Mecklenburg-Vorpommern (LWaG)
- "§ 1 Sachlicher Geltungsbereich (zu § 1 WHG)
- (1) Dieses Gesetz gilt für die Gewässer, die in § 1 Abs. 1 des Wasserhaushaltsgesetzes WHG bezeichnet sind ...
- § 3 Ziele der Wasserwirtschaft (zu § 1a WHG)
- (1) Die Durchführung dieses Gesetzes hat im Einklang mit dem Wohl der Allgemeinheit so zu erfolgen, daß die Funktion des Wasserhaushaltes im Wirkungsgefüge des Naturhaushaltes gewahrt wird. Die Gewässer sind als Bestandteil des Naturhaushaltes und als Lebensgrundlage für den Menschen, Tiere und Pflanzen zu schützen und zu pflegen. Ihre biologische Eigenart und Vielfalt sowie ihre wasserwirtschaftliche Funktionsfähigkeit ist zu erhalten, die Gewässergüte zu verbessern und bei Beeinträchtigungen wiederherzustellen.
- (2) Bei der Beurteilung des Wohles der Allgemeinheit ist insbesondere zu berücksichtigen, daß ...
- 2. Stoffe nicht so auf- oder eingebracht werden, daß eine Verunreinigung der Gewässer oder eine sonstige nachteilige Veränderung ihrer Eigenschaften zu besorgen ist ...
- § 32 Erweiterung und Beschränkung der erlaubnisfreien Benutzung (zu § 33 WHG)
- (4) Wenn eine Verunreinigung des Grundwassers nicht zu besorgen ist und sonstige Belange nicht entgegenstehen, können die Gemeinden durch Satzung regeln, daß Niederschlagswasser außerhalb von Wasserschutzgebieten auf den Grundstücken, auf denen es anfällt, oder auf besonders hierfür ausgewiesenen Flächen erlaubnisfrei versickert werden kann. Bei einer Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit oder sonstiger Belange kann die Benutzung durch die Wasserbehörde im Einzelfall untersagt werden.

§ 39 Abwasser

(1) Abwasser im Sinne dieses Gesetzes ist ... das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder künstlich befestigten Flächen abfließende und gesammelte Wasser

- (Niederschlagswasser) sowie das sonstige zusammen mit Schmutzwasser oder Niederschlagswasser in Abwasseranlagen abfließende Wasser. ...
- (3) Abwasser, insbesondere Niederschlagswasser, soll von demjenigen, bei dem es anfällt, verwertet werden, wenn wasserwirtschaftliche und gesundheitliche Belange nicht entgegenstehen, Niederschlagswasser soll darüber hinaus in geeigneten Fällen versickert werden (vgl. § 32 Abs. 3).

§ 40 Abwasserbeseitigungspflicht

- (1) Die Abwasserbeseitigung obliegt den Gemeinden im Rahmen der Selbstverwaltung, soweit sie nicht nach Absatz 4 anderen Körperschaften des öffentlichen Rechts übertragen wurden. Sie haben das in ihrem Gebiet anfallende Abwasser zu beseitigen, wenn nicht ein verbindlicher Abwasserbeseitigungsplan etwas anderes bestimmt. ...
- (3) Die Pflicht zur Abwasserbeseitigung nach Absatz 1 und zur Überlassung des Abwassers nach Absatz 2 entfällt
- 1. für Niederschlagswasser, das von öffentlichen Verkehrsflächen im Außenbereich abfließt,
- 3. für Niederschlagswasser, das verwertet oder versickert wird ... [23]
- 8.3.8.2 Verordnung über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Kommunal-abwasserverordnung KAbwVO M-V)
- "§ 1 Zweck und Geltungsbereich
- (1) Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (ABI. EG Nr. L 135 S. 40), im folgenden Richtlinie genannt.
- (2) Sie gilt für das Sammeln, Behandeln und Einleiten von kommunalem Abwasser ...
- § 2 Begriffsbestimmung

Im Sinne dieser Verordnung ist

1. Kommunales Abwasser: häusliches Abwasser oder ein Gemisch aus häuslichem und industriellem Abwasser mit oder ohne Niederschlagswasser ..."[23]

8.3.9 Niedersachsen

8.3.9.1 Niedersächsisches Wassergesetz (NdsWG)

"§ 1 Einleitende Bestimmung

- (1) Dieses Gesetz gilt für folgende Gewässer: ...
- 4. das Grundwasser.
- § 2 Grundsätze
- 1) Die Gewässer sind als Bestandteil des Naturhaushaltes und als Lebensraum für Tiere und Pflanzen zu sichern. Sie sind so zu bewirtschaften, daß sie dem Wohl der Allgemeinheit und im Einklang mit ihm auch dem Nutzen einzelner dienen und vermeidbare Beeinträchtigungen ihrer ökologischen Funktionen unterbleiben. ...

(2) Jedermann ist verpflichtet, bei Maßnahmen, mit denen Einwirkungen auf ein Gewässer verbunden sein können, die nach den Umständen erforderliche Sorgfalt anzuwenden, um eine Verunreinigung des Wassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften zu verhüten ...

§ 136 Erlaubnisfreie Benutzung

(4) ... Das Fachministerium kann ... allgemein oder für einzelne Gebiete durch Verordnung bestimmen, daß das Einleiten von Niederschlagswasser in das Grundwasser zum Zwecke der Versickerung, Verregnung oder Verrieselung keiner Erlaubnis bedarf, wenn eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. Das Fachministerium kann diese Befugnis für einzelne Gebiete durch Verordnung auf die Wasserbehörden übertragen.

§ 137 Reinhaltung

(1) Eine Erlaubnis für das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser darf nur erteilt werden, wenn eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist.

§ 148 Abwasserbeseitigung

- (1) Abwasser ist so zu beseitigen, daß das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird. ...
- (2) Abwasserbeseitigung im Sinne dieses Gesetzes umfaßt das Sammeln, Fortleiten, Behandeln, Einleiten, Versickern, Verregnen und Verrieseln von Abwasser ...

§ 149 Abwasserbeseitigungspflicht

- (1) Die Gemeinden haben das auf ihrem Gebiet anfallende Abwasser ... zu beseitigen, soweit nicht nach den folgenden Absätzen andere zur Abwasserbeseitigung verpflichtet sind. Die Aufgaben, die die Gemeinden hiernach zu erfüllen haben, gehören zum eigenen Wirkungskreis. ...
- (3) Zur Beseitigung des Niederschlagswassers sind an Stelle der Gemeinde verpflichtet ...
- 2. die Träger öffentlicher Verkehrsanlagen, soweit sie nach anderen Rechtsvorschriften zur Entwässerung ihrer Anlagen verpflichtet sind."[68]

8.3.9.2 Verordnung über die Behandlung von kommunalem Abwasser

"§ 1 Begriffsbestimmungen

Im Sinne dieser Verordnung ist

1. kommunales Abwasser: häusliches Abwasser oder ein Gemisch aus häuslichem und industriellem Abwasser mit oder ohne Niederschlagswasser ..."[23]

8.3.10 Nordrhein-Westfalen

- 8.3.10.1 Wassergesetz für das Land Nordrhein-Westfalen (Landeswassergesetz LWG)
- "§ 1 Sachlicher Geltungsbereich (zu § 1 WHG)

(1) Dieses Gesetz gilt für die in § 1 Abs. 1 Nrn. 1 und 2 des Wasserhaushaltsgesetzes aufgeführten Gewässer sowie für Handlungen und Anlagen, die sich auf die Gewässer und ihre Nutzungen auswirken oder auswirken können. ...

§ 2 Ziel der Wasserwirtschaft

- (1) Ziel der Wasserwirtschaft ist es, die Gewässer vor vermeidbaren Beeinträchtigungen zu schützen ... Die Gewässer sind so zu bewirtschaften, daß sie dem Wohl der Allgemeinheit und im Einklang mit ihm auch dem Nutzen einzelner dienen. Dies erfordert die Ordnung des Wasserhaushalts als Bestandteil von Natur und Landschaft und als Grundlage für die Wasserversorgung, die Abwasserbeseitigung und andere Gewässernutzungen.
- (2) Die Ziele und Erfordernisse der Raumordnung und Landesplanung sind zu beachten. ...
- § 51 Begriffsbestimmungen, Geltungsbereich (zu § 18a WHG)
- (1) Abwasser im Sinne dieses Gesetzes sind das ... das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen abfließende und gesammelte Wasser (Niederschlagswasser). ...
- (3) Abwasserbehandlungsanlage im Sinne dieses Abschnittes ist eine Einrichtung, die dazu dient,
- 1. die Schadwirkung des Abwassers zu vermindern oder zu beseitigen ...

Sie ist öffentliche Abwasserbehandlungsanlage, wenn sie dem allgemeinen Gebrauch dient.

§ 53 Pflicht zur Abwasserbeseitigung (zu § 18a WHG)

- (1) Die Gemeinden haben das auf ihrem Gebiet anfallende Abwasser zu beseitigen und die dazu notwendigen Anlagen (Abwasseranlagen) zu betreiben, soweit nicht nach den folgenden Vorschriften andere zur Abwasserbeseitigung verpflichtet sind oder ein für verbindlich erklärter Abwasserbeseitigungsplan andere zur Abwasserbeseitigung verpflichtete Träger ausweist. ... Soweit dies noch erforderlich ist, haben die Gemeinden die notwendigen Abwasseranlagen in angemessenen Zeiträumen zu errichten, zu erweitern oder den Anforderungen der § 18b des Wasserhaushaltsgesetzes und des § 57 dieses Gesetzes anzupassen...
- (3) Zur Beseitigung von Niederschlagswasser, welches von Straßenoberflächen außerhalb im Zusammenhang bebauter Ortsteile anfällt, ist der Träger der Straßenbaulast verpflichtet."[69]
- 8.3.10.2 Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (Kommunalabwasserverordnung KomAbwV)

"§ 1 Zweck und Geltungsbereich

(1) Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser und dem Schutz oberirdischer Gewässer vor schädlichen Auswirkungen dieses Abwassers (ABI. EG L 135 S. 40)

(2) Sie gilt für das Sammeln, Behandeln und Einleiten von kommunalem Abwasser ...

§ 2 Begriffsbestimmung

Im Sinne dieser Verordnung ist

1. kommunales Abwasser: häusliches Abwasser oder ein Gemisch aus häuslichem und industriellem Abwasser mit oder ohne Niederschlagswasser ..."[23]

8.3.11 Rheinland-Pfalz

8.3.11.1 Wassergesetz für das Land Rheinland-Pfalz (Landeswassergesetz - LWG)

"§ 1 Geltungsbereich (zu § 1 WHG)

Dieses Gesetz gilt für

- 1. die in § 1 Abs. 1 Nr. 1 und 2 des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG) bezeichneten Gewässer
- 2. Maßnahmen der Wasserversorgung, der Abwasserbeseitigung und des Hochwasserschutzes,
- 3. Handlungen und Anlagen, die sich auf die Gewässer und ihre Nutzungen auswirken können.
- § 2 Ziele des Gesetzes
- (1) Der Vollzug dieses Gesetzes hat zur Wahrung des Wohls der Allgemeinheit vornehmlich das Ziel, bei der Ordnung des Wasserhaushalts ... jede vermeidbare Beeinträchtigung der Gewässer zu verhüten, ...
- (2) ... Niederschlagswasser soll nur in dafür zugelassene Anlagen eingeleitet werden, soweit es nicht bei demjenigen, bei dem es anfällt, mit vertretbarem Aufwand verwertet oder versickert werden kann, ...

§ 25 Benutzungen

- (1) Die Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes und dieses Gesetzes über die Benutzung der Gewässer gelten auch für ...
- 3. das Versickern und Auf- oder Einbringen von Abwasser und anderen Stoffen, die die Eigenschaften von Wasser verändern können, ... wenn dabei eine wesentliche Beeinträchtigung der Gewässer nicht zu besorgen ist, ...

Für diese Benutzungen darf eine Bewilligung nicht erteilt werden.

§ 51 Begriffsbestimmung, Geltungsbereich (zu § 18a WHG)

- (1) Abwasser ist ... das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen abfließende und zum Fortleiten gesammelte Wasser (Niederschlagswasser) sowie das sonstige zusammen mit Schmutzwasser oder Niederschlagswasser in Abwasseranlagen abfließende Wasser. ...
- (3) Eine Abwasserbehandlungsanlage ist eine Einrichtung, die dazu dient, die Schadwirkung des Abwassers zu vermindern oder zu beseitigen ...

§ 53 Besondere Beseitigungspflicht

(1) Zur Beseitigung von Niederschlagswasser, das von öffentlichen Verkehrsanlagen außerhalb im Zusammenhang bebauter Ortsteile anfällt, ist der Träger der Verkehrsanlagen verpflichtet."[70]

8.3.11.2 Landesverordnung über die Beseitigung von kommunalem Abwasser (KomAbwVO)

- "§ 1 Zweck, Anwendungsbereich
- (1) Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (ABl. EG Nr. L 135 S. 40) ...
- (2) Sie gilt für das Sammeln, Behandeln und Einleiten von kommunalem Abwasser ...
- § 2 Begriffsbestimmung

Im Sinne dieser Verordnung ist

1. kommunales Abwasser: häusliches Abwasser oder das Gemisch aus häuslichem und industriellem Abwasser und/oder Niederschlagswasser ..."[23]

8.3.12 Saarland

- 8.3.12.1 Saarländisches Wassergesetz (SWG)
- "§ 1 Sachlicher Geltungsbereich (zu § 1 WHG)
- (1) Dieses Gesetz gilt für die in § 1 Abs. 1 des Wasserhaushaltsgesetzes WHG ... bezeichneten Gewässer ... Das Gesetz gilt ferner für Maßnahmen und Anlagen, die sich auf Gewässer und ihre Nutzung auswirken oder auswirken können. ...

§ 2 Grundsätze der Gewässerbewirtschaftung

Die Gewässer sind naturnah zu bewirtschaften. Erhaltung und Wiederherstellung der ökologischen Funktionsfähigkeit der Gewässer haben grundsätzlich Vorrang vor anderen Belangen.

Das Grundwasser ist zu schützen ...

- § 35 Beschränkung und Erweiterung der erlaubnisfreien Benutzung (zu § 33 WHG)
- (3) Soweit eine kommunale Abwassersatzung oder ein Bebauungsplan Festsetzungen im Sinne des § 49 a Abs. 3 beinhaltet und die Genehmigung der Obersten Wasserbehörde erteilt ist, ist die mit der Versickerung verbundene Benutzung des Grundwassers erlaubnisfrei. Bei einer Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit oder sonstiger Belange kann die Benutzung durch die untere Wasserbehörde im Einzelfall untersagt werden.
- § 49 Abwasserbegriff, Geltungsbereich
- (1) Abwasser im Sinne dieses Gesetzes sind ... das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen abfließende und gesammelte Wasser (Niederschlagswasser). ...
- § 49 a Beseitigung von Niederschlagswasser

(3) Die Gemeinde setzt in ihrer Abwassersatzung fest, wo und in welcher Weise Niederschlagswasser genutzt, versickert, verrieselt oder in ein oberirdisches Gewässer eingeleitet werden soll. Die Festsetzungen nach Satz 1 können auch in den Bebauungsplan aufgenommen werden. Sie bedürfen der Zustimmung der Obersten Wasserbehörde." [71]

8.3.12.2 Verordnung über die Behandlung von kommunalem Abwasser

- "§ 1 Zweck, Begriffe
- (1) Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (ABl. EG Nr. L 135, S. 40).
- (2) Im Sinne dieser Verordnung ist
- a) ... kommunales Abwasser': häusliches Abwasser oder Gemisch aus häuslichem und industriellem Abwasser und/oder Niederschlagswasser ...
- i) geeignete Behandlung': Behandlung von kommunalem Abwasser durch ein Verfahren und/oder Entsorgungssystem, welches sicherstellt, daß die aufnehmenden Gewässer den maßgeblichen Qualitätszielen sowie den Bestimmungen dieser und jeder anderen einschlägigen Richtlinie der Gemeinschaft entsprechen ...
- § 4 Kommunale Einleitungen
- (4) Es ist sicherzustellen, daß Abwasseranlagen so geplant, ausgeführt, betrieben und gewartet werden, daß sie unter allen normalen örtlichen Klimabedingungen ordnungsgemäß arbeiten. Bei der Planung der Anlagen sind jahreszeitliche Schwankungen der Belastungen zu berücksichtigen. Abwasserbehandlungsanlagen müssen so ausgelegt oder umgerüstet werden, daß vor dem Einleiten in Gewässer repräsentative Proben des zugeleiteten Abwassers und des behandelten Abwassers entnommen werden können. Die Stelle, an der kommunales Abwasser eingeleitet wird, ist möglichst so zu wählen, daß die Auswirkungen auf das aufnehmende Gewässer auf ein Minimum beschränkt werden."[23]

8.3.13 Sachsen

- 8.3.13.1 Sächsisches Wassergesetz (SächsWG)
- "§ 1 Sachlicher Geltungsbereich (zu § 1 WHG)
- (1) Dieses Gesetz gilt
- 1. für folgende Gewässer: ...
- b) das Grundwasser ...
- § 2 Begriffsbestimmungen für die Gewässer
- (4) Grundwasser ist das gesamte unterirdische Wasser, vorausgesetzt, daß es an den natürlichen Gewässerfunktionen Anteil hat, nicht dem Wasserhaushalt entzogen und der wasserwirtschaftlichen Lenkung zugänglich ist. ...
- § 3 Grundsätze (zu § 1a WHG)
- (1) Im Interesse der Allgemeinheit und zum Wohle des einzelnen ist die Lebensgrundlage Wasser nach dem Grundsatz der Vorsorge zu schützen, insbesondere in seinen natürlichen

Eigenschaften zu erhalten und zu sichern. Die Erhaltung und die Wiederherstellung der ökologischen Funktionen der Gewässer sind vorrangig zu berücksichtigen.

- (2) Das Wohl der Allgemeinheit verlangt insbesondere, daß ...
- 2. die Gewässer vor Verunreinigungen geschützt werden,
- 3. ein naturnaher Zustand der Gewässer gesichert und nach Möglichkeit wiederhergestellt wird ...
- § 11 Benutzung (zu §§ 2 und 3 WHG)
- (1) Die Bestimmungen des Wasserhaushaltsgesetzes und dieses Gesetzes über die Benutzungen der Gewässer gelten auch für ...
- 3. das Versickern, Verregnen und Verrieseln oder sonstiges Aufbringen von Abwasser und anderen Stoffen, welche die Eigenschaften von Wasser nachteilig verändern können, ...

§ 62 Abwasser

- (1) Abwasser im Sinne dieses Gesetzes ist ... das aus dem Bereich von bebauten oder künstlich befestigten Flächen abfließende und gesammelte Wasser aus Niederschlägen (Niederschlagswasser) sowie das sonstige in Abwasseranlagen mit Schmutzwasser oder Niederschlagswasser fließende Wasser. ...
- § 63 Abwasserbeseitigungspflicht (zu § 18a WHG)
- (1) Die Abwasserbeseitigung umfaßt das Sammeln, Behandeln, Ableiten, Verregnen, Verrieseln und Versickern von Abwasser ...
- (2) Die Abwasserbeseitigungspflicht obliegt den Gemeinden, in deren Gebiet das Abwasser anfällt, wenn nicht durch einen verbindlichen Abwasserbeseitigungsplan etwas anderes bestimmt ist. ...
- (5) Die Pflicht zur Abwasserbeseitigung nach Absatz 2 und zur Überlassung des Abwassers nach Absatz 4 kann durch Entscheidung der höheren Wasserbehörde auf Antrag des Beseitigungspflichtigen oder Überlassungspflichtigen entfallen
- 1. für Niederschlagswasser, das von öffentlichen Verkehrsflächen im Außenbereich und vom ländlichen Raum abfließt,
- 2. für Niederschlagswasser, das verwertet oder versickert wird ... "[23]
- 8.3.13.2 Verordnung des Sächsischen Staatsministeriums für Umwelt und Landesentwicklung zur Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG über die Behandlung von kommunalem Abwasser (VOkomAbw) Verordnung, kommunale Abwasser, VOkomAbw (SA)
- "§ 1 Zweck, Begriffe
- (1) Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser ...
- (2) Im Sinne dieser Verordnung ist:
- 1. kommunales Abwasser: ...häusliches Abwasser oder Gemisch aus häuslichem und industriellem Abwasser und/oder Niederschlagswasser ...
- § 4 Kommunale Einleitungen

(5) Es ist sicherzustellen, daß Abwasserbeseitigungsanlagen so geplant, ausgeführt, betrieben und gewartet werden, daß sie unter allen normalen örtlichen Klimabedingungen ordnungsgemäß arbeiten. Bei der Planung der Anlagen sind saisonale Belastungsschwankungen zu berücksichtigen. Abwasserbehandlungsanlagen müssen so ausgelegt oder umgerüstet werden, daß vor dem Einleiten in Gewässer repräsentative Proben des zugeleiteten Abwassers und des behandelten Abwassers entnommen werden können. Die Stelle, an der kommunales Abwasser eingeleitet wird, ist möglichst so zu wählen, daß die Auswirkungen auf das aufnehmende Gewässer auf ein Minimum beschränkt werden."[23]

8.3.14 Sachsen-Anhalt

- 8.3.14.1 Wassergesetz für das Land Sachsen-Anhalt (WGLSA)
- "§ 1 Sachlicher Geltungsbereich
- (1) Dieses Gesetz gilt
- 1. für folgende Gewässer: ...
- b) das Grundwasser ...
- § 2 Grundsätze
- (1) Die Gewässer sind als Bestandteil des Naturhaushaltes so zu bewirtschaften, daß sie dem Wohl der Allgemeinheit und im Einklang mit ihm auch dem Nutzen einzelner dienen und daß jede vermeidbare Beeinträchtigung unterbleibt.
- (2) Maßnahmen, die zu einer nachhaltigen Verschlechterung der Gewässergüte führen, sind unzulässig.
- (3) Das Wohl der Allgemeinheit erfordert insbesondere, daß ...
- 4. die Gewässer ... vor Verunreinigung geschützt werden ...
- (4) Jedermann ist verpflichtet, bei Maßnahmen, mit denen Einwirkungen auf ein Gewässer verbunden sein können, die nach den Umständen erforderliche Sorgfalt anzuwenden, um eine Verunreinigung des Wassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften zu verhüten ...
- § 5 Benutzungen
- (1) Benutzungen im Sinne dieses Gesetzes sind ...
- 5. Einleiten von Stoffen in das Grundwasser ...
- (2) Als Benutzungen gelten auch folgende Einwirkungen: ...
- 2. Maßnahmen, die geeignet sind, dauernd oder in einem nicht nur unerheblichen Ausmaß schädliche Veränderungen der physikalischen, chemischen oder biologischen Beschaffenheit des Wassers herbeizuführen. ...
- § 138 Reinhaltung
- (1) Eine Erlaubnis für das Einleiten von Stoffen in das Grundwasser darf nur erteilt werden, wenn eine schädliche Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht zu besorgen ist. ...

§ 150 Abwasserbeseitigung

- (1) Abwasser im Sinne dieses Gesetzes ist ... das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen abfließt und das sonst in die Kanalisation gelangende Wasser. ...
- (2) Abwasser ist so zu beseitigen, daß das Wohl der Allgemeinheit nicht beeinträchtigt wird.
- (3) Abwasserbeseitigung im Sinne dieses Gesetzes umfaßt das Sammeln, Fortleiten, Behandeln, Einleiten, Versickern, Verregnen und Verrieseln von Abwasser ...
- (4) Niederschlagswasser ist in geeigneten Fällen zu versickern. ...
- § 151 Abwasserbeseitigungspflicht
- (1) Die Gemeinden haben das auf ihrem Gebiet anfallende Abwasser ... soweit nicht nach den folgenden Absätzen andere zur Abwasserbeseitigung verpflichtet sind. Die Aufgaben, die die Gemeinden hiernach zu erfüllen haben, gehören zum eigenen Wirkungskreis. ...
- (3) Zur Beseitigung des Niederschlagswassers, in geeigneten Fällen durch Versickerung, sind an Stelle der Gemeinde verpflichtet
- 1. die Grundstückseigentümer,
- 2. die Träger öffentlicher Verkehrsanlagen,

soweit nicht die Gemeinde den Anschluß an eine öffentliche Abwasseranlage und deren Benutzung vorschreibt oder ein gesammeltes Fortleiten erforderlich ist, um eine Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit zu verhüten."[23]

8.3.14.2 Verordnung über kommunales und Industrieabwasser bestimmter Branchen (Kommunalabwasserverordnung - KomAbwVO)

"§ 1 Anwendungsbereich

Diese Verordnung gilt für das Sammeln, Behandeln und Einleiten von kommunalem Abwasser...

§ 2 Begriffsbestimmungen

Im Sinne dieser Verordnung ist

- 1. Kommunales Abwasser: häusliches Abwasser oder ein Gemisch aus häuslichem und industriellem Abwasser mit oder ohne Niederschlagswasser ...
- § 5 Einleitung von kommunalem Abwasser in Gewässer
- (5) Es ist sicherzustellen, daß Abwasserbehandlungsanlagen so geplant, ausgeführt, betrieben und gewartet werden, daß sie unter allen normalen örtlichen Klimabedingungen ordnungsgemäß arbeiten. Bei der Planung der Anlagen sind saisonale Belastungsschwankungen zu berücksichtigen. Abwasserbehandlungsanlagen müssen so ausgelegt oder umgerüstet werden, daß vor dem Einleiten in Gewässer repräsentative Proben des zugeleiteten Abwassers und des behandelten Abwassers entnommen werden können. Die Stelle, an der kommunales Abwasser eingeleitet wird, ist möglichst so zu wählen, daß die Auswirkungen auf das aufnehmende Gewässer auf ein Minimum beschränkt werden."[23]

8.3.15 Schleswig-Holstein

- 8.3.15.1 Wassergesetz des Landes Schleswig-Holstein (Landeswassergesetz LWG)
- "§ 1 Geltungsbereich (zu § 1 WHG)
- (1) Dieses Gesetz gilt für die Gewässer, die in § 1 Abs. 1 des Wasserhaushaltsgesetzes WHG bezeichnet sind ...
- § 2 Ziele der Wasserwirtschaft (zu § 1a WHG)
- (1) Die Durchführung dieses Gesetzes hat im Einklang mit dem Wohl der Allgemeinheit so zu erfolgen, daß die Funktion des Wasserhaushalts im Wirkungsgefüge des Naturhaushaltes gewahrt wird. Die Gewässer sind als Bestandteile des Naturhaushaltes und als Lebensgrundlage für den Menschen zu schützen und zu pflegen. Ihre biologische Eigenart und Vielfalt sowie ihre wasserwirtschaftliche Funktionsfähigkeit ist zu erhalten und bei Beeinträchtigungen wiederherzustellen.
- (2) Im Interesse des Wohls der Allgemeinheit kann es insbesondere erforderlich sein, daß ...
- 3. Stoffe nicht so auf- oder eingebracht werden, daß eine schädliche Verunreinigung der Gewässer oder eine sonstige nachteilige Veränderung ihrer Eigenschaften zu besorgen ist,
- 4. das Selbstreinigungsvermögen der Gewässer erhalten oder verbessert wird ...
- § 30 Abwasserbegriff, Anwendungsbereich
- (1) Abwasser im Sinne dieses Gesetzes ist Wasser, ... das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Grundstücken abfließt.
- § 31 Verpflichtung zur Abwasserbeseitigung (zu § 18a Abs. 2 WHG)
- (1) Die Gemeinden sind zur Abwasserbeseitigung im Rahmen der Selbstverwaltung verpflichtet, soweit in den nachfolgenden Vorschriften oder in einem für verbindlich erklärten Abwasserbeseitigungsplan nichts anderes bestimmt ist. ... Die Verpflichtung zur Abwasserbeseitigung umfaßt auch ... die Einleitung und Behandlung in Abwasserbeseitigungsanlagen. ...
- (3) Zur Beseitigung des Niederschlagwassers sind anstelle der Gemeinde verpflichtet ...
- 2. die Träger der öffentlichen Verkehrsanlagen, soweit sie nach anderen Rechtsvorschriften zur Entwässerung ihrer Anlagen verpflichtet sind."[23]
- 8.3.15.2 Landesverordnung über die Beseitigung von kommunalem Abwasser (KomAbwVO)
- "§ 1 Anwendungsbereich und Zweck
- (1) Diese Verordnung gilt für das Sammeln, Behandeln und Einleiten von kommunalem Abwasser ...
- (2) Sie dient zur Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser (ABl. EG Nr. L 135 S. 40) und dem Schutz oberirdischer Gewässer vor schädlichen Auswirkungen kommunalen Abwassers.
- § 2 Begriffe

Im Sinne dieser Verordnung ist

1. ,kommunales Abwasser': häusliches Abwasser oder das Gemisch aus häuslichem und industriellem Abwasser mit oder ohne Niederschlagswasser ..."[23]

8.3.16 Thüringen

- 8.3.16.1 Thüringer Wassergesetz (ThürWG)
- "§ 1 Gewässer
- (1) Dieses Gesetz gilt
- 1. für folgende Gewässer: ...
- b) das Grundwasser ...
- § 49 Erweiterung und Beschränkung der erlaubnisfreien Benutzung
- (3) Wenn eine Verunreinigung des Grundwassers nicht zu besorgen ist und sonstige Belange nicht entgegenstehen, können die Gemeinden durch Satzung regeln, daß Niederschlagswasser außerhalb von Wasserschutzgebieten auf den Grundstücken, auf denen es anfällt, oder auf besonders hierfür ausgewiesenen Flächen versickert werden kann. Die Satzung bedarf der Genehmigung der Wasserbehörde. Soweit die Satzung von der Wasserbehörde genehmigt ist, ist die mit der Versickerung verbundene Benutzung des Grundwassers erlaubnisfrei. Bei einer Beeinträchtigung des Wohls der Allgemeinheit oder sonstiger Belange kann die Benutzung durch die Wasserbehörde im Einzelfall untersagt werden.

§ 57 Abwasser

- (1) Abwasser im Sinne dieses Gesetzes ... das von Niederschlägen aus dem Bereich von bebauten oder befestigten Flächen abfließende und gesammelte Wasser (Niederschlagswasser) sowie das sonstige zusammen mit Schmutz- oder Niederschlagswasser in Abwasseranlagen abfließende Wasser. ...
- (3) Abwasser, insbesondere Niederschlagswasser, soll von demjenigen, bei dem es anfällt, verwertet werden, wenn wasserwirtschaftliche und gesundheitliche Belange nicht entgegenstehen. Niederschlagswasser soll darüber hinaus in geeigneten Fällen versickert werden.
- § 58 Abwasserbeseitigungspflicht
- (1) Die Abwasserbeseitigung obliegt den Gemeinden, in denen das Abwasser anfällt, soweit sie nicht nach Absatz 4 anderen Körperschaften des öffentlichen Rechts übertragen wurde. Sie haben das in ihrem Gebiet anfallende Abwasser zu beseitigen, wenn nicht ein verbindlicher Abwasserbeseitigungsplan etwas anderes bestimmt. ...
- (3) Die Pflicht zur Abwasserbeseitigung nach Absatz 1 und zur Überlassung des Abwassers nach Absatz 2 entfällt
- 1. für Niederschlagswasser, das von öffentlichen Verkehrsflächen im Außenbereich abfließt,
- 2. für Niederschlagswasser, das verwertet oder versickert wird ... [23]
- 8.3.16.2 Thüringer Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG über die Behandlung von kommunalem Abwasser (ThürkoAbwVO)
- "§ 1 Zweck und Geltungsbereich

(1) Diese Verordnung dient der Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates vom 21. Mai 1991 über die Behandlung von kommunalem Abwasser ...

- (2) Sie gilt für das Sammeln, Behandeln und Einleiten von kommunalem Abwasser ...
- § 2 Begriffe

Im Sinne dieser Verordnung ist:

1. Kommunales Abwasser: häusliches Abwasser oder ein Gemisch aus häuslichem und industriellem Abwasser und/oder Niederschlagswasser ...

§ 4 Kommunale Einleitungen

(4) Es ist sicherzustellen, daß Abwasserbehandlungsanlagen so geplant, ausgeführt, betrieben und gewartet werden, daß sie unter normalen örtlichen Klimabedingungen ordnungsgemäß arbeiten. Bei der Planung der Anlagen sind saisonale Schwankungen der Belastungen zu berücksichtigen. Abwasserbehandlungsanlagen müssen so angelegt oder umgerüstet werden, daß vor dem Einleiten in Gewässer repräsentative Proben des zugeleiteten Abwassers und des behandelten Abwassers entnommen werden können. Die Stelle, an der kommunales Abwasser eingeleitet wird, ist möglichst so zu wählen, daß die Auswirkungen auf das aufnehmende Gewässer auf eine Minimum beschränkt werden."[23]

8.3.17 Zusammenfassung zum Recht der Länder

8.3.17.1 Landeswassergesetze

"Zur Ausführung und Ergänzung des WHG und zum Betreiben eigener wasserwirtschaftlicher Aufgaben und Zielsetzungen haben alle Länder Landeswassergesetze erlassen. … Die Landeswassergesetze sind nach einem einheitlichen Schema aufgebaut und enthalten viele übereinstimmende Regelungen. Gerade für den Komplex "Wasserversorgung und Abwasserbeseitigung" ist festzustellen, daß der Bundesgesetzgeber den Ländern kaum Spielraum gelassen hat."[23]

In den Landeswassergesetzen wird erstmalig der Begriff "Niederschlagswasser" als unter bestimmten Voraussetzungen zum Abwasser gehörend definiert.

Dieses zu beseitigen, obliegt in den meisten Ländern den Gemeinden, wobei Niederschlagswasser, das von öffentlichen Verkehrsflächen im Außenbereich abfließt, von den Trägern dieser Verkehrsanlagen beseitigt werden muß.

Die Beseitigung von Abwasser hat dabei so vonstatten zu gehen, daß unter anderem eine Verunreinigung des Grundwassers oder eine sonstige nachteilige Veränderung seiner Eigenschaften nicht auftritt.

Allgemein ist zu beachten, daß die Landesgesetze zunehmend Niederschlagswasserversickerung zulassen, sie teilweise verlangen oder sie fördern.

Normalerweise stellt das Versickern von Niederschlagswasser einen Benutzungstatbestand dar und bedarf gemäß WHG einer wasserrechtlichen Erlaubnis.

"Eine Ausnahme von diesem Erlaubniserfordernis für Geringfügigkeitsfälle oder Fälle, in denen das Grundwasser nicht gefährdet werden kann, war bislang nach dem WHG nicht vorgesehen. Eine Erlaubnisfreiheit für Grundwasserbenutzungen konnte daher auch nicht durch Landesgesetz und schon gar nicht kraft Verwaltungsvorschrift eingeräumt werden.

Dementsprechend erweitern die meisten Landeswassergesetze nur die erlaubnispflichtigen Tatbestände und reduzieren sie aber nicht.

Bedenken bestehen insoweit gegen die Regelungen des § 44 Abs.3 S.3 HWG (Hessisches Wassergesetz, der Verf.), des § 32 Abs.4 MeVoWG (Wassergesetz des Landes Mecklenburg-Vorpommern, der Verf..) und des § 49 Abs.3 ThWG (Thüringer Wassergesetz, der Verf.), wonach in Gebieten, in denen eine gemeindliche Satzung besteht, die eine Versickerung von Niederschlagswasser zuläßt, die mit der Versickerung verbundene Benutzung des Grundwassers erlaubnisfrei gestellt wird. Diese Bedenken wurden auch nicht dadurch aus der Welt geschafft, daß der Bundesgesetzgeber ... in § 33 Abs.2 WHG eine neue Nr.3 eingefügt hat, nach der nunmehr die Länder allgemein oder für einzelne Gebiete bestimmen können, daß das Einleiten von Niederschlagswasser in das Grundwasser zum Zwecke seiner schadlosen Versickerung keiner Erlaubnis bedarf. ... Soweit auf landesgesetzlicher Ebene noch keine Vorschriften erlassen worden sind, die ein Absehen von der Erlaubnis für die Niederschlagswasserbeseitigung ermöglichen, bleibt es bei der dargelegten Erlaubnispflicht."[43]

8.3.17.2 Verordnungen zur Abwasserbeseitigung

Diese Verordnungen der einzelnen Länder dienen lediglich der Umsetzung der Richtlinie 91/271/EWG des Rates über die Behandlung von kommunalem Abwasser.

Die wichtigste Forderung für diese Arbeit ist ordnungsgemäße Sicherstellung des Betriebes der Abwasserbeseitigungsanlagen und die Erfordernis einer Probenahme des Abwassers vor und nach der Behandlung desselben.

8.4 Satzungsrecht der Gemeinden

Ortssatzungen sind Rechtsnormen, deren Gültigkeit auf das Gebiet einer Gemeinde beschränkt ist. Sie verbinden die gesetzliche Vorgaben mit den örtlichen Gegebenheiten.

Die Versickerung des Niederschlagswassers setzt Regelungen in den Ortssatzungen voraus, es sei denn, daß abschließende Regelungen in den Landeswassergesetzen vorliegen.

"Herkömmliche Ortssatzungen enthalten oft keine oder jedenfalls keine ausreichenden Bestimmungen zur Versickerung von Niederschlagswasser. Dies ist unter anderem auf die fehlenden diesbezüglichen Bestimmungen in den Landeswassergesetzen zurückzuführen"[36]

8.5 Technische Regeln, Normen und Richtlinien von Arbeitsgemeinschaften, Vereinen und Zusammenschlüssen

8.5.1 <u>A 138: Bau und Bemessung von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schädlich verunreinigtem Niederschlagswasser</u>

"Aufgrund zunehmender Bestrebungen der Länder und Kommunen, Niederschlagswasser zu versickern, um es dem Wasserkreislauf wieder zuzuführen, wird derzeit das aus dem Jahr

1990 stammende ATV-Arbeitsblatt A 138 "Bau und Bemessung von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schädlich verunreinigtem Niederschlagswasser" überarbeitet. Die Überarbeitung wird von der ATV-Arbeitsgruppe 1.4.1 "Versickerung von Niederschlagswasser" … vorgenommen.

Gegenüber dem bestehenden Arbeitsblatt, das sich mit der dezentralen Versickerung befaßt, liegen nunmehr auch Erfahrungen mit zentralen Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser und mit der Versickerung von Niederschlagswasser von Verkehrsflächen vor. Somit wird sich der Geltungsbereich des neuen A 138 wesentlich erweitern. Wie bereits in der bestehenden Fassung, soll dem Grundsatz, daß aufgrund der chemischen, physikalischen und biologischen Beschaffenheit des Oberflächenabflusses keine nachteilige Veränderung des Grundwassers zu besorgen ist, besondere Berücksichtigung gegeben werden. Folgende Themen werden in der Überarbeitung behandelt:

- Planung, Bau und Betrieb von Versickerungsanlagen
- Rechtliche Regelungen
- Hinweise zur Umsetzung der Regenwasserversickerung

Das Arbeitsblatt soll Planern, Bauherren und Behörden einen "Überblick über die derzeit bekannten Maßnahmen und Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser, die sich in der Praxis bewährt haben, geben."[96]

Eine Nachfrage bei der ATV - Abteilung Abwasser, Dipl.-Ing. Cornelia Dyk, ergab, daß voraussichtlich der Entwurf für das neue ATV-A 138 frühestens Mitte 1999 von der Arbeitsgruppe verabschiedet werden wird, was dann auch in der Korrespondenz Abwasser angekündigt wird.

8.5.2 <u>Richtlinie für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten</u> (RiStWag)

"Die Festsetzung von Wasser- und Heilquellenschutzgebieten sowie der Bau von Straßen führen oftmals zu Konflikten zwischen dem Gewässerschutz und der infrastrukturellen Entwicklung von Regionen. Die im Jahr 1982 veröffentlichten "Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten" (RiStWag) nehmen inzwischen einen festen Platz in der Verwaltungspraxis ein. Ziel der RiStWag ist es, eine Beeinträchtigung der Gewässer durch den Bau und Betrieb von Straßen zu vermeiden.

Um bisherigen Erfahrungen aus der Praxis sowie den Ergebnissen aus neueren Forschungsarbeiten und der technischen Entwicklung Rechnung zu tragen, ist ein Ausschuß, bestehend aus Vertretern der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), der Länderarbeitsgemeinschaft Wasser (LAWA) und des DVGW, mit der Überarbeitung der bestehenden Richtlinien beauftragt worden.

Folgende Themen sollen in der Überarbeitung behandelt werden:

- Gefährdung der Gewässer
- Rechtliche Grundlagen des Gewässerschutzes

•••

Anlagen zur Behandlung des Straßenoberflächenwassers

...

Die Richtlinien sollen dem planenden Ingenieur ebenso wie der Verwaltung Hilfen bieten, um jeweils im Einzelfall eine angemessene Lösung finden zu können. ..."[97]

Eine Anfrage beim Autor dieses Artikels, Dipl.-Geol. B. Niehues (DVGW-Hauptgeschäftsführung) ergab, daß aufgrund der derzeit noch regen Diskussion im Arbeitsausschuß nach Angaben des Obmannes des zuständigen Ausschusses eine Verbreitung des Entwurfes in der Fachöffentlichkeit zum derzeitigen Zeitpunkt noch zu früh ist.

Aus diesem Grunde kann auf diese Richtlinie noch nicht näher eingegangen werden.

8.6 Zusammenfassung

Bund und Länder sind verpflichtet EU-Richtlinien in nationales Recht umzusetzen.

Der Gesetzesadressat kann davon ausgehen, daß Bundes- und Landesrecht den EU-Richtlinien entspricht. Für Gesetzesadressaten ist Bundes- und Landesrecht bindend.

Sowohl auf EU-Ebene als auch auf Bundesebene wird Niederschlagswasser von bebauten und befestigten Flächen als Stoff, der ins Grundwasser gelangt und demzufolge einen Einfluß auf dieses hat, eingestuft.

Gelangt dieser "Stoff" direkt oder indirekt in ein Gewässer, worunter auch das Grundwasser fällt, stellt dies eine Gewässerbenutzung dar, welche von den EU-, bundes- und landesrechtlichen Vorschriften erfaßt wird.

Zu beachten ist darüber hinaus das Bundes-Bodenschutzgesetz. Dieses versteht unter dem Schutz des Bodens vor gefährlichen Stoffen auch den Schutz des Grundwassers direkt, als auch negative Veränderungen des Bodens durch Einleiten von gefährlichen Stoffen in das Grundwasser, wodurch die Bodenbeschaffenheit negativ verändert wird.

Die Vorsorge für das Grundwasser richtet sich jedoch generell nach dem Wasserhaushaltsgesetz.

Nach dem Bundes-Bodenschutzgesetz muß berücksichtigt werden, daß es nicht zulässig ist, Niederschlagswasser direkt in den Boden einzuleiten, wenn sich durch das Bodenfiltrat zwar eine anschließende positive Grundwasserdiagnose erstellen läßt, aber der Boden selbst durch die Filtration im Sinne des Bundes-Bodenschutzgesetzes geschädigt wurde.

Nach dem Bundesrecht ist bei der Benutzung eines Gewässers generell eine Genehmigung einzuholen, soweit nicht anderes Recht etwas abweichendes hergibt (generell heißt immer: es gibt Ausnahmen, der Verf.).

Aber die EU-Richtlinien verbieten generell das Einleiten von Stoffen der Liste I und das Einleiten von Stoffen der Liste II nur mit eingehender Prüfung. Ausnahmen können bei Geringfügigkeit ohne nachweislich schädigende Wirkung gemacht werden.

Demzufolge bedarf es auch bei Niederschlagswasser von bebauten und befestigten Flächen einer Einzelfallprüfung, welche Stoffe der Liste I und II und deren Konzentration in dem jeweiligen Gebiet enthalten sind (nach EU-Recht, der Verf.), da generell von einer Schadstoffbelastung bei diesem Niederschlagswasser ausgegangen werden muß.

Dazu gibt es auch Stofflisten I und II in der Verordnung über das Grundwasser.

Stoffe in Liste I bedeutet:

- Stoffe, deren Einleitung generell verboten ist
- keine Genehmigung
- aber, bei geringen Konzentrationen erlaubt, wenn irgendwelche Schädigungen im Sinne der rechtlichen Bestimmungen ausgeschlossen werden können

Stoffe in Liste II bedeutet:

- Stoffe erlaubnispflichtig
- Einleitung zulässig, wenn keine Gefährdung der in den verschiedenen Gesetzen genannten Rechtsgüter zu befürchten ist

Vor der Erteilung einer Erlaubnis für die Versickerung von Niederschlagswasser von bebauten oder befestigten Flächen müssen mindestens laut Grundwasserverordnung Untersuchungen der hydrogeologischen Bedingungen, der möglichen Reinigungskraft des Bodens und des Untergrundes sowie der Möglichkeiten einer schädlichen Verunreinigung des Grundwassers oder einer sonstigen nachteiligen Veränderung seiner Eigenschaften untersucht werden.

Das Landesrecht empfiehlt, fördert, verlangt oder läßt das Versickern von Niederschlagswasser zu.

Das Landesrecht kann aber die o. g. EU-Richtlinien und das Bundesrecht nicht brechen.

Zweifelhaft erscheint deshalb

- 1. Die EU-Richtlinie verbietet die Einleitung bestimmter Stoffe (Liste I und II) in das Grundwasser.
- 2. Bundesrecht gestattet in § 33 Abs. 2 Punkt 3 WHG den Ländern allgemein oder für einzelne Gebiete, das Einleiten von Niederschlagswasser in das Grundwasser zum Zwecke der schadlosen Versickerung ohne Erlaubnis festzulegen.

- 3. Da kein Erlaubnisverfahren vorgeschrieben ist, wird auch keine Prüfung der Schadstoffe des Niederschlagswassers, welche es in der Luft und am Boden aufgenommen hat, durchgeführt.
- 4. Aus diesem Grund kann nicht sichergestellt werden, daß keine Stoffe der Liste I und II mit in das Grundwasser gelangen, was ein Verstoß gegen die EU-Richtlinien darstellen würde.

Es kann deshalb nicht eingeschätzt werden, inwieweit der o. g. § 33 Abs. 2 Punkt 3 WHG mit den EU-Richtlinien übereinstimmt.

Vorgeschlagen wird

- entweder generelles Genehmigungsverfahren oder
- Erlaubnisverfahren entsprechend der EU-Richtlinie und wesentlicher Aussagen der Bundes- und Landesgesetzgebung (Beachte: Verstößt Bundesrecht gegen EU-Recht, muß Bundesrecht geändert werden; deshalb lieber EU-Recht einhalten) oder
- Prüfung und Nachfrage des Willens des Gesetzgebers mit dem § 33 Abs. 2 Punkt 3 WHG.

8.6.1.1.1 <u>Rechtliche Voraussetzungen</u>

Nach Ansicht der ATV-Arbeitsgruppe 1.4.1 [12] erfordert die Versickerung eine Erlaubnis gemäß WHG, da dies eine Benutzung des Grundwassers darstellt. Die Arbeitsgruppe ist jedoch der Meinung, daß das flächenhafte Versickern von Niederschlagswasser ein natürlicher Vorgang ist und demnach nicht erlaubnispflichtig. In diese Kategorie fällt demzufolge die Flächen- und Muldenversickerung. Für die Versickerung von Regenwasser benötigt man dann eine rechtliche Erlaubnis, wenn sie unter Zuhilfenahme von besonderen Einrichtungen geschieht. Denn ab diesem Punkt gilt eine Versickerung als ein Einleiten in Gewässer und fällt somit in den Bereich des Wasserhaushaltsgesetzes. In Wasserschutzgebieten können solche Anlagen auch weitergehenden Einschränkungen unterliegen. Die genauere rechtliche Betrachtungsweise erfolgt in Kap. 8.

Nachfolgend sind beispielhaft die Empfehlungen für erlaubnisfreie und erlaubnispflichtige Einleitungen, die von der Stadt Essen ausgearbeitet wurden, in Tabelle 73 aufgeführt.

	Erlaubnisfreie Einleitung in den Untergrund	Erlaubnispflichtige Einleitung in den Untergrund
Dachflächenent- wässerung	 Speicherung und Versickerung über Teich/Feuchtbiotop Versickerung in Gräben oder Mulden 	 Errichtung von Sickerschächten Errichtung von Rigolen- oder Rohrversickerungen
Anbauten, Gartenhäuser und Garagen		J
PKW-, Fahr- und Stellplätze	 Örtliche Versickerung bei wasserdurchlässiger Befestigung mit mind. 30 cm Kalkschotterunterbau Versiegelung der Fläche und Entwässerung über seitlich angelegte Gräben und Mulden (Sickerkörper aus Kalkschotter) 	- Flächenversiegelung und Einleitung des gesamten Niederschlagwassers über Sickerschächte oder Rohrversickerung (i.d.R. nur über Leichtstoffabscheider zulässig)

Tabelle 73 Empfehlungen der Stadt Essen für erlaubnispflichtige und erlaubnisfreie Einleitungen [37]

Mit der Wasserbehörde sind eventuell notwendige Auflagen (Ölabscheider etc.) sowie Gutachten abzuklären. Gutachten könnten z.B. gefordert werden zu

- der Struktur des Bodens,
- dem Abstand zum Grundwasser,
- dem Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens.

Entsprechend [37] sollten folgende Unterlagen bei der Wasserbehörde eingereicht werden:

- Lageplan über Standort der Sickeranlagen mit Leitungsführung,
- Aufstellung der abflußwirksam angeschlossenen Flächen,
- Sickerfähigkeitsnachweis des Untergrundes (Sickerversuch, Bodengutachten),
- Berechnung für die gewählte Versickerungsanlage.

Ist die Sickerfähigkeit des Bodens nicht bekannt, sollte ein Gutachten erstellt werden, in dem folgende Kriterein beurteilt werden sollen:

- Eignung des Bodens für Versickerung
- Durchlässigkeitsbeiwert
- Verlauf der Grundwasserströmung
- Wasserschutzgebietskennzeichnung

Weiterhin ist es wichtig, daß bereits bei der Planung darauf geachtet wird, ausreichende Abstände von Gebäuden und Grenzen festzulegen, um vor Vernässungen auf Nachbargrundstücken zu schützen. Dies gilt besonders bei hohem Grundwasserspiegel.

9 Weiterführende Aufgaben

9.1 Defizite in der Gesetzgebung

Der Schutz des Grundwassers vor Verunreinigung oder nachteiliger Veränderung ist Gegenstand des Wasserhaushaltsgesetzes (WHG). Da die Grundwasserneubildung über die Passage von Oberflächenwasser durch die ungesättigte Bodenzone erfolgt, werden dabei die Filter-, Puffer- und Transformationseigenschaften der Böden in Anspruch genommen. Die sechste Novelle des WHG ermöglicht die vorrangige Versickerung von Niederschlagswasser gegenüber der Ableitung. Naturgemäß ist damit die Beanspruchung der Regelungsfunktionen der Böden verbunden. Für einen flächenhaften Grundwasserschutz gibt es derzeit aber keine gesetzliche Regelung, die den Boden- und den Grundwasserschutz im Zusammenhang behandelt. Durch direkte Maßnahmen erfolgte der Schutz des Grundwassers bislang lediglich bei Wasserfassungen durch die Ausweisung von Trinkwasserschutzzonen.

9.2 Defizite im naturwissenschaftlichen sowie technisch-technologischen Kenntnisstand

Im Ergebnis der Literaturrecherche muß eingeschätzt werden, daß trotz zahlreicher Untersuchungen die Prozesse des Schadstofftransportes und –abbaus in Böden bislang nicht umfassend beurteilt werden können. Besonders das bei der Nutzung der Böden für Versickerungszwecke interessierende Langzeitverhalten kann aufgrund der vielfältigen Einflußfaktoren und der sich daraus ergebenden komplexen Wirkungszusammenhänge nicht exakt vorhergesagt werden. Nachfolgend werden einige Beispiele zur Verdeutlichung der Problemfelder angegeben.

In mehreren Untersuchungen wurden die Inhaltsstoffe des von befestigten Flächen abfließenden Niederschlagswassers bestimmt. Die in dieser Arbeit zusammengestellten Untersuchungsergebnisse weisen Konzentrationsspektren auf, die um den Faktor 10 - 1 300 differieren. Das läßt erkennen, wie unterschiedlich die Beschaffenheit des abfließenden Niederschlagswasser sein kann. Um so schwerer ist es aufgrund der räumlichen und zeitlichen Heterogenität Jahresfrachten für bestimmte Einzugsgebiete zu erfassen. Da der überwiegende Teil der Untersuchungen nur in relativ kurzen Zeiträumen durchgeführt wurde, stellen diese Ergebnisse im Wesentlichen Stichproben dar. Für die sichere Erfassung der auftretenden Frachten ist eine langfristige Aufnahme von Jahresreihen erforderlich, wobei der Bezug auf das jeweilige Einzugsgebiet bestehen bleibt.

Die von Oberflächen ablaufenden Niederschlagswässer enthalten Schwebstoffe, die bei der Versickerung eine Kolmation (Porenverschlämmung) des Bodens und damit ein Nachlassen der Sickerfähigkeit erwarten lassen. Aus der Filterbemessung in der Wasseraufbereitung ist die Abhängigkeit der Kolmationseffekte von der hydraulischen Beaufschlagung bekannt. Im

Blick auf zentrale Versickerungsanlagen ist von besonderen Interesse, ab welcher hydraulischen Last (Verhältnis $A_{red}:A_s$) deshalb eine Vorbehandlung der Niederschlagswässer in Absetzbecken erforderlich wird.

Weiterhin weisen die im Oberflächenabfluß enthaltenen Schwebstoffe ein hohes Bindevermögen gegenüber Schadstoffen auf. Zur Bewertung des Stoffrückhaltes bei der Bodenpassage ist die quantitative Erfassung der Partikeloberflächen der Schwebstoffe sowie die Beurteilung der Filterwirksamkeit der Bodenschichten erforderlich.

Aus verschiedenen Untersuchungen ist bekannt, daß infolge der Versickerung von Straßenoberflächenwasser eine Anreicherung von Schadstoffen in der obersten Bodenschicht erfolgt. Besondere Bedeutung kommt dabei den Schwermetallen zu, da sie als einzige Stoffgruppe keinerlei Abbaumechanismen unterliegen. Schwermetalle liegen unterschiedlichen Bindungsformen in Böden vor, wobei zwischen mobilen, mobilisierbaren und immobilen Verbindungen unterschieden werden kann. Zur Bewertung einer aktuellen Gefährdung des Grundwassers ist die Bestimmung der mobilen Schwermetallverbindungen erforderlich. Üblicherweise erfolgt der Aufschluß von Bodenproben in Anlehnung an die Klärschlammverordnung mit dem Königswasseraufschluß. Die Bestimmungsmethode erzielten Ergebnisse werden als insgesamt mobilisierbarer Schwermetallgehalt interpretiert. Es sind jedoch auf dieser Grundlage keine Aussagen zu den Randbedingungen (z.B. pH-Wert der Bodenlösung, Reaktionszeiten,...) für eine tatsächliche Mobilisierung möglich.

Für die Bewertung einer möglichen Grundwassergefährdung ist deshalb eine selektive Bestimmung der Schwermetallgehalte (mobiler und mobilisierbarer Anteil) erforderlich. Im Ergebnis der Literaturrecherche muß eingeschätzt werden, daß derartige Daten bisher für Versickerungsanlagen von Straßenoberflächenwasser kaum erhoben worden sind.

Sorptionsprozesse stellen eine wichtige Bindungsform von Stoffen an die Bodenmatrix dar. Zu deren Bestimmung (z. B. der Kationenaustauschkapazität) wurden verschiedene Methoden entwickelt, deren Ergebnisse oftmals nicht miteinander vergleichbar sind. Die Abhängigkeit der Sorptionsvorgänge von der Sickerwassermenge oder der Temperatur bleibt bei den gängigen Bestimmungsmethoden weitgehend unberücksichtigt.

Die gezielte Versickerung von Niederschlagswasser geht mit einer mehr oder weniger starken Abflußkonzentration einher. Als Folge des beim Betrieb von Versickerungsanlagen stattfindenden Stoffeintrages, ist langfristig mit einer Veränderung der Bodeneigenschaften (z.B. Lebensraum für Organismen, Milieuparameter, Textur, ...) zu rechnen. Diese Veränderungen können die Eignung eines Standortes zur Versickerung abnehmen lassen.

Bei der Planung von Versickerungsanlagen wird hauptsächlich die Durchlässigkeit des Boden (k_f-Wert) beurteilt. Um langfristig die Bodenfunktionen und somit den Schutz des Grundwassers zu gewährleisten, sind Aussagen zur Leistungsfähigkeit der Böden erforderlich. Dabei stellt sich das grundsätzliche Problem, die Leistungsfähigkeit der Böden für ihre unterschiedlichen Funktionen (Durchlässigkeit, Stoffrückhalt, -abbau, ...) bei

ungenügender Kenntnis von Ursache - Wirkungsbeziehungen im zeitlichen Verlauf zu bewerten.

9.3 Weiterführende Aufgaben

An diesen Beispielen wird deutlich, daß die Entwicklung von einheitlichen <u>Standardmethoden</u> zur Bestimmung der Eigenschaften und der Leistungsfähigkeit von Böden eine unbedingt erforderliche Aufgabe weiterer Forschungen darstellt. Im Sinne praktikabler Untersuchungsprogramme als Entscheidungsgrundlage für Genehmigungsverfahren ist die detaillierte Aufschlüsselung jeglicher Ursache-Wirkungsbeziehungen nicht zu erwarten, da der dafür notwendige Aufwand und die daraus resultierenden Kosten nicht aufzubringen sind. Vielmehr ist zur zweckmäßigen Erfassung der Standorteigenschaften potentieller Versickerungsflächen die Bestimmung von Summenparametern erforderlich. Auf diesem Prinzip aufbauend sollte eine Methodik erarbeitet werden, die als Entscheidungsgrundlage für Planungsaufgaben dient.

Mit den bei der Untersuchung von Beschaffenheitsänderungen im Grund- und Sickerwasser von Bergbaukippen sowie der Untersuchung von Anlagen zur Grundwasseranreicherung gewonnenen Erfahrungen, können im Hydrochemischen Labor des Lehrstuhls Wassertechnik der BTU Cottbus Untersuchungen durchgeführt werden, die zur Erarbeitung oben genannter Methodik beitragen. Dafür werden folgende Untersuchungsprogramme vorgeschlagen:

- Bestimmung eluierbarer Stoffe des Filtermaterials (Boden) durch 4-Stufen-Batchversuche mit entionisiertem Wasser
- Erfassung des Streusalzeinflusses auf mobilisierbare Stoffe des Filtermaterials durch 4-Stufen-Batchversuche mit Magnesiumchloridlösung
- Siebtests mit Straßenoberflächenabfluß zur Erfassung des Kolmationsverhaltens der Filterfläche
- Untersuchung des Sorptionsverhaltens gegenüber organischen Stoffen (Bestimmung von Sorptionsisothermen ausgewählter organischer Farbstoffe und leicht analysierbarer Testsubstanzen)
- Bestimmung des Rückhaltevermögens von suspendierten Feststoffen im Filtermaterial durch REV-Fluidzirkulationsversuche
- Untersuchungen zur Remobilisierung fixierter Stoffe im Filtermaterial durch veränderte Milieuparameter (pH-Wert, Salzgehalt, ...) durch REV-Fluidzirkulationsversuche.

10 Abbildungsverzeichnis

Bild 1	Oberflächen- und Volumenverteilung der Partikeln zweier Proben [45]	14
Bild 2	Gesamtmetallgehalte der Einzelproben [25]	15
Bild 3	Speziesaufteilung für Blei bei den beiden Einzelproben [25]	16
Bild 4	Speziesaufteilung für Nickel bei den beiden Einzelproben [25]	16
Bild 5	Speziesaufteilung für Cadmium bei den beiden Einzelproben [25]	17
Bild 6	Speziesaufteilung für Kupfer bei den beiden Einzelproben [25]	17
Bild 7	Konzentrationsganglinien in [ng/l] von organischen Mikroschadstoffen im Straßenabfluß [25]	18
Bild 8	Verteilung der Anzahl der Partikeln, ihrer Oberfläche und ihres Volumens über die Korngröße am	
	Beispiel einer Regenabflußprobe [121]	20
Bild 9	Intensität physikalischer, chemischer und biologischer Vorgänge in der belebten Bodenzone, der	
	Grundwasserüberdeckung (ungesättigte Zone) und dem Grundwasserleiter (gesättigte Zone)	
	(qualitative Darstellung) [5]	30
Bild 10	Schematische Darstellung der Verlagerungsprozesse unter besonderer Berücksichtigung der	
	Bodenparameter Durchlässigkeit und Feinkornanteil [5]	36
Bild 11	Durchbruchskurven für in eine Kalk-Säule eingebrachten Metalle Cd, Pb, Cu [74]	38
Bild 12	Durchbruchskurven für in eine Kaliumfeldspat-Säule eingebrachten Metalle Cd, Pb, Cu [74]	38
Bild 13	Schnitt durch die belebte Boden- bzw. Grundwasserzone mit der Darstellung von Bakterien (Pu	ınkte
	auf den Feststoffteilchen) und tierischen Kleinorganismen [89]	40
Bild 14	Hydraulik der Invasionsphase	42
Bild 15	Hydraulik der Kolmationsphase	43
Bild 16	Anordnung zum Sieb/Filtertest [106]	44
Bild 17	Zink- Sorptionsisothermen für einen Ton über verschiedene pH- Werte [41]	56
Bild 18	Cadmium- und Bleikonzentrationen in der Gleichgewichtslösung verschiedener Bodenproben a	us
	Ap-Horizonten in Abhängigkeit vom eingestellten pH-Wert [41]	57
Bild 19	Metabolischer Abbau (Prinzipskizze) [41]	60
Bild 20	Cometabolischer Abbau (Prinzipskizze) [41]	61
Bild 21	Boden neben einer Straße [16]	65
Bild 22	Bereiche der Bodenbelastung durch Straßenablaufwasser [91]	66
Bild 23	Verhalten straßenspezifischer Stoffgruppen im Untergrund [38]	68
Bild 24	Mögliche Eliminierungspfade beim biologischen Abbau der PAK [77]	69
Bild 25	Verhalten organischer Fluidphasen mit niedrigerer (a) und höherer (b) Dichte als Wasser im Bo	den
	[16]	73
Bild 26	Begriffe der Wasserbewegung im Boden [112]	88
Bild 27	Abflußbildung in der Bodenzone [118]	90
Bild 28	Wasserdurchlässigkeit von Lockergesteinen und versickerungsfähiger Bereich [46]	94
Bild 29	Übersichtsplan der Versickerungsanlage Nienburg/Langendamm	119
Bild 30	Schwermetallkonzentrationen im Grundwasser der Versickerungsanlage Nienburg/Langendamr	n
	[41]	122
Bild 31	Schwermetallkonzentrationen der Bodenbeprobungen im Versickerungsbecken [41]	123
Bild 32	PAK und PCB der Bodenproben [41]	125

11 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1	Zusammensetzung des Niederschlages	8
Tabelle 2	Verkehrsbedingte Verunreinigungen im Niederschlagsabfluß von Straßen und befestigten Flächen	l
	[108]	9
Tabelle 3	Konzentrationen im Regenabfluß von befestigten Flächen (Straßenabfluß): allgemeine Parameter	10
Tabelle 4	Konzentrationen im Regenabfluß von befestigten Flächen (Straßenabfluß):	11
Tabelle 5	Grenzwerte für Schadstoffe im Trinkwasser lt. TrinkwV	12
Tabelle 6	Konzentrationen im Regenabfluß von befestigten Flächen - organische Schadstoffe	12
Tabelle 7	Gegenüberstellung der Konzentrationen von Niederschlag, Dachablaufwasser und	
	Straßenablaufwasser [44]	13
Tabelle 8	Konzentrationen an PAK in wäßriger und partikulärer Phase verglichen mit den Grenzwerten der	
	Trinkwasser- und der Klärschlammverordnung [121]	19
Tabelle 9	Unterteilung der partikulären Phase des Regenabflusses in vier Fraktionen anhand ihrer	
	Transportcharakteristik und Schadstoffbeladung [121]	20
Tabelle 10	Ausgewählte mittlere Jahresfrachten im Regenwasserabfluß unterschiedlicher Einzugsgebiete	
	sowie Autobahnen in Deutschland in [kg/ha·a]	21
Tabelle 11	Grenzwerte für Oberflächenwasser (Rohwasser) und Trinkwasser nach verschiedenen Richtlinie	en
	[111]	22
Tabelle 12	Tolerierbare Schwermetallgehalte im Boden bezüglich ihrer Pflanzenverträglichkeit [111]	23
Tabelle 13	Schwellenwerte für Gewässer entsprechend den allgemeinen Güteanforderungen für	
	Fließgewässer des Landes Nordrhein-Westfalen von 1991 [84]	24
Tabelle 14	Zuordnung der Herkunft des Niederschlagsabflusses zu Beschaffenheitskategorien [108]	25
Tabelle 15	Qualitative Bewertung der Niederschlagsabflüsse hinsichtlich der Regenwasserversickerung in	
	Abhängigkeit der Flächennutzung [41]	26
Tabelle 16	Einstufung der Böden nach dem pH (CaCl ₂)-Wert [103]	31
Tabelle 17	Bewertung der Filterleistung (Filterung grobdisperser Stoffe d $>$ 0,1 μ m) von Böden [16]	40
Tabelle 18	Symbole und Einheiten zur Beschreibung der Invasions- und Kolmationsphase	41
Tabelle 19	Adsorptionsvermögen verschiedener Böden [37]	45
Tabelle 20	Potentielle Kationenaustauschkapazität in Abhängigkeit der spezifischen Oberfläche wichtiger	
	Bodenaustauscher [103]	47
Tabelle 21	Orientierungswerte der Kationenaustauschkapazität in mmolc/kg Boden der Bodenarten, berech	net
	aus ihrem mittleren Ton- und Schluffgehalt [22]	49
Tabelle 22	Beziehung zwischen KAK _{pot} (cmol _c / kg) und dem Humusgehalt [22]	49
Tabelle 23	Ableitung der KAK_{eff} des Humusanteils aus der KAK_{pot} in Abhängigkeit des pH- Wertes [22]	49
Tabelle 24	Beziehung zwischen pH-Wert (CaCl ₂) und Basensättigungsgrad BS [22]	51
Tabelle 25	Relative Bindungsstärke von Schwermetallen an Humus, Ton und Sesquioxiden im Boden bei p	H-
	Werten unterhalb des Grenz- pH (CaCl ₂) [27]	55
Tabelle 26	Verteilung von Mikroorganismen in verschiedenen Bodentiefen [77]	59
Tabelle 27	Hintergrundbelastung von Grundwässern mit Schwermetallen [41] [119]	63
Tabelle 28	Schwermetallgehalte in Böden [103] [16]	63
Tabelle 29	Schwermetallgehalte in verschiedener Fest- und Lockergesteine [41]	64
Tabelle 30	Bleigehalte (mg/kg Boden) in Querprofilen der Straßentypen Autobahn, Bundes-, Landes-,	
	Kreisstraße [48]	67

Tabelle 31	Cadmiumgehalte (mg/kg Boden) in Querprofilen der Straßentypen Autobahn, Bundes-, La	ndes-,
	Kreisstraße [48]	67
Tabelle 32	Halbwertzeiten von PCB im Boden [41]	68
Tabelle 33	Biologische Abbaubarkeit von LCKW [41]	71
Tabelle 34	Versickerung, Verflüchtigung, Sorption und Halbwertzeit des Abbaus verschiedener LCK	W im
	Boden [16]	71
Tabelle 35	Verhalten verschiedener AKW im Boden [16]	72
Tabelle 36	Restsättigung R nach 30 Tagen an Mineralölen in natürlichen Lockergesteinen [16]	73
Tabelle 37	Abbauverhalten von Erdölprodukten [16]	74
Tabelle 38	Bindungsformen der Metalle in Böden [26]	74
Tabelle 39	Relative Bindungsstärke der Ausgangsbodenart in Abhängigkeit vom pH-Wert (CaCl ₂)	78
Tabelle 40	Zuschläge zur Berücksichtigung des Humusgehaltes	78
Tabelle 41	Zuschläge zur Berücksichtigung des Tongehaltes bzw. der Bodenart 1)	78
Tabelle 42	Zuschläge zur Berücksichtigung höherer Eisenoxidgehalte	78
Tabelle 43	Zuschläge zur Berücksichtigung des Humusgehaltes und der Bodenart des Unterbodens bz	w. des
	Untergrundes	79
Tabelle 44	Einfluß der klimatischen Wasserbilanz	79
Tabelle 45	Grundwassergefährdung FSMw ¹⁾	80
Tabelle 46	Tiefenverteilung von Natrium und Chlorid an der B3 [48]	81
Tabelle 47	Übersicht über Stofftransportmodelle	84
Tabelle 48	Einteilung der Porengrößenbereiche und der Wasserleitfähigkeit nach dem Porendurchmes	ser
	[[16], [37]]	91
Tabelle 49	Anteil des Porenvolumens und der Porengrößenbereiche am Gesamtvolumen von Mineralb	öden
	und organischem Boden [103]	91
Tabelle 50	Eignung zur Versickerung verschiedener Kombinationen von Grundwasserdeckschichten u	ınd
	Grundwasserleitern [112]	92
Tabelle 51	Durchlässigkeitsbeiwerte von wassergesättigten Böden verschiedener Körnung [37]	93
Tabelle 52	Bemessungs- k _f - Wert in Abhängigkeit der Bestimmungsmethode [112]	93
Tabelle 53	Tiefenverteilung verkehrsbedingter Schadstoffe im Boden an Autobahnen (mg/kg)	95
Tabelle 54	Tiefenverteilung verkehrsbedingter Schadstoffe im Boden an Bundesstraßen (mg/kg)	95
Tabelle 55	Tiefenverteilung verkehrsbedingter Schadstoffe im Boden an Kreisstraßen (mg/kg)	95
Tabelle 56	Konzentrationen ausgewählter Spurenstoffe in Boden- und Grundwasserproben an der Stat	t- und
	Landebahn Süd des Frankfurter Flughafens. [112]	96
Tabelle 57	Mögliche Anwendungsbereiche von Versickerungsverfahren in Abhängigkeit vom	
	Grundwasserflurabstand [46]	96
Tabelle 58	Übersicht über Versickerungsanlagen	99
Tabelle 59	Entscheidungsmatrix zur Auswahl von Versickerungsanlagen [8]	102
Tabelle 60	Bewertung der Belastbarkeit von Gewässern I [14]	104
Tabelle 61	Bewertung der Belastbarkeit von Gewässern II [14]	104
Tabelle 62	Bewertung der Niederschlagsbelastung [14]	105
Tabelle 63	Bewertung der Flächenbelastung [14]	106
Tabelle 64	Auflistung von Versickerungsanlagen entspr. ihrer Reinigungseffektivität [14]	107
Tabelle 65	Auflistung von Sedimentationsanlagen entsprechend ihrer Reinigungseffektivität [14]	108
Tabelle 66	Physikalische Vorbehandlungsmaßnahmen	113

11 Tabellenverzeichnis 189

Tabelle 67	Biologische Vorbehandlungsmaßnahmen	114
Tabelle 68	Übersicht über Standort und Aufbau von 3 zu vergleichenden Absetzbecken	115
Tabelle 69	Konzentrationen an ein- und ausgetragenen Stoffen in der jeweiligen Anlage [114]	116
Tabelle 70	Wirkungsgrade der jeweiligen Anlagen [114]	116
Tabelle 71	Bemessungswerte für die Oberflächenbeschickung von Anlagen zur Reinigung von	
	Straßenoberflächenwasser [80]	117
Tabelle 72	Schwermetallgehalte im Zulauf und im Becken der Versickerungsanlage Nienburg/Langendam	m
	[41]	121
Tabelle 73	Empfehlungen der Stadt Essen für erlaubnispflichtige und erlaubnisfreie Einleitungen [37]	180

12 Abkürzungsverzeichnis zu Kap. 8

AbwAG Abwasserabgabengesetz AbwV Abwasserverordnung

BauGB Baugesetzbuch

BauROG Bauraumordnungsgesetz **BayWG** Bayerisches Wassergesetz

BbgKAbwV Brandenburgische Kommunalabwasserverordnung

BbodSchG Bundes-Bodenschutzgesetz **BrWG** Bremisches Wassergesetz BverwG Bundesverwaltungsgericht

BWWG Wassergesetz für Baden-Württemberg

DVGW Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.

EU Europäische Union

EG Europäische Gemeinschaft **EuGH** Europäischer Gerichtshof

FGSV Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen

GG Grundgesetz

HmbAbwG Hamburgisches Abwassergesetz HwaG Hamburgisches Wassergesetz **HWG**

KabwVO M-V Kommunalabwasserverordnung Mecklenburg-Vorpommern

Hessisches Wassergesetz

KomAbwV Kommunalabwasserverordnung **KomAbwVO** Kommunalabwasserverordnung

KomAbwVO Bln Kommunalabwasserverordnung Berlin LAWA Länderarbeitsgemeinschaft Wasser

LwaG Wassergesetz des Landes Mecklenburg-Vorpommern

LWG Landeswassergesetz

NdsWG Niedersächsisches Wassergesetz

Rahmen-AbwasserVwV Rahmen-Abwasser-Verwaltungsvorschrift

Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in RiStWag

Wassergewinnungsgebieten

RokA Reinhalteordnung kommunales Abwasser RokAbw Reinhalteordnung kommunales Abwasser

SA Sachsen

SächsWG Sächsisches Wassergesetz SWG Saarländisches Wassergesetz

ThürkoAbwVO Thüringer Verordnung zur Umsetzung der Richtlinie

91/271/EWG über die Behandlung von kommunalem Abwasser

ThürWG Thüringer Wassergesetz

VokomAbw Verordnung, kommunale Abwasser

VwVBayWG Verwaltungsvorschriften zum Vollzug des Wasserrechts

WGLSA Wassergesetz für das Land Sachsen-Anhalt

WHG Wasserhaushaltsgesetz

- [1] § 2 Abwasserabgabengesetz (AbwAG): http://www.umwelt-online/recht/wasser/abg_ges.htm
- [2] ALLOWAY/AYRES: Schadstoffe in der Umwelt chemische Grundlagen zur Beurteilung von Luft-, Wasser- und Bodenverschmutzungen; Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, Berlin, Oxford; 1996; ISBN 3-86025-361-1
- [3] Abwassertechnische Vereinigung (ATV): "Einleiten von nicht häuslichem Abwasser in eine öffentliche Abwasseranlage". Anlage I zum ATV-Regelwerk A 115; St. Augustin, 1983.
- [4] Abwassertechnische Vereinigung (ATV): "Einleiten von nicht häuslichem Abwasser in eine öffentliche Abwasseranlage". Anlage II zum -ATV-Regelwerk A 115; St. Augustin, 1983.
- [5] ASCHERL, Robert: Sicherheitsbewertung bautechnischer Maßnahmen zum Grundwasserschutz an Straßen in Wassergewinnungsgebieten auf probalistischer Grundlage in Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 726/1996; S. 38 54, Bundesministerium für Verkehr, Abteilung Straßenbau (Hrsg.)
- [6] ATV (Hrsg.): ATV-Handbuch: Mechanische Abwasserreinigung; 4. Aufl., Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1997
- [7] ATV (Hrsg.): Lehr- und Handbuch der Abwassertechnik, Band VII: Industrieabwasserreinigung mit anorganischen Inhaltsstoffen, 3. Überarbeitete Aufl., Verlag Ernst & Sohn, Berlin, 1985
- [8] ATV (Hrsg.): Versickerung von Regenwasser, ATV-Schriftenreihe 07, 1. Auflage, 1997; ISBN 3-927729-63-9
- [9] Abwassertechnische Vereinigung (ATV): "Richtlinien für die Bemessung, die Gestaltung und den Betrieb von Regenrückhaltebecken". -ATV-Regelwerk A 117; St. Augustin, 1977.
- [10] Abwassertechnische Vereinigung (ATV): "Bau und Bemessung von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schädlich verunreinigtem Niederschlagswasser". -ATV-Regelwerk A 138; St. Augustin, 1990.
- [11] ATV-Arbeitsgruppe 1.4.1: "Hinweise zur Versickerung von Niederschlagswasser". *Korrespondenz Abwasser*, 1995, 42. Jahrgang Nr.5, S. 797-806.
- [12] ATV-Arbeitsgruppe 1.4.1: Hinweise zur Versickerung von Niederschlagsabflüssen aus KA 5/95, Jg. 42; S. 797-806
- [13] ATV-Arbeitsgruppe 1.4.3: Arbeitsbericht Handlungsempfehlungen zum Umgang mit Regenwasser aus KA 8/96, Jg. 43, S. 1445-1454
- [14] ATV-Arbeitsgruppe 1.4.3: Arbeitsbericht Umgang mit Regenwasser derzeitiger Stand der Regenwasserbehandlung im Trennsystem aus KA 2/94, S. 304-311
- [15] ATV-Schriftenreihe 04: Abwasser- und Abfallschutz Umweltschutz vor neuen Aufgaben, Bad Hennef, Okt. 1996
- [16] BLUME, H.-P.: Handbuch des Bodenschutzes, 2. Auflage, Landsberg/Lech; Ecomed Verlag-Ges.; 1992; ISBN 3-609-65850-9
- [17] BÖHLER: Weiterentwicklung der Siebtests und Anwendung bei der Suspensionsfiltration über Kies; ; VEB PROWA Dresden, PWT V5 unveröffentlicht -

- [18] BORCHARDT, D.: Wirkung von Regenwasser- und Mischwassereinleitungen auf die Gewässerqualität, in: Abwassertechnische Vereinigung e.V. (Hrsg.): H/1 Abwasserableitung Entwässerungskonzepte Neue Entwässerungskonzepte und Kanalsanierung zur Reduzierung der Gewässerbelastung, Hennef 1994
- [19] BORGWARDT, S.: Entsiegelung im Straßenraum Belastung von Grundwasser und Boden bei der Versickerung von Niederschlägen?; Korrespondenz Abwasser KA 4/94; Jg. 41; S. 530 540
- [20] BROD, H.G.: Auswirkungen von Straßenabflüssen auf Böden, Vortrag im Rahmen des DVWK-Seminar 54 "Straßenentwässerung", IWU Magdeburg, 05.06.97
- [21] Bundesamt für Straßenwesen FP 8.9651: Dekontaminierende Wirkung belebter Bodenzonen bei verkehrsbedingten Beeinträchtigungen der Bodenqualität; Tischvorlage; 1996
- [22] Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und den Geologischen Landesämtern in der BRD (Hrsg.): Bodenkundliche Kartieranleitung; 4. Verbesserte und erweiterte Auflage; Hannover, 1996
- [23] CD: Das neue Wasserrecht für die betriebliche Praxis; © WEKA Fachverlag für technische Führungskräfte GmbH 1989; Stand: 10/98
- [24] Das neue Wasserrecht für die betriebliche Praxis lose Blattsammlung; WEKA Fachverlage GmbH; Augsburg; Stand Juli 1998
- [25] DAUB/STRIEBEL: Niederschlagsbedingte Schadstoffe im Straßenabfluß Erfassung, chemische Erscheinungsformen, Nachweis, in: BMFT-Verbundprojekt "Niederschlagsbedingte Schmutzbelastung der Gewässer": Schadstoffe im Regenabfluss aus städtischen Gebieten, Karlsruhe 1990
- [26] DECHEMA-Fachgespräche Umweltschutz: Beurteilung von Schwermetallen in Böden von Ballungsgebieten: Arsen, Blei und Cadmium; Internationale Expertenbeiträge und Resümee der DECHEMA-Arbeitsgruppe "Bewertung von Gefährdungspotentialen im Bodenschutz"
- [27] DVWK-Merkblätter zur Wasserwirtschaft Nr. 212: Filtereigenschaften des Bodens gegenüber Schadstoffen Teil I: Beurteilung der Fähigkeit von Böden, zugeführte Schwermetalle zu immobilisieren, 1988; ISBN 3-490-31297-X Heft 212/1988
- [28] DVWK-Schriften Heft 115: Wasserwirtschaftliche Bedeutung der Festlegung und Freisetzung von Nährstoffen durch Sedimente in Fließgewässern DVWK-Fachausschuß "Einflüsse auf die Beschaffenheit der Fließgewässer", Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Bonn, 1997
- [29] DVWK-Schriften Heft 100: Anwendung hydrogeochemischer Modelle, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Bonn, 1992
- [30] DVGW-Richtlinie W 101: Richtlinie für Trinkwasserschutzgebiete, Feb. 1995; Deutscher Verein des Gas- und Wasserfaches e.V.
- [31] Entwurf WAPRO 1.17; VEB PROWA Cottbus; 1989
- [32] EVANGELOU, V.P.: Pyrite oxidation and its control; CRC Press Boca Raton; New York; London; Tokio; 1995

[33] Fehr, K.: Der Umgang mit dem Regenwasser in der Schweiz aus Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz Nr. 31/95; S. 65-74

- [34] Feldmann, K.D.: Richtungsweisende Entwässerungstechnik Versickerung von Regenwasser aus Zeitschrift 3R-international Nr. 8/95, Jg. 34, S. 394-398
- [35] Gebhardt, Walter: Rückhaltung von Niederschlagswasser aus Zeitschrift WasserAbwasserPraxis 2/97, S. 22-23
- [36] Geiger, Wolfgang F.: "Neue Wege für das Regenwasser: Handbuch zum Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser in Baugebieten"/W. Geiger/H. Dreiseitl. Hrsg. Emschergenossenschaft, Essen und Internationale Bauausstellung Emscherpark GmbH. Gelsenkirchen. –München. Wien: Oldenburg, 1995, S. 249
- [37] GEIGER/DREISEITL: Neue Wege für das Regenwasser Handbuch zum Rückhalt und zur Versickerung von Regenwasser in Baugebieten; Hrsg. Emschergenossenschaft, Essen und Internationale Bauausstellung Emscher Park GmbH, Gelsenkirchen; Oldenbourg Verlag, München, Wien, 1995; ISBN 3-486-26259-9
- [38] GOLWER, Arthur: Auswirkungen der Straßenabflüsse auf das Grundwasser; DVWK-Seminar 54 "Straßenentwässerung"; IWU Magdeburg, 05.06.97
- [39] GOLWER/SCHNEIDER: Belastung des Grundwassers mit organischen Stoffen im Gebiet von Straßen aus gwf-Zeitschrift WasserAbwasser Heft 7/82, Jg. 123, Verlag R.Oldenbourg München
- [40] GRAU, A.: Grundlagen und Perspektiven der Versickerung von Regenwasser in Zeitschrift 3R international 11/97, Jg. 36; S. 645-650
- [41] GROTEHUSMANN, D.: Versickerung von Niederschlagsabflüssen unter Berücksichtigung des Grundwasserschutzes, vom Fachbereich Bauingenieur- und Vermessungswesen der Universität Hannover genehmigte Dissertation, 1995
- [42] GROTEHUSMANN: Versickerung von Niederschlagsabflüssen unter Berücksichtigung des Grundwasserschutzes aus Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz Nr. 31/95, S. 75 96; ISSN 0933-6052
- [43] Gruber, Meinhard: "Rechtliche Aspekte der Versickerung von Niederschlagswasser in Baugebieten". *Natur und Recht*, 1997, 19. Jahrgang, Heft 11, S. 521-528.
- [44] HAHN, H.H.: Neuere Untersuchungen zur Verschmutzung des Regen- und Mischwasserabflusses, in: Abwassertechnische Vereinigung e.V. (Hrsg.): H/1 Abwasserableitung Entwässerungskonzepte Neue Entwässerungskonzepte und Kanalsanierung zur Reduzierung der Gewässerbelastung, Hennef 1994
- [45] Hahn, H.H.: Niederschlagsbedingte Schmutzstoffbelastung der Gewässer Beitrag der verschiedenen Belastungspunkte und der möglichen Schadstoffgruppen erneut unter die Lupe genommen, in: BMFT-Verbundprojekt "Niederschlagsbedingte Schmutzbelastung der Gewässer": Schadstoffe im Regenabfluss aus städtischen Gebieten, Karlsruhe 1990
- [46] Hamacher, Renate: Berücksichtigung der Regenwasserversickerung bei der städtebaulichen Konzeption von Wohngebieten, 1996
- [47] HEINZMANN, B.: Beschaffenheit und weitergehende Aufbereitung von städtischen Regenabflüssen, Düsseldorf 1993

- [48] HOFFMANN/SCHOLL/TRENKLE: Schadstoffbelastung von Böden durch Kraftfahrzeugverkehr Blei, Cadmium, Auftausalze und chlorierte Kohlenwasserstoffe; Agrar- und Umweltforschung in Baden-Würtemberg Band 19; Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart, 1989, ISBN 3-8001-8679-9
- [49] HÖLTING, B.: Hydrogeologie Einführung in die Allgemeine und Angewandte Hydrogeologie, 5. Überarbeitete und erweiterte Auflage; Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1996
- [50] HOSANG/BISCHOF: Abwassertechnik, 10., neubearb. und erw. Aufl., Stuttgart 1993
- [51] http://www.umwelt-online/recht/allg/85_337gs.htm
- [52] http://www.umwelt-online/recht/allgemei/96_61gs.htm
- [53] http://www.umwelt-online/recht/allgemei/gg_ges.htm
- [54] http://www.umwelt-online/recht/bau/baugb/baugb_gs.htm
- [55] http://www.umwelt-online/recht/boden/bbsg_ges.htm
- [56] http://www.umwelt-online/recht/eu/egv_gs.htm
- [57] http://www.umwelt-online/recht/wasser/76_464gs.htm
- [58] http://www.umwelt-online/recht/wasser/80_68gs.htm
- [59] http://www.umwelt-online/recht/wasser/91_271gs.htm
- [60] http://www.umwelt-online/recht/wasser/abg_ges.htm
- [61] http://www.umwelt-online/recht/wasser/abw_vo/abw_ges.htm
- [62] http://www.umwelt-online/recht/wasser/gwv_ges.htm
- [63] http://www.umwelt-online/recht/wasser/laender/bay/lwg_ges.htm
- [64] http://www.umwelt-online/recht/wasser/laender/bw/lwg_ges.htm
- [65] http://www.umwelt-online/recht/wasser/laender/hessen/lwg_ges.htm
- [66] http://www.umwelt-online/recht/wasser/laender/hh/abwg_ges.htm
- [67] http://www.umwelt-online/recht/wasser/laender/hh/lwg_ges.htm
- [68] http://www.umwelt-online/recht/wasser/laender/nds/lwg_ges.htm
- [69] http://www.umwelt-online/recht/wasser/laender/nrw/lwg_ges.htm
- [70] http://www.umwelt-online/recht/wasser/laender/rp/lwg_ges.htm
- [71] http://www.umwelt-online/recht/wasser/laender/saar/lwg_ges.htm
- [72] http://www.umwelt-online/recht/wasser/whg/rahm_vwv/vwv_ges.htm
- [73] http://www.umwelt-online/recht/wasser/whg/whg_ges.htm
- [74] HUBER/FRIMMEL: Zum Transportverhalten von Cadmium, Blei und Kupfer in ausgewählten mineralischen Phasen von Grundwasserleitern in Zeitschrift Vom Wasser 83. Band, 1994
- [75] HUTH/RENNERT/GROTHKOPP/LÜTZNER: Schadstoffeintrag durch atmosphärische Deposition, in: XANTHOPOULOS, C.; HAHN, H.H. (Hrsg.): Schadstoffe im BMBF-Verbundprojektes Regenabfluß Ш (3. Präsentation des "Niederschlagsbedingte Schmutzbelastung städtischen der Gewässer aus befestigten Flächen" (Phase II)), München 1995

[76] Jedlitschka, Jens: "Die Wasserrahmenrichtlinie der Europäischen Union und der Grundwasserschutz". *Korrespondenz Abwasser*, 1998, 45.Jahrgang, Nr.9, S. 1670-1678.

- [77] KÄSTNER/MAHRO/WIENBERG: Biologischer Schadstoffabbau in kontaminierten Böden unter besonderer Berücksichtigung der Polyzyklischen Aromatischen Kohlenwasserstoffe; Hamburger Berichte Band 5 herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. R. Stegmann; Economica Verlag, Bonn, 1993; ISBN 3-87081-142-0
- [78] KNEIB/RUNGE: Verfahren und Modelle für den Bodenschutz zur Belastungs- und Risikoabschätzung von Schadstoffeinträgen Darstellung des Forschungsstandes und –bedarfs; Kernforschungsanlage Jülich GmbH; Projektleitung Biologie, Ökologie, Energie; Jül-Spez-545; Dezember 1989; ISSN 0343-7639
- [79] Koß, V.: Umweltchemie Eine Einführung für Studium und Praxis; Springer-Verlag; Berlin; 1997
- [80] Krauth, K.; Stotz, G.: Qualitativer und quantitativer Einfluß von Absetzanlagen auf den Betrieb von Versickerungsanlagen; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Bonn-Bad Godesberg, 1997, Heft 672
- [81] Krauth/Stotz: Menge und Beschaffenheit von Straßenoberflächenwasser beim Abfluß über bewachsene Seitenstreifen, Mulden und Böschungen; Forschungsgesellschaft für Straßen und Verkehrswesen, Heft 509, 1987, Bonn-Bad Godesberg
- [82] LANGE, G.: Grundlagen der Straßenentwässerung Auswirkungen der Straßenabflüsse auf oberirdische Gewässer; DVWK-Seminar 54 "Straßenentwässerung"; IWU Magdeburg, 05.06.97
- [83] LANGE, G.: Regenwasserbehandlung bei Verkehrsflächen; ATV-Seminar 9/97 "Aktuelles zur Regenwasserbehandlung in Trenn- und Mischverfahren", Dresden, 14./15.04.97
- [84] LANGE, G.: Straßenabflüsse: Beschaffenheit und Auswirkungen auf Gewässer, in: Festschrift Alexander Gerlach zur Vollendung des 60. Lebensjahres
- [85] Lange/Scheufele: Untersuchungen über den zeitlichen Verlaufder Versickerungsleistung von Versickerungsbecken und die Möglichkeiten der Beeinflussung; Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen Heft 515, 1997, Bonn-Bad Godesberg
- [86] Lietz/Werker: Niederschlagsversickerung am Beispiel des Pilotprojektes "Am Donewald" in Köln-Dünnwald aus Zeitschrift Kommunalwirtschaft Nr. 9/97; S. 486 490
- [87] LÖFFLER: Zur Technologie und Bemessung offener Infiltrationsanlagen für Grundwasseranreicherung; Dissertation TU Dresden; 1969
- [88] Londong, D.: Neue Wege für das Regenwasser im Emschergebiet aus Zeitschrift Wasserwirtschaft Nr. 85, 1995, S. 112-114
- [89] LUCKNER/SCHESTAKOW: Migrationsprozesse im Boden- und Grundwasserbereich; 1. Aufl.; VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie; Leipzig, 1986; ISBN 3-342-00090-2
- [90] MAECKELBURG, DIETRICH: Die hydraulisch wirksame Korngröße eng klassierter Schuettungen ein nützlicher Kennwert für die Praxis aus Zeitschrift gwf wasser/abwasser 119(1978)H1

- [91] MAGISTRAT DER STADT MARBURG: Umweltschutz in Marburg, Band 8: Straßenverkehr und Umweltbelastung, 2. Aufl., Marburg 1992
- [92] MOHS, Bernhard: Regenwasserversickerung im Spannungsfeld zwischen Wasserwirtschaft und Bodenschutz in Zeitschrift Bodenschutz Nr. 2/97; S. 42 47
- [93] Möller/Halfmann/Kade/Heinz: Naturnahe Regenwasserbewirtschaftung Bodenkundliche, hydrologische und biotische Aspekte erläutert am Beispiel der Ortsteile Schönow, Zepernik und Schwanebeck der Gemeinde Panketal aus Schriftenreihe Umwelttechnik und Umweltmanagement, Sondeband 8: Regenwasserbewirtschaftung statt Regenwasserentsorgung, 1993, S. 61-96
- [94] MULL/NORDMEYER: Pflanzenschutzmittel im Grundwasser Eine interdisziplinäre Studie; Springer Verlag, 1994, ISBN 3-540-58030-1
- [95] Neher, H.; Heine, Ch.: Ökologisch orientierte Regenwasserentsorgung und Regenwassernutzung; Ingenuerblatt für Baden-Württemberg Nr. 2/97, S. 96-112
- [96] Niehues, Berthold: "ATV-Arbeitsblatt A 138 Anlagen zur Versickerung von Niederschlagswasser". DVGW Nachrichten , September 1998, 16.Jahrgang Nr.3, S. 12-13.
- [97] Niehues, Berthold: "Überarbeitung RiStWag". DVGW Nachrichten , September 1998, 16.Jahrgang Nr.3, S. 12
- [98] RANDOLF/GRUHLER: Kanalisation und Abwasserbehandlung, 5., stark bearbeitete Auflage, Verlag für Bauwesen; Berlin; 1989; ISBN 3-345-00290-6
- [99] Reker, A.: Praktischer Einsatz der Regenwasserbewirtschaftung am Beispiel Baugebiet "Großer Seddiner See" bei Potsdam aus Zeitschrift Wasserwirtschaft Nr. 85/95, S. 128-133
- [100] Rowell, D.L.: Bodenkunde Untersuchungsmethoden und ihre Anwendungen, Berlin; Springer Verlag; 1997; ISBN 3-540-61825-2
- [101] RÜFFER/ROSENWINKEL: Taschenbuch der Industrieabwasserreinigung, Oldenbourg-Verlag München, Wien; 1991
- [102] Sämann, Udo: Regenwasser in Baugebieten aus VFA-Profil Das Architektur-Magazin, Jg. 9, Nr. 3/96, S. 38-40
- [103] SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL: Lehrbuch der Bodenkunde, 14. Aufl., Ferdinand Enke Verlag, 1998
- [104] SCHÖPKE, R.: Erarbeitung einer Methodik zur Beschreibung hydrochemischer Prozesse in Kippengrundwasserleitern; Dissertation BTU Cottbus LS Wassertechnik, in Vorbereitung 12/98
- [105] SCHÖPKE, R.: Laborversuche zum Vorbereitung der GWA Sdier; Bericht VEB PROWA Cottbus; 1989 unveröffentlicht -
- [106] Schöpke, R.: Suspensionsfiltration- Arbeitsgrundlagen der Verfahrensgruppe Wasserversorgung; VEB PROWA BT Cottbus; 1985, -unveröffentlicht-
- [107] SCHÖPKE, R.: Verfahrenstechnische Untersuchungen zum Investitionsvorhaben Wasserwerk Görlitz/Weinhübel; Versuchsbericht VEB PROWA Cottbus 1989 unveröffentlicht -

[108] SCHÖTTLER/REMMLER: Boden- und Grundwasserverunreinigung durch Regenwasserversickerung?, in: SCHMITT, T.G. (Hrsg.): Neuer Umgang mit Regenwasser in Siedlungen, ut95 – 4. Umwelttage Kaiserslautern 1995, Technische Akademie Südwest e.V., Kaiserslautern 1995

- [109] Sieker, F.: Das MRS Ein Konzept zur Regenwasserbewirtschaftung in Siedlungsgebieten aus Zeitschrift Wasserwirtschaft Nr. 85/95; S. 122-126
- [110] SIEKER/GROTTKER: Beschaffenheit von Straßenoberflächenwasser bei mittlerer Verkehrsbelastung, Hannover 1987, in: Bundesminister für Verkehr (Hrsg.): Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik Heft 530/1988, Bonn-Bad Godesberg 1988
- [111] SIEKER/HARMS: Entwässerungstechnische Versickerung von Regenwasserabflüssen, ATV Dokumentation und Schriftenreihe aus Wissenschaft und Praxis 14
- [112] SIEKER/HARMS: Entwässerungstechnische Versickerung von Regenwasserabflüssen; ATV Dokumentation und Schriftenreihe aus Wissenschaft und Praxis 14; GFA, 1987, St. Augustin
- [113] Stecker, Armin: Open end test zu Feldmessung der Infiltrationsrate aus Zeitschrift für Stadtentwässerung und Gewässerschutz Nr. 33/95, S. 89-99
- [114] Stotz, G.: Decontamination of Hihghway Surface Runoff in the FRG from the Journal: The science of the total environment, Heft 93/1993, S. 507-514
- [115] STRIEBEL, T.: Konzentrationen und physikochemisches Verhalten von Schwermetallen und Hauptionen in Regenabflüssen (Dissertation an der Universität Bayreuth), Aachen 1994
- [116] Tegethof, U., Cichos, A.: Vertikale Schwermetallverlagerung in Banketten von Bundesautobahnen aus Zeitschrift Straße und Autobahn Nr. 10/94, S. 627-638
- [117] THIELKE: Entwicklung leistungsfähiger Grobfilter; VEB PROWA Dresden, PWT V5 unveröffentlicht -
- [118] Uhlenbrook, S.; Leibundgut, Ch.: Abflußbildung bei Hochwasser in verschiedenen Raumskalen aus Zeitschrift Wasser & Boden, Jg. 49; Nr. 9/97, S. 13-21
- [119] Unterlagen zu den Vorträgen im Rahmen des Seminar 958/200 des Landesverbandes Nordrhein-Westfalen des vhw am 05.10.95 in Velbert; Niederschlagswasserbeseitigung unter Berücksichtigung der Novelle des Landeswassergesetzes, Material-Nr. 805
- [120] WASSMANN, H.: Grundlagen einer immissionsorientierten Regenwasserbewirtschaftung in Ballungsräumen dargestellt am Beispiel des Landes Berlin, Texte 76/95 des Umweltbundesamtes, Berlin 1996
- [121] XANTHOPOULOS, C.: Niederschlagsbedingter Schmutzstoffeintrag in Kanalsystemen Erneute Bilanzierung aufgrund weitergehender Erfassung von Ereignissen, in: BMFT-Verbundprojekt "Niederschlagsbedingte Schmutzbelastung der Gewässer": Schadstoffe im Regenabfluss aus städtischen Gebieten, Karlsruhe 1990
- [122] XANTHOPOULOS/HAHN: Diffuse Schadstoffbelastung des Grundwassers in Siedlungsgebieten; Vom Wasser Band 83, 1994, S. 81 94