

Lehrstuhl und Prüfamnt
für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik
der Technischen Universität München

Schriftenreihe
Heft 25

**Risikobetrachtungen zur
Planung von Maßnahmen zum
Grundwasserschutz im
Einflußbereich von Straßen**

von
Robert Ascherl

München 1997

Herausgegeben von Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Floss
Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik

Lehrstuhl und Prüfam
für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik
der Technischen Universität München

Risikobetrachtungen
zur Planung von Maßnahmen zum Grundwasserschutz
im Einflußbereich von Straßen

Robert Ascherl

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Th. Strobl

Prüfer der Dissertation: 1. Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Floss
2. Univ.-Prof. Dr.-Ing. P. Wilderer

Die Dissertation wurde am 04.12.1996 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen am 30.04.1997 angenommen.

Vorwort

Die Grundlagen der vorliegenden Dissertation entstanden während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München.

Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss danke ich sehr herzlich für die Anregung und kontinuierliche Förderung der Arbeit sowie die Veröffentlichung in dieser Schriftenreihe.

Für die Übernahme des Koreferates darf ich Herrn Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Wilderer besonders danken.

Herrn Akad. Direktor Dipl.-Ing. Helmut Laier danke ich für die wertvollen Ratschläge und die Betreuung während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter. Allen Kollegen des Lehrstuhles und Prüfamtes - insbesondere den Herren Dipl.-Ing. Dirk Heyer, Dipl.-Ing. Jochen Fillibeck und Dipl.-Geol. Detlev Ranis - danke ich sehr herzlich für ihre Unterstützung.

Mein besonderer Dank gilt meiner Freundin Dipl.-Inform. Ulrike Achhammer für ihre Geduld und ihr Verständnis während der gesamten Arbeit sowie für das sorgfältige Korrekturlesen. Ebenso danke ich Herrn Dipl.-Ing. Matthias Albert vielmals für seine gründliche und fachkundige Durchsicht der Endfassung.

Weiterer herzlicher Dank gilt Herrn Dipl.-Sozpäd. (FH) Rudolf Seidl, der mich in der Endphase der Arbeit besonders unterstützt hat.

Weiden, im Juni 1997

Robert Ascherl

Kurzfassung

Im Rahmen von Literatur- und Datenauswertungen wurden mögliche Gefährdungen des Grundwassers im Einflußbereich von Straßen erfaßt und hinsichtlich der Kriterien stoffliche Beschaffenheit, Menge, zeitliches Auftreten, oberirdische und unterirdische Verlagerung untersucht. Gemäß dem zeitlichen Auftreten wurde in ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen unterteilt.

Die vor allem aus Verbrennungsabgasen, Abrieb von Brems- und Fahrbelägen und Tropfverlusten stammenden ständigen Einwirkungen können durch die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke DTV näherungsweise indirekt quantifiziert werden. Die Immissionen der straßenspezifischen wassergefährdenden Stoffe nehmen mit zunehmendem Abstand vom Fahrbahnrand stark ab. Als hydrogeologische Schutzwirkung ist bei ungebündelter breitflächiger Entwässerung und Versickerung über den Fahrbahnrand eine bewachsene belebte Bodenzone und die verbleibende Grundwasserüberdeckung anzusehen.

Die von den winterlichen Witterungsverhältnissen und der aufzutauenden Fläche abhängige Tausalzstreuung wird als vorübergehende Einwirkung definiert. Die tausalzspezifischen Stoffe werden nahezu vollständig mit dem Fahrbahnabfluß verlagert. Da die aus dem Tausalz stammenden Chloride im Untergrund sehr mobil sind, kann allenfalls die hydrodynamische Dispersion im strömenden Grundwasser (Verdünnung) als hydrogeologische Schutzwirkung angesehen werden.

Die Emission wassergefährdender Stoffe durch Straßenverkehrsunfälle wird als außergewöhnliche Einwirkung definiert. Hierbei ergab die Auswertung von 831 Einzelunfällen eine Spannweite von 0 bis 50 m³ und einen Mittelwert von 1,65 m³ ausgelaufene wassergefährdende Stoffe. Mit größter Häufigkeit wurde dabei in durchschnittlich 60 % der Unfälle leichtes Heizöl/Diesel emittiert. Als maßgebende hydrogeologische Schutzwirkung ist die Durchlässigkeit der oberflächennahen Grundwasserüberdeckung (= ungesättigte Zone) für Mineralölprodukte anzusehen.

Im Rahmen von Risikobetrachtungen und -bewertungen ist im Einzelfall zu ermitteln, ob das vorhandene Risiko aus ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Einwirkungen akzeptiert werden kann, durch Schutzmaßnahmen zu mindern ist oder ausgeschlossen werden muß. Zur Risikominderung stehen vielfältige betriebliche, verkehrstechnische und bautechnische Schutzmaßnahmen zur Verfügung, die hinsichtlich der Wirksamkeit, der Zuverlässigkeit und der gemeinsamen Wirkungsweise untersucht wurden. Zur Optimierung der angestrebten Risikominderung sollten die verfügbaren Schutzmaßnahmen ihrer Wirkungsweise entsprechend und unter Berücksichtigung gegenseitiger komplementärer, konkurrierender, substituierbarer und indifferenter Wechselwirkungen verknüpft werden. Die Art und der Umfang der zu ergreifenden Schutzmaßnahmen sind im Einzelfall neben den Erfordernissen des Grundwasserschutzes auch von den standortspezifischen Randbedingungen abhängig, von denen exemplarisch die örtlichen Verhältnisse (Querschnittstopographie, Hydrogeologie), bautechnische Gegebenheiten (Neubau- oder bestehende Strecke) und wirtschaftliche Überlegungen (z.B. als Dichtungsmaterial geeigneter Aushub) genannt seien. Im Hinblick auf diese vielfältigen Variationen der im Einzelfall zu berücksichtigenden Randbedingungen und den technischen Fortschritt sollten einschlägige Richtlinien und Regelwerke bezüglich der Art und dem Umfang der zu ergreifenden Maßnahmen zum Grundwasserschutz ausreichend flexibel gestaltet werden.

Inhalt

1 Problemstellung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Derzeitiger Kenntnisstand	2
1.3 Aufgabenstellung	4
2 Grundlagen der Risikoforschung	5
2.1 Definitionen und Vorbemerkungen	5
2.2 Aufbau einer Risikoanalyse	6
2.3 Risikobetrachtungen zur Gefährdung des Grundwassers durch Straßen	10
2.3.1 Abgrenzung der Aufgabenstellung	10
2.3.2 Vorgehensweise	11
3 Identifikation von Risiken für das Grundwasser im Einflußbereich von Straßen	13
3.1 Straßenspezifische Emissionen wassergefährdender Stoffe	13
3.1.1 Allgemeines	13
3.1.2 Straßenspezifische wassergefährdende Stoffe als Eingangsgrößen einer Risikobetrachtung	15
3.1.2.1 Unterteilung in Einwirkungen	15
3.1.2.2 Quellen ständiger Einwirkungen	16
3.1.2.3 Quellen vorübergehender Einwirkungen	20
3.1.2.4 Quellen außergewöhnlicher Einwirkungen	21
3.1.3 Möglichkeiten zur Untersuchung straßenspezifischer Emissionen wassergefährdender Stoffe	22
3.2 Verlagerung straßenspezifischer wassergefährdender Stoffe	24
3.2.1 Oberirdische Verlagerung	24
3.2.2 Verlagerung im Untergrund	25
3.2.2.1 Überblick	25
3.2.2.2 Physikalische, chemische und biologische Verlagerungsprozesse im Untergrund	26
4 Risikobetrachtungen	33
4.1 Risikobetrachtungen zu ständigen Einwirkungen	33
4.1.1 Charakterisierung ständiger Einwirkungen	33
4.1.1.1 Beschaffenheit straßenspezifischer Stoffe aus ständigen Einwirkungen	33
4.1.1.2 Einfluß anderer nicht straßenspezifischer Emissionen (Hintergrundbelastungen)	34
4.1.1.3 Stoffe im Fahrbahnabfluß	36
4.1.1.4 Zeitlicher Verlauf ständiger Einwirkungen	43

4.1.1.5	Indirekte Quantifizierung ständiger Einwirkungen	48
4.1.2	Oberirdische Verlagerung der Stoffe aus ständigen Einwirkungen	52
4.1.3	Unterirdische Verlagerung der Stoffe aus ständigen Einwirkungen	57
4.1.3.1	Vorbemerkungen	57
4.1.3.2	Stoffgehalte in den oberen Bodenschichten oder Bodenprofilen im Straßenrandbereich	58
4.1.3.3	Stoffgehalte im Sickerwasser	59
4.1.3.4	Durchgehende Untersuchung der Stoffgehalte (Fahrbahnabfluß, Sickerwasser, Grundwasser)	65
4.1.3.5	Mobilität der Schwermetalle im Untergrund	66
4.1.4	Zusammenfassung und Folgerungen zu ständigen Einwirkungen	70
4.2	Risikobetrachtungen zu vorübergehenden Einwirkungen (Tausalzstreuung)	72
4.2.1	Charakterisierung vorübergehender Einwirkungen	72
4.2.1.1	Herkunft	72
4.2.1.2	Tausalzanwendung in Deutschland	73
4.2.1.3	Auswertung von in-situ-Untersuchungen	76
4.2.2	Oberirdische Verlagerung von Tausalz	81
4.2.3	Unterirdische Verlagerung von Tausalz	82
4.2.4	Zusammenfassung und Folgerungen zu vorübergehenden Einwirkungen	88
4.3	Risikobetrachtungen zu außergewöhnlichen Einwirkungen (Emission wassergefährdender Stoffe durch Unfälle)	90
4.3.1	Allgemeines	90
4.3.2	Datenbasis	90
4.3.3	Eignung, Vollständigkeit und Qualität der Unfalldaten	93
4.3.4	Auswertung der Unfalldaten	94
4.3.4.1	Unfallanzahl	94
4.3.4.2	Ausgelaufenes und wiedergewonnenes Volumen	98
4.3.4.3	Emittierte Stoffe	102
4.3.4.4	Untersuchung von "Großunfällen"	106
4.3.4.5	Abkommen von der Fahrbahn	108
4.3.5	Beschaffenheit der Stoffe aus außergewöhnlichen Einwirkungen	109
4.3.6	Oberirdische Verlagerung der Stoffe aus außergewöhnlichen Einwirkungen	111
4.3.7	Unterirdische Verlagerung der Stoffe aus außergewöhnlichen Einwirkungen	113
4.3.7.1	Allgemeines	113
4.3.7.2	Infiltration von Ottokraftstoffen (Mineralölprodukte) in die Grundwasserüberdeckung	113
4.3.8	Emissionsbezogene Risikoabschätzung außergewöhnlicher Einwirkungen	129
4.3.8.1	Stoffspezifisches Gefährdungspotential	129

4.3.8.2 Häufigkeitsabschätzung	130
4.3.8.3 Hinweise zur Risikobewertung	137
4.3.9 Zusammenfassung und Folgerungen zu außergewöhnlichen Einwirkungen	139
5 Maßnahmen zur Risikominderung (Schutzmaßnahmen)	143
5.1 Überblick	143
5.2 Betriebliche Maßnahmen	144
5.2.1 Reinigungs- und Pflegemaßnahmen	144
5.2.2 Verringerung der Tausalzanwendung	145
5.2.3 Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen mit wassergefährdenden Stoffen	145
5.3 Verkehrstechnische Maßnahmen	147
5.3.1 Verminderung der Emissionen beim Betrieb von Kraftfahrzeugen	147
5.3.2 Allgemeine verkehrstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit	147
5.3.3 Erhöhung der Sicherheit von Fahrzeugen zum Transport wassergefährdender Stoffe	148
5.3.4 Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe und/oder gefährlicher Stoffe	149
5.4 Bautechnische Maßnahmen	150
5.4.1 Passive Schutzeinrichtungen	150
5.4.1.1 Überblick	150
5.4.1.2 Distanzschutzplanken	152
5.4.1.3 Betongleitwände	154
5.4.1.4 Erdwälle	156
5.4.1.5 Passive Schutzeinrichtungen auf Brücken	157
5.4.2 Entwässerungseinrichtungen	160
5.4.2.1 Überblick	160
5.4.2.2 Fahrbahnoberfläche	161
5.4.2.3 Mulden und Gräben	162
5.4.2.4 Rinnen	162
5.4.2.5 Gullys, Kanäle und Schächte	163
5.4.2.6 Absatzbecken und Leichtflüssigkeitsabscheider	163
5.4.2.7 Versickerungsanlagen	166
5.4.3 Untergrundabdichtungen	169
5.4.3.1 Allgemeines	169
5.4.3.2 Anforderungen an die Wirksamkeit von Dichtungssystemen zum Grundwasserschutz an Straßen	170
5.4.3.3 Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Dichtungssystemen zum Grundwasserschutz an Straßen	171
5.4.3.4 Mineralische Abdichtungen	173
5.4.3.5 Kunststoffdichtungsbahnen	175

5.4.3.6	Bentonitdichtungsmatten	177
5.4.3.7	Asphaltbetondichtungen	180
5.4.3.8	Hinweise für die Auswahl von Dichtungselementen	181
5.5	Untersuchung der gemeinsamen Wirkungsweise von Schutzmaßnahmen	185
5.5.1	Vorbemerkungen	185
5.5.2	Schutzmaßnahmen gegen ständige Einwirkungen	187
5.5.3	Schutzmaßnahmen gegen vorübergehende Einwirkungen	190
5.5.4	Schutzmaßnahmen gegen außergewöhnliche Einwirkungen	193
5.5.5	Übergreifende Wechselwirkungen	196
5.6	Risikominderung im Einzelfall	197
5.6.1	Auswahl und Kombination von Schutzmaßnahmen	197
5.6.2	Hinweise zur Bewertung der Schutzmaßnahmen-Kombinationen	200
5.6.2.1	Allgemeines	200
5.6.2.2	Variation 100, ständige Einwirkungen	200
5.6.2.3	Variation 010, vorübergehende Einwirkungen	201
5.6.2.4	Variation 001, außergewöhnliche Einwirkungen	202
5.6.2.5	Variation 110, ständige und vorübergehende Einwirkungen	202
5.6.2.6	Variation 011, vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen	203
5.6.2.7	Variation 101, ständige und außergewöhnliche Einwirkungen	204
5.6.2.8	Variation 111, ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen	205
6	Hinweise für Risikoanalysen im Einzelfall	206
6.1	Allgemeine Hinweise	206
6.1.1	Beschreibung der Ausgangssituation	206
6.1.2	Risikoakzeptanz	207
6.1.3	Berücksichtigung von Wasserschutz-zonen	210
6.1.4	Abstufungsrahmen	211
6.2	Durchführung von Risikoanalysen für straßenspezifische Einwirkungen	214
6.2.1	Vorbemerkung	214
6.2.2	Ständige Einwirkungen	214
6.2.3	Vorübergehende Einwirkungen	215
6.2.4	Außergewöhnliche Einwirkungen	216
7	Zusammenfassung und Schlußfolgerungen	217
8	Literatur	223
8.1	Allgemeine Literatur	223
8.2	Normen, Richtlinien, Merkblätter	233
9	Anlagen	236

1 Problemstellung

1.1 Einführung

Von Straßen gehen komplexe Wirkungen auf die Umweltmedien Luft, Vegetation, Boden und Gewässer aus:

- | | |
|-------------|--|
| Luft: | <ul style="list-style-type: none">• qualitative Veränderungen durch straßenspezifische Stoffeinträge |
| Vegetation: | <ul style="list-style-type: none">• Veränderungen des Mikro- und Kleinklimas• qualitative Veränderungen durch straßenspezifische Stoffeinträge |
| Boden: | <ul style="list-style-type: none">• Veränderung der Zusammensetzung und Struktur der oberflächennahen Bodenschichten durch die Baumaßnahmen• Veränderung des Bodenwasserhaushaltes im Fahrbahnbereich durch Versiegelung und Straßenentwässerung• qualitative Veränderungen durch straßenspezifische Stoffeinträge |
| Gewässer: | <ul style="list-style-type: none">• quantitative Veränderungen, wie Einleitungen in Oberflächengewässer und/oder reduzierte Versickerung und Grundwasserneubildung• qualitative Veränderungen durch straßenspezifische Stoffeinträge in Oberflächengewässer und Grundwasser |
| Sonstige: | <ul style="list-style-type: none">• Lärmbelastung• Trennwirkung (z.B. Einschränkung der Mobilität von Tieren)• Veränderung des Landschaftsbildes• Nutzungseinschränkungen (z.B. Landwirtschaft) |

Ein wesentlicher Teilaspekt sind hierbei die qualitativen und quantitativen Auswirkungen auf das Grundwasser, insbesondere, wenn eine Verwendung als Trinkwasser vorgesehen ist. Durch die Förderung von Grundwasser werden in der Bundesrepublik Deutschland (alte Bundesländer einschließlich Westberlin) ca. 64 % des Gesamtbedarfs an Trinkwasser gedeckt. Die hierbei entnommene Menge entspricht 4,1 % der jährlichen Grundwasserneubildung von $63 \cdot 10^9 \text{ m}^3/\text{a}$ und 0,08 % der nutzungsrelevanten (speicherwirksamen) Gesamt-Grundwassermenge von $3,2 \cdot 10^{12} \text{ m}^3$ (Daten aus HÖLTING 1991). Um die Güte des

Grundwassers zu bewahren, können Wasserschutzgebiete ausgewiesen werden, deren Größe in erster Linie von den örtlichen hydrogeologischen Verhältnissen abhängt. Die Anteile der Wasserschutzgebiete an den Gesamtflächen der einzelnen Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland variierten im Jahr 1989 zwischen 3,8 % und 37,6 %, was in erster Linie auf die unterschiedlichen hydrogeologischen Verhältnisse zurückzuführen sein dürfte. Im Jahr 1989 hatten die Wasserschutzgebiete insgesamt 14 % Anteil an der Gesamtfläche der Bundesrepublik Deutschland (Daten aus AURAND et al. 1991).

1.2 Derzeitiger Kenntnisstand

Sofern die Anlage und der Betrieb einer Straße innerhalb eines Wasserschutzgebietes nicht vermieden werden kann, sind Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers zu ergreifen, die in den "Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten" (RiStWag 1982) enthalten sind. Die RiStWag wurden im Jahr 1971 von der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) eingeführt und liegen derzeit in der Fassung von 1982 vor. Die Art und der Umfang der zu ergreifenden Schutzmaßnahmen richten sich nach den Schutzzonen II, III A und III B sowie der Schutzwirkung grundwasserüberdeckender Bodenschichten, die gemäß DVGW - Arbeitsblatt W 101 (1975) zu beurteilen ist.

In den RiStWag (1982) sind die möglichen Gefährdungen des Grundwassers durch Straßen weitgehend erfaßt, jedoch nicht quantifiziert und bewertet. In jüngeren Arbeiten wurde die Beschaffenheit von Fahrbahnabflüssen (z.B. KRAUTH & KLEIN 1982, SCHORB 1988), Bankettböden (z.B. CICHOS 1992, TEGETHOF & CICHOS 1992), straßennaher Böden (z.B. UNGER & PRINZ 1992, REINIRKENS 1992), straßennaher Sickerwässer (z.B. CICHOS 1992, TEGETHOF & CICHOS 1992, REINIRKENS 1992), straßenbeeinflußten Grundwassers (z.B. GOLWER & SCHNEIDER 1983a,b, SCHORB 1988), straßenbeeinflußter Oberflächengewässer (z.B. SCHORB 1988) und des Wassers in straßenbeeinflußten Sickerbecken (z.B. GOLWER & SCHNEIDER 1983a,b) untersucht.

Von den in den RiStWag (1982) genannten bautechnischen Maßnahmen zum Grundwasserschutz an Straßen in Wassergewinnungsgebieten wurden die Wirksamkeit und die Zuverlässigkeit der Dichtungselemente mineralische Abdichtungen (HEYER 1989a,b und

BRAUNS et al. 1993), Kunststoffdichtungsbahnen (FILLIBECK 1994) und Bentonitdichtungsmatten (z.B. HEYER et al. 1995) und die Wirksamkeit von Absetzbecken mit Leichtstoffabscheidern (KRAUTH & KLEIN 1982) untersucht.

Aufgrund gewisser Analogien können weiterhin die Gefährdungen des Grundwassers durch den Umgang mit wassergefährdenden Stoffen sowie durch den Betrieb von Deponien im Rahmen der Aufgabenstellung berücksichtigt werden:

Die Eignung mineralischer Dichtungsmaterialien für den Grundwasserschutz bei der Lagerung wassergefährdender Stoffe wurde mehrfach untersucht (z.B. KROLEWSKI 1959, BEYER 1965, BILLIB et al. 1969, KORECK 1979). In BPG Kunststoffbahnen (1984) sind Bau- und Prüfgrundsätze zur Abdichtung von Auffangwannen und -räume für die Lagerung wassergefährdender Stoffe mit Kunststoffdichtungsbahnen festgelegt. In UBA (1990) werden Hinweise zur Beurteilung und Behandlung von Mineralölschadensfällen im Hinblick auf den Grundwasserschutz gegeben.

Die von Deponien ausgehenden Risiken für das Grundwasser wurden bereits mehrfach untersucht: BURKHARDT & EGLOFFSTEIN (1995) geben einen Überblick zur Durchführung von Risikostudien für Deponiestandorte. PFAFF (1995) stellt eine Methodik zur Risikoanalyse von Deponiestandorten auf der Grundlage von Simulationsberechnungen zum Transport deponiespezifischer Stoffe im Grundwasser vor. DEMMERT (1993) untersuchte anhand von Laboruntersuchungen und Simulationsberechnungen das Emissionsverhalten von Kombinationsabdichtungen für Deponien als Teilaspekt von Risikobetrachtungen für Abfalldeponien. Trotz gewisser Gemeinsamkeiten lassen sich diese Risikoanalysen für Deponien wegen den in Tab. 1-1 erläuterten Unterschieden wesentlicher Einflußgrößen nur teilweise auf die Aufgabenstellung übertragen. Zur Wirksamkeit und Zuverlässigkeit von Dichtungselementen für Oberflächen- und Basisabdichtungssysteme von Deponien liegt eine Vielzahl aktueller Forschungsarbeiten vor, die ebenfalls unter Berücksichtigung der andersartigen Randbedingungen (s. Tab. 1-1) auf Untergrundabdichtungen zum Grundwasserschutz an Straßen übertragen werden können.

Tabelle 1-1: Qualitativer Vergleich wesentlicher Einflußgrößen auf die Gefährdung des Grundwassers durch Deponien und durch Straßen

Einflußgröße	Erläuterung / qualitative Bewertung	
	Deponien	Straßen
Ort der Stoffeingebe	unterirdisch in die Grundwasserüberdeckung	oberirdisch auf die bewachsene und belebte Bodenzone
Form der Stoffeingebe	begrenzte Flächeneingebe, näherungsweise kreis- oder punktförmig	i.d.R. linienförmige Stoffeingebe
Stoffkonzentrationen bzw. -mengen	sehr groß	gering; nur bei Unfällen mit wassergefährdenden Stoffe große Stoffmengen
Permeierte Medien	Kombinationsabdichtung der Deponiebasis (i.d.R. Kunststoffdichtungsbahn und mineralische Abdichtung) und verbleibende natürliche Grundwasserüberdeckung	zunächst nur natürliche Grundwasserüberdeckung (Abdichtungen als zusätzliche Schutzmaßnahme)
Nutzungs- bzw. Einwirkungsdauer	theoretisch unbegrenzt	durch die Nutzungsdauer der Straße und ggf. der Wassergewinnungsanlage begrenzt
Durchführbarkeit nachträglicher Schutzmaßnahmen	wegen der tiefen Lage der Deponiebasis stark eingeschränkt bzw. sehr aufwendig (z.B. bergmännische Ausführung von Untergrundabdichtungen - siehe*)	gut möglich, da oberflächennah ausführbar

* EICHMEYER, H.; BOHM, W.; BREDEL-SCHÖRMANN, S. (1995): Untersuchung der Eignung bergmännischer Verfahren zur nachträglichen Sohlabdichtung von Deponien. In: 3. Arbeitstagung "Deponieabdichtungssysteme", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin. S. 367-375

1.3 Aufgabenstellung

Das Ziel dieser Arbeit ist, die straßenspezifischen Einwirkungen auf das Grundwasser so zu beschreiben, daß eine vollständige Risikobestimmung möglich wird und die Art und der Umfang gegebenenfalls zu ergreifender Schutzmaßnahmen entsprechend deren Wirkungsweise den gegebenen standortspezifischen Randbedingungen angepaßt werden können. Hierzu werden folgende Fragestellungen behandelt:

- Identifikation straßenspezifischer Einwirkungen auf das Grundwasser im Einflußbereich von Straßen (s. Abschn. 3)
- Stoffliche Beschaffenheit, Menge, zeitliches Auftreten, oberirdische und unterirdische Verlagerung wassergefährdender Stoffe aus straßenspezifischen Einwirkungen (s. Abschn. 4)
- Wirksamkeit und gegenseitige Wechselwirkungen der verfügbaren Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers im Einflußbereich von Straßen (s. Abschn. 5.1 bis 5.5)
- Erarbeitung und Beurteilung von Schutzmaßnahmen-Verknüpfungen zur Risikominderung für die möglichen Variationen der Risikobewertung im Einzelfall (s. Abschn. 5.6)

2 Grundlagen der Risikoforschung

2.1 Definitionen und Vorbemerkungen

Der zentrale Begriff *Risiko* wird in der Sicherheits- und Risikoforschung als das Produkt aus der Eintretenswahrscheinlichkeit eines unerwünschten Ereignisses, wie z.B. der Versagenswahrscheinlichkeit eines Tragwerkes, und dem Erwartungswert des resultierenden Schadens bei Eintritt dieses Ereignisses (Schadenserwartung) definiert (SCHNEIDER 1994). Wie in Abb. 2-1 ersichtlich, können Orte gleichen Risikos, d.h. $|R| = \text{konst.}$, durch Kurven zweiter Ordnung (Hyperbeln) dargestellt werden.

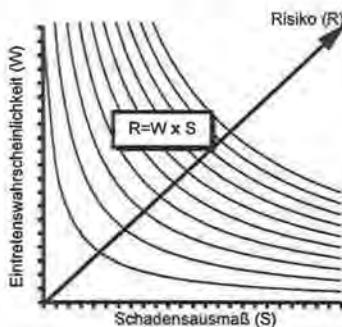


Abb. 2-1: Veranschaulichung des Begriffs Risiko - definiert als Produkt aus der Eintretenswahrscheinlichkeit und dem Erwartungswert eines bestimmten Schadens

Gefährdende Einflußgrößen werden als *Einwirkungen*, schützende Einflußgrößen werden als *Widerstände* definiert.

Nach der SIA-Norm 160 (zit. in SCHNEIDER 1994) besteht *Sicherheit* gegenüber einer Gefährdung, wenn diese Gefährdung durch geeignete Maßnahmen unter Kontrolle gehalten oder auf ein akzeptables Maß beschränkt wird. Eine absolute Sicherheit kann nicht erreicht werden. Übertragen auf eine bauliche Anlage bedeutet Sicherheit deren Fähigkeit, allen nachteiligen Einwirkungen mit angemessener Wahrscheinlichkeit widerstehen zu können.

Zuverlässigkeit ist die Fähigkeit eines Objektes, eine festgelegte Funktion (Widerstand gegenüber Einwirkung) unter vorgegebenen Bedingungen während einer festgelegten Zeitdauer (Nutzungsdauer) mit vorgegebener Wahrscheinlichkeit zu erfüllen (SCHNEIDER 1994).

Die meisten Bereiche des menschlichen Daseins sind mit direkten und indirekten Risiken verbunden, von denen exemplarisch Gefährdungen der Gesundheit, der Persönlichkeit und des Vermögens genannt seien. Bei Verunreinigungen des Grundwassers durch Verkehrseinwirkungen handelt es sich somit um eine indirekte Gefährdung der Gesundheit und des Lebens der durch die Nutzung als Trink- und Brauchwasser Betroffenen.

2.2 Aufbau einer Risikoanalyse

Zur genaueren Untersuchung von Risiken können Risikoanalysen durchgeführt werden, die nach ROWE (1983) aus den Komponenten Risikobestimmung (Risikoidentifizierung und -abschätzung) und Risikobewertung (Risikoaversion oder Risikoakzeptanz) zusammengesetzt sind. Der Ablauf einer Risikoanalyse ist in Abb. 2-2, unterteilt in die wesentlichen Arbeitsschritte, schematisch dargestellt.

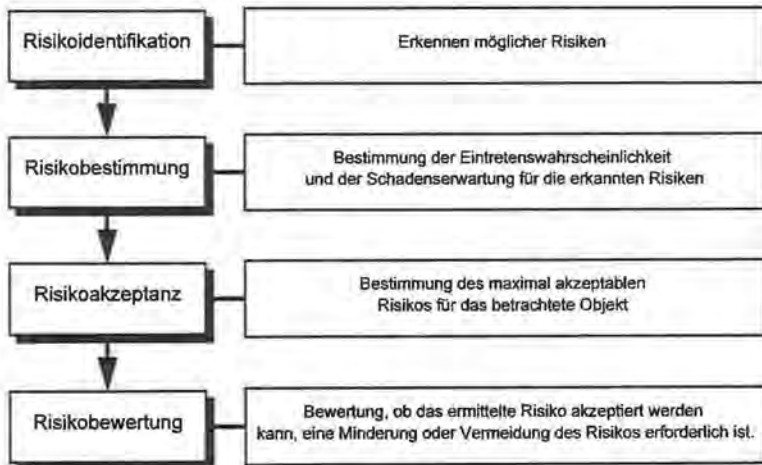


Abb. 2-2: Wesentliche Komponenten und Ablauf einer Risikoanalyse

Bei der Risikobestimmung können grundsätzlich folgende Methoden unterschieden werden:

- a) *Deterministische Berechnung:*
Berechnung von Erscheinungen, die in vorbestimmter (deterministischer) Weise ablaufen.
- b) *Probabilistische (wahrscheinlichkeitstheoretische) Berechnung:*
Mathematische Beschreibung des Verhaltens des untersuchten Objekts unter Berücksichtigung der zufälligen Schwankungen streuender Parameter durch stochastische Modelle (Mittelwert, Standardabweichung, Verteilungsfunktion) und anschließende Berechnung der Eintretenswahrscheinlichkeit der identifizierten Risiken, das heißt der möglichen Schädigungen des Objekts.
- c) *Statistische Analyse:*
Erfassung und statistische Auswertung von Daten (Meßdaten, Beobachtungen) über das Verhalten - insbesondere von Schädigungen - vergleichbarer Objekte in der Vergangenheit.
- d) *Experimentelle Untersuchung:*
Experimentelle Simulationen an in der Regel maßstäblich verkleinerten Modellen des untersuchten Objekts.
- e) *Objektive Abschätzung:*
Abschätzung der Risiken aufgrund von Erfahrungen mit vergleichbaren Systemen.
- f) *Risikoperzeption:*
Abschätzung des von bestimmten Personenkreisen (subjektiv) wahrgenommenen Risikos.

Nach RACKWITZ (1993) laufen viele Erscheinungen, mit denen der Ingenieur im Entwurf, der Herstellung und der Nutzung von technischen Objekten zu tun hat, wie beispielsweise die Vorgänge die den Gesetzen der klassischen Mechanik folgen, in vorbestimmter (deterministischer) Weise ab. Die deterministische Funktionssicherheit derartiger Objekte kann direkt angegeben oder bestimmt werden. Häufig jedoch sind zumindest einzelne Einflußgrößen des untersuchten Objekts mit zufälligen Schwankungen behaftet (z.B. Witterungseinflüsse), die in deterministischen Berechnungen (Methode a) nicht oder nur pauschal (Sicherheitsbeiwerte) berücksichtigt werden.

Nach HOSSER et al. (1988) setzen probabilistische Analysen (Methode b) voraus, daß

- der Grenzzustand (Gleichgewicht zwischen Einwirkungen und Widerständen) in Form eines physikalisch-mathematischen Modells in Abhängigkeit von zufällig streuenden Basisvariablen darstellbar ist
- und die Basisvariablen (streuende Parameter, die gefährdend als Einwirkungen oder schützend als Widerstände den Zustand des betrachteten Systems beeinflussen) durch ein stochastisches Modell beschrieben werden können, das zumindest Annahmen über Mittelwerte, Streuungen und Typ der Wahrscheinlichkeitsverteilung enthält.

Wenn eine mathematische Beschreibung des Verhaltens (vgl. Methode b) des untersuchten Objekts nicht möglich ist, können die identifizierten Risiken durch die statistische Auswertung von Daten zum Verhalten vergleichbarer Objekte in der Vergangenheit (Methode c) bestimmt werden.

Sofern die Voraussetzungen der Methoden a) und b) nicht erfüllt sind, experimentelle Untersuchungen (Methode d) nicht möglich sind und zudem keine ausreichende Datenbasis (Methode c) vorliegt, können die identifizierten Risiken anhand von Erfahrungen mit vergleichbaren Objekten durch Fachleute "objektiv" abgeschätzt werden (Methode e).

Nach ROWE (1983) werden gesellschaftliche Entscheidungen auf der Grundlage von subjektiven Risikoabschätzungen (Methode f) getroffen, da in der Praxis emotionale Erwägungen größere Wirkung haben, als wissenschaftliches Wissen. Auch SCHNEIDER (1994) stellt fest, daß die Bevölkerung seltene Unfälle mit vielen Toten und Verletzten wesentlich schlimmer bewertet, als häufige Ereignisse mit wenigen Toten, trotz des ggf. gleichen absoluten Risikos. Zur Bestimmung dieser subjektiven Risikowahrnehmung können nach ROWE (1983) die Verfahren "*Revealed Preferences*", "*Implied Preferences*" und "*Expressed Preferences*" im Rahmen von Risikovergleichen (siehe 1), unten) angewandt werden. *Revealed Preferences* geht von der Annahme aus, daß sich in einer Gesellschaft zwischen den Risiken und dem Nutzen einer Aktivität ein optimales Gleichgewicht eingependelt hat, so daß dann anhand von Risikovergleichen diese von der Bevölkerung akzeptierten Risiken auch auf andere Aktivitäten (z.B. neue Technologien) übertragen werden können. *Implied Preferences* betrachtet die Gesetze einer Gesellschaft als Reflexion dessen, was die Bevölkerung wünscht sowie deren aktuelle wirtschaftliche Rahmenbedingungen ermöglichen, so daß akzeptable Risiken im Rahmen eines demokratischen Entscheidungsprozesses festzulegen wären. *Expressed Preferences* ermittelt die von der Bevölkerung subjektiv wahrgenommenen akzeptierten Risiken durch direkte Befragungen.

Bei der Risikobewertung ist zu untersuchen, ob die vorhandenen Schutzwirkungen (Widerstände, W) das aus den vorhandenen Einwirkungen (E) resultierende Risiko ($R_{\text{vorhanden}}$) auf ein akzeptables Maß ($R_{\text{akzeptabel}}$) beschränken. Die Risikobewertung kann formal wie folgt dargestellt werden:

$$R_{\text{vorhanden}}^x = 1 - \frac{\sum_{i=1}^k W_i^x}{\sum_{i=1}^k E_i^x} \geq \text{bzw.} \leq R_{\text{akzeptabel}}^x \quad \text{Gl (2-1)}$$

mit
R Risiko
W Widerstand
E Einwirkung
x Bezeichnung des untersuchten Lastfalls

Die Ansätze und Methoden der Risikobewertung können nach ROWE (1983) in vier Hauptkategorien unterteilt werden:

- 1) Risikovergleichsansätze
- 2) Kostenwirksamkeit der Risikominderung
- 3) Abwägen von Kosten-Risiken-Nutzen
- 4) Metasysteme

Mit Risikovergleichsansätzen (1) werden die von der untersuchten Aktivität ausgehenden Risiken mit Bezugswerten oder Werturteilen verglichen. Hierzu seien exemplarisch die von der Bevölkerungsmehrheit (vgl. *Revealed Preferences*, *Expressed Preferences*) oder den Entscheidungsträgern einer Gesellschaft (vgl. *Implied Preferences*) akzeptierten Risiken oder die durch einen potentiellen Schaden verursachten Kosten genannt.

Bei der Betrachtung der Kostenwirksamkeit einer Risikominderung (2) werden die zur Risikominderung aufgewandten Kosten mit den durch die Vermeidung einer Schädigung eingesparten Kosten verglichen. Exemplarisch seien bautechnische Brandschutzmaßnahmen oder der volkswirtschaftliche Wert eines geretteten Menschenlebens genannt.

Bei Kosten-Risiken-Nutzen-Abwägungen (3) wird zusätzlich zu den risikospezifischen Kosten auch der wirtschaftliche Nutzen der untersuchten Aktivität berücksichtigt, um den Gesamtnutzen einer Aktivität optimieren zu können.

Metasysteme (4) sind nach ROWE (1983) Verknüpfungen der vorgenannten Methoden der Risikobewertung, um komplexe Fragestellungen differenziert und umfassend bewerten zu können.

Den Abschluß einer Risikoanalyse bilden Empfehlungen für die Handhabung der untersuchten Aktivität, wobei grundsätzlich drei Handlungsmöglichkeiten unterschieden werden können:

Akzeptanz	Minderung	Vermeidung
Das aus der untersuchten Aktivität resultierende Risiko wird akzeptiert	Ergreifen von Schutzmaßnahmen zur Minderung des resultierenden Risikos auf ein akzeptables Maß	Unterlassen der untersuchten Aktivität

2.3 Risikobetrachtungen zur Gefährdung des Grundwassers durch Straßen

2.3.1 Abgrenzung der Aufgabenstellung

Die von Straßen ausgehenden potentiellen Beeinträchtigungen des Grundwassers im Hinblick auf dessen Eignung als Trinkwasser ergeben ein komplexes Geflecht konkurrierender Interessen der Verursacher, Nutznießer, Betroffenen und Verantwortlichen (siehe Abb. 2-3, nächste Seite).

Nach ZECH (1983) verlangt der Ausgleich der durch eine Beeinträchtigung von Grundwasser als Folge des Straßenbaus betroffenen Interessen eine Betrachtung von verfahrens- und materialrechtlichen Bestimmungen in den bundes- und landesrechtlichen Regelungen des Wasserrechts, des bürgerlichen Rechts und des Enteignungsentschädigungsrechts, ohne daß verallgemeinernd einfache Zuordnungen und Abgrenzungen der relevanten Tatbestände diese Aufgabe a priori vereinfachen könnten.

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Risikobetrachtungen zur Gefährdung des Grundwassers durch Straßen sollen eine Entscheidungsgrundlage für den Ausgleich der durch eine Beeinträchtigung von Grundwasser als Folge des Straßenbaus betroffenen Interessen liefern.

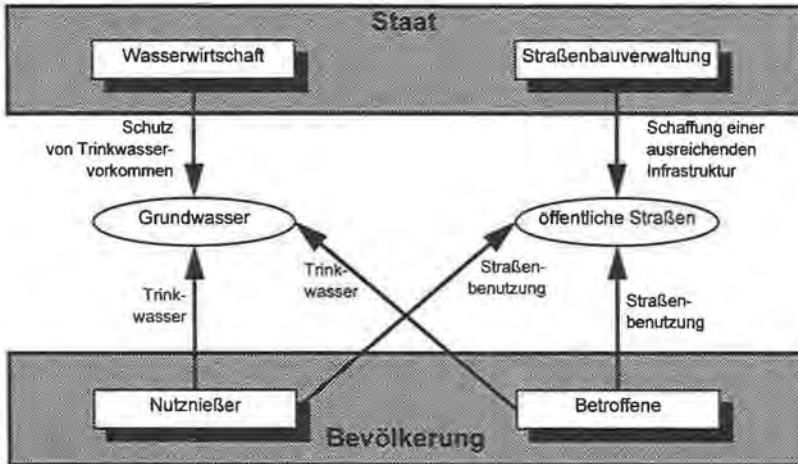


Abb. 2-3: Geflecht der konkurrierenden Interessen der Verursacher, Nutznießer, Betroffenen und Verantwortlichen im Spannungsfeld aus Straßen und Grundwasser

2.3.2 Vorgehensweise

Wie in Abschnitt 1.2 erläutert, wurden bereits in mehreren Forschungsarbeiten mögliche Gefährdungen des Grundwassers durch Straßen zusammengestellt und untersucht. Ein umfassendes Konzept für Risikobetrachtungen zum Grundwasserschutz an Straßen liegt derzeit jedoch nicht vor.

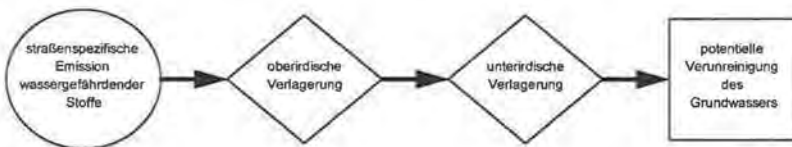


Abb. 2-4: Flußdiagramm zum elementaren Ablauf einer Grundwasserverunreinigung durch Straßen

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten *"Risikobetrachtungen zur Gefährdung des Grundwassers durch Straßen"* folgen dem in Abb. 2-4 als Flußdiagramm dargestellten elementaren Ablauf einer möglichen Grundwasserverunreinigung durch Straßen.

Es werden die einzelnen straßenspezifischen Emissionen wassergefährdender Stoffe und deren oberirdische und unterirdische Verlagerung hinsichtlich folgender Kriterien untersucht:

- Beschaffenheit
- Menge
- zeitliches Auftreten

Hierbei wird besonderes Augenmerk auf die Art und die Wirkungsweise verfügbarer und ggf. neu zu entwickelnder Schutzmaßnahmen gelegt.

3 Identifikation von Risiken für das Grundwasser im Einflußbereich von Straßen

3.1 Straßenspezifische Emissionen wassergefährdender Stoffe

3.1.1 Allgemeines

Gemäß RiStWag (1982) sind feste, flüssige und gasförmige Stoffe, die geeignet sind, die physikalische, chemische oder biologische Beschaffenheit des Wassers nachhaltig zu verändern, wassergefährdend. Das Gefährdungspotential wassergefährdender Stoffe wird durch deren physikalische, chemische und biologische Stoffeigenschaften bestimmt. Zur Abschätzung der Gefahr, die von einzelnen Stoffen ausgeht, hat die Kommission "Bewertung wassergefährdender Stoffe" des Beirates "Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe (Beirat LTWS)" (UBA 1991a) ein Bewertungsschema entwickelt, das sich an folgenden Stoffeigenschaften orientiert:

- akute Toxizität gegenüber Säugetieren, Bakterien und Fischen
- Abbauverhalten
- Algen- und Daphnientoxizität
- Langzeitwirkungen
- Verteilungsverhalten (Migrationsverhalten)

Entsprechend ihrer Gefährlichkeit werden die Stoffe in folgende Wassergefährdungsklassen (WGK) eingestuft:

- WGK 0: im allgemeinen nicht wassergefährdend
- WGK 1: schwach wassergefährdend
- WGK 2: wassergefährdend
- WGK 3: stark wassergefährdend

Im "Katalog wassergefährdender Stoffe" (LTWS-Schrift Nr. 12) ist für eine Vielzahl von Stoffen - unterteilt in Stoffgruppen - die jeweilige Wassergefährdungsklasse angegeben.

3.1.2.2 Quellen ständiger Einwirkungen

Tabelle 3-1 gibt einen Überblick über die Art und die Herkunft straßenspezifischer wassergefährdender Stoffe aus ständigen Einwirkungen.

Tabelle 3-1: Herkunft und Art straßenspezifischer Stoffe aus ständigen Einwirkungen

Herkunft	Emittierte Stoffe*	Literaturquelle
Abgase	Blei (3), Nickel (2), Stickstoffverbindungen (1), Phenole (2), div. Kohlenwasserstoffe (2-3), Ruß, partikuläres Material	GOLWER 1991, STOTZ & KRAUTH 1987
	polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und Dibenzofurane (PCDD/F)	UNGER & PRINZ 1992
Bremsenabrieb	Chrom (3), Kupfer (2/3), Nickel (2), Stäube	Yousef 1986 - zit. in STOTZ & KRAUTH 1987
	Blei (3), Zink (1-3), Asbest	Muschak 1989 - zit. in UNGER & PRINZ 1992
Reifenabrieb	Cadmium (3), Zink (1-3), Ruße, organische Substanzen Kautschuk, Schwefel (1-2)	STOTZ & KRAUTH 1987
	Blei (3), Chrom (3), Kupfer (2/3), Nickel (2)	Muschak 1989 - zit. in UNGER & PRINZ 1992
Straßenabrieb	Partikel, Silizium (0), Calcium (0), Magnesium (0), Asphalt, Bitumen (2-3)	STOTZ & KRAUTH 1987
	Blei (3), Chrom (3), Kupfer (2/3), Nickel (2), Zink (1-3)	Muschak 1989 - zit. in UNGER & PRINZ 1992
Abrieb von Fahrbahnmarkierungen	Titanoxid (TiO ₂)	GOLWER & SCHNEIDER 1983a
	Lösungsmittel, (CKW in Abbeizmitteln)	SCHALLES 1988
Tropfverluste (Treibstoffe, Schmierstoffe, Bremsflüssigkeit, Unterbodenschutz, Frostschutz)	Blei (3), Nickel (2), Zink (1-3), organische Stoffe, Öle, Fette, Mineralölkohlenwasserstoffe (2-3)	STOTZ & KRAUTH 1987
	Kupfer (2/3), Vanadium (2), Chrom (3)	Muschak 1989 - zit. in UNGER & PRINZ 1992
	Phenole (2), anionaktive Tenside (Reinigungsmittel)	GOLWER 1991
Korrosion, Verschleiß	Aluminium (1), Kupfer (2/3), Eisen (1), Kobalt (2), Mangan (1)	Yousef 1986 - zit. in STOTZ & KRAUTH 1987
	Cadmium (3), Zink (1-3), Kupfer (2/3)	Gäth et al. - zit. in UNGER & PRINZ 1992
Baustoffe	Mineralstoffe, Bindemittel (Bitumen, Kalk, Zement), alternative Baustoffe	GOLWER 1991

* Soweit bekannt, wird die Wassergefährdungsklasse (WGK) in Klammern angegeben.

Den Emittenten ständiger Einwirkungen können die in Tabelle 3-2 angegebenen wassergefährdende Stoffe zugeordnet werden.

Tabelle 3-2: Straßenspezifische wassergefährdende Stoffe nach Emissionsquellen

	Abgase	Bremsenabrieb	Reifenabrieb	Straßenabrieb	Abrieb von Fahrbahnmark.	Tropfverluste	Korrosion, Verschleiß	Emittent unklar
Aluminium							X	
Arsen								X
Asbest		X						
Blei	X	X	X			X		
Cadmium			X				X	
Calcium				X				
Chrom		X	X			X		
Eisen							X	
Kupfer		X	X			X	X	
Magnesium				X				
Mangan							X	
Nickel	X	X	X			X		
Schwefel			X					
Silizium				X				
Titanoxid					X			
Vanadium						X		
Zink		X	X			X	X	
Partikel, Ruß, Stäube	X	X	X	X				
anionaktive Tenside (Reinigungsmittel)						X		
aliphatische (Mineralöl-) Kohlenwasserstoffe	X					X		
aromatische Kohlenwasserstoffe	X			X		X		
Phenole	X					X		
polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und polychlorierte Dibenzofurane (PCDD/F)	X							
Stickstoffverbindungen	X							
Bitumen				X				
div. organische Substanzen (Öle, Fette)			X		X	X		
Kautschuk			X					

Schlipkötter et al. (1974 - zit. in REINIRKENS 1992) stellt eine Belastung durch insgesamt 164 schädliche anorganische und organische Abgaskomponenten fest. Nach GOLWER (1991) sind aus chemischer Sicht folgende Stoffe straßenspezifisch, d.h. den ständigen Einwirkungen zuzuordnen (Wassergefährdungsklasse WGK in Klammern):

- Anorganische Hauptbestandteile:
Calcium (0), Magnesium (0), Aluminium (1), Silicium (0), Eisen (1), Mangan (1), Chlorid (NaCl: 0), Hydrogencarbonat (0), Phosphat (1), Stickstoffverbindungen (1)
- Anorganische Spurenstoffe:
Arsen (3), Blei (2/3), Bor (1), Cadmium (3), Chrom (3), Kupfer (2/3), Nickel (2), Titan (-), Vanadium (2), Zink (1-3)
- Organische Substanzen:
Mit Petrolether bzw. Tetrachlorkohlenstoff extrahierbare Stoffe (2-3), einige flüchtige aliphatische und aromatische Kohlenwasserstoffe (Mineralölkohlenwasserstoffe) (2-3), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK) (2-3), Phenole (2), anionaktive Tenside, polychlorierte Dibenzodioxine (PCDD) (3), und polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) (3), polychlorierte Biphenyle (PCB) (3).

Tabelle 3-3: Stoffliche Beschreibung der Quellen ständiger Einwirkungen - aus UNGER & PRINZ (1992)

Bestandteile	organ. Stoffe	BSB ₅	CSB	Fette u. Öle	Petroleum	Blei	Zink	Chrom	Kupfer	Nickel
Stoff	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	mg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g	µg/g
Benzin	999,5	154	682,1	1,3	1,3	663*	10	15	4	10
Diesel	999,6	80,2	399	385,3	307,8	12	12	15	8	8
Motorenöl	996,9	143,8	220,8	989,2	937,7	9	1060	0	3	17
Getriebeöl	999,8	102,6	198,3	985,6	941,7	8	244	0	0	21
Frostschutzmittel	987,8	37,6	1102,4	143,8	69,6	6	14	0	76	16
Bremsflüssigkeit	999,8	23,8	2420,8	883	33,1	7	15	19	5	31
Unterbodenschutz	998,7	89,8	309,5	958,1	182,8	116	108	0	0	470
Schmierfett	973,9	143,3	-	753,1	665,8	0	164	0	0	0
Gummi	986,3	26,8	2097,4	191,6	97,8	1110	617	182	247	174
Bremsbeläge	285,3	16,9	416,5	30,5	8,3	1050	124	2200	30600	7454
Asphalt	64,2	1,2	85,5	21,4	15	102	164	357	51	1170
Beton	70,7	1,4	63,6	2,7	1,3	450	417	93	99	304

* Im Jahr 1993 betrug der Marktanteil verbleitete Benzins nur noch 1,1 % gegenüber 99 % im Jahr 1985 (DIW, 1994), so daß sich die diesbezüglichen Bleiemissionen entsprechend verringern (Anm. d. Verf.).

Für eine differenziertere stoffliche Untersuchung der Quellen ständiger Einwirkungen geben UNGER & PRINZ (1992) die Gehalte organischer und anorganischer Stoffe sowie die

Parameter biologischer Sauerstoffbedarf (BSB₅) und chemischer Sauerstoffbedarf (CSB) an (s. Tab. 3-3).

Bei der Auswertung von älteren Untersuchungen ist zu beachten, daß die Emissionen bestimmter Stoffe durch die Modifikation von Umweltgesetzen bzw. durch technische Fortschritte, wie z.B. den Abgaskatalysator in Verbindung mit unverbleitem Benzin, teilweise erheblich abgenommen haben: So hat sich der Marktanteil verbleiten Benzins von 1985 bis 1993 drastisch verringert, wie in Abb. 3-2 ersichtlich. Dementsprechend nimmt auch die Bedeutung des Bleis als verkehrsspezifischer Stoff ab. Da Neuwagen mit Ottomotor inzwischen ausschließlich mit unverbleitem Benzin betrieben werden, dürfte sich diese Entwicklung weiter fortsetzen.

Nach UNGER & PRINZ (1992) führen Ottomotoren mit geregelten Katalysatoren gegenüber Ottomotoren mit verbleitem Benzin zu einer Verringerung der Emissionen polychlorierter Dibenzo-p-Dioxine und polychlorierter Dibenzofurane (PCDD/F) um ca. 98 %.

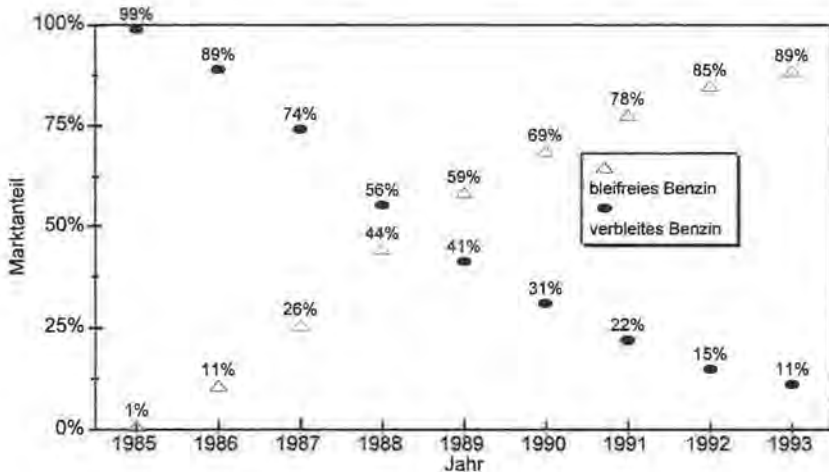


Abb. 3-2: Marktanteile verbleiten und unverbleiten Benzins von 1985 bis 1993 - Daten aus DIW (1994)

Die Verwendung alternativer Baustoffe sowie Raststätten und Parkplätze sind "Sonderfälle" ständiger Einwirkungen (siehe Tabelle 3-4).

Tabelle 3-4: "Sonderfälle" ständiger Einwirkungen

Herkunft	Emittierte Stoffe	Literaturquelle
Hochofenschlacke (alternativer Baustoff)	Salze (z.B. Sulfat, Chlorid)	KRASS 1985
Nebengestein der Steinkohle (alternativer Baustoff)	Salze (z.B. Sulfat, Chlorid)	KRASS 1985, FGSV 1984
Alternative Baustoffe: Steinkohlenflugasche	Salze (z.B. Sulfat, Chlorid), Schwermetalle (z.B. As, Cd, Cr, Pb)	KRASS 1985, TL SFA-StB 93 1993
Müllverbrennungssasche (alternativer Baustoff)	Salze (z.B. Sulfat, Chlorid), Schwermetalle (z.B. As, Cd, Cr, Pb), ggf. org. Verbindungen (z.B. Dioxin)	KRASS 1985, FGSV 1986
Pechhaltiger Straßenaufbruch (alternativer Baustoff)	PAK und Phenole	FGSV 1993b, 1994
Raststätten und Parkplätze	Fäkalien, nicht ordnungsgemäß entsorgte Abfälle	LANGE et al. 1993

Die Umweltverträglichkeit alternativer Baustoffe sollte gemäß den Richtlinien und Merkblättern der Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV) nachgewiesen werden.

Raststätten und Parkplätze werden als Sonderbauwerke verstanden, die den Belangen des Grundwasserschutzes - vor allem im Hinblick auf Abwasser- und Abfallbeseitigung - anzupassen sind.

3.1.2.3 Quellen vorübergehender Einwirkungen

Von den in Tabelle 3-5 genannten vorübergehenden Einwirkungen können nach derzeitigem Kenntnisstand lediglich die Stoffe aus der Tausalzstreuung im Rahmen von Messungen identifiziert und quantifiziert werden. Die nicht direkt als vorübergehende Einwirkungen identifizierbaren Stoffe, wie beispielsweise die bei der Aufbringung von Fahrbahnmarkierungen emittierten Stoffe, werden den ständigen Einwirkungen zugeordnet, da sie bei Fahrbahnabfluß-, Boden-, Sickerwasser- und Grundwasseruntersuchungen miterfaßt werden.

Tabelle 3-5: Herkunft und Art straßenspezifischer Schadstoffe aus vorübergehenden Einwirkungen

Herkunft	Emittierte Stoffe*	Literaturquelle
Tausalzstreuung	NaCl (0), CaCl (0)	BROD 1993
	Kalzium (0), Kalium (0), Magnesium (1), Sulfat	SCHORB 1988
Straßenunterhaltung	Markierungsfarbe (Titan), Reinigungsmittel, Pflanzenbehandlungsmittel, Schädlingsbekämpfungsmittel	GOLWER 1991
Baumaßnahmen	Abwasser- und Abfallbeseitigung (Fäkalien, Waschmittel, sonstige Abfälle), Lagerung und Verwendung wassergefährdender Stoffe (Heizstoffe, Kraftstoffe, Chemikalien, Baustoffe)	RiStWag 1982

* Soweit bekannt, wird die Wassergefährdungsklasse (WGK) in Klammern angegeben.

Die Durchführung von Baumaßnahmen ist im Hinblick auf eine Gefährdung des Grundwassers als besonderer nicht straßentypischer Lastfall anzusehen. Um hierbei Gefährdungen des Grundwassers zu vermeiden, sollte der Abschnitt 7 der RiStWag (1982) beachtet werden.

3.1.2.4 Quellen außergewöhnlicher Einwirkungen

Bei den als außergewöhnliche Einwirkungen definierten Emissionen wassergefährdender Stoffe durch Unfälle kann prinzipiell das gesamte Spektrum der auf Straßen transportierten wassergefährdenden Stoffe emittiert werden.

Tabelle 3-6: Auf der Grundlage des Gesetzes für Umweltstatistiken (UStatG - zit. in STATISTISCHES BUNDESAMT 1994) erfaßte Stoffarten

Stoffart bzw. Stoffgruppe	Wassergefährdungsklasse (WGK)
anorganischer Stoff	nicht bestimmbar
leichtes Heizöl und Dieselmotorenkraftstoff	WGK 2 "wassergefährdend"
Ottomotorenkraftstoff (Benzin)	WGK 2 "wassergefährdend"
schweres Heizöl	WGK 1 "schwach wassergefährdend"
Altöl	WGK 3 "stark wassergefährdend"
Rohöl	WGK 1 "schwach wassergefährdend" (zähflüssige, feste Rohöle), WGK 2 "wassergefährdend" (leichtflüssige Rohöle)
Flugmotorenkraftstoff (Düsentriebwerke)	WGK 2 "wassergefährdend"
andere Mineralölprodukte	nicht bestimmbar / WGK 1, 2 "schwach wassergefährdend", "wassergefährdend"*
sonstige organische Stoffe	nicht bestimmbar

* in Anlehnung an die genannten Mineralölprodukte

Für die Risikoanalysen im Rahmen dieser Arbeit werden die auf der Grundlage des Gesetzes für Umweltstatistiken (UStatG) (zit. in STATISTISCHES BUNDESAMT 1994) erfaßten Stoffarten bzw. -gruppen verwendet (s. Tab. 3-6).

3.1.3 Möglichkeiten zur Untersuchung straßenspezifischer Emissionen wassergefährdender Stoffe

Zur quantitativen Untersuchung straßenspezifischer Emissionen wassergefährdender Stoffe (Einwirkungen) kommen verschiedene Methoden in Betracht, die im folgenden im Hinblick auf die Aufgabenstellung erläutert werden.

a) **Direkte Emissionsmessungen an einzelnen Kraftfahrzeugen (Kfz)**

Es können in erster Linie die Abgasinhaltsstoffe erfaßt werden.

b) **Bilanzierung von Verbrauchsstoffen**

Es können prinzipiell alle Verbrauchsstoffe erfaßt werden, für die die zeitliche Verbrauchsmenge und die stoffliche Zusammensetzung bekannt ist. Jedoch ergeben sich durch die Art des Verbrauchs (Verbrennung, Abrieb, Korrosion) Veränderungen der einzelnen Stoffe, so daß Rückschlüsse auf die resultierenden Stoffimmissionen nur für die Stoffe möglich sein dürften, für die eine möglichst geringfügige Stoffumsetzung angenommen werden kann, wie z.B. Reifenabrieb oder Straßenabrieb.

Diesbezügliche Untersuchungen: Brunner (1978), Lygren et al. (1984), Malmqvist (1983), Yousef et al. (1985) - zit. in: STOTZ & KRAUTH (1987); SIEKER & GROTTKER (1988)

c) **Messung der in der Luft enthaltenen straßenspezifischen Stoffe**

Es werden die meßtechnisch erfaßbaren, als Gase oder kleine Partikel in der Luft verlagerten Stoffe (v.a. Abgasinhaltsstoffe) ermittelt. Größere Partikel, die je nach Windstärke rasch sedimentieren, werden nicht erfaßt.

Diesbezügliche Untersuchungen: ESSER (1980, 1981), Kwapulinski (1986 zit. in STOTZ & KRAUTH 1987), SIEKER & GROTTKER (1988)

d) **Messung der Gehalte wassergefährdender Stoffe im Fahrbahnabfluß bei Niederschlägen**

Es werden die an der Oberfläche abgelagerten und vom Niederschlagswasser transportierten Stoffe erfaßt. Kleinere Partikel, die über größere Entfernungen vom Wind verlagert

werden, können nicht oder nur teilweise erfaßt werden. Bei kontinuierlicher, paralleler Messung von Stoffkonzentrationen und Abflußmengen können Stofffrachten ermittelt werden.

Diesbezügliche Untersuchungen: KRAUTH & KLEIN (1982), STOTZ & KRAUTH (1987), GOLWER & SCHNEIDER (1983 a,b), GOLWER (1991), SCHORB (1988), SIEKER & GROTTKER (1988)

e) Messung der Gehalte wassergefährdender Stoffe in straßennahen Böden

Es werden die in straßennahen Böden enthaltenen wassergefährdenden Stoffe ermittelt.

Diesbezügliche Untersuchungen: UNGER & PRINZ (1992)

f) Messung der Gehalte wassergefährdender Stoffe im Straßenbegleitgrün

Es werden die im Straßenrandbereich auf Pflanzen abgelagerten und von Pflanzen aufgenommenen straßenspezifischen Stoffe erfaßt.

Diesbezügliche Untersuchungen: UNGER & PRINZ (1992), KRIEGER (1996)

g) Erhebung und Auswertung von Daten zu Unfällen beim Transport wassergefährdender Stoffe

Datenerhebung am Unfallort und nachträgliche/ergänzende Befragung der Unfallbeteiligten sowie der für die Sofort- und Folgemaßnahmen Zuständigen (Behörden, Firmen, etc.). Der Erfassungsumfang setzt sich aus der Anzahl und der Qualität der Einzelinformationen, und der Vollständigkeit der Daten für das Bezugsgebiet und den Bezugszeitraum zusammen.

Diesbezügliche Untersuchungen: STATISTISCHES BUNDESAMT (1986-1995), BRESSIN (1985), PÖPPEL & KÜHNEN (1993), Statistische Landesämter

Stoffe, die biologischen und chemischen Abbau- und Umwandlungsprozessen unterliegen (z.B. Mineralölprodukte), können prinzipiell nur unter Berücksichtigung dieser Prozesse quantifiziert werden.

Hintergrundgehalte aus Emissionen der Industrie und der privaten Haushalte können durch parallel durchzuführende Messungen in größerem Abstand vom Fahrbahnrand (> 100 m) berücksichtigt werden.

Zur quantitativen Untersuchung der Emissionen aus ständigen und vorübergehenden Einwirkungen eignen sich die Messungen der Gehalte wassergefährdender Stoffe in der Luft (c) und

im Fahrbahnabfluß (d). Zur quantitativen Untersuchung der Emissionen aus außergewöhnlichen Einwirkungen eignet sich die Erhebung und Auswertung von Daten zu Unfällen beim Transport wassergefährdender Stoffe.

Für weiterführende Fragestellungen, wie der Verlauf der oberirdischen Verlagerung der Stoffe mit zunehmendem Abstand vom Fahrbahnrand oder die Betrachtung einzelner Emissionsquellen, eignen sich die Untersuchungsmethoden e) und f).

Zur Untersuchung der Verlagerung straßenspezifischer Stoffe im Untergrund eignen sich Analysen von im Einflußbereich von Straßen gewonnenen Boden-, Sickerwasser- und Grundwasserproben. Für spezielle Fragestellungen, wie den zeitlichen Verlauf einer Infiltration von Mineralölprodukten (außergewöhnliche Einwirkungen) in die ungesättigte Bodenzone, eignen sich zudem Laboruntersuchungen.

Die an der oberirdischen Verlagerung und der Verlagerung im Untergrund beteiligten Prozesse werden in Abschn. 3.2 erläutert und in Abschn. 4 auf ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen übertragen.

3.2 Verlagerung straßenspezifischer wassergefährdender Stoffe

3.2.1 Oberirdische Verlagerung

Die oberirdische Verlagerung straßenspezifischer Stoffe hängt von der Beschaffenheit der Stoffe (Feststoffpartikel, Flüssigkeit), den Witterungsverhältnissen (Niederschlag, Wind), der Straßenentwässerung und der Topographie der Straße (Damm, Gleichlage, Einschnitt) ab. Wegen des dominierenden Witterungseinflusses werden die oberirdischen Verlagerungspfade, wie in Abb. 3-3 ersichtlich, entsprechend den Witterungsbedingungen "Wind", "Wind und Niederschlag", "Niederschlag" und "kein Witterungseinfluß" unterteilt.

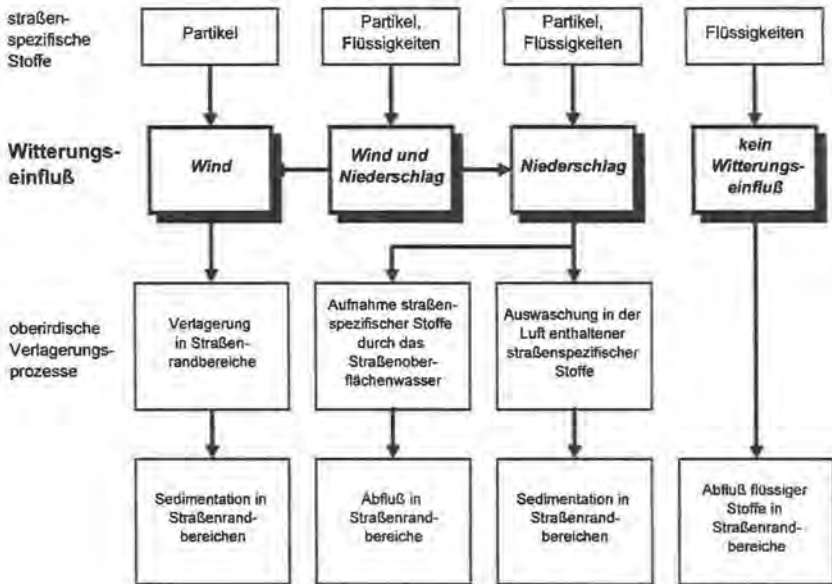


Abb. 3-3: Oberirdische Verlagerungspfade straßenspezifischer Stoffe

3.2.2 Verlagerung im Untergrund

3.2.2.1 Überblick

GOLWER (1991) hat die Intensität der physikalischen, chemischen und biologischen Vorgänge für die belebte Bodenzone, die Grundwasserüberdeckung (ungesättigte Zone) und den Grundwasserleiter (gesättigte Zone) qualitativ dargestellt (s. Abb. 3-4).

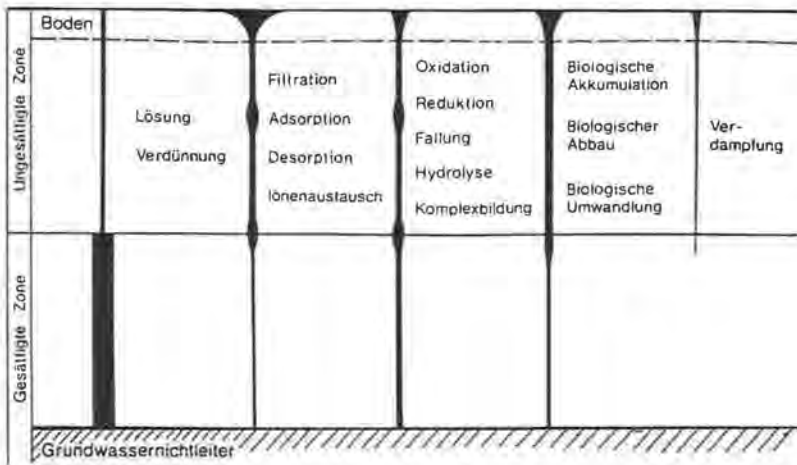


Abb. 3-4: Intensität physikalischer, chemischer und biologischer Vorgänge in der belebten Bodenzone, der Grundwasserüberdeckung (ungesättigte Zone) und dem Grundwasserleiter (gesättigte Zone); qualitative Darstellung aus GOLWER (1991)

Im folgenden werden die physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse erläutert, die die Verlagerung, die Retention und den Abbau von wassergefährdenden Stoffen im Untergrund bewirken und daher *hydrogeologische Widerstände* gegenüber ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Einwirkungen sind.

3.2.2.2 Physikalische, chemische und biologische Verlagerungsprozesse im Untergrund

• Konvektion

In Böden, d.h. in porösen Medien, ist Konvektion die Strömung der Porenflüssigkeit und deren Inhaltsstoffe durch die Porenkanäle der Bodenmatrix unter dem Einfluß eines hydraulischen Potentials. Da die tatsächliche Strömung um das Einzelkorn bzw. im Porenkanal nicht exakt ermittelt werden kann, wird das Gesetz von Darcy als Berechnungsgrundlage verwendet, das die mittlere Strömungsgeschwindigkeit entlang der betrachteten Hauptströmungsrichtung zugrundelegt:

$$v = k \cdot i \quad (\text{Gl. 3-1})$$

mit

v	Strömungsgeschwindigkeit in m/s
k	Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens in m/s
i	hydraulisches Gefälle $\delta h / \delta l$ in m/m

Aufgrund des in Deutschland vorherrschenden humiden Klimas versickern regelmäßig große Mengen Niederschlagswasser im Boden, wodurch alle Arten wassergefährdender Stoffe aus ständigen und vorübergehenden Einwirkungen verlagert werden können. Die bei Unfällen emittierten wassergefährdenden Flüssigkeiten werden ebenfalls konvektiv verlagert. Folglich ist die Konvektion für alle straßenspezifischen wassergefährdenden Stoffe der maßgebende Verlagerungsprozeß.

• Filtration

Partikelförmige Stoffe können während der Durchströmung des Bodens durch mechanische Filtration zurückgehalten werden. Die Intensität der Filtration wird einerseits durch die Partikelgröße des Stoffes und andererseits durch den Porenanteil und die Porenraumstruktur des betrachteten Bodens bestimmt.

Da partikelförmige Stoffe aus ständigen Einwirkungen bereits in der belebten Bodenzone in erheblichem Umfang durch Filtration zurückgehalten werden können, hat dieser Verlagerungsprozeß eine große Bedeutung als Schutzwirkung.

• Diffusion

Nach KOHLRAUSCH (1968) ist die Diffusion ein Prozeß, der zum Konzentrationsausgleich innerhalb einer einzelnen Phase führt. Die treibende Kraft für die Diffusion ist der Konzentrationsgradient dc/dx (Gradient der Stoffmengenkonzentration oder Molarität c), sofern man die Diffusion nur in der x -Richtung betrachtet. Nach KUCHLING (1988) ist die Diffusion stark temperaturabhängig.

Im Boden bewirkt die Diffusion einen Massentransport durch das Porenwasser, der vom hydraulischen Gefälle und der Wasserbewegung unabhängig ist. Infolge der Brown'schen Molekularbewegung gelangen dabei wassergelöste Stoffe von Orten höherer Konzentration zu solchen niedrigerer Konzentration (SCHNEIDER & GÖTTNER 1991).

Mit dem 1. Fick'schen Gesetz (ONNICH et al. 1991; SCHNEIDER 1991; SCHNEIDER & GÖTTNER 1991; FINSTERWALDER 1992; JESSBERGER et al. 1993; DEMMERT 1993) errechnet sich der diffusive Massenfluß q_{dir} in freier Lösung unter stationären Bedingungen folgendermaßen:

$$q_{\text{dir}} = -d_0 \cdot A \cdot dc/dx \quad (\text{Gl. 3-2})$$

mit
 d_0 Diffusionskoeffizient in m^2/s

Der Diffusionskoeffizient d_0 ist abhängig von der Temperatur, dem Druck und unter Umständen auch von der Stoffkonzentration und vom Konzentrationsgefälle. Nur in isotropen Medien, wie Gasen und Flüssigkeiten, kann die Diffusion mit einem einzigen Parameter d_0 beschrieben werden (KOHLRAUSCH 1968). Durch die Porenraumstruktur des Bodens wird die Diffusion im Porenwasser im Vergleich zur Diffusion in freier Lösung behindert.

Die von Strömungsvorgängen unabhängige Verlagerung von Sickerwasserinhaltsstoffen infolge Diffusion bedingt einen Konzentrationsgradienten. Die Stoffe aus ständigen Einwirkungen liegen bereits im Fahrbahnabfluß nur in verhältnismäßig geringen Konzentrationen vor (vgl. Abschnitt 4.1.1.3) und werden durch versickerndes Niederschlagswasser zusätzlich verdünnt, so daß auch die Konzentrationsgradienten gering sind. Daher kann die diffusive Verlagerung von wassergefährdenden Stoffen aus ständigen Einwirkungen vernachlässigt werden. Die Emission konzentrierter Schadstoffe durch Unfälle (außergewöhnliche Einwirkungen) führt zu erheblichen Konzentrationsgradienten. Im Rahmen von Sanierungsmaßnahmen ist jedoch das verunreinigte Bodenvolumen kurzfristig zu entfernen oder zu reinigen, so daß auch längerfristige Diffusionsprozesse unterbunden werden.

• Dispersion

Unter Dispersion versteht man die räumliche Verteilung bzw. Vermischung von gelösten Wasserinhaltsstoffen im bewegten Porenwasser aufgrund unterschiedlicher Fließgeschwindigkeiten einzelner Wasservolumina. Dispersionsprozesse liefern zusätzlich zur Konvektion einen weiteren strömungsabhängigen Beitrag zum Massenfluß. Es kann zwischen einer korngerüstbedingten Mikrodispersion, die bei ungeklüfteten Böden in Größenordnungen von wenigen cm liegt, und einer Makrodispersion aufgrund bereichsweise unterschiedlicher

Durchlässigkeit innerhalb eines Bodens unterschieden werden (SCHNEIDER & GÖTTNER 1991). Nach BEAR & VERRUIJT (1987) besteht die Dispersion im strömenden Grundwasser aus einer longitudinalen Komponente in Strömungsrichtung und einer transversalen Komponente senkrecht zur Strömungsrichtung. Die prinzipielle Wirkungsweise ist in Abb. 3-5 am Beispiel einer punktförmigen Tracereingabe in gleichmäßig strömendes Grundwasser qualitativ dargestellt.

Wie in Abb. 3-5 ersichtlich, führt die Dispersion im Verlauf der Strömung (Konvektion) zu einer Abnahme der Konzentration des gelösten Stoffes. Wie in theoretischen und experimentellen Arbeiten festgestellt (Scheidegger 1961; De Josselin & De Jong 1958; Harleman & Rumer 1963; zit. in SCHNEIDER & GÖTTNER 1991), kann der dispersive Massenfluß nach BEAR & VERRUIJT (1987) formal wie das Fick'sche Diffusionsgesetz dargestellt werden.

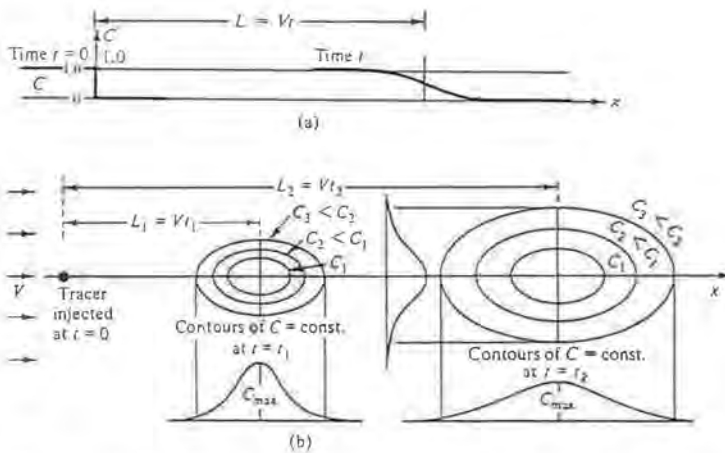


Abb. 3-5: Qualitative Darstellung zur longitudinalen und transversalen Dispersion im strömenden Grundwasser am Beispiel schlagartiger punktförmiger Tracereingabe, aus: BEAR & VERRUIJT (1987), S. 156

Die Gleichung für den dispersiven Massenfluß lautet (SCHNEIDER & GÖTTNER 1991):

$$\dot{f}_{Dib} = - \Theta \cdot D_d \cdot i_c \quad (\text{Gl. 3-3})$$

mit

$\dot{f}_{Dib}$	Diffusiver Massenfluß [kg/m²s]
Θ	$\Theta_m + \Theta_{im}$ = volumetrischer Gehalt des gesamten Porenwassers [m³/m³]
D_d	Dispersionskoeffizient [m²/s]
i_c	Konzentrationsgradient senkrecht zur gedachten Einheitsgrenzfläche [kg/m³·m]

Der räumliche Dispersionskoeffizient D ist nach BEAR & VERRUIJT (1987) annähernd linear von der mittleren Porenwassergeschwindigkeit abhängig. Er bestehend aus einer longitudinalen Komponente in Strömungsrichtung (1 Raumachse) und zwei transversalen Komponenten senkrecht zur Strömungsrichtung (2 Raumachsen):

$$[D_{ij}] = \begin{bmatrix} \alpha_L \vec{v} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_T \vec{v} & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_T \vec{v} \end{bmatrix} \quad (\text{Gl.3-4})$$

mit

D_y	räumlicher Dispersionskoeffizient
α_y	Dispersivität
v	Strömungsgeschwindigkeit

Im Verlauf der Durchströmung (Konvektion) der Grundwasserüberdeckung bewirkt die hydrodynamische Dispersion eine Verteilung und Vermischung der Sickerwasserinhaltsstoffe, so daß sich die Stoffkonzentrationen im Rahmen dieses "Verdünnungsprozesses" verringern. Im Hinblick auf Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe (außergewöhnliche Einwirkung) liegt ein Zielkonflikt zwischen der schützend wirkenden Verdünnung und der horizontalen Verlagerung straßenspezifischer Stoffe im strömenden Grundwasser vor. Wegen der möglichen weitreichenden Verlagerung größerer Mengen wassergefährdender Stoffe wirkt die hydrodynamische Dispersion bei Unfällen nicht als Schutzwirkung sondern gefährdend.

• Sorption

Unter Sorption versteht man die Aufnahme von Komponenten einer gasförmigen oder flüssigen Phase an der Oberfläche einer damit in Kontakt stehenden festen oder kondensierten Phase (Phasengrenzfläche). Es muß zwischen der reversiblen Physisorption und der nur teilweise reversiblen Chemisorption unterschieden werden. Bei der Physisorption sind nur Dispersionskräfte (ähnlich den Van-der-Waals-Kräften) wirksam. Die adsorbierten Moleküle bleiben als solche erhalten. Bei einer Chemisorption gleicht die Bindung eher einer chemischen Bindung,

so daß es sich um teilweise umkehrbare Grenzflächenreaktionen handelt (es kann zum Zerfall der adsorbierten Moleküle kommen). Das Ausmaß der Sorption hängt vor allem von den Faktoren Druck, Temperatur, Oberflächenbeschaffenheit des Adsorbats sowie der chemischen Struktur des adsorbierten Stoffes ab (Wirtz - zit. in DREYHAUPT 1994).

Nach DEMMERT (1993) ist bei Tonmineralen die Sorption in Form der Kationenadsorption dominierend. Zwischen den negativ geladenen Oberflächen der tonmineralischen Schichten befinden sich als Ladungsausgleich Kationen; bei Montmorillonit zumeist Natrium- oder Calciumionen. Bei Sorptionsvorgängen in Böden handelt es sich somit um eine reversible Stoffretention infolge Adsorption.

Durch Sorptionsvorgänge werden vor allem anorganische strassenspezifische Stoffe, wie Blei, Cadmium, Kupfer, Nickel und Zink, im Boden zurückgehalten, so daß Sorptionsvorgänge schützend wirken. Das Sorptionspotential eines Bodens hängt von dessen Ionenbelegung und dessen Sorptionsfläche je Volumeneinheit ab, weswegen feinkörnige Böden mit großen Tonmineralanteilen das größte Sorptionsvermögen aufweisen.

• **Abbau und Umwandlung**

Abbau- und Umwandlungsvorgänge können zu einer Verringerung der Stoffmenge bzw. durch unproblematischere Umwandlungsprodukte zu einer Verringerung des Gefährdungspotentials führen. Nach SCHNEIDER & GÖTTNER (1991) sind diese mikrobiellen und chemischen Prozesse sehr komplex, so daß deren funktionale Abhängigkeit bis heute nur unzureichend beschrieben werden kann. Daher ist eine Quantifizierung allenfalls näherungsweise für bestimmte Stoffe und Milieubedingungen möglich.

Sofern geeignete Milieubedingungen im Untergrund vorliegen, bewirken Abbau- und Umwandlungsprozesse eine Reinigung des schadstoffbelasteten Sickerwassers, deren Ausmaß von der Verweildauer der Schadstoffe in diesen Bodenschichten abhängt. Für die Aufgabenstellung dieser Arbeit ist vor allem der mikrobielle Abbau von Mineralölprodukten, die aus Tropfverlusten stammen, von Bedeutung. Wegen der nur begrenzt und langsam fortschreitenden Reinigung können Abbau und Umwandlung nur bei geringen Schadstoffmengen berücksichtigt werden.

Ergänzend sei auf mögliche Beeinträchtigungen des Bodens hingewiesen, die nicht unmittelbar Gegenstand der Aufgabenstellung sind: Die Retention von Schadstoffen (v.a. Schwermetalle) durch Filtration und Sorption in den oberen Bodenschichten führt zu ansteigenden Konzentrationen dieser Stoffe, so daß die Gefahr einer Verlagerung dieser Stoffe auf dem Pfad *Boden-Pflanze-(Tier)-Nahrung bis zum Menschen* in Betracht gezogen werden muß. In Abhängigkeit von der jeweiligen Verlagerungsintensität dieser Schadstoffe sollte die landwirtschaftliche Nutzung der Straßenrandbereiche eingeschränkt werden. UNGER & PRINZ (1992) empfehlen beispielsweise, beim Anbau von Nahrungs- und Futtermitteln einen noch zu bestimmenden Sicherheitsabstand von mindestens 10 m zu Straßen einzuhalten, was bei den durchgeführten Untersuchungen teilweise nicht gegeben war, wie beispielsweise an der BAB A 8 bei Stuttgart.

4 Risikobetrachtungen

4.1 Risikobetrachtungen zu ständigen Einwirkungen

4.1.1 Charakterisierung ständiger Einwirkungen

4.1.1.1 Beschaffenheit straßenspezifischer Stoffe aus ständigen Einwirkungen

Auf die Beschaffenheit der straßenspezifischen Stoffe im Fahrabfluß kann anhand vergleichender Untersuchungen unfiltrierter und filtrierter Proben geschlossen werden:

Tabelle 4-1: Vergleichende Untersuchungen filtrierter und unfiltrierter Proben von Fahrabflüssen

Untersuchung	A 3, Frankfurt/Main (GOLWER & SCHNEIDER 1983)*		Motorway M 6, Cumbria GB (Harrison & Wilson 1985, in REINIRKENS 1992)	
	< 0,8 µm	> 0,8 µm	< 0,45 µm	> 0,45 µm
Blei	15 %	85 %	6 %	94 %
Cadmium	39 %	61 %	59 %	41 %
Eisen	-	-	3 %	97 %
Kupfer	27 %	73 %	32 %	68 %
Nickel	35 %	65 %	-	-
Zink	35 %	65 %	-	-
Petroletherextrakt	5 %	95 %	-	-

* Mittelwert dreier Proben vom 14.12.78, 20.09.79 und 06.11.79

Wie in Tab. 4-1 ersichtlich, liegen Blei, Eisen, Kupfer, Nickel, Zink und die mit Petrolether extrahierbaren Stoffe (nach GOLWER 1991 v.a. Öle und Fette aus Motorenöl, Getriebeöl, Unterbodenschutz, Bremsflüssigkeit und Schmierfette) im Fahrabfluß überwiegend in filtrierbarer Form als Feststoffpartikel oder an Feststoffpartikel gebunden vor. Cadmium lag in erheblichen Mengen auch in Partikelgrößen unter 0,8 bzw. 0,45 µm vor.

4.1.1.2 Einfluß anderer nicht straßenspezifischer Emissionen (Hintergrundbelastungen)

Anhand der von KRAUTH & KLEIN (1982) an der A 81 (DTV = 40857) und der A 6 (DTV = 47253) parallel zu den Stoffen im Fahrbahnabfluß gemessenen Stofffrachten in Regen und Staub in größerer Entfernung vom Fahrbahnrand kann der Einfluß der Hintergrundbelastungen aus anderen nicht straßenspezifischen anthropogenen Stoffquellen im Fahrbahnabfluß abgeschätzt werden. Unter Berücksichtigung der Hauptwindrichtung ist an der A 81 bei etwa 500 m Abstand zwischen der Meßstation für Regen und Staub und dem Fahrbahnrand von einer geringfügigen Beeinflussung durch straßenspezifische Stoffe auszugehen, so daß auch die Hintergrundbelastung geringfügig überschätzt wird. An der A 6 wurde die Meßstation für Regen und Staub durch (nicht näher bekannte) Emissionen des nahegelegenen Gewerbegebietes Obereisesheim beeinflusst, so daß hier erhöhte Hintergrundgehalte anzunehmen sind.

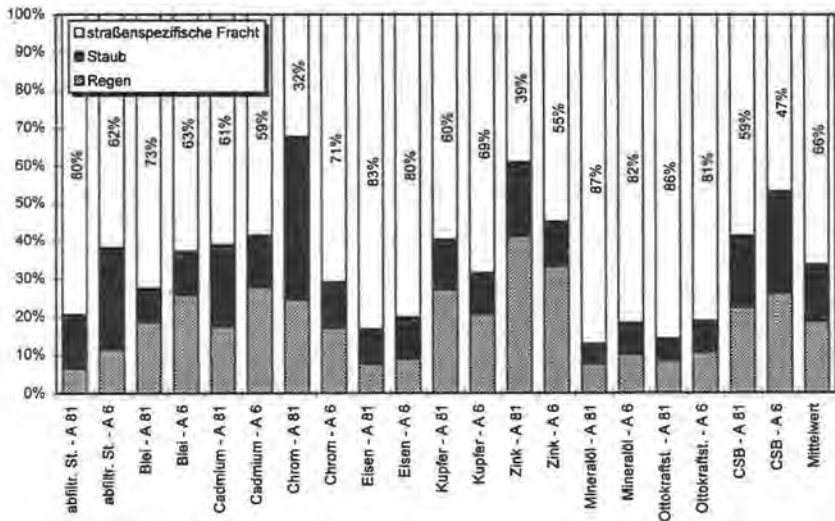


Abb. 4-1: Vergleich der von KRAUTH & KLEIN (1982) an der A81 und an der A6 gemessenen Stofffrachten im Fahrbahnabfluß und in Regen und Staub

In Abb. 4-1 ist der jeweilige prozentuale Anteil der Stofffrachten aus Regen und Staub an der gesamten Stofffracht im Fahrbahnabfluß der A 81 und der A 6 dargestellt. Bei beiden Untersuchungsstrecken ergibt sich ein überwiegender Anteil der straßenspezifischen Stoffe im Fahrbahnabfluß, der durch den Gesamt-Mittelwert von 66 % verdeutlicht wird. Die Hintergrundbelastung aus anderen anthropogenen Emittenten hatte in den Untersuchungsgebieten je nach Stoffart mit zwischen 13 % und 68 % und durchschnittlich 34 % Anteil an den Stoffgehalten im Fahrbahnabfluß.

GOLWER & SCHNEIDER (1983b) untersuchten das Grundwasser im Bereich eines Sickerbeckens, in das Straßenoberflächenwasser aus ca. 54000 m² befestigter Fläche der A 3 bei Frankfurt/Main eingeleitet wurde. Anhand der vom Sickerbecken unbeeinflussten Grundwasserproben (im Grundwasseroberstrom entnommen) wird der Anteil der Hintergrundbelastung abgeschätzt. Weiterhin werden die beeinflussten und unbeeinflussten Stoffgehalte für eine quantitative Bewertung mit den von SCHLEYER & KERNDORFF (1992) als geogene Obergrenze definierten Stoffgehalten verglichen:

Tabelle 4-2: Anteil der Hintergrundbelastung im unmittelbar durch ein Sickerbecken der A 3 belasteten Grundwasser (Mittelwerte aus 8-9 Einzelanalysen) und Über- bzw. Unterschreitung der von SCHLEYER & KERNDORFF (1992) als geogene Obergrenze definierten Stoffgehalte im Grundwasser westdeutscher Trinkwasserressourcen; Auswertung der Daten aus GOLWER & SCHNEIDER (1983b)

Parameter	Hintergrundbelastung (nicht straßenspezifisch)	Überschreitung der geogenen Stoffgehalte*	
		unbeeinflusstes GW (Hintergrundgehalte)	vom Sickerbecken beeinflusstes GW
CSB	13%	keine Überschreitung	+567%
BSB ₅	67%	-	-
Gesamt Eisen	61%	keine Überschreitung	keine Überschreitung
Blei	53%	keine Überschreitung	+70%
Cadmium	50%	+100%	+300%
Kupfer	37%	keine Überschreitung	+58%
Nickel	29%	keine Überschreitung	+155%
Zink	55%	keine Überschreitung	keine Überschreitung
Petrolether-Extrakt	47%	-	-
PAK	100%	-	-

* Von SCHLEYER & KERNDORFF als Obergrenze geogener Stoffgehalte des Grundwassers definierte 84,1%-Perzentilwerte von insgesamt 1717 Einzelanalysen westdeutscher als Trinkwasser genutzter Grundwässer in Lockersedimenten.

Mit 13-100 % (Mittelwert: 51 %) hat die Hintergrundbelastung einen erheblichen Anteil an den Stoffgehalten im Grundwasser. Dies wird in erster Linie auf den nahegelegenen Großflughafen Frankfurt/Main (ca. 3 km Entfernung) und weiterhin auf das umliegende Ballungszentrum Frankfurt am Main (Industrie, Gewerbe und private Haushalte) zurückgeführt. Abgesehen von Cadmium liegen die Stoffgehalte im vom Sickerbecken unbeeinflussten Grundwasser jedoch unter den als geogene Obergrenze definierten Stoffgehalten. Im unmittelbar und maximal vom Sickerbecken beeinflussten Grundwasser werden die als geogene Obergrenze definierten Stoffgehalte um bis zu 567 % überschritten.

Der Umfang von Hintergrundbelastungen aus anderen nicht straßenpezifischen anthropogenen Quellen dürfte im Einzelfall in Abhängigkeit von der Gewerbe- und Siedlungsstruktur der näheren Umgebung stark variieren und sollte für die Beurteilung der Straßeneinflüsse berücksichtigt werden.

4.1.1.3 Stoffe im Fahrbahnabfluß

Zur quantitativen Untersuchung der für das Grundwasser relevanten Immissionen wassergefährdender Stoffe eignen sich Untersuchungen des Fahrbahnabflusses von Außerortsstraßen (vgl. Methode d, Abschnitt 3.1.3), die bereits mehrfach durchgeführt wurden:

Tabelle 4-3: Ausgewertete Untersuchungen des Fahrbahnabflusses von Außerortsstraßen in Deutschland

Strecke	Untersuchungszeitraum	Verkehrsstärke			befestigte Fläche Untersuchungsstrecke [m ² /m]	Autoren
		Min.	MW	Max.		
A 81	02.1978 - 09.1978	23600	40857	55000	ca. 14,4	KRAUTH & KLEIN 1982
A 6	02.1979 - 07.1979	38940	47253	54791	ca. 18,5	
A 3	09.1975-10.1977 (anorg. St.)* 08.1978-08.1980 (org. St.)*	62785	66928	70000	ca. 18	GOLWER & SCHNEIDER 1983
B 45	11.1978 - 10.1981	-	16544	-	ca. 8,5	SCHORB 1988

* Keine kontinuierliche Probenahme des Fahrbahnabflusses

Wie in Tabelle 4-3 angegeben, lagen an den drei Bundesautobahnen A 81, A 6 und A 3 ähnliche Entwässerungsverhältnisse (befestigte Fläche : Untersuchungsstrecke) vor. An der B 45 mußte im Vergleich zu den Untersuchungen an Bundesautobahnen nur etwa 50 % befestigte

Fläche je Streckeneinheit entwässert werden, was bei der Beurteilung der Stoffgehalte im Fahrbahnabfluß zu berücksichtigen ist.

Bei den Untersuchungen von GOLWER & SCHNEIDER (1983) ist im Vergleich mit anderen Untersuchungen zu beachten, daß die Proben des Fahrbahnabflusses erst nach mehreren 100 m Fließweg durch geschlossene Rohrleitungen und teils nach Durchfließen einer mit Gras bewachsenen Seitenmulde gewonnen wurden. Da hierbei die Feststoffe im Fahrbahnabfluß zumindest teilweise zurückgehalten werden, können die Werte der Summenparameter "Sedimentfracht" und/oder "abfiltrierte Stoffe" nicht mit denen der anderen Untersuchungen verglichen werden.

Eine Abgrenzung gegenüber Hintergrundbelastungen im Fahrbahnabfluß ist nur bei den Untersuchungen von KRAUTH & KLEIN (1982) möglich, da diesbezügliche Vergleichsdaten von SCHORB (1988) nicht und von GOLWER & SCHNEIDER (1983a,b) nur im Grundwasser erhoben wurden.

In Abb. 4-2 sind die in den genannten Untersuchungen ermittelten Minimal- Mittel- und Maximalgehalte der straßenspezifischen anorganischen Stoffe im Fahrbahnabfluß vergleichend dargestellt. Die jeweilige Probenanzahl ist in eckigen Klammern angegeben.

Die als Mittelwert etwa um den Faktor 50 höheren Sedimentfrachten an der B 45 gegenüber den abfiltrierten (Schweb-) Stoffen an der A 81 und der A 6 dürften in erster Linie auf die unterschiedliche Art der Probennahme zurückzuführen sein: KRAUTH & KLEIN (1982) installierten ein automatisches Probennahmesystem, bei dem der in einem Straßenablaufschacht anfallende Fahrbahnabfluß von einer Pumpe über Edelstahlrohre mit 25 mm Durchmesser in Probegefäße gefördert wurde, so daß bereits sedimentierte Feststoffe nicht erfaßt wurden. SCHORB (1988) gewann seine Proben mittels eines Auffangbehälters direkt aus kurzen Betonrohren mit 68 m² (Rohr 18) und 76 m² (Rohr 19) befestigter Straßen-Einzugsfläche in ca. 1,35 m Entfernung zum Fahrbahnrand, so daß von einer nahezu vollständigen Erfassung der Sedimentfracht im Fahrbahnabfluß auszugehen ist.

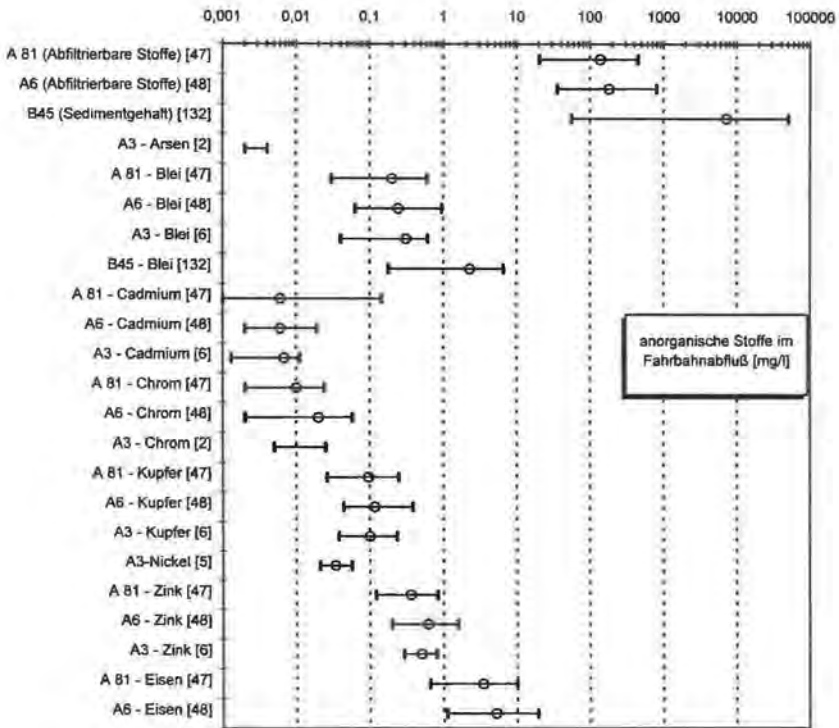


Abb. 4-2: Spannweite der Gehalte straßenspezifischer anorganischer Stoffe im Fahrabfluß Deutscher Außerortsstraßen - Auswertung der Daten aus: KRAUTH & KLEIN 1982 (A 81, A 6); GOLWER & SCHNEIDER 1983 (A 3); SCHORB 1988 (B45) - jeweilige Probenanzahl in eckigen Klammern

Die als Mittelwert an der B 45 etwa um den Faktor 10 gegenüber der A 81 und der A 6 und um den Faktor 25 gegenüber der A 3 höheren Bleifrachten dürften ebenfalls in erster Linie auf die oben erläuterte unterschiedliche Art der Probennahme zurückzuführen sein, da Blei überwiegend als Feststoff oder an Feststoffe sorbiert im Fahrabfluß vorliegt*. Neben der an der B 45 gegenüber den Bundesautobahnen erheblich geringeren Verkehrsstärke (25, 35 und 40 % der BAB-DTV) dürfte insbesondere ein Einfluß der andersartigen Fahrdynamik vorliegen: Das Untersuchungsgebiet an der B 45 lag zwischen zwei Knotenpunkten ca. 0,5 km vom

* GOLWER & SCHNEIDER 1983: ca. 85 %; KRAUTH & KLEIN 1982: ca. 95 % und Harrison & Wilson 1985, in REINIRKENS 1992: ca. 94 %.

Ort Bammental entfernt, so daß von häufigen Beschleunigungs- und Bremsvorgängen auszugehen ist.

Die nur an den Bundesautobahnen gemessenen Cadmium-, Chrom-, Kupfer-, Zink- und Eisengehalte liegen in ähnlichen Größenordnungen, so daß eine zutreffende Bestimmung dieser Stoffgehalte im Fahrabfluß gefolgert werden kann.

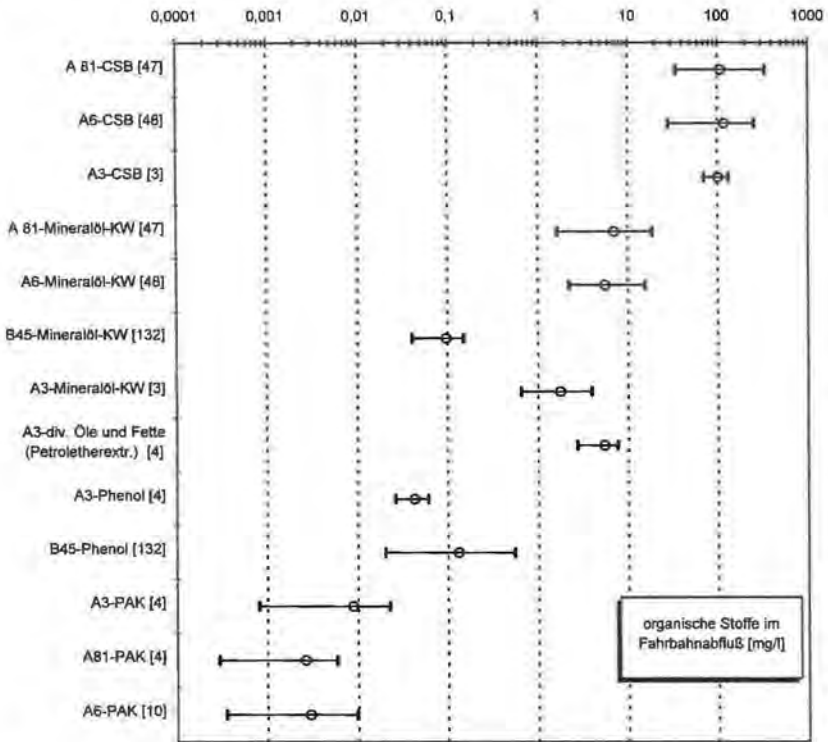


Abb. 4-3: Spannweite der Gehalte straßenspezifischer organischer Stoffe im Fahrabfluß Deutscher Außerortsstraßen - Daten aus: KRAUTH & KLEIN 1982 (A 81, A 6); GOLWER & SCHNEIDER 1983 (A 3); SCHORB 1988 (B45) - jeweilige Probenanzahl in eckigen Klammern

Bei den organischen Stoffen (s. Abb. 4-3) ist im Vergleich der Untersuchungen an Bundesautobahnen - abgesehen von den an der A 3 gegenüber A 81 und A 6 etwa um den Faktor 3 erhöhten Gehalte polyzyklischer aromatischer Kohlenwasserstoffe (PAK), die auf die

ungewöhnliche Hintergrundbelastung im Untersuchungsgebiet (Großflughafen Frankfurt/Main, s. Abschn. 4.1.1.2) zurückzuführen sind, eine gute Übereinstimmung festzustellen.

Auffallend sind die gegenüber den Bundesautobahnen A 81 und A 6 an der B 45 durchschnittlich um 55- und 70-fach geringer bestimmten mittleren Kohlenwasserstoffgehalte. Dies dürfte zumindest teilweise auf die um den Faktor 2,5 geringere Verkehrsstärke der B 45 und die Untersuchung filtrierter Wasserproben an der B 45 gegenüber der Untersuchung unfiltrierter Proben an den BAB A 81, A 6 und A 3 zurückzuführen sein.

Die an der A 3 von GOLWER & SCHNEIDER (1983b) weiterhin untersuchten monozyklischen aromatischen Kohlenwasserstoffe, wie Benzol, Toluol und Xylol, konnten in den vier untersuchten unfiltrierten Proben des Fahrbahnabflusses nicht oder nur in Spuren nachgewiesen werden, obwohl diese Stoffe in erheblichen Mengen in Kraftstoffen und auch in Abgasen enthalten sind: Gemäß UBA (1982, zit. in UNGER & PRINZ 1992) werden 2,35 g Benzol/kg Kraftstoff mit den Verbrennungsabgasen emittiert.

Tabelle 4-4: Stoffgehalte im Fahrbahnabfluß der A 81 und der A 6 (Daten aus KRAUTH & KLEIN 1982), der A 3 (Daten aus GOLWER & SCHNEIDER 1983) und der B 45 (Daten aus SCHORB 1988) in Relation zu den Grenz- und Richtwerten der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990)

Untersuchungsstrecke:	A 81 (Betonfahrbahn)	A 6 (bituminöse Fahrbahn)	A3	B 45
Untersuchungszeitraum:	02 bis einschl. 09/78	02 bis einschl. 07/79	09/75 bis 10/77	10/79 bis 11/81
Verkehrsstärke in Kfz/24h	40857	47253	66928	16544
Parameter:	Mittelwert in Relation zum TrinkwV- Grenz- oder Richtwert			
CSB	+2040%	+2270%	+1080%	n.b.
Ottokraftstoff	+68100%	+51600%	n.b.	n.b.
Mineralöl	+70100%	+55000%	n.b.	-90%
Cadmium	+20%	+20%	+20%	n.b.
Chrom	-80%	-60%	-70%	n.b.
Kupfer	-97%	-96%	-98%	n.b.
Eisen	+1610%	+2480%	n.b.	n.b.
Arsen	n.b.	n.b.	-70%	n.b.
Blei	+405%	+513%	+125%	+128%
Nickel	n.b.	n.b.	-46%	n.b.
Zink	-93%	-88%	-90%	n.b.

Zur quantitativen Bewertung wurden die Mittelwerte der Stoffgehalte im Fahrabfluß der A 81 und der A 6 (Daten aus KRAUTH & KLEIN 1982), der A 3 (Daten aus GOLWER & SCHNEIDER 1983) und der B 45 (Daten aus SCHORB 1988) mit den Grenz- und Richtwerten der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990) verglichen (s. Tab. 4-4). Bei Chrom, Kupfer, Nickel und Zink ist keine, bei Cadmium eine geringfügige und bei CSB und den Mineralölkohlenwasserstoffen eine erhebliche Überschreitung der Grenz- und Richtwerte der Trinkwasserverordnung festzustellen. Bei den ebenfalls starken Überschreitungen der Bleigehalte ist zu berücksichtigen, daß der Marktanteil verbleiten Benzins von 100% während der Untersuchungszeiträume auf ca. 11 % im Jahr 1993 (DIW 1994) mit weiterhin abnehmender Tendenz gesunken ist.

Tabelle 4-5: Auf die Strecke und die Verkehrsstärke bezogene Stofffrachten einzelner Niederschlagsereignisse im Fahrabfluß der A 81 und der A 6 (Auswertung von Daten aus KRAUTH & KLEIN 1982)

Stoffmenge DTV x Strecke	Mineralöl	CSB	abfiltr. Stoffe	Cadmium	Chrom	Kupfer	Eisen	Blei	Zink
	mg x 24 h kfz x km								
	A 81 - 47 Niederschlagsereignisse								
Maximal	24,48	363,15	783,08	0,0653	0,0458	0,3737	16,73	1,0849	1,616
Minimal	0,90	16,89	7,87	0,0004	0,0007	0,0102	0,22	0,0134	0,031
Mittelwert	5,14	78,37	100,14	0,0043	0,0070	0,0711	2,50	0,1475	0,261
Standardabw.	4,60	64,23	143,41	0,0095	0,0076	0,0655	2,82	0,181	0,269
straßenspezifisch	87%	59%	80%	61%	32%	60%	83%	73%	39%
straßensp. MW	4,47	46,24	80,11	0,003	0,002	0,043	2,07	0,108	0,1
A 6 - 48 Niederschlagsereignisse									
Maximal	8,43	266,29	486,27	0,0120	0,0645	0,2831	14,83	0,5121	2,071
Minimal	0,61	13,21	8,03	0,0004	0,0004	0,0103	0,29	0,0148	0,040
Mittelwert	2,38	51,19	77,99	0,0025	0,0088	0,0505	2,23	0,1056	0,268
Standardabw.	1,95	45,92	107,65	0,0029	0,0124	0,0549	2,79	0,125	0,350
straßenspezifisch	82%	47%	62%	59%	71%	69%	80%	63%	55%
straßensp. MW	1,95	24,06	48,35	0,002	0,006	0,035	1,78	0,07	0,15

KRAUTH & KLEIN (1982) haben bei zeitproportionaler Probennahme an der A 81 47 und an der A 6 48 einzelne Niederschlagsereignisse erfaßt, untersucht und die jeweils transportierten Stofffrachten bilanziert. Als leistungsbezogene Kenngröße, d.h. bezogen auf 1 km Strecke und

die Verkehrsstärke, ergeben sich die in Tabelle 4-5 zusammengestellten Frachtdaten. Bei den straßenspezifischen Mittelwerten der Stoffe Kupfer, Eisen, Blei und Zink ergibt sich eine gute, bei Cadmium eine mäßige und bei Mineralöl, CSB, abfiltrierbare Stoffe und Chrom eine schlechte Übereinstimmung der Untersuchungsstrecken. Wegen der übereinstimmenden Untersuchungs- und Auswertungsmethodik dürften die Abweichungen auf die unterschiedlichen Untersuchungszeiträume, Witterungsbedingungen und ggf. unterschiedliche örtliche Randbedingungen zurückzuführen sein.

Die von KRAUTH & KLEIN (1982) an der A 81 und der A 6 je Niederschlagsereignis gemessenen Stofffrachten im Fahrbahnabfluß bieten weiterhin die Möglichkeit, Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Parametern zu untersuchen. Hierzu wurde zunächst geprüft, ob den Daten der Stofffrachten eine Normalverteilung zugrundegelegt werden kann. Im Rahmen von Anpassungstests nach *KOLMOGOROV-SMIRNOV* bei einem Signifikanzniveau ($1 - \alpha$) von 0,95 (siehe BRONSTEIN & SEMENDJAJEW 1987 und RACKWITZ 1993) wurde die Hypothese einer Normalverteilung an der A 81 lediglich von CSB (chemischer Sauerstoffbedarf) und Kupfer und an der A 6 lediglich von Mineralölkohlenwasserstoffen bestätigt. Für die folgenden Korrelationsuntersuchungen wurden daher Rang-Korrelationskoeffizienten (r_s) nach *SPEARMAN* berechnet, da diese keine Normalverteilung der Grundgesamtheiten bedingen (RACKWITZ 1993).

Wie in Tabelle 4-6 ersichtlich, besteht eine signifikante lineare Abhängigkeit zwischen den einzelnen je Niederschlagsereignis mit dem Fahrbahnabfluß transportierten Stofffrachten. Folglich können für Langzeituntersuchungen vorab Regressionsgleichungen zwischen einem "Leitparameter" - wie beispielsweise die mit geringem Aufwand zu ermittelnden abfiltrierbaren Stoffe - und weiteren relevanten Parametern ermittelt werden, so daß im weiteren nur noch der "Leitparameter" zu bestimmen wäre. Die erforderlichen Voruntersuchungen müßten jeweils unter den standortspezifischen Randbedingungen durchgeführt werden.

Tabelle 4-6: Untersuchung von Abhängigkeiten zwischen den Stofffrachten (auf 1 km Strecke und den DTV in Kfz/24 h bezogen) im Fahrbahnabfluß der A 81 und der A 6 je Niederschlagsereignis anhand der *SPEARMAN*-Rang-Korrelationskoeffizienten (r_s); Auswertung der Einzeldaten aus KRAUTH & KLEIN (1982)

Rang-Korrelationskoeffizienten (r_s) nach <i>SPEARMAN</i> für die A 81 (linke untere Hälfte) A 6 (rechte obere Hälfte)									
r_s	abf. Stoffe	Blei	Cadmium	Chrom	Eisen	Kupfer	Zink	CSB	Mineralöl-KW
abf. Stoffe	1	0,96	0,92	0,90	0,95	0,93	0,92	0,89	0,85
Blei	0,94	1	0,95	0,93	0,95	0,93	0,96	0,91	0,89
Cadmium	0,88	0,93	1	0,93	0,93	0,92	0,96	0,91	0,89
Chrom	0,91	0,93	0,92	1	0,95	0,86	0,90	0,81	0,88
Eisen	0,93	0,97	0,93	0,93	1	0,90	0,90	0,84	0,90
Kupfer	0,89	0,91	0,92	0,93	0,91	1	0,93	0,93	0,83
Zink	0,83	0,88	0,87	0,89	0,89	0,91	1	0,92	0,84
CSB	0,81	0,82	0,80	0,83	0,79	0,88	0,86	1	0,83
Mineralöl-KW	0,77	0,78	0,79	0,82	0,77	0,87	0,87	0,92	1

4.1.1.4 Zeitlicher Verlauf ständiger Einwirkungen

Im Sinne des Risikobegriffs ist neben den emittierten Mengen der zeitliche Verlauf ständiger straßenspezifischer Einwirkungen wassergefährdender Stoffe ein wichtiges Kriterium. Im Rahmen der vorliegenden Datenbasis werden folgende Auswertungen durchgeführt:

- Kurzfristiger Verlauf während eines Niederschlagsereignisses:
KRAUTH & KLEIN (1982)
- Mittelfristiger Verlauf während mehrerer Monate:
KRAUTH & KLEIN (1982), SCHORB (1988)
- Langfristig summierte Frachten im Fahrbahnabfluß:
KRAUTH & KLEIN (1982)

Der kurzfristige Verlauf ständiger Einwirkungen während einzelner Niederschlagsereignisse kann anhand der Einzel-Untersuchungen des Fahrbahnabflusses der A 81 und der A 6 von KRAUTH & KLEIN (1982) nachvollzogen werden (s. Abb. 4-4). Abgesehen von der als Sonderfall anzusehenden Kombination aus Schneeschmelze und Regen (A 81, 26.02.1978) sind folgende Zusammenhänge erkennbar:

- Die Konzentrationen der erfaßten straßenspezifischen Stoffe zeigen ähnliche zeitliche Verläufe.

- Bei gleichmäßigen Niederschlagsabflüssen treten die maximalen Stoffkonzentrationen zu Beginn des Niederschlagsereignisses auf.
- Bei ungleichmäßigen Niederschlagsabflüssen treten die maximalen Stoffkonzentrationen zusammen mit dem maximalen Abfluß auf.

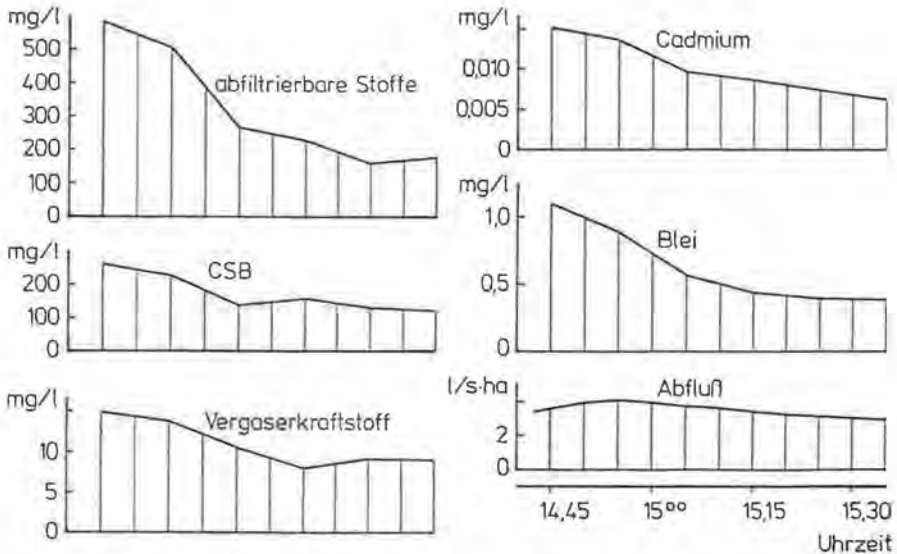


Abb. 4-4: Kurzfristiger Verlauf des Fahrabflusses und der Konzentrationen straßenspezifischer Stoffe während eines Niederschlagsereignisses an der A 81 - aus KRAUTH & KLEIN (1982), S. 16 (Regen vom 16.3.78)

Für allgemeine Betrachtungen eignen sich die über alle Niederschlagsereignisse gemittelten Mengen- bzw. Konzentrations-Ganglinien von Abfluß, abfiltrierbaren Stoffen, chemischem Sauerstoffbedarf (CSB) und Blei der A 81 und der A 6:

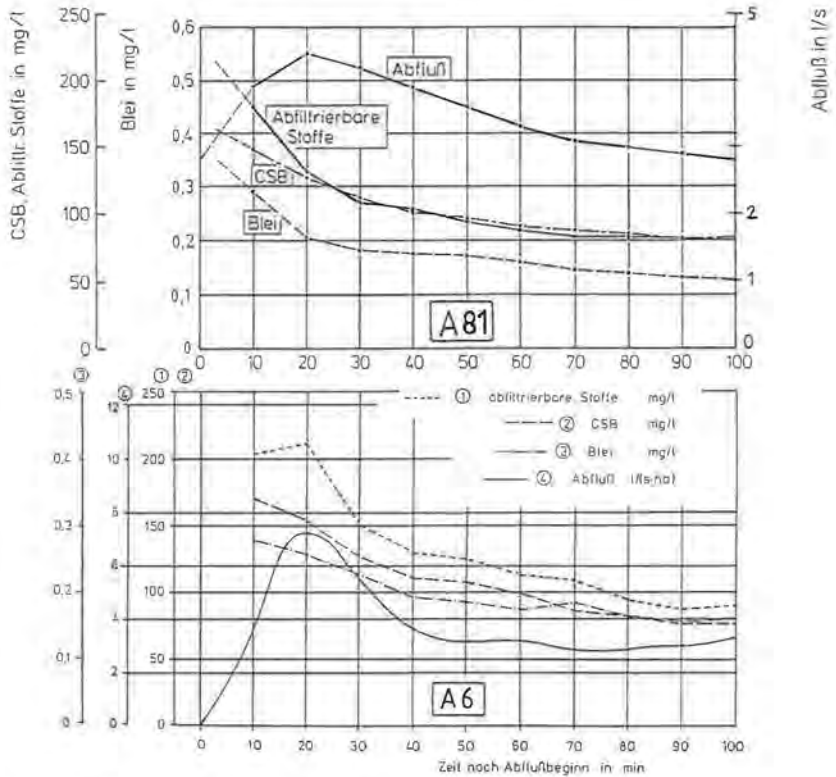


Abb. 4-5: Mittlere Mengen- bzw. Konzentrations-Ganglinien von Abfluß, abfiltrierbaren Stoffen, chemischem Sauerstoffbedarf (CSB) und Blei aller an der A 81 und der A 6 von KRAUTH & KLEIN (1982) untersuchten Niederschlagsereignisse

Der mittelfristige jahreszeitliche Verlauf (mehrere Monate) der Emissionen straßenspezifischer Stoffe aus ständigen Einwirkungen wird anhand der mittleren Stoffkonzentrationen je Niederschlagsereignis (Einzelwerte) aus KRAUTH & KLEIN (1982) und anhand der Monatsmittelwerte der Stoffgehalte im Fahrabfluß aus SCHORB (1988) untersucht.

Die Einzelkonzentrationen von abfiltrierbaren Stoffen, Blei, Cadmium, Chrom, Kupfer, Zink, CSB und Mineralöl im Fahrabfluß der A 81 und der A 6 (s. Abb. 4-6) unterliegen sehr starken Schwankungen ohne klar erkennbaren jahreszeitlichen Verlauf, so daß ein bestimmender Einfluß der Niederschlagsereignisse (Häufigkeit und Intensität) gefolgert wird.

/Novemberwerte durch die August-/Septemberwerte sowie fehlende Dezember-/Januarwerte durch Februarwerte. Bei der A 6 wurde entsprechend vorgegangen.

Tabelle 4-7: Jährliche Stofffrachten im Fahrbahnabfluß der Bundesautobahnen A 81 und A 6 nach KRAUTH & KLEIN (1982)

Untersuchungsstrecke	A 81		A 6	
Untersuchungszeitraum	02.1978 - 09.1978		02.1979 - 07.1979	
Verkehrsstärke (DTV-Mittelwerte)	40857		47253	
Stofffracht	kg/(ha · a)	kg/(km · a)	kg/(ha · a)	kg/(km · a)
Abfiltrierbare (Schweb-) Stoffe	873	1257,1	847,5	1567,9
Ottokraftstoff	42,19	60,75	25,41	47,01
Mineralöl	43,27	62,31	27,09	50,12
Cadmium	0,037	0,053	0,029	0,054
Chrom	0,062	0,089	0,1	0,19
Kupfer	0,621	0,89	0,544	1,006
Eisen	23,37	33,65	28,81	53,3
Blei*	1,332	1,91	1,155	2,137
Zink	2,329	3,35	2,892	5,35

* Im Jahr 1993 betrug der Marktanteil verbleiten Benzins nur noch 11 % gegenüber 99 % im Jahr 1985 und zuvor (DIW, 1994).

4.1.1.5 Indirekte Quantifizierung ständiger Einwirkungen

Die Menge der infolge ständiger Einwirkungen (aus normalem Straßenbetrieb) emittierten wassergefährdenden Stoffe hängt von folgenden Parametern ab:

- Verkehrsstärke (DTV)
- Fahrdynamik (Beschleunigung, Verzögerung, Geschwindigkeit) in Abhängigkeit von straßenbaulichen Aspekten (Entwurfsgeschwindigkeit, Steigung, Knotenpunkte, Anzahl der Fahrspuren, u.a.)
- Emissionen der Verkehrsteilnehmer in Abhängigkeit von der Verkehrszusammensetzung (PKW, KRAD, LKW), dem technischem Standard (z.B. geregelter Katalysator) der Kfz und dem Zustand der Kfz (Undichtigkeiten führen zu Tropfverlusten)

Die Emissionen wassergefährdender Stoffe der einzelnen Verkehrsteilnehmer (PKW, KRAD, LKW) bei variierenden in-situ-Randbedingungen sind derzeit nicht vollständig bekannt. Da zudem für den jeweiligen Straßenstandort die genaue Verkehrszusammensetzung bekannt sein

müßte, ist eine direkte Quantifizierung der ständigen Einwirkungen derzeit nicht möglich. Bei der deshalb durchzuführenden indirekten Quantifizierung ständiger Einwirkungen muß ein Zusammenhang zwischen den Emissionen und bestimmten Parametern, wie Verkehrsstärke, Fahrdynamik und Verkehrszusammensetzung, bestehen. Hierzu wird zunächst der Zusammenhang zwischen den Stoffemissionen und der Verkehrsstärke (DTV) anhand der folgenden Forschungsarbeiten untersucht:

ESSER (1980, 1981) hat die Konzentration der Luftschadstoffe Stickstoffmonoxid (NO), Stickstoffdioxid (NO₂), Summe der Stickstoffoxide (NO_x), Blei (Pb) und Kohlenmonoxid (CO) aus Kfz-Abgasen in Abhängigkeit von Verkehrsdaten untersucht. Im Rahmen von Korrelationsanalysen der Meßdaten wurde eine lineare Abhängigkeit der Stoffkonzentrationen vom Verkehrsaufkommen durch PEARSON-Korrelationskoeffizienten $r_{CO} = 0,87$ und $r_{NOx} = 0,79$ bestätigt. Für die Komponente Blei wurde ein Korrelationskoeffizient $r_{Pb} = 0,55$ ermittelt, was ESSER (1980) auf eine geringere Anzahl an Vergleichswerten und den relativ großen Fehler bei der Bleianalyse zurückführt.

UNGER & PRINZ (1992) untersuchten das Schwemmmaterial im Bereich von Straßen unterschiedlicher Verkehrsstärke* bei ansonsten vergleichbaren Randbedingungen (Entwässerung, Querschnittstopographie, Witterung), die mindestens 25 Jahre in Betrieb waren, auf deren Gehalte an Schwermetallen und organischen Fremdstoffen. Für die Stoffe Blei ($r_{Pb} = 0,81$), Zink ($r_{Zn} = 0,61$), Kupfer ($r_{Cu} = 0,54$), BTX-Aromate ($r_{BTX} = 0,77$), Mineralölkohlenwasserstoffe ($r_{C_{nH_m}} = 0,61$) ergab sich ein ausgeprägter und für Cadmium ($r_{Cd} = 0,37$) und polychlorierte Dibenzodioxine ($r_{PCDD} = 0,41$) ein mäßiger Zusammenhang zur Verkehrsstärke, der durch die in Klammern angegebenen PEARSON-Korrelationskoeffizienten belegt wird. Bei den Stoffen polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK), Phenole und polychlorierte Dibenzofurane (PCDF) war kein eindeutiger Zusammenhang zum Verkehrsaufkommen erkennbar, was nach UNGER & PRINZ (1992) an einer weiträumigeren Windverfrachtung dieser Stoffe liegen könnte.

* L 99 (DTV=1200), K 5326 (DTV=5000), B 3 (DTV=16000), B 3 (DTV=18000), BAB 5 (DTV=50000), BAB 8 (DTV=50000), B 31a (DTV=56000), BAB 5 (DTV=65000)

Ähnliches gilt für die von UNGER & PRINZ (1992) an den genannten Straßenstandorten* untersuchten Stoffkonzentrationen in den oberen Bodenschichten (bis in 10 cm Tiefe) in unterschiedlicher Entfernung vom Fahrbahnrand, wobei es sich bei allen Standorten um Lößlehm mit geringfügigen schluffigen, sandigen oder kiesigen Anteilen handelte. Für Blei, Cadmium, Mineralölkohlenwasserstoffe und polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe ergab sich ein ausgeprägter Zusammenhang zur Verkehrsstärke (DTV) (s. Tab. 4-8).

Tabelle 4-8: PEARSON-Korrelationskoeffizienten zwischen Stoffgehalten in der obersten Bodenschicht (bis 10 cm Tiefe) und der Verkehrsstärke (DTV) an Straßen, die länger als 25 Jahre in Betrieb waren (L 99 (DTV=1200), K 5326 (DTV=5000), B 3 (DTV=16000), B 3 (DTV=18000), BAB 5 (DTV=50000), BAB 8 (DTV=50000), B 31a (DTV=56000), BAB 5 (DTV=65000)) in unterschiedlicher Entfernung vom Fahrbahnrand - Daten aus UNGER & PRINZ (1992)

PEARSON-Korrelationskoeffizienten des untersuchten Zusammenhangs*	Entfernung vom Fahrbahnrand		
	0,1 m	1 m	2,5 m
DTV - Blei	0,95	0,97	0,91
DTV - Cadmium	0,82	0,39	0,50
DTV - Mineralölkohlenwasserstoffe (C_nH_m)	0,86	0,93	0,81
DTV - PAK (polyzykl. aromat. Kohlenwasserst.)	0,62	0,93	0,81

* Je sechs Wertepaare

Bei den Stoffen Chrom (Cr), Nickel (Ni), Zink (Zn), Phenole, polychlorierte Biphenyle (PCB), polychlorierte Dibenzo-p-Dioxine und polychlorierte Dibenzofurane (PCDD/F) war keine eindeutige Beziehung zum Verkehrsaufkommen erkennbar, was nach UNGER & PRINZ (1992) an einer weiträumigeren Windverfrachtung oder am geringeren Rückhaltevermögen der oberen Bodenschichten für diese Stoffe liegen könnte. Bei den untersuchten organischen Fremdstoffen (C_nH_m , PAK, Phenole, PCB, PCDD/F) ist zu beachten, daß diese bereits in der Luft und auf der Bodenoberfläche, je nach Persistenzeigenschaften, photochemisch und photolytisch (UV-Strahlung des Sonnenlichts) abgebaut bzw. in ihrer Struktur verändert werden können.

Bei den Untersuchungen von KRAUTH & KLEIN (1982) an der A 81 konnte bei vier Wertepaaren (zwei-Monats-Werte) eine lineare Abhängigkeit der Stofffrachten im Fahrbahnabfluß von der zugehörigen Verkehrsmenge durch die PEARSON-Korrelationskoeffizienten $r_{abf, \text{Stoffe}} = 0,79$; $r_{\text{Blei}} = 0,70$; $r_{\text{CSB}} = 0,89$ und $r_{\text{Benzin}} = 0,88$ bestätigt werden. Hiervon abweichend

ergaben sich bei den sechs Wertepaaren (Monatswerte) an der A 6 immer negative Korrelationskoeffizienten zwischen Verkehrsmenge und Schmutzfracht des Straßenoberflächenwassers, was KRAUTH & KLEIN (1982) auf andere, den Einfluß der Verkehrsmenge überlagernde Einflüsse zurückführen, da eine tatsächlich umgekehrt proportionale Abhängigkeit unwahrscheinlich sei. Hierzu wurde vom Verfasser der Zusammenhang zwischen den oben genannten Stofffrachten und den zugehörigen Niederschlagsmengen (vier zwei-Monats-Wertepaare an der A 81 und sechs Monatswertepaare an der A 6) untersucht:

Tabelle 4-9: Zusammenhang zwischen der Niederschlagsmenge, bestimmten Stofffrachten im Fahrbahnabfluß und der Verkehrsmenge an der A 81 (zwei-Monatswerte) und der A 6 (Monatswerte); Einzeldaten aus KRAUTH & KLEIN (1982)

Untersuchter Zusammenhang	PEARSON-Korrelationskoeffizienten	
	A 81	A 6
Niederschlagsmenge - abfiltr. Stoffe	0,91	0,98
Niederschlagsmenge - Blei	0,72	0,98
Niederschlagsmenge - CSB	0,99	0,99
Niederschlagsmenge Verkehrsmenge	0,94	-0,42

An der A 81 liegt eine eindeutige lineare Abhängigkeit sowohl zwischen der Niederschlagsmenge und den Stofffrachten als auch zwischen der Niederschlagsmenge und der Verkehrsmenge vor. An der A 6 liegt ebenfalls eine eindeutige lineare Abhängigkeit zwischen der Niederschlagsmenge und den Stofffrachten - jedoch eine umgekehrte Proportionalität zwischen der Niederschlagsmenge und der Verkehrsmenge vor. Hieraus wird gefolgert, daß die sechs- und achtmonatigen Untersuchungen der Fahrbahnabflüsse der A 81 und der A 6 von KRAUTH & KLEIN (1982) wegen des dominierenden Einflusses der kurz- und mittelfristig stark schwankenden Niederschlagsmenge auf die Stofffrachten im Fahrbahnabfluß zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Verkehrsmenge und den resultierenden ständigen Einwirkungen nicht geeignet sind.

Neben der Verkehrsstärke als Bestimmungsgröße für die Menge der im Rahmen von ständigen Einwirkungen emittierten wassergefährdenden Stoffe ist ein weiterer bedeutender Einfluß der Fahrdynamik (Beschleunigung, Verzögerung, Geschwindigkeit) denkbar. Zur Beurteilung dieses Zusammenhangs eignen sich die Untersuchungen von UNGER & PRINZ (1992) an

den Straßenkategorien Kreis-, Landes-, Bundesstraßen und Bundesautobahnen, wobei mit DTV-Stärken zwischen 1200 und 65000 auch Unterschiede in der Fahrdynamik vorlagen. Da eindeutige lineare Zusammenhänge (PEARSON-Korrelation) zwischen der Verkehrsstärke und den emittierten Stoffmengen ermittelt wurden, wird gefolgert, daß unter ansonsten vergleichbaren Randbedingungen (Straßentopographie, -entwässerung, -längsneigung) der Einfluß der Fahrdynamik vernachlässigbar klein ist. Unter besonderen Randbedingungen, wie beispielsweise im Bereich von Knotenpunkten oder an Steigungsstrecken, dürfte jedoch ein nennenswerter Einfluß der Fahrdynamik vorliegen.

Die Untersuchungen von ESSER (1980, 1981) und von UNGER & PRINZ (1992) belegen eine lineare Abhängigkeit der infolge ständiger Einwirkungen emittierten Stoffmenge von der Verkehrsstärke, so daß sich die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke DTV in Kfz/24h als Bestimmungsgröße für die Schadstoffemissionen aus ständigen Einwirkungen eignet.

Wegen des kurz- und mittelfristig dominierenden Einflusses der wechselhaften Witterungsbedingungen sind die Stofffrachten im Fahrabfluß einzelner Bundesautobahnen (KRAUTH & KLEIN 1982) nicht zur Untersuchung des Zusammenhangs zwischen den infolge ständiger Einwirkungen emittierten Stoffmengen und der Verkehrsstärke geeignet. Diesbezügliche Untersuchungen müßten - wie die Untersuchungen von UNGER & PRINZ (1992) - an Straßenstandorten unterschiedlicher Verkehrsstärke bei ansonsten weitgehend übereinstimmenden Randbedingungen durchgeführt werden.

4.1.2 Oberirdische Verlagerung der Stoffe aus ständigen Einwirkungen

Straßenspezifische Stoffe aus ständigen Einwirkungen werden je nach Beschaffenheit (Partikel, Flüssigkeiten, Gase) auf den in Abschnitt 3.2.1 erläuterten Pfaden verlagert. Wegen des dominierenden Einflusses der wechselhaften Witterungsbedingungen sind diese Verlagerungsprozesse im Rahmen von in-situ-Messungen nur als langfristige Mittelwerte quantifizierbar.

Bezüglich der Verlagerungsreichweite wurden bereits mehrere Untersuchungen durchgeführt (ESSER 1980; GOLWER & SCHNEIDER 1983a,b; GOLWER 1991; KRAUTH & KLEIN 1982; REINIRKENS 1992; STOTZ & KRAUTH 1987; UNGER & PRINZ 1992).

Nach STOTZ & KRAUTH (1987) nehmen die Stoffkonzentrationen grundsätzlich mit zunehmendem Abstand vom Fahrbahnrand ab. Kleine Partikel werden bei Trockenwetter vom Wind verfrachtet. Die Reichweite dieser Verlagerung hängt einerseits von der Windrichtung und -stärke und andererseits von der Dichte und Größe der Partikel ab. Bei Regenwetter werden die im Bereich von Straßen an der Oberfläche abgelagerten Stoffe vom Niederschlagswasser aufgenommen und abtransportiert. In der Luft enthaltene Partikel werden von den Regentropfen ausgewaschen.

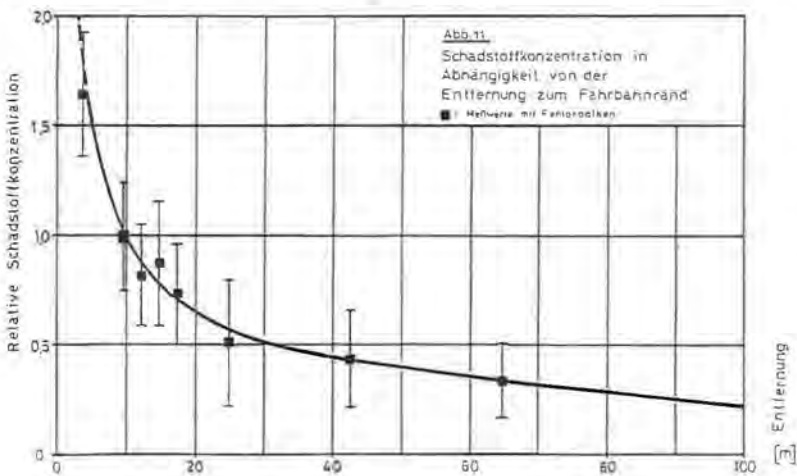


Abb. 4-9: Relative Konzentration der Luftschadstoffe Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x) und Blei (Pb) in Abhängigkeit von der Entfernung zum Fahrbahnrand (aus ESSER 1980)

In-situ-Messungen ergaben im einzelnen folgendes:

ESSER (1980) hat die Konzentrationen der straßenspezifischen Luft-Schadstoffe Kohlenmonoxid (CO), Stickoxide (NO_x) und Blei (Pb) in Abhängigkeit von der Entfernung zum Fahrbahnrand untersucht (siehe Abb. 4-9). Im Rahmen von Regressionsanalysen ergab eine

Potenzfunktion vom Typ $y = A \cdot x^B$ die beste Anpassung an die Meßwerte (PEARSON-Korrelationsfaktor $r = 0,71$).

UNGER & PRINZ (1992) haben die Schadstoffgehalte der oberen Bodenschicht (0-10 cm Tiefe) in unterschiedlichem Abstand zum Fahrbahnrand (0,1 m, 1 m, 2,5 m, 5 m, 10 m, 25 m, 50 m und 100m) an acht verschiedenen Straßenstandorten in Baden-Württemberg* untersucht. Alle Untersuchungsgebiete lagen in ebenem Gelände in Dammlage (1 m bis 3 m Höhe) und wurden über die Böschung entwässert, so daß sich eine Untersuchung der Verlagerungsintensität anhand der von UNGER & PRINZ (1992) gewonnenen Daten anbietet. Hierzu werden die Einzelkonzentrationen jeweils auf die Maximalkonzentration der Meßachse bezogen ($K_{(\text{Straße } x)} / \max. K_{(\text{Straße } x_0)}$). Es ergaben sich typische Verteilungsmuster für einzelne Stoffgruppen:

- **Blei (Pb), Kupfer (Cu), Mineralölkohlenwasserstoffe (C_nH_m), polyzyklische aromatische Kohlenwasserstoffe (PAK)**
Die Gehalte von Pb, Cu und C_nH_m im Boden nahmen von 0 bis 2,5 m Entfernung sehr stark auf durchschnittlich ca. 30 % der Ausgangskonzentration ab und fielen dann weniger stark auf durchschnittlich ca. 10 % der Ausgangskonzentration in 100 m Entfernung. Der Verlauf der Konzentrationsabnahme kann im Rahmen einer nichtlinearen Regression wie bereits bei ESSER (1980) am besten durch eine Potenzfunktion vom Typ $y = A \cdot x^B$ beschrieben werden. Dies gilt prinzipiell auch für PAK, wobei jedoch vereinzelt noch in 2,5 bis 5 m Entfernung hohe Konzentrationen festgestellt wurden, was UNGER & PRINZ (1992) auf den Abrieb bituminöser Fahrbahnen zurückführen.
- **Zink, Nickel, Chrom**
Die Abnahme der Stoffkonzentrationen unterliegt starken Schwankungen, so daß kein eindeutiger Verlagerungsverlauf festgestellt werden kann. Bei Nickel und Chrom dürfte dies an den niedrigen Ausgangskonzentrationen liegen, die von Hintergrundgehalten des Bodens stark überlagert werden.
- **Cadmium**
Die Cadmiumkonzentrationen unterliegen mit Maximalwerten in 50 m Entfernung und bis 50 % der Ausgangskonzentration in 100 m Entfernung extremen Schwankungen. Insgesamt kann eine sehr starke Mobilität des Schadstoffes Cadmium festgestellt werden, die auf eine überwiegende Windverfrachtung zurückzuführen sein dürfte. Dies wird auch von KRAUTH & STOTZ (1987) bei der Auswertung von Forschungsarbeiten festgestellt.

* L 99 (DTV=1200), K 5326 (DTV=5000), B 3 (DTV=16000), B 3 (DTV=18000), BAB 5 (DTV=50000), BAB 8 (DTV=50000), B 31a (DTV=56000), BAB 5 (DTV=65000)

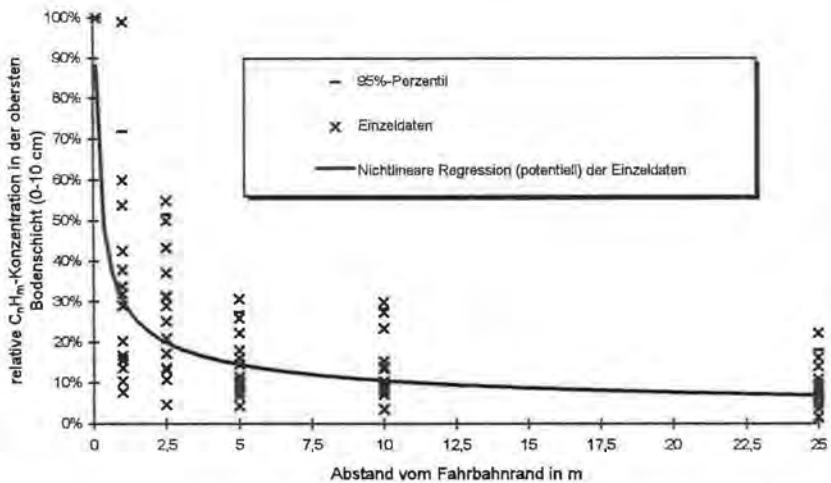


Abb. 4-10: Verlagerungsintensität von Mineralölkohlenwasserstoffen (C_nH_m). Auswertung von C_nH_m -Gehalten in der obersten Bodenschicht (0-10 cm Tiefe) an folgenden Außerortsstraßen (Meßachsen): L 99 (DTV=1200), K 5326 (DTV=5000), B 3 (DTV=16000), B 3 (DTV=18000), BAB 5 (DTV=50000), BAB 8 (DTV=50000), B 31a (DTV=56000), BAB 5 (DTV=65000) - Daten aus UNGER & PRINZ (1991)

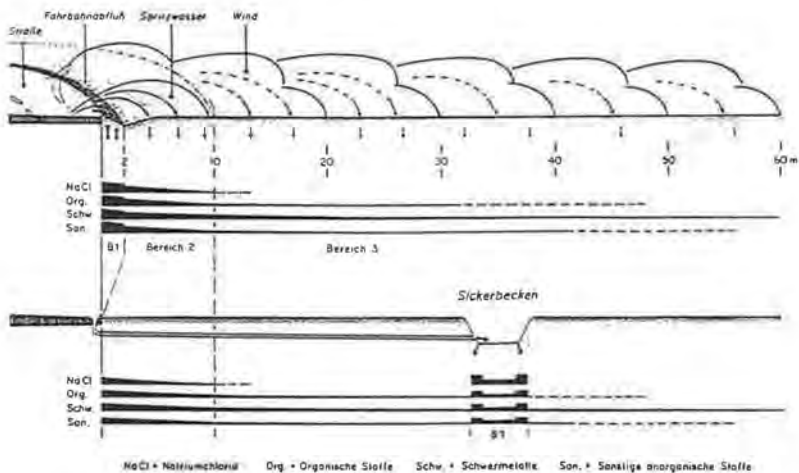


Abb. 4-11: Belastung von Böden und Grundwasser durch Straßen; entn. aus GOLWER (1991)

Nach GOLWER (1991) haben fast alle Untersuchungen der vergangenen 30 Jahre in Straßenrandböden mit zunehmendem Abstand von der Straße und zunehmender Tiefe eine Abnahme der Stoffkonzentrationen ergeben. Es kann an Straßen aufgrund der vorherrschenden Transportmechanismen in drei Belastungsbereiche unterteilt werden (s. Abb. 4-11). Den von GOLWER (1991) beschriebenen Belastungsbereichen können anhand der Untersuchungen von UNGER & PRINZ (1992) und ESSER (1980) näherungsweise die in Tab. 4-10 angegebenen, auf den Maximalwert am Fahrbahnrand bezogenen Belastungsintensitäten zugeordnet werden, wobei für den Verlauf der Verlagerungsintensität $I_{\text{Verf.}} = 0,5 \cdot \text{Abstand}^{0,3}$ ($I_{\text{Verf.}}$ = relative Verlagerungsintensität bezogen auf den Maximalwert am Fahrbahnrand) zugrunde gelegt wird.

Tabelle 4-10: Erläuterung der drei von GOLWER (1991) beschriebenen Belastungsbereiche und näherungsweise Abschätzung der Belastungsintensität in Anlehnung an die Untersuchungsergebnisse von UNGER & PRINZ (1992) und ESSER (1980).

Bereich	Erläuterung ^{a)}	Belastungsintensität ^{b)}
1	Abstand zum Fahrbahnrand: $0 \text{ m} > B 1 < 2 \text{ m}$. Der Bereich 1 ist der durch Fahrbahnabfluß und Spritzwasser am stärksten belastete Bereich. Im Einschnitt ist der Bereich 1 durch die Seitenmulde begrenzt.	100 % ... 50 %
2	Abstand zum Fahrbahnrand: $2 \text{ m} > B 2 < 10 \text{ m}$. Im Bereich 2 versickert vorwiegend das Spritzwasser und an Straßenböschungen bei großem Wasseranfall zeitweise auch der Fahrbahnabfluß. Die Stoffkonzentrationen nehmen in Bereich 2 mit zunehmendem Fahrbahnabstand deutlich ab; für einige Stoffe wird bereits die Grenze der allgemeinen oberirdischen Verlagerung erreicht.	50 % ... 25 %
3	Abstand zum Fahrbahnrand: $10 \text{ m} > B 3 < 60...100 \text{ m}$. Im Bereich 3 werden vom Wind verfrachtete Staubpartikel und bei Niederschlag der Sprühnebel abgelagert. Die Ausdehnung dieses Bereiches ist abhängig von Windstärke und -richtung, Topographie und Lage der Straße (Damm oder Einschnitt). Aufgrund der nur noch sehr geringen Stoffkonzentrationen können straßenspezifische Stoffe teilweise nicht mehr von Hintergrundgehalten (Emissionen der Industrie oder geogene Gehalte bestimmter Stoffe in Böden) abgegrenzt werden.	25 % ... 10 %

^{a)} Nach GOLWER (1991); ^{b)} Näherungsweise nach UNGER & PRINZ (1992) und ESSER (1980)

4.1.3 Unterirdische Verlagerung der Stoffe aus ständigen Einwirkungen

4.1.3.1 Vorbemerkungen

Ausgehend von SCHNEIDER & GÖTTNER (1991) wurde der Stofftransport durch mineralische Deponiebasisabdichtungen bereits in mehreren Arbeiten (z.B. FINSTERWALDER 1992, DEMMERT 1993, STOCKMEYER et al. 1994) auf der Basis definierter Randbedingungen funktional beschrieben. Die maßgebenden Parameter der Stofftransportgleichung wurden für ausgewählte Schadstoffe, Dichtungsmaterialien und geometrische und hydraulische Randbedingungen im Laborversuch bestimmt.

Die in Abschnitt 3.2.2.2 erläuterten physikalischen, chemischen und biologischen Prozesse, die an der Verlagerung straßenspezifischer Schadstoffe aus ständigen Einwirkungen im Untergrund beteiligt sind, sind prinzipiell bekannt. Jedoch kann das Zusammenspiel der einzelnen Verlagerungsprozesse derzeit nur unter vereinfachten Annahmen, wie beispielsweise gesättigte Verhältnisse und Homogenität, funktional beschrieben werden. Weiterhin müßten eine Vielzahl spezieller hydraulischer, allgemein physikalischer, chemischer und biologischer Parameter des Bodens und der an den Verlagerungsprozessen beteiligten Fluide bekannt sein. Zusammenfassend wird die funktionale Beschreibung der unterirdischen Verlagerung von wassergefährdenden Stoffen aus ständigen Einwirkungen für die Verhältnisse im Einflußbereich von Straßen als nicht zweckmäßig bewertet, da einerseits der Aufbau und die Zusammensetzung natürlich anstehender grundwasserüberdeckender Boden- oder Felsschichten stark schwankt und andererseits der Fahrbahnabfluß und damit das Sickerwasser aufgrund einer Vielzahl schwer bestimmbarer und zeitlich veränderlicher Einflußgrößen sehr heterogen zusammengesetzt ist.

Aus den genannten Gründen werden im folgenden in-situ-Untersuchungen zur Verlagerung straßenspezifischer wassergefährdender Stoffe aus ständigen Einwirkungen im Untergrund unter typischen Randbedingungen ausgewertet.

4.1.3.2 Stoffgehalte in den oberen Bodenschichten oder Bodenprofilen im Straßenrandbereich

UNGER & PRINZ (1992) untersuchten vertikale Bodenprofile in unterschiedlicher Entfernung zum Fahrbahnrand (0,1; 1; 2,5; 5 und 10 m) der breitflächig über die Böschung entwässerten BAB A5 (DTV = 50000) auf deren Gehalte an Schwermetallen und organischen Fremdstoffen. Bei der Auswahl der Untersuchungsstandorte wurden örtliche Hintergrundbelastungen durch Siedlung, Gewerbe und Industrie (abgesehen von weiträumigen atmosphärischen Belastungen) ausgeschlossen. Im folgenden wird auf die maximal belasteten Bodenprofile in 0,1 m Entfernung vom Fahrbahnrand näher eingegangen (s. Abb. 4-12 und 4-13).

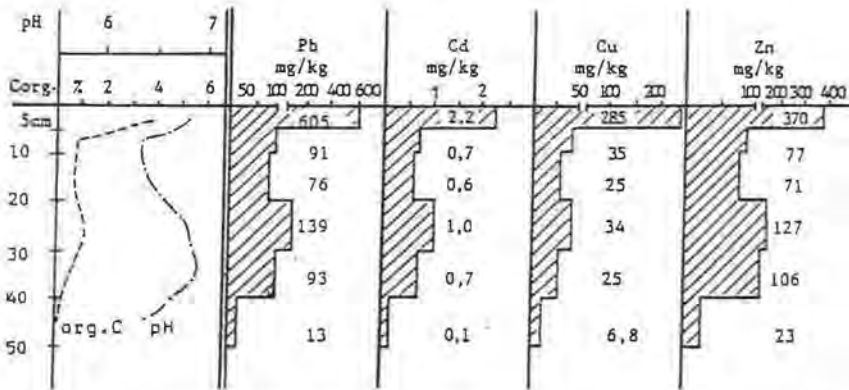


Abb. 4-12: Tiefenfunktionen der Stoffgehalte eines Bodenprofils in 0,1 m Entfernung vom Fahrbahnrand der A5 (DTV¹⁹⁹⁰=50000); Quelle: UNGER & PRINZ (1992)

Die Untersuchungen ergaben generell eine starke Abnahme der Stoffgehalte in den ersten 5-10 cm Tiefe. Dies ist in erster Linie auf Filtrationsprozesse in der obersten Bodenschicht zurückzuführen, da die untersuchten Stoffe im Fahrbahnabfluß überwiegend als Feststoffpartikel oder an Feststoffpartikel gebunden vorliegen (s. Abschn. 4.1.1.1, Tabelle 4-1). In Tiefen zwischen 20 und 40 cm waren die Stoffgehalte nochmals leicht erhöht, was auf den in dieser Tiefe ebenfalls leicht erhöhten pH-Wert des Bodens und die daraus resultierende geringere

Löslichkeit der zurückgehaltenen straßenspezifischen Stoffe zurückgeführt wird (s. Abschn. 4.1.3.5).

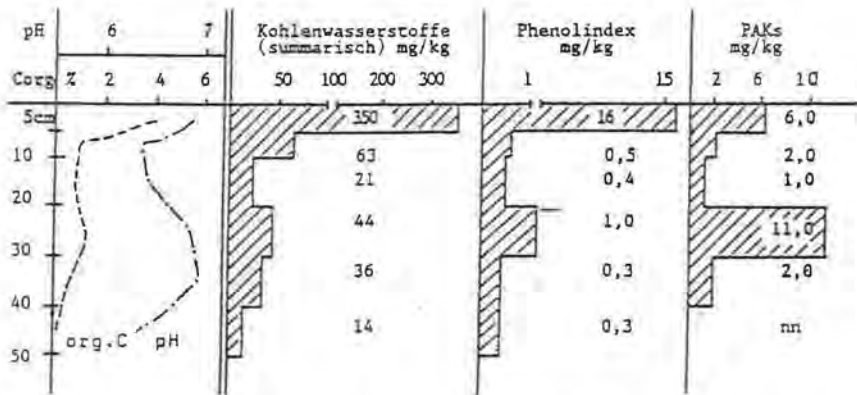


Abb. 4-13: Tiefenfunktionen der Stoffgehalte eines Bodenprofils in 0,1 m Entfernung vom Fahrbahnrand der A5 (DTV¹⁹⁹⁰=50000); Quelle: UNGER & PRINZ (1992)

4.1.3.3 Stoffgehalte im Sickerwasser

Für die im Rahmen dieser Arbeit durchzuführende Risikobetrachtung wurden nur Untersuchungen des maximal straßenbeeinflussten oberflächennahen Sickerwassers in unmittelbarer Fahrbahnnähe bei breitflächiger ungebündelter Straßenentwässerung ausgewertet.

REINIRKENS (1992) analysierte im Verlauf eines Jahres (2.1.1989 - 17.1.1990) kontinuierlich oberflächennahe Sickerwässer an drei Bundesstraßen und einer Kreisstraße mittlerer Verkehrsstärke (DTV^{B51}=14750, DTV^{B58}=10600, DTV^{B63}=12700, DTV^{L403}=11400) in Nordrhein-Westfalen auf deren Gehalte an Blei, Cadmium, Zink und Kupfer, die sowohl im Sickerwasser als auch im Boden nachweisbar waren. Die Proben wurden in unterschiedlichem Abstand zum Fahrbahnrand und unterschiedlicher Tiefe innerhalb der belebten Bodenzone mittels Keramiksaugkerzen mit 1 µm Porenweite gewonnen. Im folgenden werden die ermittelten Meßwerte mit den Grenz- und Richtwerten der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990) und

den jeweiligen von SCHLEYER & KERNDORFF (1992) als Beginn einer anthropogenen Beeinflussung definierten geogenen Stoffgehalten im Grundwasser westdeutscher Trinkwasserressourcen in Lockersedimenten (95%-Perzentilwerte aus 1717 Einzelanalysen westdeutscher Lockersediment-Grundwässer) verglichen (s. Tab. 4-11).

Im Sickerwasser der von REINIRKENS (1992) untersuchten Straßenstandorte waren Blei und Zink meist nicht nachweisbar, so daß auch die Maximalgehalte zumeist deutlich unter den als Beginn einer anthropogenen Beeinträchtigung definierten Referenzwerten verblieben.

Die Kupfergehalte im Sickerwasser der von REINIRKENS (1992) untersuchten Straßenstandorte waren leicht erhöht: Nur vier von zwölf Maximalwerten überschritten den als Beginn einer anthropogenen Beeinträchtigung definierten Referenzwert. Das gleiche gilt für die ermittelten Zinkgehalte, von denen nur drei Maximalwerte den als Beginn einer anthropogenen Beeinträchtigung definierten Referenzwert überschritten.

Die Cadmiumgehalte im Sickerwasser der von REINIRKENS (1992) untersuchten Straßenstandorte waren deutlich erhöht: Vier von zwölf Mittelwerten überschritten den als Beginn einer anthropogenen Beeinträchtigung definierten Referenzwert und sechs von zwölf Maximalwerten überschritten den Grenzwert der Trinkwasserverordnung.

Tabelle 4-11: Blei, Cadmium, Zink und Kupfer im maximal belasteten Sickerwasser (Entwässerungsgraben) der B 58 (DTV=10600), der B 63 (DTV=12700) und der L 403 (DTV=11400) im Vergleich zum TrinkwV-Grenz- bzw. Richtwert und dem von SCHLEYER & KERNDORFF (1992) als Beginn einer anthropogenen Beeinflussung definierten geogenen Stoffgehalten im Grundwasser westdeutscher Trinkwasserressourcen in Lockersedimenten - Daten aus REINIRKENS (1992)

Standort	µg/l Blei im Sickerwasser				
<i>Straße, Seite, Tiefe/Boden</i>	Minimal	Maximal	Mittelwert	TrinkwV-Grenzwert	anthr. Beeinflussung
B58-Nord, 10cm/Ah	+	-	-	40	6
B58-Nord, 45cm/IIBv	-	-	-	40	6
B58-Süd, 14cm/Ah	-	-	-	40	6
B58-Süd, 45cm/IIBv	-	-	-	40	6
B63-West, 7cm/A	-	11	0,4	40	6
B63-West, 27cm/Sw	-	-	-	40	6
B63-Ost, 12cm/A	-	1,3	~0	40	6
B63-Ost, 30cm/IISw	-	5,5	0,2	40	6
L403-Nord, 20cm/Ah	-	-	-	40	6
L403-Nord, 50cm/IIBv	-	-	-	40	6
L403-Süd, 20cm/Ah	-	-	-	40	6
L403-Süd, 46cm/yB	-	1,7	0,1	40	6

Standort	µg/l Cadmium im Sickerwasser				
<i>Straße, Seite, Tiefe/Boden</i>	Minimal	Maximal	Mittelwert	TrinkwV-Grenzwert	anthr. Beeinflussung
B58-Nord, 10cm/Ah	-	6,4	0,3	5	0,4
B58-Nord, 45cm/IIBv	-	0,5	0,1	5	0,4
B58-Süd, 14cm/Ah	-	0,9	0,1	5	0,4
B58-Süd, 45cm/IIBv	-	0,5	0,1	5	0,4
B63-West, 7cm/A	-	40	1,5	5	0,4
B63-West, 27cm/Sw	-	1,1	0,2	5	0,4
B63-Ost, 12cm/A	-	2,4	0,2	5	0,4
B63-Ost, 30cm/IISw	-	24,8	1	5	0,4
L403-Nord, 20cm/Ah	-	9,2	0,6	5	0,4
L403-Nord, 50cm/IIBv	-	5,5	0,4	5	0,4
L403-Süd, 20cm/Ah	-	1,1	0,1	5	0,4
L403-Süd, 46cm/yB	-	158,2	6,7	5	0,4

Standort	mg/l Zink im Sickerwasser				
<i>Straße, Seite, Tiefe/Boden</i>	Minimal	Maximal	Mittelwert	TrinkwV-Richtwert	anthr. Beeinflussung
B58-Nord, 10cm/Ah	-	0,2	-0	5	0,31
B58-Nord, 45cm/IIBv	-	0,2	-0	5	0,31
B58-Süd, 14cm/Ah	-	0,2	0,1	5	0,31
B58-Süd, 45cm/IIBv	-	0,2	-0	5	0,31
B63-West, 7cm/A	-	0,4	-0	5	0,31
B63-West, 27cm/Sw	-	0,2	-0	5	0,31
B63-Ost, 12cm/A	-	0,5	-0	5	0,31
B63-Ost, 30cm/IISw	-	0,8	-0	5	0,31
L403-Nord, 20cm/Ah	-	0,2	-0	5	0,31
L403-Nord, 50cm/IIBv	-	0,2	-0	5	0,31
L403-Süd, 20cm/Ah	-	0,1	-0	5	0,31
L403-Süd, 46cm/yB	-	0,3	-0	5	0,31

Standort	µg/l Kupfer im Sickerwasser				
<i>Straße, Seite, Tiefe/Boden</i>	Minimal	Maximal	Mittelwert	TrinkwV-Richtwert	anthr. Beeinflussung
B58-Nord, 10cm/Ah	-	17,7	7,2	3000	20
B58-Nord, 45cm/IIBv	0,2	21,1	3,8	3000	20
B58-Süd, 14cm/Ah	1,7	22,5	8,1	3000	20
B58-Süd, 45cm/IIBv	-	16,6	2,6	3000	20
B63-West, 7cm/A	-	185,7	16,1	3000	20
B63-West, 27cm/Sw	-	5,8	1,7	3000	20
B63-Ost, 12cm/A	-	5,7	2,1	3000	20
B63-Ost, 30cm/IISw	-	3,3	1,2	3000	20
L403-Nord, 20cm/Ah	3,5	38,4	19,2	3000	20
L403-Nord, 50cm/IIBv	-	5,3	2,8	3000	20
L403-Süd, 20cm/Ah	2,4	13,7	9	3000	20
L403-Süd, 46cm/yB	1,2	6,3	3,3	3000	20

* - = nicht bestimmbar, da unterhalb der Nachweisgrenze

TEGETHOF & CICHOS (1994) untersuchten oberflächennahe Sickerwässer in Bankettböden stark befahrener Bundesautobahnen auf deren Gehalte an Blei, Cadmium, Zink und Kupfer. Von April bis Juni 1991 wurden an je acht Entnahmetagen in drei Tiefenstufen Sickerwasserproben gewonnen, wobei die gleiche Probennahmetechnik wie in REINIRKENS (1992) angewandt wurde, so daß ein Vergleich der beiden Untersuchungen möglich ist.

Die Blei-, Cadmium-, und Zinkgehalte im Sickerwasser der von TEGETHOF & CICHOS (1994) untersuchten Bankettböden von stark befahrenen Bundesautobahnen waren erhöht: 11 von 12 Bleigehaltsmittelwerte, 7 von 12 Cadmiumgehaltsmittelwerte und 6 von 12

Zinkgehaltsmittelwerte überschritten die als Beginn einer anthropogenen Beeinflussung definierten Grenzwerte. Die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990) wurden jedoch nicht überschritten. Die Kupfergehalte waren leicht erhöht: 3 von 12 Kupfergehaltsmittelwerten überschritten die als Beginn einer anthropogenen Beeinflussung definierten Grenzwerte.

Tabelle 4-12: Durchschnittliche Schwermetallgehalte im Sickerwasser von Bankettböden der stark befahrenen Bundesautobahnen A 555 (DTV=52500), A 61 (DTV=50200), A 59 (DTV=63800) im Vergleich zum TrinkwV-Grenz- bzw. Richtwert und dem von SCHLEYER & KERNDORFF (1992) als Beginn einer anthropogenen Beeinflussung definierten geogenen Stoffgehalten in Lockersedimenten-Daten aus TEGETHOF & CICHOS (1994)

Metall	Tiefe	Untersuchungsstrecke				Mittelwert (n=4x8=32)	TrinkwV- Grenz-/ Richtwert	anthr. Beeinflussung
	cm	A 555	A 555	A 61	A 59			
Blei	20	10,0	7,7	32,7	31,4	20,5	40	6
	70	7,2	5,6	7,3	8,6	7,2	40	6
	120	10,8	37,0	7,3	22,0	19,3	40	6
	Mittelwert (n=3x4x8=96)					15,7	40	6
Cadmium	20	1,3	1,7	1,1	2,3	1,6	5	0,4
	70	0,3	0,1	0,5	0,3	0,3	5	0,4
	120	0,3	0,0	0,5	0,9	0,4	5	0,4
	Mittelwert (n=3x4x8=96)					0,8	5	0,4
Zink	20	327	371	421	430	387	5000	310
	70	241	133	131	367	218	5000	310
	120	424	165	181	129	225	5000	310
	Mittelwert (n=3x4x8=96)					277	5000	310
Kupfer	20	15,3	26,8	55,0	47,1	36,0	3000	20
	70	8,6	12,9	6,9	15,6	11,0	3000	20
	120	9,5	6,6	6,5	11,9	8,6	3000	20
	Mittelwert (n=3x4x8=96)					18,5	3000	20

Anhand der Untersuchungen des Fahrbahnabflusses der Bundesautobahnen A 81 und A 6 von KRAUTH & KLEIN (1982) kann aufgrund der ähnlichen Verkehrsbelastung und Witterungsverhältnisse das Rückhalte- und Reinigungsvermögen der obersten Bodenschicht für die Stoffe Cadmium, Kupfer und Zink in den Untersuchungen von TEGETHOF & CICHOS (1994) abgeschätzt werden. Zum Ausgleich der je nach Entnahmetiefe (20, 70 und 120 cm) schwankenden Stoffgehalte im Sickerwasser wird der Mittelwert je Straßenstandort der Untersuchungen von TEGETHOF & CICHOS (1994) dem zugehörigen aus KRAUTH & KLEIN (1982)

abgeleiteten Referenzwert gegenübergestellt. Als Referenzwert wird der jeweilige Mittelwert des Stoffgehaltes im Fahrbahnabfluß der A 81 und der A 6 verwendet und an die Verkehrsstärke der Vergleichsstrecke angepaßt.

Die Bleigehalte können nicht berücksichtigt werden, da der Marktanteil verbleiten Benzins (Hauptquelle straßenspezifischer Bleiemissionen) während der Probennahmen von TEGETHOF & CICHOS (1994) im Jahr 1991 nur noch ca. 41,5 % gegenüber 100 % bei KRAUTH & KLEIN (1982) betrug.

Tabelle 4-13: Abschätzung zur Retention straßenspezifischer Stoffe innerhalb der obersten Bodenschicht Fahrbahnabfluß-Daten aus KRAUTH & KLEIN (1982), Sickerwasser-Daten aus TEGETHOF & CICHOS (1994)

Untersuchungsstrecke:	A 555	A 555	A 61	A 59	Mittelwert
µg/l Cadmium im Sickerwasser	0,6	0,6	0,7	1,2	0,8
µg/l Cadmium im Fahrbahnabfluß	7,2	7,2	6,8	8,7	7,5
Retention	91,7%	91,7%	89,7%	86,2%	89,8%
µg/l Kupfer im Sickerwasser	11,1	15,4	22,8	24,9	18,6
µg/l Kupfer im Fahrbahnabfluß	127,5	127,5	121,9	155	133
Retention	91,3%	87,9%	81,3%	83,9%	86,1%
µg/l Zink im Sickerwasser	330,7	223,0	244,3	308,7	276,7
µg/l Zink im Fahrbahnabfluß	583,9	583,9	558,3	709,6	608,9
Retention	43,4%	61,8%	56,2%	56,5%	54,5%

Bei den von TEGETHOF & CICHOS (1994) untersuchten Bankettböden an Bundesautobahnen handelt es sich um künstlich entstandene und wegen der bautechnischen Drainage-, Frostsicherheits- und Tragfähigkeitsanforderungen überwiegend grobkörnige, stark durchlässige Böden mit relativ geringem Rückhaltevermögen für straßenspezifische Schwermetalle. Dennoch ergibt die durchgeführte Abschätzung mit durchschnittlich ca. 90% und ca. 86% ein sehr großes Rückhaltevermögen für Cadmium und Kupfer und mit durchschnittlich ca. 55% ein großes Rückhaltevermögen für Zink.

Wegen der erheblich unterschiedlichen Verkehrsbelastung, Fahrdynamik und Straßenquerschnittsgestaltung von Bundes- und Landesstraßen wurde die obige Abschätzung nicht für die Daten aus REINIRKENS (1992) angewandt.

Ein Vergleich der Untersuchungen von REINIRKENS (1992) und von TEGETHOF & CICHOS (1994) ergibt deutlich höhere Gehalte der untersuchten Schwermetalle im Sickerwasser der Bundesautobahnen gegenüber den Bundes- und Landesstraßen, die in erster Linie auf die an den Bundesautobahnen etwa um den Faktor fünf höhere Verkehrsbelastung zurückzuführen sind. Aufgrund der starken Schwankungen der jeweils ermittelten Gehalte, der unterschiedlichen Probenanzahl (REINIRKENS 1992: n=20...39; TEGETHOF & CICHOS 1994: n=8) und anderer, im einzelnen nicht identifizierbarer Unterschiede der standortspezifischen Randbedingungen, wie Witterung, Bodenaufbau, Straßenquerschnittsgestaltung und Fahrdynamik, ist ein rechnerischer Vergleich der Meßwerte nicht sinnvoll.

4.1.3.4 Durchgehende Untersuchung der Stoffgehalte (Fahrbahnabfluß, Sickerwasser, Grundwasser)

Von den im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten Forschungsarbeiten führten lediglich GOLWER & SCHNEIDER (1983 a,b) parallele Untersuchungen des Fahrbahnabflusses, des Sickerwassers und des Grundwassers durch. Einschränkend ist jedoch anzumerken, daß die Grundwasseruntersuchungen im Bereich eines Sickerbeckens erfolgten, dessen Sohle durch eine 5 bis 23 cm mächtige Schlammschicht bedeckt war, so daß eine Versickerung nur an der Böschung möglich war. Dies dürfte infolge Sedimentation, Abbau- und Umwandlungsvorgängen während der Verweildauer im Sickerbecken zu einer erheblichen "Vorreinigung" des schadstoffbelasteten Fahrbahnabflusses geführt haben. Bei einem Flurabstand von ca. 8,6 m im Bereich des Sickerbeckens bestand die Grundwasserüberdeckung aus Wechselfolgen von Fein- bis Grobsanden, kiesigen Sanden und sandigen Kiesen, so daß die Untergrundbeschaffenheit gemäß DVGW-Arbeitsblatt W 101 (1975) als "günstig" zu bewerten ist. In Tabelle 4-14 sind die Mittelwerte straßenspezifischer Stoffgehalte im Fahrbahnabfluß, Sickerbecken und Grundwasser der A 3 in Relation zum Gehalt im Fahrbahnabfluß zusammengestellt. Von den genannten Stoffen überschritten die Blei-, Cadmium- und CSB-Gehalte im Fahrbahnabfluß den jeweiligen Grenzwert der Trinkwasserverordnung.

Tabelle 4-14: Mittelwerte straßenspezifischer Stoffgehalte im Fahrabfluß, Sickerbecken und Grundwasser der A 3 in Relation zum Gehalt im Fahrabfluß (in %) - Daten aus GOLWER & SCHNEIDER (1983a)

	Blei	Cadmium	Chrom	Kupfer	Nickel	Zink	CSB	Petrolether-Extrakt
Fahrabfluß	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%	100%
Sickerbecken	35%	34%	53%	51%	44%	21%	14%	14%
Grundwasser	3%	5%	33%	55%	22%	36%	3%	2%

Abgesehen von Kupfer und Zink nahmen die Stoffkonzentrationen vom Sickerbecken zum Grundwasser deutlich ab, was überwiegend auf eine starke Verdünnung im durchschnittlich ca. 15 m mächtigen Grundwasserleiter zurückzuführen sein dürfte. Rückhalte- und Reinigungsprozesse innerhalb der Grundwasserüberdeckung bleiben hierbei unklar, da das Sickerwasser nicht untersucht wurde. Weiterhin ist zu beachten, daß im vom Sickerbecken unbeeinflussten Grundwasser (Brunnen 4) bereits nennenswerte Gehalte wassergefährdender Stoffe vorliegen, was angesichts der Mächtigkeit des Grundwasserleiters von ca. 15 m auf erhebliche nicht straßenspezifische Stoffeinträge (Hintergrundbelastungen) im Zusammenhang mit dem nahegelegenen Großflughafen Frankfurt/Main schließen läßt.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, daß das Sickerbecken mit einer Breite von ca. 100 m senkrecht zur Grundwasserströmungsrichtung einen ca. 3 km langen Autobahnabschnitt entwässert (Versickerungsfläche : Entwässerungsfläche = 1:15), so daß gegenüber einer breitflächigen Entwässerung über den Fahrabfluß eine entsprechend konzentriertere, direkte Stoffeinträge in die Grundwasserüberdeckung gegeben ist. Es ist anzunehmen, daß bei breitflächiger Entwässerung über den Fahrabfluß erheblich geringere Stoffgehalte im Grundwasser ermittelt worden wären.

4.1.3.5 Mobilität der Schwermetalle im Untergrund

Im Sinne des präventiven Grundwasserschutzes ist zu prüfen, ob die in den oberen Bodenschichten angereicherten straßenspezifischen Schwermetalle langfristig zurückgehalten werden können.

Nach UNGER & PRINZ (1992) erfolgt eine Verlagerung von Schwermetallen in Böden in Abhängigkeit vom pH-Wert, Humusgehalt, Tongehalt, Gehalt an amorphen pedogenen Oxiden, Salzgehalt und Gesamtschwermetallgehalt. Insgesamt wird die Löslichkeit straßenspezifischer Schwermetalle im Boden entscheidend vom pH-Wert beeinflusst (GOLWER 1991, UNGER & PRINZ 1992). Nach Blume & Brümmer (1987, zit. in UNGER & PRINZ 1992) sind die nachfolgend genannten Schwermetalle ab den in Klammern angegebenen pH-Werten in Böden stark gebunden bzw. schwer lösbar:

Cadmium (6,0); Zink, Nickel (5,5); Kupfer, Chrom (4,5); Blei (4,0)

In der Literatur werden diesbezüglich in Abhängigkeit von der Nutzung die in Tab. 4-15 zusammengestellten pH-Wertebereiche im oberflächennahen Sickerwasser angegeben. Die jeweilige Bodennutzung hat einen maßgeblichen Einfluß auf den pH-Wert und damit auf die Verlagerung eingetragener Schwermetalle: Unabhängig von der Bodenart wiesen alle Waldböden einen pH-Wert < 5 , die landwirtschaftlich genutzten Böden pH-Werte zwischen 5,2 und 8,2 und die straßenbeeinflussten Bankett- und Fahrbahnrandböden pH-Werte zwischen 6,3 und 8,9 auf. Nach REINIRKENS (1992) sind daher in landwirtschaftlich genutzten Gebieten zusätzliche straßenspezifische Schwermetallbelastungen für das Sickerwasser nicht zu erwarten, wenn der Fahrbahnabfluß über Straßengräben und Mulden versickert wird und keinen direkten Kontakt zum Grundwasser hat. In Forsten und Wäldern sind wegen des geringen pH-Wertes jedoch erhöhte Verlagerungen der Schwermetalle zu befürchten, wie die Messungen von REINIRKENS (1992) an der B 58 zeigen (s. Tabelle 4-15, nächste Seite).

Untersuchungen mit verschiedenen Extraktionsmitteln (Harrison et al. 1981, zit. in GOLWER 1991) ergaben, daß Blei, Cadmium und Zink vorwiegend in der Fraktion der Carbonate und Fe-, Mn-Oxide festgelegt sind, Kupfer an organische Bestandteile gebunden und Cadmium zu einem hohen Prozentsatz auch in der austauschbaren Form enthalten ist. Daraus geht hervor, daß Cadmium schneller remobilisiert und aus Böden ausgewaschen werden kann als andere Schwermetalle.

Tabelle 4-15: pH-Wertebereiche in oberflächennahen Sickerwässern in Abhängigkeit von der Bodenart und -nutzung

Bodenart	Tiefe	Nutzung	pH-Wert	Quelle
Braunerde, Bv	30 cm	Wald	< 5	Miehlich & Gröngöft 1988, zit. in REINIRKENS 1992
Podsol, Aeh	30 cm	Wald	< 3	
Pararendzina, AhC	30 cm	unbek.	7-9	
Podsol, IIBv	35 cm	Wald	< 5	
Braunerde, Ol/Oh	unbek.	Wald	< 5	
Braunerde, IIBv	80 cm	Wald	< 5	
Moor marsch, Apg	20 cm	unbek.	5-6	
Auftragsboden, jY	30 cm	Hafenschlickspülfeld (Acker)	< 5	
Auftragsboden	120 cm	Straßenentwässerungsgraben	7,4	GOLWER & SCHNEIDER 1983a
Braunerde, Ap	26 cm	Acker (in Straßennähe)	7,4	REINIRKENS 1992
Braunerde, rAp	25 cm	Gehölz (in Straßennähe)	4,4	
Phytosol, YG	38 cm	Weide (in Straßennähe)	7,5	
Auftragsboden, Ah	20 cm	Straßengraben	7,7	
Oberboden, j Y Ah	0-32 cm	BAB-Bankettböden	7,7-8	CICHOS 1992
Frostschuttschicht, j Y Ah	20-110 cm	BAB-Frostschuttschicht	7,5-8,9	
wasserstauer Horizont, j y III Sd	90-140 cm	BAB-Untergrundplanum	7-8,8	
Oberboden	5-20 cm	Acker	7,9-8,2	
Oberboden, Ah	0-5 cm	Fahrbahnrand der BAB 5 (0,1 m entfernt)	6,8	UNGER & PRINZ 1992
AhjYICv	5-20 cm		6,3	
IIIfAh	20-30 cm		6,8	
IIAYICv	30-40 cm		6,9	
IIjYICv	40-50 cm		6,3	
Oberboden, Ah	0-5 cm	Viehweide (10 m von der BAB 5 entfernt)	6,2	
Ah	5-10 cm		5,2	
Ah	10-20 cm		5,5	

GOLWER & SCHNEIDER (1983a) untersuchten die Löslichkeit des im Schlamm des Sickerbeckens der A 3 angereicherten Bleis in Kaltwasser (20° C; ohne, mit 2 mg und mit 20 mg Huminsäure), in Heißwasser (90° C; ohne, mit 1 mg und mit 5 mg Huminsäure), in Schwefelsäure, in organischen Lösungsmitteln (Methyl-iso-butyl-Keton) und in Ammoniumacetat. Die Untersuchungen ergaben, daß die im Schlamm des Sickerbeckens angereicherten Bleiverbindungen nicht in wasserlöslicher sondern in säurelöslicher Form vorlagen, so daß es sich um schwer lösliches Bleisulfid handelt. Nach GOLWER & SCHNEIDER (1983a) ist daher

unter natürlichen Bedingungen nur bei einem erhöhten Gehalt an gelösten Huminsäuren des Wassers eine geringe Zunahme der Bleilöslichkeit möglich.

Nach REINIRKENS (1992) sind die verkehrsbedingten Schwermetalle nicht abbaubar, da sie überwiegend als Partikel in nicht löslichen Verbindungen eingetragen werden. Sie reichern sich in den Oberböden der Straßenrandbereiche an und sind in der Regel nicht mobilisierbar. Eine Verlagerung mit dem Sickerwasser findet bei Blei, Zink und Cadmium nicht statt. Kupfer wird wegen seiner anderen Eigenschaften ausgewaschen. Austragspfade ergeben sich für die persistenten Schwermetalle nur über die Pflegemaßnahmen des Straßenraumes und eventuell zu minimalen Teilen über die Flora und Fauna. Die Akkumulation aller Stoffe findet im unmittelbaren Straßenraum statt. Die höchsten Belastungen treten in den Straßengräben und Mulden auf.

GOLWER & SCHNEIDER (1983b) konnten in ihren 5-jährigen Untersuchungen des Grundwassers unterhalb eines Sickerbeckens der stark befahrenen BAB A 3 keine Hinweise für eine Remobilisierung von Schwermetallspuren finden. Es ergaben sich zwar erhöhte Konzentrationen einiger anorganischer Spurenstoffe, diese lagen jedoch immer unter den Grenzwerten für Roh- und Trinkwasser. In den durchgeführten Untersuchungen war die Reichweite dieser Schwermetallspuren auf 100 m beschränkt.

CICHOS (1992) hat die vertikale Verlagerung gelöster Schwermetalle im Sickerwasser von Bankettböden stark befahrener Bundesautobahnen ($DTV > 50.000$) untersucht. Dabei wurden kurzfristige und geringfügige Schwermetallkonzentrationserhöhungen im Sickerwasser festgestellt, die jedoch etwa um den Faktor 1000 geringer waren als die Schwermetallgehalte in den Bankettböden. TEGETHOF & CICHOS (1994) kommen bei der Auswertung der Untersuchungen von CICHOS (1992) zu dem Ergebnis, daß Verunreinigungen des Grundwassers durch straßenspezifische Schwermetalle, die über die für den Gebrauch als Trinkwasser geforderten Werte hinausgehen, nicht zu befürchten sind.

4.1.4 Zusammenfassung und Folgerungen zu ständigen Einwirkungen

Im folgenden sind die wesentlichen Ergebnisse (mit • gekennzeichnet) der zu ständigen straßenspezifischen Einwirkungen auf das Grundwasser durchgeführten Literatur- und Datenauswertung zusammengefaßt (Folgerungen sind mit ► gekennzeichnet):

- Straßenspezifische Schwermetalle liegen im Fahrbahnabfluß überwiegend als Feststoffpartikel oder an Feststoffpartikel gebunden vor.
- Durch Sedimentation und/oder Filtration können die straßenspezifischen Schwermetalle zurückgehalten werden.
- Hintergrundbelastungen aus anderen nicht straßenspezifischen, anthropogenen Emittenten können in Abhängigkeit von der Siedlungs- und Gewerbestruktur der Umgebung einen erheblichen Anteil an den Stoffgehalten im Fahrbahnabfluß haben.
- Für eine zutreffende Risikobeurteilung sollten die Hintergrundbelastungen ermittelt und berücksichtigt werden.
- Die Konzentrationen der Stoffe aus ständigen Einwirkungen im Fahrbahnabfluß unterliegen sehr großen, von der Intensität des einzelnen Niederschlagsereignisses abhängigen Schwankungen.
- Der Umfang von in-situ-Untersuchungen (Dauer, Probenanzahl) sollte einen Ausgleich kurzfristiger Witterungsschwankungen ermöglichen.
- Ein Vergleich der mittleren Stoffgehalte im Fahrbahnabfluß von Bundesautobahnen mit großer Verkehrsbelastung mit den Grenz- und Richtwerten der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990) ergibt bei Chrom, Kupfer, Nickel und Zink keine, bei Cadmium eine geringfügige und bei CSB und den Mineralölkohlenwasserstoffen eine erhebliche Überschreitung.
- Für den Abbau von Mineralölkohlenwasserstoffen im Fahrbahnabfluß sollten bei breitflächiger Entwässerung über den Fahrbahnrand geeignete Milieubedingungen - v.a. ausreichende Verweildauer des Sickerwassers und Sauerstoffzufuhr - gegeben sein.
- Im Rahmen von Korrelationsuntersuchungen (*SPEARMAN*-Rangkorrelation) ergeben sich signifikante lineare Abhängigkeiten zwischen den einzelnen straßenspezifischen Stofffrachten je Niederschlagsereignis, das heißt die zeitlichen Verläufe der einzelnen Stoffgehalte im Fahrbahnabfluß ähneln einander.
- Für Langzeituntersuchungen können im Rahmen von Voruntersuchungen Regressionsgleichungen zwischen einem "Leitparameter" - wie beispielsweise die mit geringem Aufwand zu ermittelnden abfiltrierbaren Stoffe - und weiteren relevanten Parametern ermittelt werden, so daß im weiteren nur noch der "Leitparameter" zu bestimmen wäre.
- Bei gleichmäßigen Niederschlagsabflüssen treten die maximalen Stoffgehalte zu Beginn des Niederschlagsereignisses auf. Bei ungleichmäßigen Niederschlagsabflüssen treten die maximalen Stoffkonzentrationen zusammen mit dem maximalen Abfluß auf. Die monatlichen Niederschlagsabflußsummen und die zugehörigen Stofffrachtsummen stehen in engem Zusammenhang.

- Absetz- und Rückhaltebecken sind in Abhängigkeit von den standortspezifischen Randbedingungen zu dimensionieren.
- Bei den meisten straßenspezifischen Stoffen aus ständigen Einwirkungen liegt ein signifikanter linearer Zusammenhang zur Verkehrsstärke vor.
- Die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV in Kfz/24h) eignet sich als Bestimmungsgröße zur indirekten Quantifizierung ständiger Einwirkungen.
- Ein Einfluß der Fahrdynamik war für die Straßenkategorien Bundesautobahn, Bundes-, Landes- und Kreisstraßen bei ansonsten ähnlichen Randbedingungen nicht erkennbar.
- Ein nennenswerter Einfluß der Fahrdynamik dürfte an Steigungsstrecken und im Bereich von Knotenpunkten gegeben sein.
- Der Fahrbahnrand und die Entwässerungsmulde bis ca. 2 m Abstand vom Fahrbahnrand sind der durch Fahrbahnabfluß und Spritzwasser am stärksten belastete Bereich. Bei ungebündelter Entwässerung und annähernd geländegleicher Gradienten ergibt eine Potenzfunktion vom Typ $y = A \cdot x^{-b}$ im Rahmen einer nichtlinearen Regression die beste Anpassung an den Verlauf der oberirdischen Verlagerung der Stoffe aus ständigen Einwirkungen.
- Bei ungebündelter Entwässerung und annähernd geländegleicher Gradienten kann der oberirdischen Verlagerung näherungsweise die Potenzfunktion $I_{\text{Verl}} = 0,5 \cdot \text{Abstand}^{0,3}$ (I_{Verl} = relative Verlagerungsintensität bezogen auf den Maximalwert am Fahrbahnrand) zugrunde gelegt werden.
- Innerhalb der obersten Bodenschicht wird bereits ein großer Teil der Stoffe aus ständigen Einwirkungen zurückgehalten. Nur ein sehr geringer Teil der straßenspezifischen Schwermetalle wird mit dem oberflächennahen Sickerwasser verlagert.
- Eine breitflächige Entwässerung und Versickerung des Fahrbahnabflusses (Begrenzung der Stofffrachten) über bewachsene Seitenstreifen ist grundsätzlich vorteilhaft.
- Festgesteine sind im Vergleich zu Lockergesteinen als weniger schützend zu bewerten, da die Wasserbewegung über Klüfte bzw. Karsthohlräume abläuft. Dies wirkt sich im Vergleich zu Lockergesteinen gleicher Systemdurchlässigkeit, das heißt bei gleichem Massentransport je Fläche und Zeit ($= q$ in $\text{m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{s}$), nachteilig auf das Rückhalte- und Reinigungsvermögen klüftiger Festgesteine für Stoffe aus ständigen Einwirkungen aus:
 - verminderte Filtration wegen größerer Durchmesser der einzelnen durchströmten Porenkanäle
 - verminderte Sorption wegen geringeren Sorptionsflächen und kürzerer Verweildauer
 - Verringerung von Abbau und Umwandlung aufgrund kürzerer Verweildauer in Strömungsrichtung

4.2 Risikobetrachtungen zu vorübergehenden Einwirkungen (Tausalzstreuung)

4.2.1 Charakterisierung vorübergehender Einwirkungen

4.2.1.1 Herkunft

Um straßenspezifische Salzeinträge in Boden und Grundwasser von anderen anthropogenen sowie von geogenen Salzeinträgen abgrenzen zu können, wird im folgenden ein Überblick über die Herkunft erhöhter Salzgehalte gegeben.

Nach BROD (1993) kann das Grundwasser je nach Gesteinsart des Grundwasserleiters bereits durch geogene Salzgehalte vorbelastet sein. Bei der Analyse und Bewertung von Grundwasserproben im Hinblick auf straßenspezifische Salzeinträge müssen diese geogenen Hintergrundgehalte berücksichtigt werden. HÖLTING (1991) gibt folgende Schwankungsbreiten der geogenen Natrium- und Chloridgehalte im Grundwasser verschiedener Gesteinsarten an:

Tabelle 4-16: Na- und Cl-Gehalte in Grundwässern in der Bundesrepublik Deutschland - aus HÖLTING (1991)

Gesteinsart des Grundwasserleiters	mg Na/l im Grundwasser		mg Cl/l im Grundwasser	
	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert
Magmatisches / metamorphes Gestein (Kristallin), Quarzit	0,6-10	8,1	2,5-15	9
Vulkanit (Diabas, Basalt), Tuffit	3,9-95	49,5	3,0-4,0	3,5
Sandstein, Konglomerat	1,3-23	8,2	1,8-71	14,8
Grauwacken-, Ton- und Kieselchiefer	3,4-33	12,1	6,8-35	12,3
Carbonatgestein (Kalk- / Mergelstein)	3,0-30,5	9,5	7,1-47	21,7
Tertiärer und pleistozäner Sand, Mergel	3,9-30	14,9	0-25	16,8
Ton- / Schluffstein	3-10,2	6,5	7-20,6	13,4
Sand, Meerwassereinfluß	3675		6026	

Der tatsächlich vorliegende Salzgehalt in Boden und Grundwasser kann neben der geogenen Vorbelastung und der Tausalzstreuung im Straßenverkehr auch aus anderen anthropogenen

Quellen stammen. BISCHOFBERGER et al. (1986) nennen folgende anthropogene Salzeinträge:

- landwirtschaftliche Düngung
- Verunreinigungen des Niederschlags
- Einleitung von Grubenwässern
- Abwässer aus dem Kalibergbau
- künstliche Grundwasseranreicherung
- Sickerwasser aus Abfalldeponien
- unsachgemäße Lagerung und Transport von Chemikalien.

KRAUTH & KLEIN (1982) haben an der A 81 und der A 6 parallel zur Chloridfracht im Fahrbahnabfluß auch die Chloridfracht in Regen und Staub in größerer Entfernung vom Fahrbahnrand gemessen, so daß der Anteil der Hintergrundbelastung aus anderen nicht straßen-spezifischen anthropogenen Quellen im Fahrbahnabfluß abgeschätzt werden kann:

Tabelle 4-17: Herkunft der Chloridgehalte im Fahrbahnabfluß der A 81 und der A 6 - errechnet aus den Messungen von KRAUTH & KLEIN (1982)

Untersuchungsstrecke	Herkunft der Chloridgehalte im Fahrbahnabfluß		
	Regen	Staub (Luft)	Tausalzstreuung
A 81	1,6%	0,2%	98,2%
A 6	0,3%	0,2%	99,5%

Im Fahrbahnabfluß der untersuchten Bundesautobahnen A 81 und A 6 konnten die Chloridgehalte nahezu vollständig auf die Tausalzstreuung zurückgeführt werden.

4.2.1.2 Tausalzanwendung in Deutschland

Als Tausalz werden im Straßenwinterdienst vergälltes Stein- und Siedesalz verwendet. Bezüglich der Auswirkungen von Schadstoffen im Wasser bewertet Quentin (1972 - zit. in BROD 1993) Natriumchlorid als störenden Stoff. Laut UBA (1991a) kann NaCl als "*im allgemeinen nicht wassergefährdend*" (Wassergefährdungsklasse 0) eingestuft werden. Nach BROD (1995) werden Natrium und Chlorid als toxikologisch nicht bedeutsam angesehen, jedoch ist ab 250 mgCl/l mit Geschmacksbeeinträchtigungen zu rechnen.

Der Tausalzverbrauch hängt in erster Linie von den Witterungsbedingungen und von der befestigten, aufzutauenden Fahrbahnfläche (Straßenquerschnitt) ab.

Weitere Einflußgrößen sind:

- Verkehrsaufkommen
- Ausbringungstechnik (Dosiereinrichtung)
- Organisation des Winterdienstes

Seit Anfang der 60er Jahre ist der Tausalzverbrauch in Deutschland (West) mit Spitzenwerten in den Wintern 69/70 und 78/79 stark gestiegen (s. Abb. 4-14). Seit Mitte der 80er Jahre ist der Tausalzverbrauch - bedingt durch drei aufeinanderfolgende milde Winter - jedoch wieder rückläufig. Dieser Trend scheint sich, abgesehen von witterungsbedingten Schwankungen, fortzusetzen, obwohl der Kfz-Bestand und die Fahrleistung eine steigende Tendenz aufweisen. Neben dem dominierenden Witterungseinfluß ist dies auf verbesserte Dosierung und gezieltere Ausbringung zurückzuführen. Aufgrund dieser technischen und organisatorischen Fortschritte dürfte sich der Tausalzverbrauch auf mittlerem Niveau einpendeln, obwohl das Verkehrsaufkommen auf den außerörtlichen Straßen weiter steigt (BROD 1993).

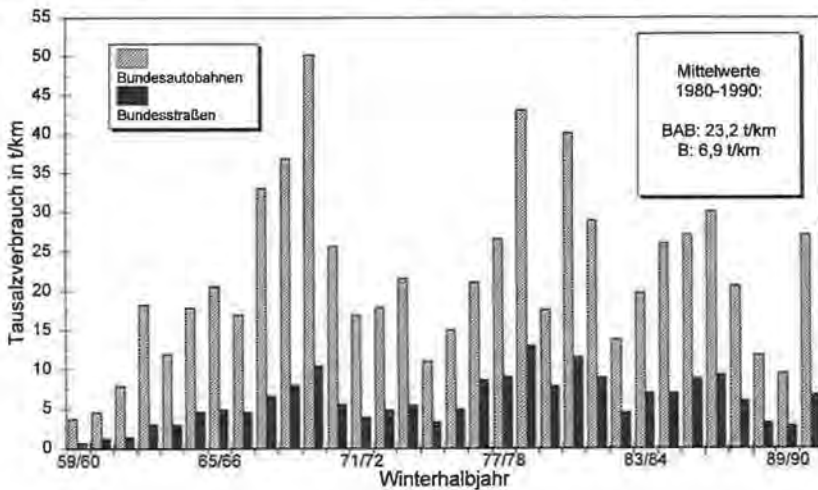


Abb. 4-14: Gesamtverbrauch an Auftausalz (t/km · Winter) auf BAB und B in Deutschland (West) im Zeitraum 1959-1991 (Bundesverkehrsministerium - Daten aus BROD 1993)

BREITENSTEIN (1995, 1996) hat mit dem Streusalzverbrauch auf Bundesautobahnen und den folgenden Klimadaten von 10 westdeutschen Wetterstationen* zu 13 Winterhalbjahren (1968/69 bis 1980/81) eine Korrelationsanalyse durchgeführt:

- Mittlere Lufttemperatur T in °C,
- Niederschlagshöhe N in mm,
- Anzahl der Tage mit Schneefall SF über mind. 0,1 mm,
- Anzahl der Tage mit einer geschlossenen Schneedecke SD über mind. 1 cm,
- Anzahl der Frosttage FT (Tiefstwert der Lufttemperatur unter 0 °C) und
- Anzahl der Eistage ET (Höchstwert der Lufttemperatur unter 0 °C).

Die Wahl des Zeitraumes von 1968/69 bis 1980/81 beruhte auf der durch die Korrelationsanalyse bestätigten These, daß in diesem Zeitraum der tatsächliche Tausalzverbrauch der theoretisch erforderlichen Menge (hypothetischer Streusalzverbrauch) entsprach. Zuvor war wegen der erst allmählich einsetzenden Tausalzanwendung und danach wegen des gestiegenen Umweltbewußtseins und Kostendrucks jeweils der tatsächliche Tausalzverbrauch geringer als der theoretisch erforderliche Tausalzverbrauch. Folgende Korrelationskoeffizienten wurden ermittelt:

Tabelle 4-18: Korrelation des Streusalzverbrauchs mit verschiedenen Wetterdaten der Winterhalbjahre 1968/69 bis 1980/81 (aus BREITENSTEIN 1996)

	T	N	SF	SD	FT	ET	SV
T	1	0,282	-0,631	-0,812	-0,944	-0,896	-0,749
N	0,282	1	0,342	0,12	-0,331	-0,121	0,18
SF	-0,631	0,342	1	0,93	0,656	0,793	0,954
SD	-0,812	0,12	0,93	1	0,8	0,942	0,969
FT	-0,944	-0,331	0,656	0,8	1	0,851	0,786
ET	-0,896	-0,121	0,793	0,942	0,851	1	0,877
SV	-0,749	0,18	0,954	0,969	0,786	0,877	1

T=mittlere Lufttemperatur; N=Niederschlagshöhe; SF=Anzahl der Schneefalltage; SD=Anzahl der Tage mit geschlossener Schneedecke; FT=Anzahl der Frosttage; ET=Anzahl der Eistage; SV=Streusalzverbrauch auf Bundesautobahnen

Die hohen Korrelationskoeffizienten zwischen dem Streusalzverbrauch und der Anzahl der Schneefalltage, den Tagen mit geschlossener Schneedecke, den Frosttagen und den Eistagen ergeben eine starke Witterungsabhängigkeit des Streusalzverbrauchs.

* Hamburg-Fuhlsbüttel, Oldenburg, Hannover-Langenhagen, Arnsberg, Köln-Wahn, Frankfurt, Kaiserslautern, Stuttgart, Nürnberg und München-Nymphenburg

4.2.1.3 Auswertung von in-situ-Untersuchungen

Tausalze werden überwiegend mit dem Fahrbahnabfluß verlagert, so daß im folgenden diesbezügliche Untersuchungen ausgewertet werden.

In Abb. 4-15 sind die von SCHORB (1988)* ermittelten Spannweiten der jeweils im Fahrbahnabfluß der B 45 (Lage: 25 km östlich von Heidelberg, geodätische Höhe: 123 m ü. NN) enthaltenen tausalzspezifischen Stoffe dargestellt. Eine Vielzahl weiterer, in ähnlichen Größenordnungen liegender Untersuchungsergebnisse kann BROD (1993) entnommen werden. Insgesamt ist eine sehr große Spannweite der Gehalte tausalzspezifischer Stoffe im Fahrbahnabfluß festzustellen.

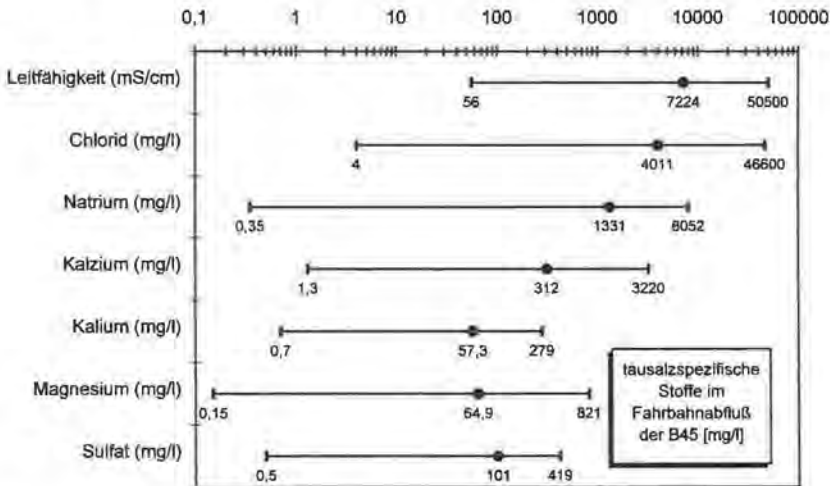


Abb. 4-15: Spannweiten der von SCHORB (1988) im Fahrbahnabfluß der B 45 ermittelten Gehalte tausalzspezifischer Stoffe

Nach BROD (1993) wird der Salzgehalt im Fahrbahnabfluß theoretisch durch die maximale Löslichkeit der Salze begrenzt (22,4 % bei -21,2°C). In der Literatur werden folgende

* Von den bereits in Abschnitt 4.1.1.3 für ständige Einwirkungen ausgewerteten Untersuchungen der Stoffgehalte im Fahrbahnabfluß wurden nur von SCHORB (1988) bei kontinuierlicher Probenahme mehrere vollständige Winterhalbjahre erfaßt. Bei den anderen Untersuchungen ist eine vollständige und repräsentative Erfassung der Konzentrationsbereiche der aus der Tausalzstreuung stammenden Stoffe im Fahrbahnabfluß nicht gesichert.

maximale Chloridkonzentrationen im Fahrbahnabfluß verschiedener bundesdeutscher Außerortsstraßen genannt:

Tabelle 4-19: Kurzfristige maximale Chloridkonzentrationen im Fahrbahnabfluß bundesdeutscher Außerortsstraßen

Straße / Stadt	Cl _{max} [mg Cl/l]	Quelle
A 7 / Hannover-Anderten	8988	Tiemann (1971, zit. in BROD 1993)
A 45 / Lützellinden	7450	Brod (1979, zit. in BROD 1993)
A 45 / Niederscheid	19469	Brod (1979, zit. in BROD 1993)
A 7 / Niederaula	6300	Brod (1979, zit. in BROD 1993)
A 6 / Heilbronn	2761*	KRAUTH & KLEIN (1982)
A 81 / Pleidelsheim	1087*	KRAUTH & KLEIN (1982)
B 45 / Bammental	46600	SCHORB (1988)

* Es wurde jeweils nur ein Teil eines Winterhalbjahres (ab Februar) erfasst.

Zum zeitlichen Auftreten der straßenspezifischen Tausalze werden im Rahmen der vorliegenden Datenbasis folgende Auswertungen durchgeführt:

- Kurzfristiger Verlauf während eines Niederschlagsereignisses:
KRAUTH & KLEIN (1982)
- Mittelfristiger Verlauf während mehrerer Monate:
KRAUTH & KLEIN (1982), SCHORB (1988)
- Langfristig summierte Frachten im Fahrbahnabfluß:
SCHORB (1988)

Der kurzfristige Konzentrationsverlauf der aus der Tausalzstreuung stammenden Chloride während einzelner Niederschlagsereignisse wird anhand der Einzel-Untersuchungen des Fahrbahnabflusses der A 81 und der A 6 von KRAUTH & KLEIN (1982) nachvollzogen (s. Abb. 4-16). Ausgehend von einem maximalen Chloridgehalt von über 1000 mg/l zu Beginn des Niederschlags vom 26.02.1978 während der Schneeschmelze sinkt der Chloridgehalt gleichmäßig auf ca. 600 mg/l ab, so daß gegenüber dem Mittelwert des gesamten Untersuchungszeitraumes noch eine ca. 6-fache Erhöhung verbleibt. Beim Niederschlagsereignis am 16.03.1978 wurde ein ähnlicher Verlauf des Chloridgehaltes im Fahrbahnabfluß - jedoch auf deutlich niedrigerem Niveau - ausgehend von maximal 370 mg/l ermittelt.

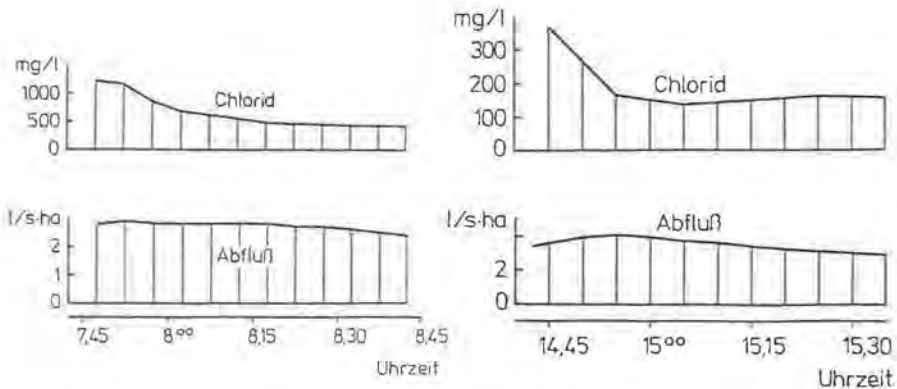


Abb. 4-16: Kurzfristiger Verlauf der Abflußmenge und der tausalzspezifischen Chloridgehalte im Fahrbahnabfluß während zweier Niederschlagsereignisse aus KRAUTH & KLEIN (1982)

Der mittelfristige jahreszeitliche Verlauf (mehrere Monate) der aus der Tausalzstreuung stammenden Chloridgehalte im Fahrbahnabfluß wird anhand der mittleren Chloridkonzentrationen je Niederschlagsereignis (Einzelwerte) aus KRAUTH & KLEIN (1982) und anhand der Monatsmittelwerte der Chloridgehalte im Fahrbahnabfluß aus SCHORB (1988) untersucht.

Die einzelnen Chloridkonzentrationen im Fahrbahnabfluß der A 81 und der A 6 (s. Abb. 4-17) unterliegen während der Wintermonate starken Schwankungen, die auf einzelne Tausalzstreuungen zurückgeführt werden. Ab April nehmen die Chloridkonzentrationen stark ab und verbleiben während des restlichen Untersuchungszeitraumes (an der A 81 bis Ende Sept., an der A 6 bis Ende Juli) bei geringeren Schwankungen unterhalb 140 mg Cl/l an der A 81 und unter 100 mg Cl/l an der A 6, was in Relation zum Grenzwert der Trinkwasserverordnung von 250 mg Cl/l (TrinkwV 1990) als niedrig bewertet werden kann. Zusammenfassend ist ein jahreszeitlicher Verlauf klar erkennbar, so daß ein bestimmender Einfluß der winterlichen Tausalzanwendung auf die Chloridgehalte im Fahrbahnabfluß (Häufigkeit und Intensität) vorliegt.

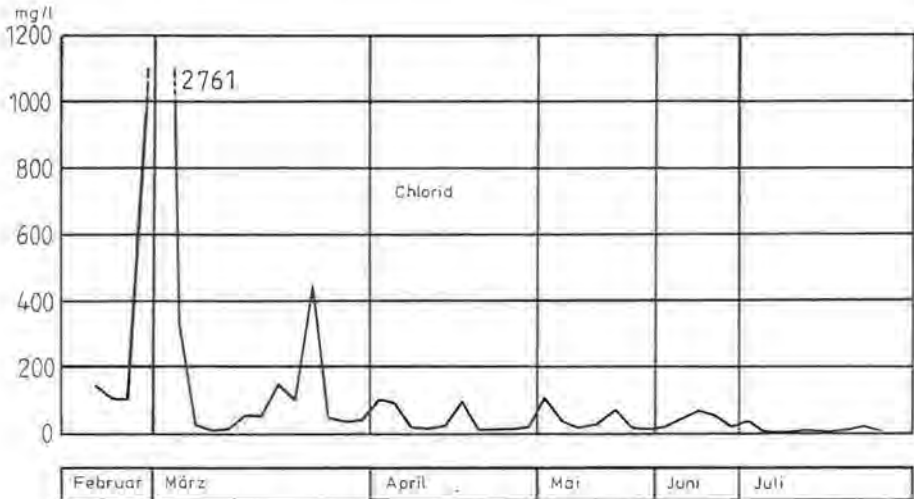


Abb. 4-17: Zeitlicher Verlauf der Chloridkonzentrationen im Fahrbahnabfluß der A 6 aus KRAUTH & KLEIN (1982)

Die Monatsmittelwerte der tausalzspezifischen Parameter Leitfähigkeit, Natrium, Chlorid, Kalium, Calcium und Magnesium im Fahrbahnabfluß der B 45 (aus SCHORB 1988) hatten ihre stark erhöhten Maxima jeweils in den Wintermonaten. In den restlichen Monaten lagen die Monatsmittelwerte der tausalzspezifischen Parameter im Fahrbahnabfluß bei geringen Schwankungen auf erheblich geringerem Niveau. Da im selben Zeitraum die monatlichen Niederschlagsmengen ohne erkennbaren jahreszeitlichen Verlauf stark schwankten, ist kein signifikanter Einfluß der monatlichen Niederschlagsmenge auf die tausalzspezifischen Parameter im Fahrbahnabfluß erkennbar.

SCHORB (1988) hat die im Fahrbahnabfluß der B 45 (Lage: 25 km östlich von Heidelberg, geodätische Höhe: 123 m ü. NN) gemessenen Gehalte aus der Tausalzstreuung stammender straßenspezifischer Stoffe zu flächenbezogenen jährlichen Frachten hochgerechnet. Zur besseren Anschaulichkeit wurden die Werte anhand der Abmessungen des Untersuchungsgebietes in $\text{kg}/(\text{km} \cdot \text{a})$, das heißt als streckenbezogene Stofffrachten, umgerechnet (vgl. Tabelle 4-20).

Tabelle 4-20: Von SCHORB (1988) aus Analysen des Fahrbahnabflusses hochgerechnete jährliche Frachten der aus der Tausalzstreuung stammenden Stoffe an der Bundesstraße B 45

Stoffgehalte im Fahrbahnabfluß*	kg/(ha · a)	kg/(km · a)
Chlorid	6303	5336
Natrium	2596	2503
Kalium	88,3	74,8
Kalzium	612,1	518,2
Magnesium	194,2	164,4

* Verkehrsstärke (DTV-Mittelwert): 16544 Kfz/24h; Untersuchungszeitraum: 11.1978 - 10.1981

Die Anteile der im Fahrbahnabfluß gemessenen und hochgerechneten einzelnen Stofffrachten entsprechen annähernd der Zusammensetzung des örtlich verwendeten Tausalzes, so daß diese Stoffe im Fahrbahnabfluß eindeutig auf die Tausalzstreuung zurückgeführt werden können:

Tabelle 4-21: Vergleich der Zusammensetzung des auf der B 45 ausgebrachten Tausalzes mit den von SCHORB (1988) gemessenen und zu jährlichen Frachten hochgerechneten Gehalten tausalzspezifischer Stoffe im Fahrbahnabfluß

	Chlorid	Natrium	Kalium	Kalzium	Magnesium
Tausalzzusammensetzung	64%	27%	1%	6%	2%
Tausalzbestandteile im Fahrbahnabfluß	50%	32%	1%	13%	1%

Die von SCHORB (1988) ermittelte Chloridfracht von 5,3 t/(km · a) wird durch die im Untersuchungszeitraum in der Bundesrepublik Deutschland durchschnittlich auf Bundesstraßen je Winterhalbjahr ausgebrachte Tausalzmenge von ca. 10,8 t NaCl/(km · a), die einer Chloridfracht von ca. 6,5 t/(km · a) entspricht, bestätigt (siehe Abb. 4-14, Daten aus BROD 1993). Hieraus wird gefolgert, daß die von SCHORB (1988) während drei Jahren kontinuierlich gemessenen Gehalte tausalzspezifischer Stoffe im Fahrbahnabfluß für durchschnittliche Strecken- und Witterungsverhältnisse und den Umfang der Tausalzstreuung in Deutschland typisch sind, so daß sich die in Abb. 4-14 dargestellten Daten für die Verhältnisse in Deutschland als Bemessungsgrößen eignen.

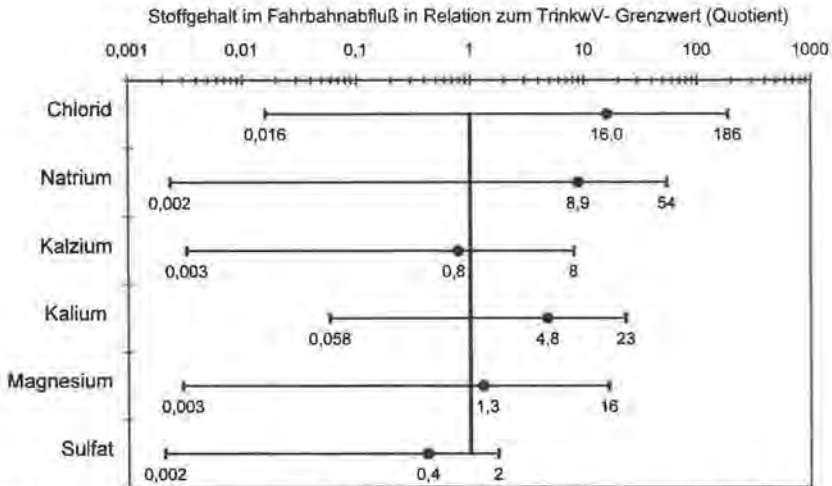


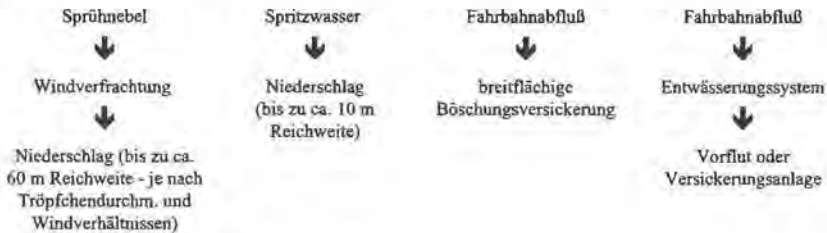
Abb. 4-18: Minimale, mittlere und maximale Gehalte der aus der Tausalzstreuung stammenden Stoffe im Fahrbahnabfluß der B 45 (Auswertung der Daten aus SCHORB 1988) in Relation (Quotient) zu den jeweiligen Grenzwerten der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990)

Die hierbei ermittelten Minimal-, Mittel- und Maximalwerte werden daher in Abb. 4-18 im Verhältnis zu den jeweiligen Grenzwerten der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990) dargestellt. Die Chlorid-, Natrium- und Kaliumgehalte im Fahrbahnabfluß der B 45 überschreiten die zugehörigen Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990) sowohl als Maximal- als auch als Mittelwerte erheblich. Die Maximal- und Mittelwerte der Magnesiumgehalte überschreiten die zugehörigen Grenzwerte der Trinkwasserverordnung in geringerem Umfang. Die Kalzium- und Sulfatgehalte überschreiten nur als Maximalwerte die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung.

4.2.2 Oberirdische Verlagerung von Tausalz

Die oberirdische Verlagerung von Tausalz ist vor allem witterungsabhängig. Das auf die Straße aufgebrachte Tausalz vermischt sich mit der vorhandenen Eis- und/oder Schneedecke (ggf. Regen). Die Verlagerung der im Auftauprozess auf der Fahrbahnoberfläche entstehenden

Schmelzwasserlösung verläuft auf den im folgenden genannten Pfaden (GOLWER 1991; BROD 1993):



Die im Einzelfall stattfindende oberirdische Tausalzverlagerung ist von der Straßenentwässerung, den Witterungsverhältnissen und der Topographie der Straße (Damm, Anschnitt, Einschnitt) abhängig. DAUSCHECK & BISCHOFBERGER (1986) haben bei ihren Untersuchungen eine durchschnittliche Reichweite der Tausalzverfrachtung von ca. 25 m ermittelt. In allen Untersuchungen ergab sich übereinstimmend eine sehr starke Abnahme der Chloridkonzentration innerhalb der ersten ca. 5 m ab dem Straßenrand. Weiterhin kommt es bei anhaltendem starken Frost zur vorübergehenden Akkumulation von Tausalz im Altschnee am Straßenrand und in Straßenrandböden (Bodenfrost). DAUSCHECK & BISCHOFBERGER (1986) haben bei ihren Messungen bis zu 2000 mg Cl/l in Altschnee am Straßenrand und bis zu 1400 mg Cl/l im Boden in 1 m Entfernung vom Straßenrand ermittelt. In Abhängigkeit von der Frostperiode und der Niederschlagshöhe werden die Salze unterschiedlich lange gespeichert. Dadurch können bei einsetzendem Tauwetter kurzfristig sehr große Tausalzfrachten im Sickerwasser anfallen (siehe Tab. 4-19).

4.2.3 Unterirdische Verlagerung von Tausalz

Die Verlagerung von Auftausalzen in Boden und Grundwasser kann prinzipiell mit den selben Methoden untersucht werden, wie ständige Einwirkungen. Im folgenden werden diesbezügliche Untersuchungsergebnisse genannt:

Tausalzeinträge in Böden äußern sich vor allem im Anstieg der Natrium- und Chloridgehalte. Die Natriumzufuhr führt zu einer Verdrängung (Desorption) anderer sorbierter

Kationen und zu einem Anstieg der Natriumsättigung der Bodenaustauscher, da zwischen gelösten und sorbierten Ionen im Boden ein Gleichgewicht besteht (BROD 1993). Das sorbierte, stark hydratisierte Natriumion bewirkt bei geringer Calziumsättigung eine Dispergierung der Bodenaggregate in Einzelkornstrukturen, wobei das Ausmaß der strukturellen Beeinflussung des Bodens von der Korngrößenverteilung, der Gefügesteife und der Ionenkonzentration in der Bodenlösung abhängt. Hohe Skelett-, Sand- und Kalkanteile sowie starke Verdichtung der Straßenrandböden wirken der Dispergierung entgegen. Dagegen geht von Chloridionen keine Primärwirkung auf bodenphysikalische Eigenschaften aus (BROD 1993).

Untersuchungen von DAUSCHECK & BISCHOFBERGER (1986) im süddeutschen Raum ergaben stets wesentlich höhere Salzkonzentrationen in der belebten Bodenschicht als in der unbelebten Bodenschicht, so daß anzunehmen ist, daß in der belebten Bodenschicht stärkere Filter- und Sorptionswirkungen auftreten. Weiterhin wurde im Einflußbereich der Tausalzversickerung ein Austausch der im Boden vorhandenen Calciumionen durch Natriumionen beobachtet. In den kontinuierlich im Verlauf eines Jahres von REINIRKENS (1992) durchgeführten Analysen oberflächennaher Sickerwässer an drei Bundesstraßen und einer Kreisstraße in Nordrhein-Westfalen erreichte der höchste Einzelwert der Natriumkonzentrationen im Sickerwasser in ca. 30 cm Tiefe lediglich ca. 60 % des Grenzwertes der TrinkwV (1991) von 150 mg/l.

Dagegen waren die Chloride im Untergrund sehr mobil, weil die Cl-Anionen wie die Bodenteilchen negative Ladung besitzen, so daß sie sich frei zwischen den Bodenteilchen hindurch bewegen können und zudem weder mikrobiell abgebaut, noch nennenswert durch chemische Ausfällungen, Mitfalleffekte oder Ionenaustausch vermindert werden, sondern lediglich durch Niederschlagswasser verdünnt und transportiert werden (DAUSCHECK & BISCHOFBERGER 1986). Wegen der leichteren Auswaschung der Cl-Ionen liegen die Cl-Gehalte der fahrbahnnahen Böden trotz größerer Konzentrationsschwankungen auf einem insgesamt niedrigeren Niveau als die Na-Gehalte (Hutchinson 1974; Brod 1979; Scott 1980; Temmermann et al. 1981- zit. in BROD 1993). Die hohe Mobilität der Chloride im Untergrund führt zu einer direkten - je nach Bodendurchlässigkeit - nur geringfügig zeitlich verzögerten Verlagerung der straßenspezifischen Chloride ins Grundwasser, was die Untersuchungen von SCHORB (1988) an der B 45 bestätigen. Wie in Abb. 4-19 ersichtlich, kann der Verlauf der

Chloridgehalte im Fahrabfluß mit einer zeitlichen Verzögerung von 1-2 Monaten auch im fahrbahnnahe Grundwasser nachvollzogen werden.

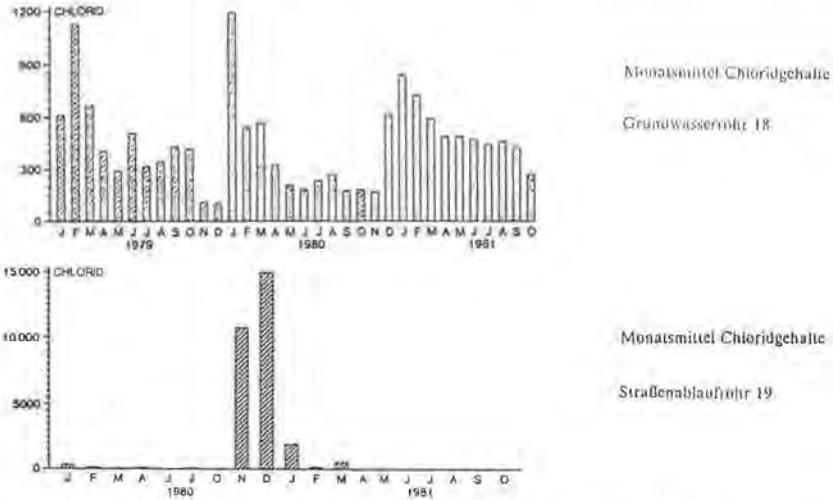


Abb. 4-19: Zeitlicher Verlauf der Chloridgehalte (Monatsmittelwerte) im Fahrabfluß und im straßennahen Grundwasser der B 45 von Januar 1980 bis einschließlich Oktober 1981 (aus SCHORB 1988)

Je nach Durchlässigkeit der durchsickerten Bodenschichten wird die Auswaschung der Chloride verzögert. Der Großteil der während Frostperioden in den oberen Bodenschichten gespeicherten Salze wird bei einsetzendem Tauwetter innerhalb weniger Tage ausgewaschen. Der Abbau der Restkonzentrationen nimmt längere Zeit (bis zu mehrere Monate) in Anspruch. Bei geringer Durchlässigkeit des Bodens, kleiner Niederschlagsmenge und starker Tausalzstreuung kann es trotz dieser Auswaschvorgänge langfristig zur Akkumulation von Chloriden im Boden kommen (DAUSCHECK & BISCHOFBERGER 1986). Nach BROD (1979) reichen auch Niederschlagsmengen von 550 bis 800 mm nicht aus, eine vollständige Auswaschung der Salze aus den oberen Bodenschichten des straßennahen Bereiches zu bewirken. Auch in den Untersuchungen von SCHORB (1988) an der B 45 reichten die sommerlichen Niederschläge nicht aus, die straßenspezifischen Salze aus den straßennahen oberen Bodenschichten auszuwaschen.

Nachdem die Chloride das Grundwasser erreicht haben, werden sie je nach Mächtigkeit des Grundwasserleiters und der Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers infolge hydrodynamischer Dispersion stark verdünnt. In stark durchlässigen Grundwasserleitern mit hohen Abstandsgeschwindigkeiten im süddeutschen Raum wurden Reichweiten der Tausalzbeeinflussung des Grundwassers von nur 40 bis 170 m ermittelt (DAUSCHECK & BISCHOF-SBERGER 1986).

Tabelle 4-22: Na- und Cl-Gehalte im oberflächennahen Grundwasser im Bereich von Straßen

Quelle		DAUSCHECK & BISCHOF-SBERGER (1986)			GOLWER & SCHNEIDER (1983)
Untersuchungsgebiet		Königsbrunn	Lochham	Kaufering	Frankfurt a. Main
Straße (Breite)		B17 (22m)	A96 (55m)	B17 (ca. 12m)	A3
Fahrbahnenentwässerung		oberflächennahe Sickerschächte	tiefliegende Sickergalerien	Böschungsversickerung	Sickerbecken (ca. 3500m ²)
Untergrundverhältnisse		Niederterrassen Schotter	Quartäre Schotter	Quartäre Schotter	Pleistozäne Sande und Kiese
k	m/s	$3 \cdot 10^{-2}$	$1,3 \cdot 10^{-2}$	$5,5 \cdot 10^{-2}$	$7,5 \cdot 10^{-4}$
eff. Porosität	%	18	17	17,6	-
GW-Flurabstand	m	6	11	13	8,6
GW-Mächtigkeit	m	3	12	4	15
v_A	m/s	$2 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-3}$	$3,5 \cdot 10^{-4}$	$8 \cdot 10^{-6}$
	m/d	17	121	30	0,7
Einzugsfläche	m ²	2850	14000	9000	54000
Tausalzmengen	g/(m ² ·d)	10-150	20-90	10-60	15-90
mittl. Tausalzeintrag	mg/(s·m)	7,1	11,9	3,4	-
Cl-Hintergrundgehalt	mg/l	36	32	26	12,6
mittl. Cl-Belastung	mg/l	65	33,4	34	308
max. Cl-Belastung	mg/l	245	35,5	52	493
Reichweite	m	155	170	80	450

In Tabelle 4-22 sind Untersuchungsergebnisse zu Art und Umfang der Tausalzbelastung des Grundwassers im Bereich von Straßen unter Berücksichtigung der hydrogeologischen Verhältnisse zusammengestellt. Nur an der A3 wurde der Grenzwert der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990) für Chlorid (250 mg/l) im unmittelbar straßenbeeinflussten Grundwasser überschritten. Da die Grundwasserleiter der Untersuchungsgebiete stark bis sehr stark

durchlässig waren, wurden die Tausalzfrachten der Sickerwässer in Abhängigkeit von der Mächtigkeit der Grundwasserleiter und der Abstandsgeschwindigkeit des Grundwassers erheblich verdünnt, so daß die Reichweiten der straßenspezifischen Cl-Belastungen verhältnismäßig gering waren.

Das Ausmaß der Verdünnung straßenspezifischer Chloridgehalte im Grundwasserleiter setzt sich aus folgenden Komponenten zusammen:

- Dispersion im strömenden Grundwasser, ausgehend vom Einleitungsort
- diffunder Ausgleich des Cl-Konzentrationsgradienten - ausgehend vom Einleitungsort

Die Dispersion ist der maßgebende Verdünnungsprozeß. Der Konzentrationsausgleich infolge Diffusion dürfte in Abhängigkeit vom Konzentrationsgradienten nur in gering mächtigem und langsam strömendem Grundwasser einen nennenswerten Anteil an der Verdünnung haben.

Da Chloride im Untergrund weder mikrobiell abgebaut, noch nennenswert durch chemische Ausfällungen oder Mitfalleffekte noch durch Ionenaustausch (Sorption) vermindert werden (DAUSCHECK & BISCHOFBERGER 1986), können abnehmende Cl-Konzentrationen im Grundwasserstrom nahezu vollständig auf Verdünnungsvorgänge infolge hydrodynamischer Dispersion zurückgeführt werden. Da sich die Konzentrationen der anderen straßenspezifischen wassergefährdenden Stoffe neben diesen Verdünnungsvorgängen zusätzlich durch Rückhalte- und/oder Reinigungsprozesse verringern, kann der von der Straße beeinflusste Grundwasserbereich anhand des Verlaufes der Chloridkonzentration unter Berücksichtigung der geogenen und ggf. anthropogenen Hintergrundgehalte konservativ ("auf der sicheren Seite") abgegrenzt werden. Diese Einstufung der Chloridkonzentrationen als ein verkehrsspezifisches Leitelement zur Abgrenzung des von der Straße beeinflussten Grundwasserbereiches in Gebieten mit winterlichen Streueinsätzen wird durch die Untersuchungen von GOLWER & SCHNEIDER (1983a,b) bestätigt, bei denen die Natrium- und Chlorid-Ionen von allen organischen und anorganischen Stoffen das Grundwasser am stärksten belasteten und im Grundwasserunterstrom am weitesten reichten.

BISCHOFBERGER et al. (1986) haben im gesamten Bundesgebiet Erhebungen über die Herkunft und die zeitliche Entwicklung der Chloridgehalte im Grundwasser durchgeführt.

Dabei zeigten 25 von 45 untersuchten Gebieten einen langjährigen Anstieg der Chloridkonzentration. Jedoch konnte nur bei 7 Objekten primär der Tausalzeinfluß für den Chloridanstieg verantwortlich gemacht werden. Bei der Mehrzahl der untersuchten Objekte konnte der Anstieg der Chloridkonzentration im Grundwasser zeitlich auf die letzten 15 bis 20 Jahre abgegrenzt werden. Neben dem Straßenverkehr kam es in diesem Zeitraum auch zu steigenden Chlorideinträgen aus Industrie und Landwirtschaft.

Alle im Rahmen dieser Arbeit ausgewerteten Untersuchungen zur Verlagerung von Tausalz in Boden und Grundwasser ergaben eine sehr hohe Mobilität der Chloride im Untergrund. Da die Verlagerung der im Sickerwasser gelösten Chloride auch bei geringer Bodendurchlässigkeit allenfalls zeitlich verzögert wird, kann eine langfristige Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung im Sinne von Rückhalte- und Reinigungsvorgängen nicht berücksichtigt werden.

Im Rahmen einer vereinfachten, bundesweiten Betrachtung (alte Bundesländer) kann der langfristige, straßenspezifische Chloridanstieg im Grundwasser in Deutschland wie folgt abgeschätzt werden:

$$\text{Cl}_{\text{Grundwasser}} = \frac{\text{Tausalzstreuung} \cdot \text{Cl-Gehalt} \cdot \text{Versickerungsanteil}}{\text{Grundwasserneubildung}} \quad (\text{Gl. 4-1})$$

Mit

- $1,3 \cdot 10^6$ kg mittlerer jährlicher Tausalzverbrauch der Jahre 1968-1990 (Verein der Deutschen Salzindustrie in: BROD 1993),
- 60 % Chloridanteil im Tausalz (BROD 1993),
- 64 % mittlerem Versickerungsanteil (Evapotranspiration - Niederschlag) (aus KLEINSCHROTH 1994),
- $63 \cdot 10^9$ m³/a jährliche Grundwasserneubildung (aus HÖLTING 1991) und
- $3,2 \cdot 10^{12}$ m³ nutzungsrelevante (speichervirksame) Grundwassermenge in den alten Bundesländern Deutschlands (aus HÖLTING 1991)

wird der langfristige straßenspezifische Anstieg der Chloridkonzentration im Grundwasser in den alten Bundesländern Deutschlands auf ca. 8 mgCl/l abgeschätzt.

Es wird darauf hingewiesen, daß es sich hierbei um den Mittelwert über eine Fläche von 249000 km² handelt, so daß in der Realität vorhandene starke örtliche Schwankungen nicht berücksichtigt werden. Bei Beachtung des Grundwasserkreislaufs ergibt sich der in Abb. 4-20 dargestellte zeitliche Verlauf für den straßenspezifischen Anstieg der Chloridkonzentration im Grundwasser.

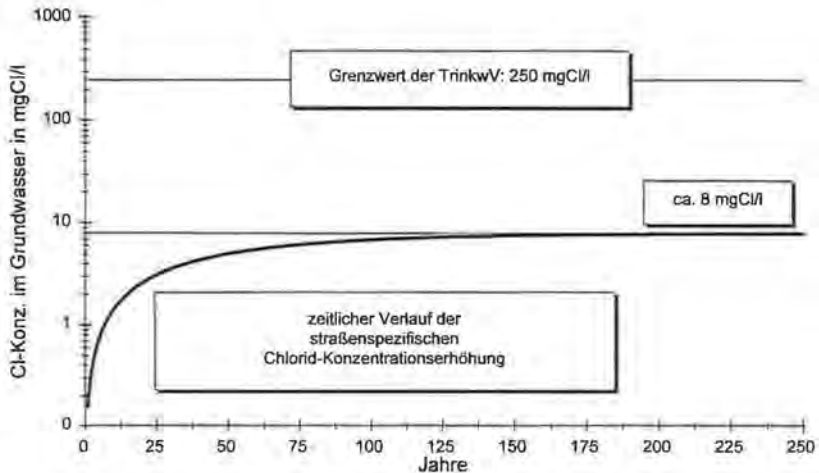


Abb. 4-20: Abschätzung zum zeitlichen Verlauf des Anstiegs der straßenspezifischen Chloridkonzentration im Grundwasser der Bundesrepublik Deutschland (alte Bundesländer) unter Berücksichtigung des durch die Grundwasserneubildung bedingten Wasserkreislaufs - Bezugsdaten aus BROD (1993), HÖLTING (1991) und KLEINSCHROTH (1994)

Wie in Abb. 4-20 ersichtlich, kann von einer starken zeitlichen Verzögerung des Cl-Anstiegs ausgegangen werden. In Relation zum Grenzwert der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990) von 250 mgCl/l ist dieser abgeschätzte, langfristige Anstieg gering.

4.2.4 Zusammenfassung und Folgerungen zu vorübergehenden Einwirkungen

Im folgenden sind die wesentlichen Ergebnisse (mit • gekennzeichnet) der zu tausalzspezifischen Einwirkungen auf das Grundwasser durchgeführten Literatur- und Datenauswertung zusammengefaßt (Folgerungen sind mit ► gekennzeichnet):

- Je nach Gesteinsart des Grundwasserleiters kann das Grundwasser bereits durch geogene Salzgehalte vorbelastet sein. In Abhängigkeit von den standortspezifischen Randbedingungen sind ggf. neben der Tausalzstreuung eine Vielzahl anderer anthropogener Salzemitenten, wie Landwirtschaft, Industrie, Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe und Deponien vorhanden.

- Neben der Tausalzstreuung sind bei Risikoanalysen im Einzelfall vorliegende andere geogene und/oder anthropogene Salzeinträge ins Grundwasser zu berücksichtigen.
- Die flächenbezogen ausgebrachte Tausalzmenge und damit die Tausalzkonzentration im Fahrbahnabfluß sind in erster Linie witterungsabhängig. Die streckenbezogen anfallende Tausalzmenge hängt bei einheitlichen Witterungsbedingungen von der aufzutauenden Fläche (Breite bzw. Straßenquerschnitt) ab.
- Für die einzelnen Straßenkategorien (aufzutauende Fläche) könnten für Prognosen zur Tausalzstreuung auf der Grundlage langfristiger Datenreihen Kenngrößen in Abhängigkeit von variierenden Witterungsbedingungen bestimmt werden.
- Weitere Einflußgrößen sind das Verkehrsaufkommen, die Ausbringungstechnik und die Organisation des Winterdienstes.
- Im Hinblick auf den Grundwasserschutz ist prinzipiell eine Optimierung der Ausbringungstechnik und der Organisation des Winterdienstes anzustreben.
- Die tausalzspezifischen Stoffgehalte im Fahrbahnabfluß unterliegen sehr starken, kurzfristigen Schwankungen. Bei den Monatsfrachten tausalzspezifischer Stoffe im Fahrbahnabfluß ist mit stark erhöhten Werten während der Wintermonate ein eindeutiger, jahreszeitlicher Verlauf erkennbar.
- Quentin (1972 - zit. in BROD 1993) bewertet Natriumchlorid als störenden Stoff; laut UBA (1991a) kann NaCl als *"im allgemeinen nicht wassergefährdend"* (Wassergefährdungsklasse 0) eingestuft werden. Im Rahmen der ausgewerteten Untersuchungen überschritten die Gehalte tausalzspezifischer Stoffe im Fahrbahnabfluß während der Wintermonate und teilweise auch als Jahresmittelwerte die Grenz- und Richtwerte der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990).
- Die oberirdische Verlagerung der tausalzspezifischen Stoffe erfolgt überwiegend mit dem Fahrbahnabfluß. Die tausalzspezifischen Natriumgehalte werden infolge Sorption (Ionenaustausch) bereits in der obersten Bodenschicht stark reduziert. Die tausalzspezifischen Chloride sind im Untergrund sehr mobil, da sie weder mikrobiell abgebaut, noch nennenswert durch chemische Ausfällungen oder Mitfalleffekte noch durch Ionenaustausch (Sorption) vermindert werden.
- Zwischen der für die Grundwasserneubildung als vorteilhaft anzusehenden breitflächigen Entwässerung und Versickerung über den Fahrbahnrand einerseits und dem Grundwasserschutz andererseits liegt wegen der Mobilität der Chloride im Untergrund ein Zielkonflikt vor.
- Der von der Straße beeinflusste Grundwasserbereich kann anhand des Verlaufes der Chloridgehalte unter Berücksichtigung der geogenen und ggf. anthropogenen Hintergrundgehalte konservativ ("auf der sicheren Seite") abgegrenzt werden.
- Bei geringer Bodendurchlässigkeit kann es in Abhängigkeit von der Niederschlags- und Sickerwassermenge zur Akkumulation der tausalzspezifischen Stoffe in den oberen Bodenschichten kommen.

4.3 Risikobetrachtungen zu außergewöhnlichen Einwirkungen (Emission wassergefährdender Stoffe durch Unfälle)

4.3.1 Allgemeines

Die Emission wassergefährdender Stoffe durch Unfälle wird als außergewöhnliche Einwirkung definiert. Die statistischen Merkmale sind geringe Auftretenswahrscheinlichkeit, kurze Dauer und große Wiederholungszeiten. Zur Untersuchung außergewöhnlicher Einwirkungen eignet sich im Hinblick auf eine Risikobewertung insbesondere die Auswertung von Daten zurückliegender Unfälle.

4.3.2 Datenbasis

Auf der Grundlage des Gesetzes für Umweltstatistiken (UStatG) (zit. in STATISTISCHES BUNDESAMT 1994) werden Unfälle bei der Lagerung und beim Transport wassergefährdender Stoffe von den unteren Wasserbehörden oder Polizeidienststellen erfaßt und jährlich in einer amtlichen Statistik durch die statistischen Landesämter und das Statistische Bundesamt veröffentlicht. Hierbei werden folgende Unfallmerkmale erfaßt (s. Anlage 2: Muster eines Erhebungsbogens):

- **Nach Umweltstatistikgesetz:**
Ort (Stadt, Landkreis), Zeit, Art des Verkehrs (Nah- oder Fernverkehr), Beförderungsmittel, beförderte, ausgelaufene und wiedergewonnene Menge, Stoffart (unterteilt in 9 Stoffarten), Unfallursache (Unfall beim Fahren/Rangieren), Unfallfolgen, Sekundärfolgen
- **Nach landesinternen Regelungen:**
Maßnahmen, Kosten

Zur Untersuchung der Gefährdung des Grundwassers durch Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe im Rahmen dieser Arbeit wurden die in der Tabelle 4-23 zusammengestellten Unfalldaten erhoben. Die amtlichen Statistiken des Statistischen Bundesamtes und einiger statistischer Landesämter bieten einen guten Überblick zum Unfallgeschehen. Für weiterführende Fragestellungen wurden für die in Tabelle 4-23 angegebenen Zeiträume bei den statistischen Landesämtern der alten Bundesländer Einzeldaten zu Unfällen beim

Transport wassergefährdender Stoffe auf Straßen (im folgenden mit UTwSSSt abgekürzt) erhoben. Der angestrebte, einheitliche Erhebungszeitraum (ab 1986) konnte nicht eingehalten werden, da in einigen Bundesländern aus Datenschutzgründen bereits die Einzeldaten früherer Jahrgänge vernichtet worden waren. Die neuen Bundesländer wurden nicht erfaßt, da sich diese erst ab 1991 an der amtlichen Statistik beteiligt haben und zudem das dortige Streckennetz und das Verkehrsaufkommen im Untersuchungszeitraum starken Veränderungen unterlag.

Tabelle 4-23: Datenerhebung zu Unfällen beim Transport wassergefährdender Stoffe auf Straßen

Art der Daten	Erhebungsgebiet	Zeitraum	Quelle
amtliche Statistik	Bundesrepublik Deutschland (neue Bundesländer ab 1991)	1986 bis 1992	STATISTISCHES BUNDESAMT, 1987-1994
amtliche Statistik	Baden-Württemberg	1989, 1992	STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG, 1990, 1993
amtliche Statistik	Bayern	1982 bis 1992	BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK UND DATENVERARBEITUNG, 1993
amtliche Statistik	Hessen	1986 bis 1992	HESSISCHES STATISTISCHES LANDESAMT, 1987-1994
amtliche Statistik	Nordrhein-Westfalen	1986 bis 1993	LANDESAMT FÜR DATENVERARBEITUNG UND STATISTIK NORDRHEIN-WESTFALEN, 1987-1994
Einzeldaten	Baden-Württemberg	1991 bis 1993	STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG, 1994, 1995
Einzeldaten	Bayern	1990 bis 1993	BAYERISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK UND DATENVERARBEITUNG, 1994
Einzeldaten	Hessen	1992, 1993	HESSISCHES STATISTISCHES LANDESAMT, 1994
Einzeldaten	Niedersachsen	1989 bis 1993	NIEDERSÄCHSISCHES LANDESAMT FÜR STATISTIK, 1994
Einzeldaten	Nordrhein-Westfalen	1989 bis 1993	LANDESAMT FÜR DATENVERARBEITUNG UND STATISTIK NORDRHEIN-WESTFALEN, 1994
Einzeldaten	Rheinland-Pfalz	1992, 1993	STATISTISCHES LANDESAMT RHEINLAND-PFALZ, 1994
Einzeldaten	Saarland	1987 bis 1992	STATISTISCHES LANDESAMT SAARLAND, 1994
Einzeldaten	Schleswig-Holstein	1990 bis 1993	STATISTISCHES LANDESAMT SCHLESWIG-HOLSTEIN, 1994

Da ein großer Teil der wassergefährdenden Stoffe zugleich Gefahrgut im Sinne der Gefahrgutverordnung Straße (GGVS 1987) ist, wurden die Untersuchungen der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) zu Unfällen von Gefahrguttfahrzeugen in den Zeiträumen von 1982 bis 1984 (BREßIN 1986) und von 1989 bis 1991 (PÖPPEL & KÜHNEN 1993)

hinzugezogen. Hierbei werden auf Veranlassung des Bundesministers für Verkehr zusätzlich zur polizeilichen Unfallaufnahme am Unfallort Daten zum Gefahrgutunfall in einem gesonderten Fragebogen erhoben, sofern Armaturen oder Tanks eines beteiligten Gefahrgutfahrzeugs beschädigt wurden und/oder Gefahrgut freigesetzt wurde. Diese Daten werden über die Länderinnenminister und den Bundesminister für Verkehr an die Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) geleitet und dort in eine spezielle Datenbank aufgenommen (PÖPPEL & KÜHNEN 1993).

Bei der von PÖPPEL & KÜHNEN (1993) durchgeführten Erhebung von Gefahrgutunfällen (Zeitraum: 1989-1991) wurden in Zusatzfragebögen zur polizeilichen Straßenverkehrsunfallanzeige (s. Anlage 3: Muster der Zusatzfragebögen) folgende Daten erfaßt:

- Unfallort, Straße; Datum/Uhrzeit; Wasserschutzgebiet (I, II oder III); Naturschutzgebiet; Gefällestrecke; Kurvenreiche Strecke
- detaillierte technische Angaben zum Fahrzeug
- Angaben zum Ladegut
- detaillierte Angaben zu Unfallhergang und entstandenen Schäden (Gefahrgutaustritt)
- Angaben zur Behebung der Schäden (Maßnahmen, Kosten)

Im Vergleich ist die Erhebung von PÖPPEL & KÜHNEN (1993) zu Gefahrgutunfällen umfangreicher und detaillierter als die gemäß UStatG durchgeführte Erhebung zu Unfällen beim Transport wassergefährdender Stoffe.

Als Bezugsdaten wurden weiterhin Angaben zum Streckennetz, zur Straßenbelastung und zum Güterverkehrsaufkommen erhoben. Bundesweit wurde hierzu auf "*Verkehr in Zahlen*" (DIW 1994) zurückgegriffen. Daten einzelner Bundesländer wurden bei folgenden Bundesämtern, Ministerien oder Landesämtern direkt erfragt:

- Bundesamt für Güterverkehr
- Statistisches Landesamt Baden-Württemberg
- Bayerisches Landesamt für Statistik und Datenverarbeitung; Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft; Oberste Baubehörde im Bayerischen Staatsministerium des Innern
- Hessisches Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Technologie und Europaangelegenheiten; Hessisches Statistisches Landesamt
- Niedersächsisches Landesamt für Statistik
- Ministerium für Stadtentwicklung und Verkehr des Landes Nordrhein-Westfalen; Landschaftsverband Rheinland
- Ministerium für Umwelt, Energie und Verkehr - Saarland

4.3.3 Eignung, Vollständigkeit und Qualität der Unfalldaten

Die erhobenen Einzeldaten zu UTWSS sind für die untersuchten Fragestellungen prinzipiell geeignet, jedoch fehlen folgende Angaben:

- Unfallort:
 - innerorts/außerorts
 - Straßenkategorie und bauliche Ausbildung (Querschnittstopographie, passive Schutzeinrichtungen)
 - wasserwirtschaftliche Bedeutung (Wasserschutzzone I, II, oder III)
- Unfallhergang:
 - auf der Fahrbahn oder von der Fahrbahn abgekommen
 - passive Schutzeinrichtungen – soweit vorhanden – wirksam oder durchbrochen

Im Rahmen der Risikobestimmung werden die fehlenden Angaben durch die Ergebnisse der Untersuchung von PÖPPEL & KÜHNEN (1993), durch die Auswertung von Bezugsdaten und sonstige geeignete Annahmen ergänzt.

Zur Beurteilung der Vollständigkeit der Daten werden die von PÖPPEL & KÜHNEN (1993) für das Land Nordrhein-Westfalen (NRW) erhobenen Gefahrgutunfälle zunächst den in der hier durchgeführten Erhebung von Einzeldaten erfaßten UTWSS in Nordrhein-Westfalen, die zugleich als Gefahrgut ausgewiesen sind und bei denen Stoffe ausgetreten sind, gegenübergestellt. Mit 125 Unfällen wurden bei der Erhebung von Einzeldaten deutlich mehr Unfälle erfaßt als bei PÖPPEL & KÜHNEN (1993), denen 39 Unfälle gemeldet wurden. Der selbe Vergleich für das Land Niedersachsen ergibt ebenfalls eine Untererfassung, die mit 23 : 30 jedoch geringer ausfällt. Hieraus wird, wie bei einem ähnlichen Vergleich für die Jahre 1989 und 1990 in PÖPPEL & KÜHNEN (1993), eine teilweise erhebliche Untererfassung von Gefahrgutunfällen gefolgert. Aufgrund der vor allem zum Unfallhergang detaillierteren Angaben bei Gefahrgutunfällen werden die Ergebnisse der Untersuchung PÖPPEL & KÜHNEN (1993) für diesbezügliche Fragestellungen dennoch auf die in dieser Arbeit erhobenen Einzeldaten übertragen. Trotz der gegenüber Gefahrgutunfällen erwiesenermaßen vollständigeren Erfassung der UTWSS sind auch hierbei folgende Möglichkeiten einer Untererfassung denkbar:

- Von Behörden Seite unentdeckte Unfälle; vor allem nachts und/oder auf untergeordneten Strecken
- Leckagen der in der Regel an der Fahrzeugunterseite befestigten Treibstoffbehälter (die im Güterfernverkehr mehrere 100 l Volumen enthalten können) bei Unfällen, die zu

Interpretationsschwierigkeiten führen, da es sich nicht um einen Transportbehälter handelt und/oder nicht um einen Transport wassergefährdender Stoffe

Zur Datenqualität wird folgendes angemerkt: Direkt erfaßbare Größen, wie die Unfallzeit, sind wenig fehlerbehaftet (PÖPPEL & KÜHNEN 1993). Angaben, die detaillierteres Fachwissen erfordern, wie Angaben zum Fahrzeug oder Gefahrgut, und Schätzgrößen, wie Umfang einer Erd- und Grundwasserverunreinigung, können mit größeren Fehlern behaftet sein. Zudem ist anzunehmen, daß langfristige Schäden, wie Boden- und Grundwasserverunreinigungen, zum Zeitpunkt der Datenerfassung lediglich abgeschätzt werden können. Deshalb werden für die hier durchzuführende Risikoanalyse ausschließlich direkt erfaßbare Daten, wie Stoffarten und -mengen, herangezogen. Weiterführende Angaben zu den Unfallfolgen werden gesondert ausgewertet.

4.3.4 Auswertung der Unfalldaten

4.3.4.1 Unfallanzahl

Das Merkmal Unfallanzahl ist eine diskrete, auf einen bestimmten Zeitraum (hier 1 Jahr) bezogene Zufallsvariable, die beliebige ganzzahlige Werte annehmen kann.

Von der amtlichen Statistik wurden im Zeitraum von 1983 bis 1992 jährlich im Durchschnitt 309 UTwSSt (s. Abb. 4-21, nächste Seite) erfaßt. Als Bezugsgröße hierzu sei die jährliche Anzahl der Unfälle mit schwerem Sachschaden* genannt, die von 1983 bis 1990 durchschnittlich 254550 betrug (DIW 1994). Hierbei ergibt sich ein Verhältnis von 1 : 824 (gerundet). Das mittlere, je Unfall ausgelassene Volumen (Jahresmittelwerte) schwankte von 1983 bis 1992 ohne erkennbaren Trend zwischen 0,76 und 1,88 m³ je Unfall.

In Abb. 4-22 (nächste Seite) sind die im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Einzeldaten zu UTwSSt als Balkendiagramm dargestellt. Insgesamt wurden 831 Unfälle erfaßt, wobei sich die überwiegende Anzahl der jährlichen Unfälle in Nordrhein-Westfalen ereignete.

* Im genannten Zeitraum gemäß DIW (1994) ab 3000 DM Sachschaden bei mindestens einem der Geschädigten.

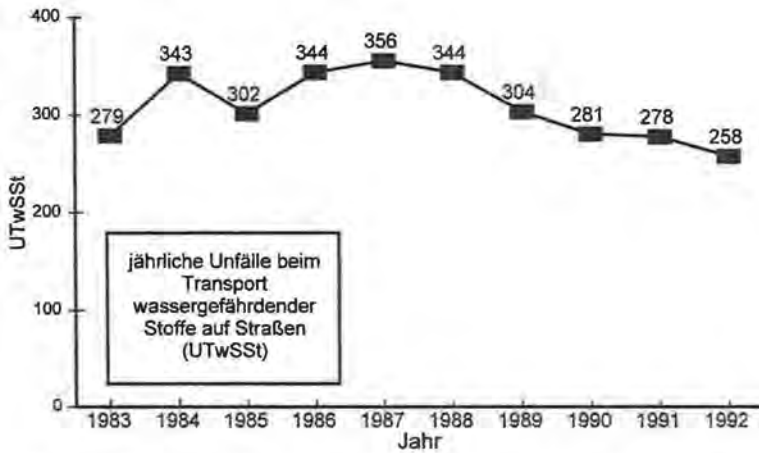


Abb. 4-21: Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe auf Straßen in Deutschland (alte Bundesländer) von 1983 bis 1992 (Auswertung der Daten aus STATISTISCHES BUNDESAMT 1986-1994)

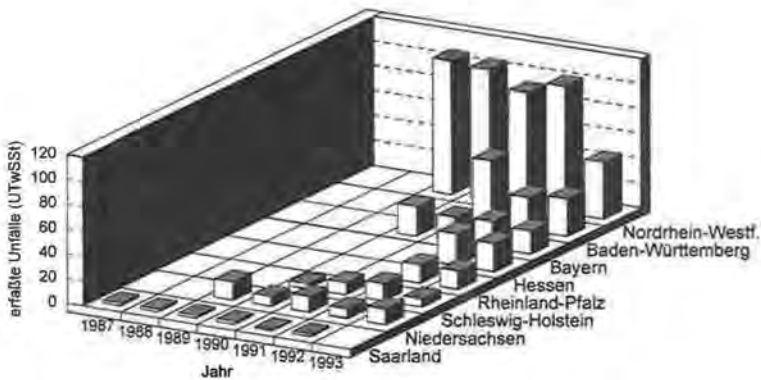


Abb. 4-22: Erhebung von Einzeldaten zu UTwSSt im Überblick (Quellen s. Tab. 4-22)

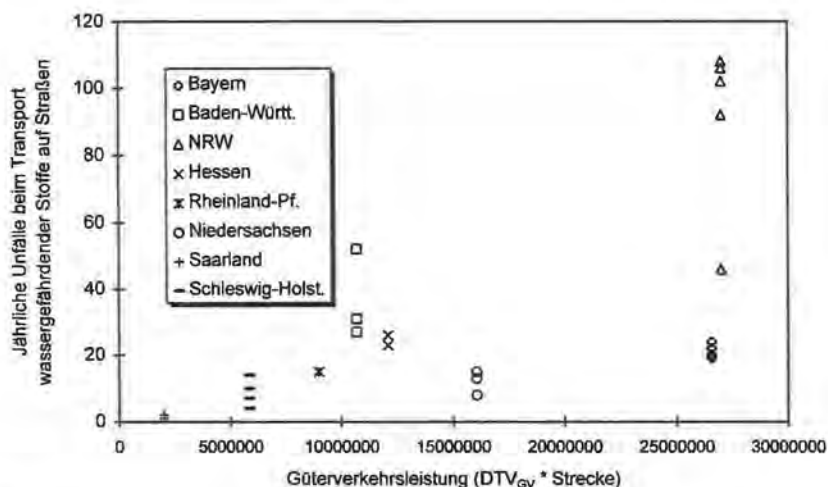
Zur Begründung der im Vergleich der Bundesländer sehr unterschiedlichen Unfallanzahlen kommen folgende Einflußgrößen in Betracht:

- Anzahl und Strecke der Transporte wassergefährdender Stoffe (Transportleistung)
- Unfallschwerpunkte
- Witterungseinflüsse

Die Bedeutung der genannten Einflußgrößen kann wegen der hierfür unzureichenden Bezugsgrößen und Unfalldatenerfassung nicht direkt angegeben werden. Aufgrund der bundesweit einheitlichen Richtlinien für den Ausbau und die Unterhaltung des Streckennetzes erscheinen besondere Häufungen von Unfallschwerpunkten nicht plausibel. Auch besondere Witterungseinflüsse, wie beispielsweise verstärkte winterliche Schnee- und Eisglätte in den südlichen Bundesländern, können nicht bestätigt werden. Daher wird im folgenden untersucht, ob Anzahl und Strecke (Transportleistung) der Transporte wassergefährdender Stoffe den maßgebenden Einfluß auf die erfaßten Unfallzahlen haben. Da diesbezügliche Daten nicht verfügbar sind, wird als Bezugsgröße die Verkehrsleistung des Güterverkehrs wie folgt in Form einer Kenngröße errechnet:

$$\text{Güterverkehrsleistung} = \sum_i (\text{DTV}_i^{\text{GV}} \cdot \text{Strecke}_i), i = \text{BAB, B, L, K} \quad (\text{Gl. 4-2})$$

In Abb. 4-23 (nächste Seite) sind die jährlichen UTwSSt der einzelnen Bundesländer den jeweiligen Güterverkehrsleistungen gegenübergestellt. Trotz erheblicher Schwankungsbreiten ist insgesamt ein signifikanter linearer Zusammenhang erkennbar, der durch einen *PEARSON*-Korrelationskoeffizienten von $r = 0,67$ belegt wird. Die Schwankungen dürften in erster Linie auf die unterschiedliche Wirtschafts- (z.B. chemische Industrie) und Verkehrsstruktur (z.B. Transitverkehr) der einzelnen Bundesländer zurückzuführen sein. Die in Relation zur Transportleistung des Güterverkehrs ungewöhnlich geringen Unfallzahlen in Bayern weichen deutlich vom erkennbaren Trend der anderen Bundesländer ab, was durch einen ohne die bayerischen Daten höheren *PEARSON*-Korrelationskoeffizienten $r_{(\text{ohne Bayern})} = 0,83$ bestätigt wird. Neben den oben genannten Gründen ist eine Untererfassung der Unfälle in Bayern, wie von PÖPPEL & KÜHNEN (1993) bei einer ähnlichen Erhebung zu Gefahrgutunfällen vermutet, zwar möglich, jedoch liegen hierfür keine Anhaltspunkte vor.



Der zeitliche Verlauf der Unfallanzahl wird im folgenden anhand der amtlichen Statistik näher untersucht. In Abb. 4-24 (vorherige Seite) ist hierzu die jährliche Veränderung der Unfallanzahl (UTwSSt) und der Transportleistung im Straßengüterverkehr (in % - bezogen auf das folgende Jahr) dargestellt. Die Anzahl der UTwSSt ist ab dem Jahr 1987 rückläufig, obwohl gleichzeitig die jährliche Transportleistung des Straßengüterverkehrs (DIW 1994) zugenommen hat.

4.3.4.2 Ausgelaufenes und wiedergewonnenes Volumen

Das Merkmal ausgelaufenes Volumen ist eine stetige Zufallsvariable, die je Unfallereignis beliebige Werte zwischen 0 m^3 und dem insgesamt beförderten Volumen annehmen kann. In der vorliegenden Datenbasis betrug das maximal ausgelaufene Volumen 50 m^3 .

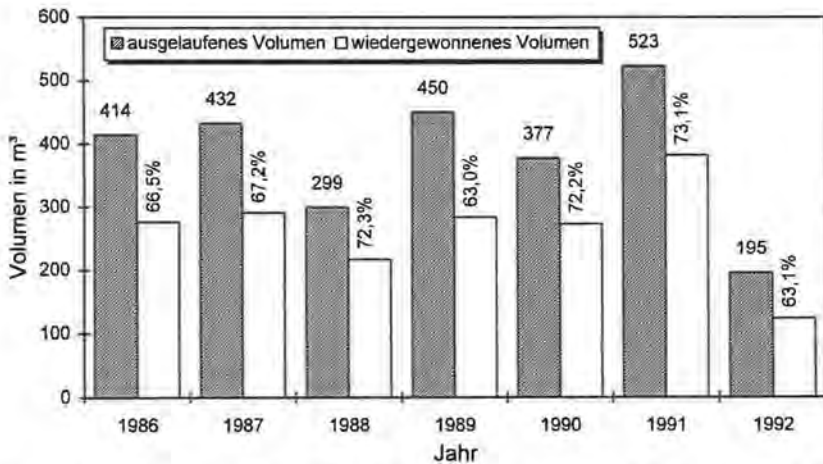


Abb. 4-25: Bei UTwSSt von 1986 bis 1992 jährlich ausgelaufenes Volumen und Wiedergewinnung in % (Auswertung der Daten aus STATISTISCHES BUNDESAMT 1987-1994)

Das von der amtlichen Statistik erfaßte, jährlich bei UTwSSt ausgelaufene Volumen beträgt durchschnittlich $384,3 \text{ m}^3$ und unterliegt mit einer Standardabweichung von $107,7 \text{ m}^3$ starken Schwankungen, die, wie in Abb. 4-25 ersichtlich, im betrachteten Zeitraum keinem erklärbaren Trend folgen. Die Wiedergewinnungsquote schwankt jedoch nur geringfügig um den

Mittelwert 68,2 % bei einer Standardabweichung von 4,35 %, wobei auch hier kein Trend erkennbar ist. Somit kann gefolgert werden, daß der durchschnittliche Erfolg der durchgeführten Sofort- und Folgemaßnahmen relativ konstant ist, obwohl das ausgelaufene Volumen größeren zufälligen Schwankungen unterliegt.

Im folgenden wird das jeweils ausgelaufene Volumen anhand der in dieser Arbeit erhobenen Einzeldaten näher untersucht. Da angenommen werden kann, daß das Merkmal ausgelaufenes Volumen vom Bundesland und dem Erfassungsjahr unabhängig ist, werden hierzu alle 831 UTwSSt herangezogen, trotz unterschiedlicher Erfassungszeiträume der einzelnen Bundesländer (vgl. Abb. 4-22).

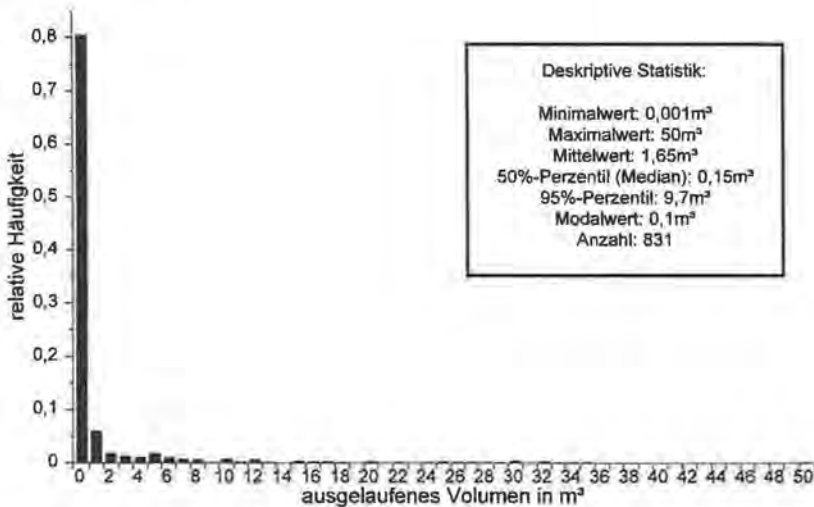


Abb. 4-26: Empirische Häufigkeitsverteilung (Histogramm) und deskriptive Statistik der bei UTwSSt ausgelaufenen Volumina (Auswertung der Einzeldaten)

In Abb. 4-26 sind die statistischen Kennwerte und die empirische Häufigkeitsverteilung (relative Häufigkeit: $\Sigma n_{v_{aus}}/n$; $n=831$) der ausgelaufenen Volumina dargestellt. Mit größter Häufigkeit (Modalwert) liefen in 32,8 % der UTwSSt 0,1 m³ aus; der Mittelwert der ausgelaufenen Volumina betrug 1,65 m³. In 50 % der UTwSSt (Median) wurden weniger als 0,15 m³,

in 95 % der UTwSSt (95 %-Perzentil) weniger als $9,7 \text{ m}^3$ und in 75 % der UTwSSt (75 %-Perzentil) weniger als $0,5 \text{ m}^3$ emittiert. Die Spannweite der ausgelaufenen Volumina ist mit 50 m^3 als sehr groß anzusehen.

Die Hypothese einer Normalverteilung der ausgelaufenen Volumina wird im Rahmen eines Anpassungstests nach *KOLMOGOROV-SMIRNOV* bei einem Signifikanzniveau $(1 - \alpha)$ von 0,95 (siehe BRONSTEIN & SEMENDJAJEW 1987 und RACKWITZ 1993) verworfen. Mit einem Schiefekoeffizienten von $\gamma' = 4,93$ ist die empirische Häufigkeitsverteilung "rechts-schief" (RACKWITZ 1993), das heißt der Median ist kleiner als der Mittelwert, so daß der rechte Ast der empirischen Verteilungskurve flacher ausläuft als der linke. Mit einem Exzeß (Kurtosis) von $\epsilon' = 27,7$ ist die empirische Verteilungsfunktion der ausgelaufenen Volumina der 831 Einzelunfälle in Relation zu einer Normalverteilung schmal und spitz.

Als zusätzliche Kenngröße wird das Produkt aus relativer Häufigkeit und ausgelaufenem Volumen - bezogen auf die Spannweite der ausgelaufenen Volumina - eingeführt (s. Abb. 4-27).

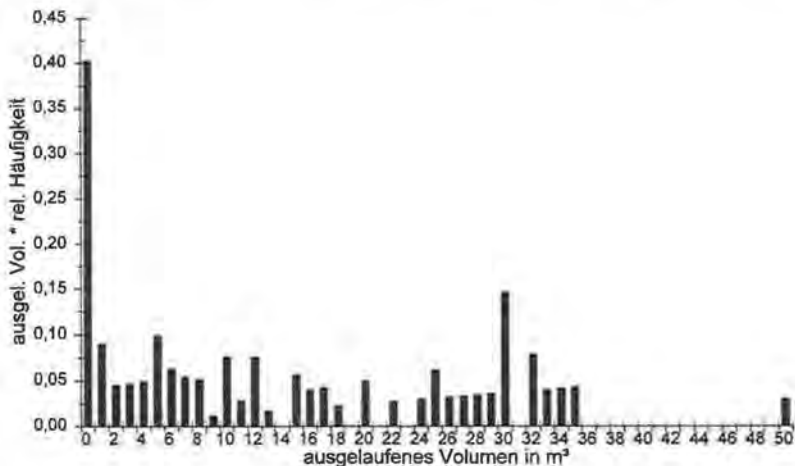


Abb. 4-27: Produkt aus relativer Häufigkeit und ausgelaufenem Volumen - bezogen auf die Spannweite der ausgelaufenen Volumina (Auswertung der Einzeldaten)

Bei gleicher Gewichtung von relativer Häufigkeit und ausgelaufenem Volumen ergibt der Bereich zwischen 0 und 1 m³ die maximale und der Bereich zwischen 5 m³ und 35 m³ nennenswerte jedoch stark schwankende Beträge der Kenngröße. Der Einzelunfall mit 50 m³ ausgelaufenem Volumen ergibt trotz der hohen emittierten Menge eine geringe Bewertung.

Bei den 831 UTwSSt (Einzeldaten) wurden durchschnittlich 65,5 % des ausgelaufenen Volumens wiedergewonnen, wobei kein Zusammenhang zwischen ausgelaufenem und wiedergewonnenem Volumen erkennbar ist, was durch einen *SPEARMAN*-Korrelationskoeffizienten von -0,01 (unkorreliert) bestätigt wird. Die Wiedergewinnung im einzelnen UTwSSt wird anhand eines Histogramms (s. Abb. 4-28) untersucht. Hierbei zeigt sich, daß bei der überwiegenden Anzahl der UTwSSt das ausgelaufene Volumen mit ähnlicher relativer Häufigkeit entweder vollständig oder überhaupt nicht wiedergewonnen wurde.

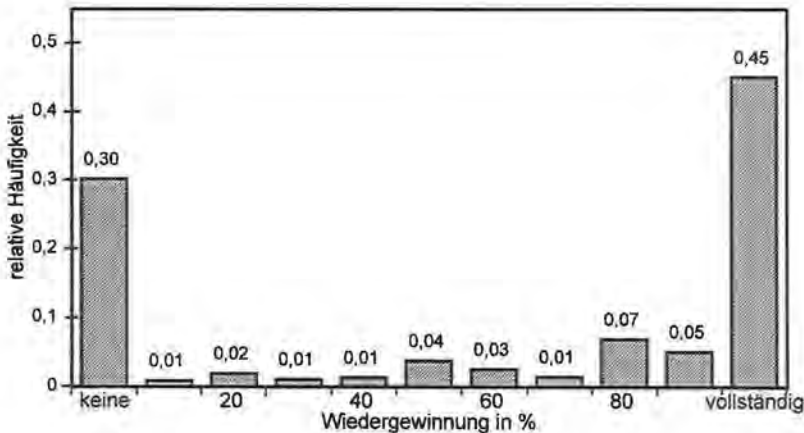


Abb. 4-28: Histogramm der prozentualen Wiedergewinnung (relative Häufigkeit); Auswertung der Einzeldaten.

4.3.4.3 Emittierte Stoffe

Bei der Erfassung der UTwSSSt wird in neun Stoffarten oder -gruppen unterteilt (siehe Anlage 2: Muster des Erhebungsbogens). Somit ist das Merkmal Stoffart eine diskrete Zufallsvariable, die neun verschiedene Werte annehmen kann.

Zunächst werden von der bezüglich der erfaßten Zeiträume heterogenen Erhebung von Einzeldaten die Daten der Jahre 1992 und 1993 verwendet, die von nahezu* allen alten Bundesländern vorliegen. In Abb. 4-29 ist die relative Häufigkeit der Emission der einzelnen Stoffarten ($n_{\text{Stoffart}}/\Sigma n$; $n_{92}=216$; $n_{93}=154$) in einem Histogramm dargestellt. Trotz der unterschiedlichen Unfallanzahl ergeben sich ähnliche relative Emissionshäufigkeiten. Mit größter Häufigkeit werden leichtes Heizöl und Diesel emittiert; die Mineralölprodukte insgesamt haben den überwiegenden Anteil (1992: 79 %; 1993: 75 %). Weiterhin werden mit großer Häufigkeit die Stoffgruppen "anorganische Stoffe" und "sonstige organische Stoffe" emittiert.

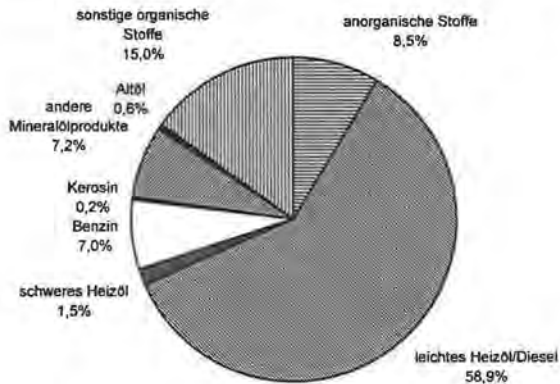


Abb. 4-29: Relative Häufigkeit für die Emission der einzelnen Stoffarten (Auswertung der Einzeldaten für die Jahre 1992 und 1993)

* Ausgenommen Saarland im Jahr 1993, das jedoch in den Jahren von 1987 bis 1991 mit jeweils nur zwei erfaßten Unfällen einen vernachlässigbar geringen Anteil (1% Anteil der zwei erfaßten Unfälle im Jahr 1992) am Unfallgeschehen der alten Bundesländer hat.

In Abhängigkeit vom ausgelaufenen Volumen ergeben sich für die Jahre 1992 und 1993 die in Abb. 4-30 dargestellten Anteile der einzelnen Stoffarten. Hierbei zeigt sich ein deutlich geringerer, jedoch weiterhin bestimmender Anteil von leichtem Heizöl/Diesel bei deutlich größeren Anteilen von Benzin und sonstigen organischen Stoffen und weiterhin geringfügig größerem volumenbezogenen Anteil der anorganischen Stoffe.

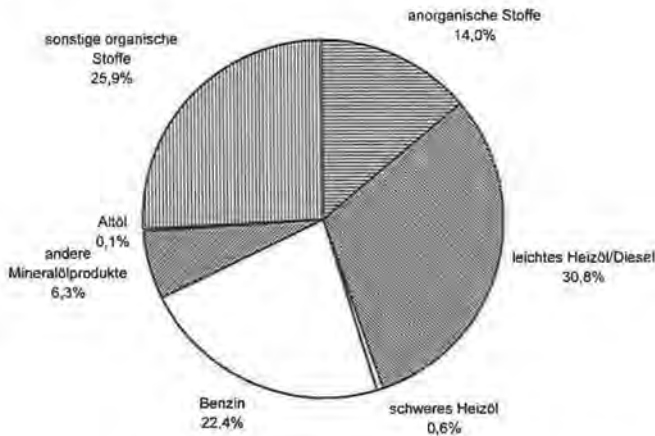


Abb. 4-30: Auf das ausgelaufene Volumen bezogene Anteile der einzelnen Stoffarten (Auswertung der Einzeldaten für die Jahre 1992 und 1993)

Die je nach Stoffart sehr unterschiedlichen Unfallhäufigkeiten lassen einen Zusammenhang zur jährlichen Transportleistung vermuten. Das Bundesamt für Güterverkehr führt Erhebungen zum gewerblichen Güterfernverkehr und zum Werkfernverkehr deutscher und ausländischer Lastkraftfahrzeuge durch, die jährlich in Zusammenarbeit mit dem Kraftfahrt-Bundesamt ausgewertet und veröffentlicht werden (BUNDESAMT FÜR GÜTERVERKEHR & KRAFTFAHRT-BUNDESAMT 1992a,b). Dabei wird die Transportleistung - als Produkt aus transportierter Menge [t] und transportierter Strecke [km] in tkm - unter anderem für folgende der hier untersuchten wassergefährdenden Stoffe ermittelt:

- leichtes Heizöl/Diesel
- Benzin

- schweres Heizöl
- Rohöl
- andere Mineralölprodukte

Im Rahmen einer Korrelationsanalyse kann, wie in Abb. 4-31 ersichtlich, ein Zusammenhang zwischen der Unfallanzahl und der Transportleistung der genannten Stoffe festgestellt werden, der durch die *PEARSON*-Korrelationskoeffizienten $r_{1992}=0,80$ und $r_{1993}=0,79$ belegt wird. Die in Relation zur Transportleistung ungewöhnlich häufigen Unfälle mit leichtem Heizöl/Diesel werden auf größere Transporthäufigkeiten und geringere Transportweiten wegen der bei diesen Stoffen gegebenen direkten Nachfrage der Einzelhaushalte zurückgeführt.

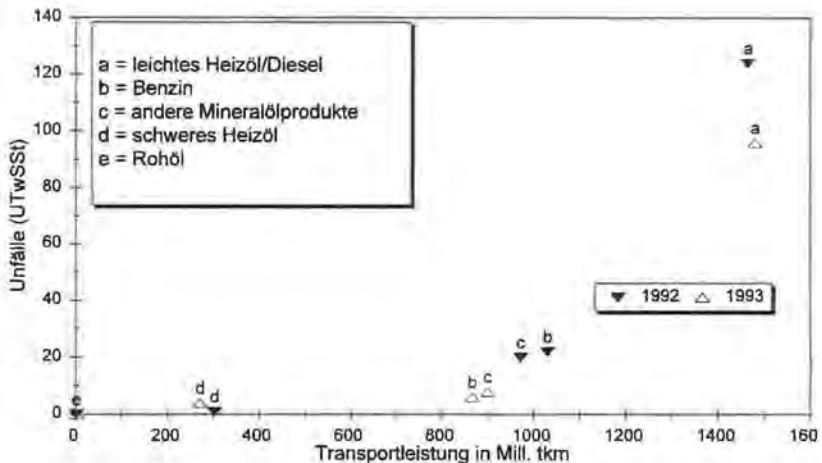


Abb. 4-31: Unfälle und Transportleistungen bestimmter Stoffe 1992 und 1993 (Erhebung von Einzeldaten; BUNDESAMT FÜR GÜTERVERKEHR & KRAFTFAHRT-BUNDESAMT 1992, 1993)

In Abb. 4-32 sind die relativen Häufigkeiten für die Emission der einzelnen Stoffarten getrennt nach Bundesländern für die Jahre 1992 und 1993 dargestellt. Zusammenfassend kann dabei eine typische Verteilung der relativen Häufigkeiten auf die erfaßten Stoffarten im Vergleich der untersuchten Bundesländer festgestellt werden. Die gegenseitigen Abweichungen werden auf die unterschiedliche Wirtschafts- und Verkehrsstruktur der einzelnen Bundesländer zurückgeführt.

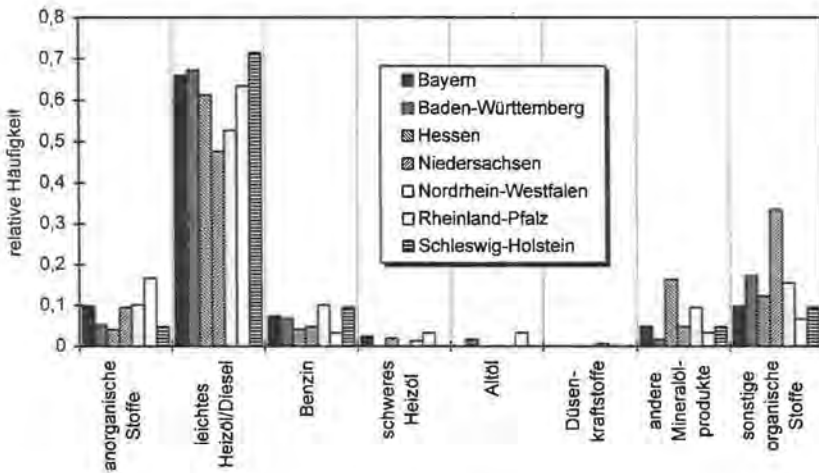


Abb. 4-32: Relative Häufigkeit für die Emission der einzelnen Stoffarten - Vergleich der Bundesländer für die Jahre 1992 und 1993 (Auswertung der Einzeldaten)

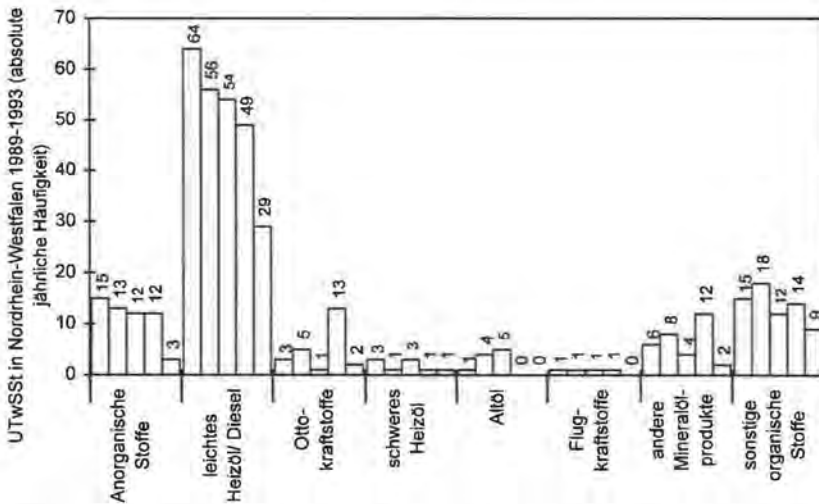


Abb. 4-33: Jährliche Anzahl der UTwSSt (absolute Häufigkeit) in Nordrhein-Westfalen getrennt nach Stoffarten in den Jahren 1989 bis 1993 (Auswertung der Einzeldaten)

Zeitliche Schwankungen der Emissionshäufigkeit der Stoffarten werden anhand der Einzeldaten für das Land Nordrhein-Westfalen von 1989 bis 1993 untersucht. In Abb. 4-33 ist zu diesem Zweck die jährliche Anzahl von UTwSSt (absolute Häufigkeit) nach Stoffarten getrennt dargestellt. Innerhalb des fünfjährigen Zeitraumes sind geringfügige Schwankungen der Emissionshäufigkeit der Stoffarten festzustellen, die sich bei den seltener emittierten Stoffarten, wie "Benzin" oder "andere Mineralölprodukte", besonders stark auswirken. Weiterhin nahm die Häufigkeit der Unfälle mit "leichtes Heizöl/Diesel" innerhalb der fünf Jahre von 64 auf 29 ab.

4.3.4.4 Untersuchung von "Großunfällen"

Die 18 der 831 erfaßten Unfälle, bei denen mehr als 20 m^3 wassergefährdende Stoffe ausgelaufen sind werden im folgenden als "Großunfälle" gesondert untersucht. Es wird in Unfälle mit $20 \text{ m}^3 < \text{ausgelaufenes Volumen} < 30 \text{ m}^3$ (Y) und Unfälle mit $\text{ausgelaufenes Volumen} > 30 \text{ m}^3$ (X) unterteilt. Da Großunfälle als singuläre Ereignisse ohne erkennbaren Zusammenhang zum Ereignisjahr oder zum betroffenen Bundesland angesehen werden, dient die gesamte Erhebung von Einzeldaten (831 Unfälle) als Datenbasis. Rückschlüsse auf die absolute Häufigkeit von Großunfällen sind in dieser Form nicht möglich. Hinsichtlich der Datenqualität wird auf die eingangs erläuterten Einschränkungen verwiesen (s. Abschn. 4.3.3). Die zu Großunfällen erhobenen Daten sind in Tabelle 4-24 aufgelistet. Eine Auswertung der Daten zu Großunfällen ergibt folgendes:

- bei 6 Unfällen (33 %) wurde mit größter Häufigkeit aller Stoffarten Benzin emittiert
- bei 9 Unfällen (50 %) wurden die ausgetretenen Stoffe vollständig bzw. nahezu vollständig wiedergewonnen; bei 5 Unfällen (28 %) erfolgte keine Wiedergewinnung der ausgetretenen Stoffe
- bei 15 Unfällen (83 %) wurde der Boden verunreinigt
- bei 4 Unfällen (22 %) wurde ein Kanalnetz verunreinigt
- bei 7 Unfällen (39 %) wurde ein Grundwasservorkommen verunreinigt
- bei 4 Unfällen (22 %) wurde ein Oberflächengewässer verunreinigt
- bei 2 Unfällen wurde eine Wasserversorgungsanlage gefährdet;
nach 1 Unfall fiel eine Wasserversorgungsanlage aus;
bei keinem Unfall wurde eine Wasserversorgungsanlage verunreinigt
- 1 Unfall führte zu einer Beeinträchtigung von Mensch und/oder Tier

Tabelle 4-24: Daten zu Großunfällen im Rahmen der insgesamt erfaßten 831 Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe auf Straßen (Auswertung von Einzeldaten)

Unfall-Nr.	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	Y1	Y2	Y3	Y4	Y5	Y6	Y7	Y8	Y9	Y10	Y11
Unfallausmaß	Ausgelaufenes Volumen > 30 m³							20 m³ < ausgelaufenes Volumen < 30 m³										
Unfalldaten																		
Verkehrsart (FV=Fernverkehr; NV=Nah- verkehr; UFR=Unfall beim Fahren, Rangieren)	FV,UFR	NV,UFR	FV,UFR	FV,UFR	FV,UFR	NV,UFR	FV,UFR	NV,UFR	NV,UFR	FV,UFR	FV,UFR	FV,UFR	FV,UFR	FV	FV,UFR	FV,UFR	FV,UFR	FV,UFR
Behältervolumen	35	35	34	32	36	50,00	34	30	30	30	28	*	*	*	25	32	24	30
Befördertes Volumen	35	33,5	34	32	32	50,00	31,316	30	30	27,5	28	30	40	*	25	32	24	30
Ausgelaufenes Volumen	35	33,5	34	32	32	50,00	30,116	30	25	27,5	28	29	26	30	25	22	24	30
Wiedergewonnenes Volumen	35	28	0,62	32	31,5	50,00	12,11	20	24,5	27,5	0	0	0	0	25	10	24	30
Nicht wiedergew. Volumen	0	5,5	33,38	0	0,5	0	18,006	10	0,5	0	28	29	26	30	0	12	0	0
Stoffart	Benzin	Benzin	Benzin	leichtes Heizöl/ Diesel	leichtes Heizöl/ Diesel	Benzin	Benzin	leichtes Heizöl/ Diesel	sonst. org. St.	schw. Heizöl	anorg. Stoff	schw. Heizöl	anorg. Stoff	anorg. Stoff	sonst. org. St.	Benzin	sonst. org. St.	sonst. org. St.
Unfallfolgen																		
Verunreinigung d. Bodens	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein	ja	nein	ja	ja	ja	ja
Kanalnetz-Verunreinigung	nein	nein	nein	nein	nein	nein	*	nein	ja	nein	nein	ja	ja	nein	nein	ja	nein	nein
Grundwasser-Verunreinig.	ja	ja	ja	nein	ja	nein	ja	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja
Oberflächengew.-Verunr.	nein	ja	nein	nein	ja	nein	*	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein
Wasserversorgung-Verunr.	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Wasserversorg.-Gefährd.	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja
Keine Sekundärfolgen	ja	nein	nein	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	ja	nein	nein	nein	ja	nein	ja	ja
Beeinträcht.-Mensch/ Tier	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein
Wasserversorgung-Ausfall	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein	nein	nein	nein
Sonstige Folgeschäden	nein	nein	ja	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	nein	ja	nein	nein
Erläuterungen: Volumina in m³; * = keine Angabe																		

Der beim Unfall Y6 angegebene "Ausfall einer Wasserversorgung", obwohl keine Gefährdung oder Verunreinigung einer Wasserversorgung vorlag ist nicht plausibel. Es dürfte sich entweder um einen Fehler beim Ausfüllen des Erhebungsbogens oder eine reine (ggf. im nachhinein unbegründete) Präventivmaßnahme handeln.

Aufgrund des mit 50 m³ ungewöhnlich großen Volumens (Behälter, befördert, ausgelaufen und wiedergewonnen) des Unfalles X6 wurde dieser nochmals überprüft. Eine Anfrage beim zuständigen Statistischen Landesamt ergab neben den bereits bekannten Daten folgendes:

- Ein inländisches Tankfahrzeug mit 50 m³ Behältervolumen
- Unfall beim Fahren/Rangieren
- Landesstraße als Unfallort
- Großeinsatz der Feuerwehr und der Umweltbehörde für Sofort- und Folgemaßnahmen

Da auch unter den von PÖPPEL & KÜHNEN (1993) insgesamt zwischen 1989 und 1991 erhobenen 153 Unfällen mit Gefahrguttankfahrzeugen 8 Tankfahrzeuge mit zwischen 40 m³ und 50 m³ und ein Tankfahrzeug mit über 50 m³ Tankvolumen erfaßt wurden, bestehen keine Zweifel an der Richtigkeit der Angaben zum Unfall X6.

4.3.4.5 Abkommen von der Fahrbahn

Aufgrund des besonderen Einflusses auf die Erfordernis und die Gestaltung von Schutzmaßnahmen gegenüber außergewöhnlichen Einwirkungen wird im folgenden das Unfallmerkmal "Abkommen von der Fahrbahn ..." näher untersucht.

Bei der Untersuchung von 131 Unfällen mit Gefahrguttankfahrzeugen im Zeitraum von 1989 bis 1993 ermittelten PÖPPEL & KÜHNEN (1993) "Abkommen von der Fahrbahn ..." als häufigste Unfallursache. Folgende relative Häufigkeiten wurden ermittelt:

- | | |
|------------------------------|--------|
| ▪ Abkommen von der Fahrbahn: | 53,4 % |
| ▪ davon nach rechts: | 70 % |
| ▪ davon nach links: | 30 % |

Das Abkommen nach links bei 30 % der Unfälle mit Gefahrguttankfahrzeugen ist besonders kritisch zu sehen, da wegen des größeren Anprallwinkels an passive Schutzeinrichtungen die Durchbruchgefahr und die potentielle Unfallschwere erhöht sind.

Für den Zeitraum von 1986 bis 1989 nennen SCHNÜLL et al. (1993) für das "Abkommen von der Fahrbahn ..." bei insgesamt 226503 Unfällen aller Arten von Kfz auf Bundesstraßen in der Bundesrepublik Deutschland folgende Häufigkeiten:

- Abkommen von der Fahrbahn: 28 %
- davon nach rechts: 56,4 %
- davon nach links: 43,6 %

Im Rahmen einer detaillierteren Untersuchung von insgesamt 4943 Unfällen auf Bundesstraßen in Rheinland-Pfalz im Zeitraum von 1986 bis 1989 ermittelten SCHNÜLL et al. (1993) einen signifikanten Einfluß des Straßenverlaufs auf die Richtung des Abkommens (s. Tabelle 4-25).

Tabelle 4-25: Einfluß des Straßenverlaufs auf die Richtung des Abkommens bei "Abkommen-Unfällen" auf Bundesstraßen in Rheinland-Pfalz im Zeitraum von 1986 bis 1989 (Daten aus SCHNÜLL et al. 1993)

	Abkommen nach rechts	Abkommen nach links
Linkskurve	35,2 %	24,4 %
Rechtskurve	27,4 %	45,6 %
Gerade	37,4 %	30 %
Σ	100 %	100 %

Zusammenfassend wird gefolgert, daß wegen der großen Häufigkeit des Abkommens von der Fahrbahn im Hinblick auf außergewöhnliche Einwirkungen besonderes Augenmerk auf die Art und den Umfang der Anordnung passiver Schutzeinrichtungen zu legen ist.

4.3.5 Beschaffenheit der Stoffe aus außergewöhnlichen Einwirkungen

Im Sinne des präventiven Grundwasserschutzes ist eine mögliche Versickerung straßenspezifischer, wassergefährdender Stoffe in der ungesättigten Bodenzone maßgebend. Daher werden

im folgenden die Stoffeigenschaften untersucht, die das Migrationspotential der durch Unfälle ermittelten wassergefährdenden Stoffe in der ungesättigten Zone bestimmen. Vom Ausschuß "Verhalten von wassergefährdenden Stoffen" des Beirates "Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe" (LTWS) wurde mit der LTWS-Schrift Nr. 25 ein "*Stoffspezifisches Bewertungsschema für das Verhalten von wassergefährdenden Stoffen im Untergrund*" vorgestellt, das die Einschätzung des Ausbreitungsverhaltens eines Stoffes im Untergrund ermöglicht (UBA, 1991b). Unter Berücksichtigung der physiko-chemischen Eigenschaften, die das Verhalten des betrachteten Stoffes im Untergrund bestimmen, erfolgt eine Einstufung in vier Migrationsklassen (MK):

- MK 0: geringes Migrationspotential
- MK 1: mittleres Migrationspotential
- MK 2: hohes Migrationspotential
- MK 3: sehr hohes Migrationspotential

Das Migrationsverhalten von Flüssigkeiten wird in folgenden Bewertungsschritten anhand der angegebenen Stoffeigenschaften additiv bewertet (UBA, 1991b):

- *Sickerverhalten* (ungesättigte Zone): kinematische Viskosität
- *Volatilitätsverhalten* (ungesättigte Zone): Dampfdruck und relative Gasdichte
- *Ausbreitungsverhalten* (gesättigte Zone): Stoffdichte und Wasserlöslichkeit

Das Migrationsverhalten von Feststoffen wird bei einer Wasserlöslichkeit $< 10^2$ mg/l als gering (MK 0) und bei einer Wasserlöslichkeit $> 10^2$ mg/l als mittel (MK 1) bewertet (UBA, 1991b).

Der Einfluß der hydrogeologischen Randbedingungen auf den Schadstofftransport wird lediglich durch die Unterscheidung in gesättigte und ungesättigte Zone berücksichtigt. Somit liefert das Bewertungsschema eine primär stoffspezifische Einstufung bezüglich des Migrationsverhaltens wassergefährdender Stoffe.

Das Migrationspotential der gemäß Umweltstatistikgesetz (UStatG - zit. in STATISTISCHES BUNDESAMT 1994) erfaßten wassergefährdenden Stoffe ist in Tab. 4-26 bewertet. Hinsichtlich der "*nicht bestimmbar*" Stoffgruppen werden folgende Überlegungen angestellt:

- Das Migrationspotential wasserlöslicher Feststoffe kann gemäß (ÜBA, 1991b) maximal als "mittel" (MK 1) bewertet werden.
- Die Unterscheidung zwischen hohem (MK 2) und sehr hohem Migrationspotential (MK 3) wird ausschließlich im Hinblick auf die Ausbreitung in der gesättigten Zone (Grundwasserleiter) anhand der Wasserlöslichkeit (MK 3 ab $>10^4$ mg/l) vorgenommen. Im Sinne des präventiven Grundwasserschutzes ist jedoch zunächst die Versickerung in der ungesättigten Zone zu untersuchen.

Tabelle 4-26: Migrationspotential, relative Emissionshäufigkeit und mittleres ausgelaufenes Volumen der gemäß Umweltstatistikgesetz (UStatG - zit. in STATISTISCHES BUNDESAMT 1994) erfaßten wassergefährdenden Stoffe aus außergewöhnlichen Einwirkungen

Stoffart bzw. Stoffgruppe	Migrationsklasse	relative Emissions- Häufigkeit (Unfallanzahl)*	mittleres ausgelaufenes Volumen in m ³
anorganischer Stoff	<i>nicht bestimmbar</i>	8,5 %	2,108
leichtes Heizöl und Dieselmotorenstoff	MK 1	59,9 %	1,005
Ottomotorenstoff (Benzin)	MK 2	7,0 %	6,142
schweres Heizöl	MK 0	1,5 %	6,654
Altöl	MK 0	0,6 %	0,1
Rohöl	MK 0	<i>kein Unfall erfaßt</i>	
Flugmotorenstoff (Düsenantriebsstoffe)	MK 2	0,2 %	0,215
andere Mineralölprodukte	<i>nicht bestimmbar</i>	7,2 %	0,78
sonstige organische Stoffe	<i>nicht bestimmbar</i>	15,0 %	2,106

* Auswertung der im Rahmen dieser Arbeit erhobenen Einzeldaten der Jahre 1991 und 1992 zu Unfällen beim Transport wassergefährdender Stoffe

Von allen erfaßten Stoffarten sind Ottomotorenstoffe vor allem wegen ihres hohen Migrationspotentials (MK 2) und weiterhin wegen des hohen, je Unfall ausgelaufenen Volumens (Mittelwert) hinsichtlich der Verlagerung der durch Unfälle emittierten wassergefährdenden Stoffe maßgebend.

4.3.6 Oberirdische Verlagerung der Stoffe aus außergewöhnlichen Einwirkungen

Die oberirdische Verlagerung der durch Unfälle emittierten wassergefährdenden Stoffe hängt in erster Linie vom jeweiligen Unfallhergang ab, wobei folgende Grundfälle unterschieden werden können:

- a) Unfall auf der befestigten Fahrbahn
- b) Unfall außerhalb der befestigten Fahrbahn

Bei Emissionen wassergefährdender Stoffe im Zuge von Unfällen auf der befestigten Fahrbahn (Fall a) kommen prinzipiell alle in Abschn. 3.2.1 erläuterten Verlagerungspfade in Betracht. Hierzu sei exemplarisch ein von KRAUTH & KLEIN (1982) erfaßter Unfall beschrieben, bei dem an der A 81 am 24.04.1978 ein schwerer Autokran Feuer fing, nachdem am Fahrzeug mehrere Hydraulikleitungen gebrochen waren. Das beim Löschen des Brandes abfließende Löschwasser enthielt im Vergleich zu dem nur durch ständige und vorübergehende Einwirkungen belasteten Fahrbahnabfluß erheblich größere Mengen wassergefährdender Stoffe:

Tabelle 4-27: Vergleich des durch ständige und vorübergehende Einwirkungen belasteten Fahrbahnabflusses mit dem nach einem Unfall abfließenden Löschwasser an der A 81 - aus KRAUTH & KLEIN (1982)

Parameter	Löschwasser	Mittlere Konzentration im Fahrbahnabfluß (02.78-09.78)	<u>Löschwasser</u> <u>Fahrbahnabfluß</u>
CSB	3923 mg/l	107,1 mg/l	36,6
pH-Wert	6,9	6,6...8,5	-
Chlorid	153 mg/l	107,9 mg/l	1,4
Mineralöl	328 mg/l	7,02 mg/l	46,7
Cadmium	0,057 mg/l	0,0059 mg/l	9,7
Chrom	0,053 mg/l	0,0096 mg/l	5,5
Kupfer	0,203 mg/l	0,097 mg/l	2,1
Eisen	4,0 mg/l	3,42 mg/l	1,2
Blei	0,439 mg/l	0,202 mg/l	2,2
Zink	4,7 mg/l	0,36 mg/l	13,1

Sofern der Unfall- bzw. Emissionsort außerhalb der befestigten Fahrbahn liegt (Fall b), sind oberirdische Verlagerungsprozesse von untergeordneter Bedeutung, da die emittierten Stoffe bereits einer potentiellen Verlagerung ins Grundwasser zur Verfügung stehen.

Nach UTWSSt sind Sofortmaßnahmen zur Beendigung des Austritts wassergefährdender Stoffe und/oder Rückgewinnung/Bindung der wassergefährdenden Stoffe an der Oberfläche durchzuführen, wodurch auch die oberirdische Verlagerung beeinflußt wird.

Zusammenfassend ist der jeweilige Unfallhergang, insbesondere die Lage des verunfallten Fahrzeuges, im Hinblick auf die oberirdische Verlagerung wassergefährdender Stoffe aus außergewöhnlichen Einwirkungen bestimmend.

4.3.7 Unterirdische Verlagerung der Stoffe aus außergewöhnlichen Einwirkungen

4.3.7.1 Allgemeines

Bei Unfällen werden örtlich begrenzt konzentrierte Schadstoffe in großer Menge schlagartig emittiert, so daß zunächst der zeitliche Verlauf einer Versickerung flüssiger Schadstoffe bzw. Schadstofflösungen und somit die Konvektion der maßgebende Verlagerungsprozeß ist. Längerfristige Verlagerungsprozesse, wie Abbau und Umwandlung, sind nur bei unzureichendem Erfolg der nach Unfällen kurzfristig durchzuführenden Sofort- und Folgemaßnahmen relevant.

Die Infiltration straßenspezifischer, wassergefährdender Stoffe nach Unfällen unterliegt besonderen Randbedingungen, die bei der Beurteilung hydrogeologischer Schutzwirkungen der Grundwasserüberdeckung zu berücksichtigen sind. Diese werden im Rahmen einer Literaturauswertung näher untersucht.

4.3.7.2 Infiltration von Ottokraftstoffen (Mineralölprodukte) in die Grundwasserüberdeckung

Im folgenden werden die Grundlagen der Infiltration von Ottokraftstoffen (Mineralölprodukten) in die Grundwasserüberdeckung anhand einer Literaturauswertung erarbeitet:

Mehrphasenströmung:

Bei der Versickerung bzw. Infiltration von Benzin handelt es sich prinzipiell um eine hochgradig instationäre Mehrphasenströmung, da die Durchlässigkeit und die Kapillarität des Bodens für die einzelnen Phasen von der räumlich und zeitlich veränderlichen

Sättigungsverteilung abhängen. Die theoretischen Grundlagen sind in der Literatur (z.B.: UBA 1990; BEYER 1965; DAM, van 1967; MULL 1969; SCHIEGG 1977 und 1979; SCHWEIGER 1966 u. 1967; SCHWILLE 1966) ausführlich erläutert, so daß im folgenden nur auf die für die Aufgabenstellung relevanten Ergebnisse diesbezüglicher Labor- und Felduntersuchungen eingegangen wird.

In teilgesättigten Böden ist je nach Sättigungsverteilung die "Drei-Phasen-Strömung" der nicht mischbaren Phasen *Luft-Wasser-Mineralölprodukt* zu untersuchen. Da für jede Phase nur ein Teil des Porenraumes zur Verfügung steht, ergeben sich geringere Durchlässigkeiten der einzelnen Phasen. Diese relativen Durchlässigkeiten (Permeabilitäten) der einzelnen Phasen in einem bestimmten Boden (jeweils bezogen auf die gesättigte Durchlässigkeit) können anschaulich als "Isopermen" (=Linien gleicher Durchlässigkeit) in Abhängigkeit unterschiedlicher Sättigungsgrade der drei Phasen in einem Dreiecksdiagramm dargestellt werden (s. Abb. 4-34).

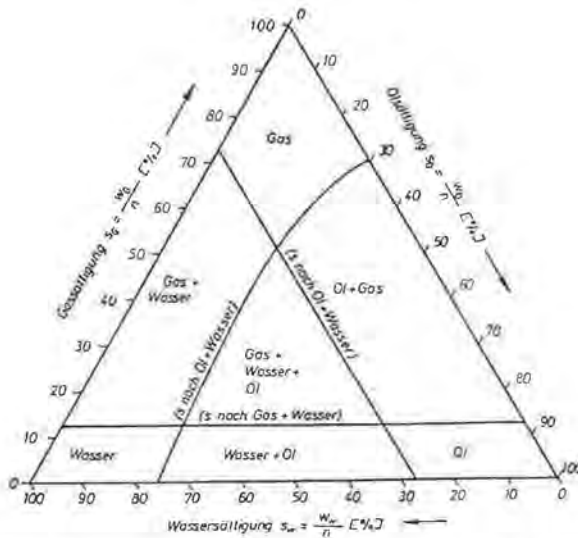


Abb. 4-34: Mobilität und relative Durchlässigkeit der Phasen Wasser, Öl und Luft in Sandböden in Abhängigkeit von der Sättigungsverteilung (aus BEYER & SCHWEIGER 1968)

Diesbezügliche Laboruntersuchungen von SCHWEIGER (1966) und Leverett (1939 - zit. in SCHWEIGER 1966) an schwach schluffigen Sanden ergaben für unterschiedliche Mineralölprodukte jedoch denselben Boden annähernd gleiche relative Durchlässigkeiten (s. Abb. 4-34). Aus dem Diagramm geht weiterhin hervor, daß in größeren Bereichen zumindest eine der drei Phasen bei Residualsättigung unbeweglich ist und daß das gleichzeitige Strömen aller drei Phasen nur in einem äußerst eng begrenzten Sättigungsbereich möglich ist.

Da Wasser gegenüber Mineralölprodukten im Boden die stärker benetzende Phase ist, hat der natürliche Wassergehalt bzw. die Wassersättigung eines Bodens erheblichen Einfluß auf die Durchlässigkeit für Mineralölprodukte. Ein vollständig wassergesättigter Boden kann von Mineralölprodukten wegen deren geringerer Dichte und Benetzungsfähigkeit (des Bodens) nur unter erhöhten äußeren Drücken durchströmt werden, da hierzu ein Teil des Porenwasser verdrängt werden muß. Der Wasserhaushalt oberflächennaher Bodenschichten unterliegt einer Vielzahl veränderlicher Einflußgrößen, wie Temperatur, Niederschlag und Wasserbedarf von Pflanzen. Für die Infiltration von Mineralölprodukten ist hierbei die Sättigungsverteilung von Porenwasser und -luft innerhalb der ungesättigten Bodenzone (Grundwasserüberdeckung) zum Zeitpunkt eines Unfalles maßgebend. Da die jeweilige in-situ-Wasser- und -Luftsättigung nach einem Unfall nicht bekannt sind, wird der in dieser Arbeit durchzuführenden Risikobetrachtung vereinfachend eine residuale (Rest-) Wassersättigung innerhalb der ungesättigten Bodenzone zugrundegelegt. Diese vereinfachende Annahme ist während Trockenperioden (v.a. Sommermonate) und in grobkörnigen Böden weitgehend zutreffend und ansonsten konservativ, d.h. auf der sicheren Seite liegend.

Bei Residualsättigung des Bodenwassers innerhalb der ungesättigten Bodenzone kann der Infiltration des nicht wassermischbaren Fluids Benzin in Lockergesteinen vereinfachend näherungsweise eine Einphasenströmung zugrunde gelegt werden, da die Porenluft bei punktförmiger Eingabe zur Seite hin verdrängt werden kann (vgl. MULL 1969 und SCHIEGG 1979). Folglich ist dann auch Residualsättigung der Porenluft anzunehmen.

Als weitere Vereinfachung wird im folgenden unter Vernachlässigung horizontaler Ausbreitungsvorgänge infolge Kapillarität ausschließlich eine eindimensionale, vertikale Strömung innerhalb der ungesättigten Bodenzone (Grundwasserüberdeckung) untersucht. Bei

unbegrenzter Benzinzufuhr hat diese Vereinfachung keine sicherheitsrelevante Auswirkung; ansonsten ist sie konservativ, d.h. auf der sicheren Seite liegend.

Durchlässigkeit des Bodens für Benzin und andere Mineralölprodukte:

Als wesentlicher Parameter wird im folgenden die Durchlässigkeit des Bodens für Benzin bei stationärer Einphasenströmung auf der Grundlage des *DARCY*-Gesetzes untersucht.

Tabelle 4-28: Durchlässigkeitsbeiwerte für Benzin, leichtes Heizöl/Diesel und Wasser in grobkörnigen Böden (Zusammenstellung von Laborversuchsergebnissen)

Autor	Bodenart	Porenvolumen in %	Durchlässigkeitsbeiwert k in m/s			Verhältnismerte	
			Benzin	L. Heizöl/Diesel	Wasser	$k_{\text{Benzin}}/k_{\text{Wasser}}$	$k_{\text{Diesel}}/k_{\text{Wasser}}$
KROLEWSKI (1959)	50 % mS, 50 % gS	31,5	$7,1 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$2,9 \cdot 10^{-4}$	2,4	0,6
		33,5	$9,8 \cdot 10^{-4}$	$2 \cdot 10^{-4}$	$3,4 \cdot 10^{-4}$	2,9	0,6
KROLEWSKI (1959)	50 % fS, 50 % mS	32	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-5}$	$2,3 \cdot 10^{-5}$	6,1	1,2
		35	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	$3,5 \cdot 10^{-5}$	6	1
		38	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-5}$	6,7	1
KROLEWSKI (1959)	10 % fS, 45 % mS, 45 % gS	28	$3,3 \cdot 10^{-4}$	$6 \cdot 10^{-5}$	$6 \cdot 10^{-5}$	5,5	1
		31	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$9 \cdot 10^{-5}$	$1 \cdot 10^{-4}$	5,7	0,9
		34	$8,1 \cdot 10^{-4}$	$1,2 \cdot 10^{-4}$	$1,4 \cdot 10^{-4}$	5,8	0,9
KROLEWSKI (1959)	30 % fS, 35 % mS, 35 % gS	28	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$3,2 \cdot 10^{-5}$	$4,3 \cdot 10^{-5}$	3,3	0,7
		30	$2,1 \cdot 10^{-4}$	$3,9 \cdot 10^{-5}$	$5,2 \cdot 10^{-5}$	4	0,8
		32	$2,7 \cdot 10^{-4}$	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$6,5 \cdot 10^{-5}$	4,2	0,7
SCHWEIGER (1966)	mS	30,3	$5,2 \cdot 10^{-4}$	$6,3 \cdot 10^{-5}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	4	0,5
		34,2	$7,6 \cdot 10^{-4}$	$8,6 \cdot 10^{-5}$	$2 \cdot 10^{-4}$	3,8	0,4
		37	$1,1 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-4}$	$2,7 \cdot 10^{-4}$	4,1	0,5

In Tabelle 4-28 sind Ergebnisse von Laboruntersuchungen zur Durchlässigkeit (gesättigte Leitfähigkeit) unterschiedlich zusammengesetzter grobkörniger Bodenarten gegenüber Benzin, leichtem Heizöl/Diesel und Wasser aus der Literatur zusammengestellt. Es ergaben sich höhere Durchlässigkeiten für Benzin gegenüber Wasser (2,4- bis 6,7-fach), die nur teilweise durch das Verhältnis der kinematischen Zähigkeiten $\nu_{\text{Wasser}}/\nu_{\text{Benzin}} \sim 1,77$ (UBA 1990) erklärt werden können. Leichtes Heizöl/Diesel führt in den untersuchten, grobkörnigen Böden überwiegend zu geringeren Durchlässigkeiten als Wasser (0,4- bis 1,2-fach), was ebenfalls nur teilweise durch das Verhältnis der kinematischen Zähigkeiten $\nu_{\text{Wasser}}/\nu_{\text{L. Heizöl/Diesel}} \sim 0,25$ (UBA

1990) erklärt werden kann. Eine Literaturobwertung bezüglich dieser Abweichungen ergibt folgendes:

Nach MULL (1969) kann der Durchlässigkeitsbeiwert k für ein bestimmtes Fluid anhand der spezifischen Durchlässigkeit oder Permeabilität K unter Berücksichtigung der Dichte ρ und der dynamischen Zähigkeit η oder der kinematischen Zähigkeit ν wie folgt errechnet werden:

$$k = K \frac{\rho}{\eta} = K \frac{\rho}{\nu} \quad (\text{Gl. 4-3})$$

Nach BEYER & SCHWEIGER (1969) ist hierbei die Unabhängigkeit des spezifischen Durchlässigkeitsbeiwertes K von der Filterflüssigkeit nur gewährleistet, solange die Flüssigkeit das poröse Medium bzw. dessen Porenkanäle nur unwesentlich beeinflusst, wie beispielsweise bei Grobsand oder Glaskugeln. Wie in Tabelle 4-29 ersichtlich, ergaben die Untersuchungen von SCHWEIGER (1966) bereits bei Mittelsand etwa zweifache K -Werte für Benzin und Diesel gegenüber Wasser, die mit zunehmendem Feinkornanteil je nach Porenvolumen bis auf einen maximal 36,7-fachen K -Wert für Benzin gegenüber Wasser anstiegen.

Tabelle 4-29: Verhältniswerte der spezifischen Durchlässigkeiten K gegenüber unterschiedlichen Filterflüssigkeiten in Abhängigkeit vom Porenvolumen n aus SCHWEIGER (1966)

Mittelsand			schwach toniger schluffiger Sand			toniger sandiger Schluff		
n	$K_{\text{Benzin}}/K_{\text{Wasser}}$	$K_{\text{Diesel}}/K_{\text{Wasser}}$	n	$K_{\text{Benzin}}/K_{\text{Wasser}}$	$K_{\text{Diesel}}/K_{\text{Wasser}}$	n	$K_{\text{Benzin}}/K_{\text{Wasser}}$	$K_{\text{Diesel}}/K_{\text{Wasser}}$
30,3 %	2,3	2	30,3 %	14,8	12,5	30,1 %	5,3	4,6
34,2 %	2,2	1,8	40 %	6,4	5,2	38,5 %	21,8	11,6
37 %	2,4	2	45,5 %	6,2	4,3	46,2 %	36,7	10,5

Auch KROLEWSKI (1959) hat bei seinen Durchlässigkeitsuntersuchungen an Sanden mittlere Verhältniswerte $k_{\text{Benzin}}/k_{\text{Wasser}} = 5,7$ und $k_{\text{Heizöl}}/k_{\text{Wasser}} = 0,8$ festgestellt, während die Verhältniswerte der kinematischen Viskositäten $\nu_{\text{Wasser}}/\nu_{\text{Benzin}} = 1,64$ und $\nu_{\text{Wasser}}/\nu_{\text{Heizöl}} = 0,23$ betrugen, so daß die Gültigkeit eines spezifischen Durchlässigkeitsbeiwertes K nicht bestätigt werden konnte. SCHWEIGER (1966) begründet dies durch Unterschiede in der Adsorption der jeweiligen Flüssigkeiten (Mineralölprodukte und Wasser) an einzelne Bodenteilchen und der damit verbundenen Einengung des absoluten Gesamtporenraumes n auf das spannungsfreie, dynamisch wirksame Porenvolumen n_w . Hierdurch ergeben sich größere Differenzen der

Durchlässigkeitsbeiwerte desselben Bodens für Wasser und Mineralölprodukte, die nicht allein auf die unterschiedlichen Viskositäten zurückzuführen sind.

Anhand von Durchlässigkeitsuntersuchungen an Dreiphasensystemen (Boden-Wasser-Luft) hat SCHWEIGER (1966) dieses dynamisch wirksame Porenvolumen für drei verschiedene Bodenarten ermittelt (s. Abb. 4-35).

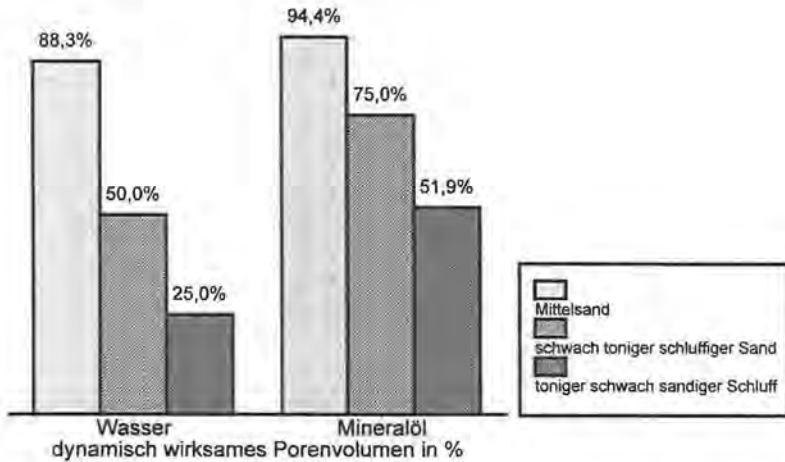


Abb. 4-35: Anteil des dynamisch wirksamen Porenvolumens am Gesamtporenvolumen für die Filterflüssigkeiten Wasser und Mineralöl nach SCHWEIGER (1966)

Wie in Abb. 4-35 dargestellt, verringert sich nach SCHWEIGER (1966) der Anteil des dynamisch wirksamen Porenvolumens n_w am Gesamtporenvolumen mit abnehmender Korngröße bzw. zunehmendem Feinkornanteil, wobei n_w mit Mineralöl als Filterflüssigkeit jeweils größer ist als mit Wasser als Filterflüssigkeit. Der dabei im Vergleich zu Wasser zunehmende Anstieg von n_w für Mineralöl bei abnehmender Korngröße läßt sich durch die Vergrößerung der spezifischen Oberfläche A_s des Bodens (= Kornoberfläche bzw. Berandungsfläche des Porenraumes je Volumeneinheit des Bodens) erklären. Da hierbei auch die auf das Porenvolumen bezogene verfügbare Adsorptionsfläche ansteigt, nimmt das dynamisch wirksame Porenvolumen n_w mit Mineralöl als Filterflüssigkeit wegen der gegenüber Wasser geringeren Adsorption überproportional zu. Somit hängt der Durchlässigkeitsbeiwert k nur dann

ausschließlich von der kinematischen Zähigkeit ν der Flüssigkeit ab, wenn die strömende Flüssigkeit das poröse Medium nicht oder nur unwesentlich beeinflusst, wie z.B. Kies (BEYER & SCHWEIGER 1969).

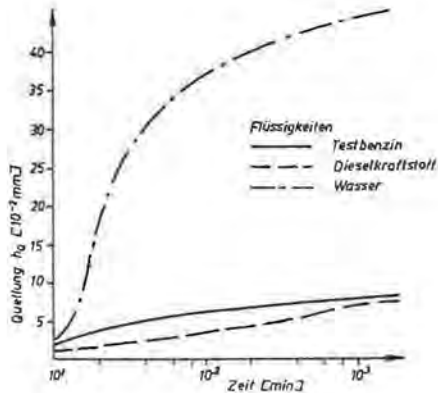


Abb. 4-36: Quellung eines schwach tonigen Schluffs mit Wasser, Testbenzin und Dieselkraftstoff (aus BEYER & SCHWEIGER 1969)

In feinkörnigen bzw. gemischtkörnigen Böden (mit hohem Feinkornanteil) kann der Porenraum nicht mehr als "starr" angesehen werden. In Abhängigkeit von der Sättigungsverteilung und dem Spannungszustand müssen Quell- und Schrumpferscheinungen berücksichtigt werden, die die Porenraumstruktur beeinflussen und sich dadurch erheblich auf die relativen Durchlässigkeiten der strömenden Fluide auswirken (SCHWEIGER 1966). Nach BEYER & SCHWEIGER (1969) quellen die hydrophilen Bodenteilchen (Korngröße $< 0,1$ mm) in allen polaren Flüssigkeiten proportional zu den Dipolmomenten des jeweiligen Sättigungsmediums. In Mineralölprodukten mit weniger stark polaren Molekülgruppen quellen daher feinkörnige Böden gegenüber dem dipolaren Wasser nur gering (vgl. Abb. 4-36).

Das geringere Quellvermögen feinkörniger Böden mit Mineralölprodukten führt bei diesen Böden zu erheblich größerer Durchlässigkeit für Mineralölprodukte im Vergleich zu Wasser (siehe z.B. WALZENBACH in Tabelle 4-30), sofern diese vor der Mineralöldurchströmung

getrocknet werden, was eine große Bedeutung für die Durchführung von Laboruntersuchungen und die Bewertung der erzielten Ergebnisse hat.

Tabelle 4-30: Durchlässigkeitsbeiwerte für Benzin, leichtes Heizöl/Diesel und Wasser in Böden mit Feinkomanteilen (Zusammenstellung von Laborversuchsergebnissen)

Autor	Bodenart	Porenvolumen in %	Durchlässigkeitsbeiwert k in m/s			Verhältniswerte	
			Benzin	l. Heizöl/Diesel	Wasser	k_{Benzin}/k_{Wasser}	k_{Diesel}/k_{Wasser}
KROLEWSKI (1959)	5 % gU, 30 % fS, 32 % mS, 33 % gS	25	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$9,1 \cdot 10^{-6}$	$7,8 \cdot 10^{-6}$	5,6	1,2
		28	$8,9 \cdot 10^{-5}$	$1,4 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	5,6	0,9
		30	$1,4 \cdot 10^{-4}$	$1,8 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-5}$	6,4	0,8
KROLEWSKI (1959)	10 % gU, 30 % fS, 30 % mS, 30 % gS	26	$4,6 \cdot 10^{-5}$	$4,6 \cdot 10^{-6}$	$6,6 \cdot 10^{-6}$	7	0,7
		29	$7,6 \cdot 10^{-5}$	$7,8 \cdot 10^{-6}$	$1 \cdot 10^{-5}$	7,6	0,8
KROLEWSKI (1959)	20 % gU, 42 % fS, 38 % mS	28	$2,4 \cdot 10^{-5}$	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$2,6 \cdot 10^{-6}$	9,2	0,8
		30	$3 \cdot 10^{-5}$	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$3,7 \cdot 10^{-6}$	8,1	0,8
		32	$4 \cdot 10^{-5}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	7,3	0,8
SCHWEIGER (1967)	schwach toniger schluffiger Sand	30,3	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$4,9 \cdot 10^{-7}$	$1,6 \cdot 10^{-7}$	26,3	3,1
		40	$4,4 \cdot 10^{-5}$	$4,9 \cdot 10^{-6}$	$3,9 \cdot 10^{-6}$	11,3	1,3
		45,5	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	$1,6 \cdot 10^{-5}$	10,6	1
SCHWEIGER (1967)	toniger sandiger Schluff	30,1	$1,5 \cdot 10^{-7}$	$1,8 \cdot 10^{-8}$	$1,6 \cdot 10^{-9}$	93,8	11,3
		38,5	$2,7 \cdot 10^{-6}$	$2 \cdot 10^{-7}$	$7,1 \cdot 10^{-8}$	38	2,8
		46,2	$4,8 \cdot 10^{-5}$	$1,9 \cdot 10^{-6}$	$7,4 \cdot 10^{-7}$	64,9	2,6
WALZENBACH (1991)	schluffiger feinsandiger Ton	-	$7,2 \cdot 10^{-7}$	$4,6 \cdot 10^{-8}$	$9,6 \cdot 10^{-11}$	7500	480

In Tabelle 4-30 sind Ergebnisse von Laboruntersuchungen zur Durchlässigkeit (gesättigte Leitfähigkeit) unterschiedlicher gemischt- und feinkörniger Bodenarten gegenüber Benzin, leichtem Heizöl/Diesel und Wasser aus der Literatur zusammengestellt. Es ergaben sich höhere Durchlässigkeiten für Benzin im Vergleich zu Wasser, die bei zunehmendem Feinkomanteil überproportional stark anstiegen und somit nur teilweise durch die kinematischen Zähigkeiten der strömenden Fluide erklärt werden können. Weitgehend gilt dies auch für leichtes Heizöl/Diesel, das jedoch bei Grobschluff als Feinkomanteil (siehe z.B. KROLEWSKI 1959 in Tabelle 4-30) zu geringeren Durchlässigkeitsbeiwerten als Wasser führte.

Hinsichtlich der Versuchsrandbedingungen der genannten Untersuchungen ist zu beachten, daß

- die Bodenproben trocken (Ofentrocknung) eingebaut wurden und nur mit der jeweiligen Filterflüssigkeit in Kontakt gebracht wurden,
- die Bodenproben in der Regel homogenisiert wurden (gestörte Proben),
- die feinkörnigen Bodenproben wegen der Aggregation (Krümelstruktur) bei der Ofentrocknung für den Versuchseinbau gemahlen werden mußten (WALZENBACH 1991) und
- stationäre Einphasenströmungen untersucht wurden (Verdrängung bzw. Strömung von Porenluft oder Porenwasser wurde nicht berücksichtigt).

Im Rahmen einer Literaturlauswertung stellt HAUS (1993) weiterhin fest, daß Laborversuche zur Permeabilität von Tonen gegenüber unpolaren Kohlenwasserstoffen zumeist mit unrealistisch hohen hydraulischen Gradienten I durchgeführt wurden, wodurch Räumlichkeitsänderungen und Gefügeveränderungen künstlich initiiert und verstärkt worden seien:

- | | |
|-------------------------------|--------------|
| • Acar & Seals (1984): | $I=150$ |
| • Anderson et al. (1981): | $I=61..361$ |
| • Brown et al. (1981): | $I=31..181$ |
| • Fernandez & Quigley (1985): | $I=500$ |
| • Foreman & Daniel (1986): | $I=410$ |
| • Quigley & Fernandez (1989): | $I=175..410$ |
| • Uppot & Stephenson (1989): | $I=831$ |

Weiterhin seien die Untersuchungen für den Anwendungsfall von Deponiebasisabdichtungen oder geologischen Barrieren mit hohen Seitendrücken (infolge großer Auflast) durchgeführt worden, wodurch die Ausbildung von Mikro- und Makrorissen infolge von Schrumpfungen behindert wird. Derartige Untersuchungsrandbedingungen entsprechen nicht oder nur teilweise den Verhältnissen im Einflußbereich von Straßen:

- In den für außergewöhnliche Einwirkungen relevanten, oberflächennahen Bodenschichten liegen nur geringe Auflasten vor.
- Erst bei einem starken Einfluß der Kapillarität steigt der hydraulische Gradient während der Infiltration nennenswert über $I = 1$ an.

Daher handelt es sich bei den im Labor ermittelten Durchlässigkeiten feinkörniger Böden gegenüber Mineralölprodukten um Maximalwerte, die wegen des in humiden Klimazonen grundsätzlich gegebenen Wassergehaltes im Boden ($w \geq w_{\text{residual}}$; w_{residual} ... Restwassersättigung) nicht direkt auf die Verhältnisse in situ übertragen werden können.

Hydraulischer Gradient:

Da die Schadstoffeingabe ohne nennenswerten Aufstau mit geringem Druck erfolgt, wirkt als "äußere" Kraftkomponente nahezu ausschließlich die Gravitation. In Abhängigkeit von der Porenraumstruktur, der Sättigungsverteilung und der Benetzbarkeit des Bodens für das Mineralölprodukt Benzin wirkt die aktive kapillare Saugspannung innerhalb der Sättigungsfront als weitere Kraftkomponente der Infiltrationsströmung.

Kapillarität des Bodens für Benzin und andere Mineralölprodukte:

Die Kapillarität im Boden wird von Adsorptions- und Kohäsionskräften bewirkt, die die Moleküle der beweglichen Phasen untereinander und gegenüber Feststoffen (Boden) ausüben. Grenzt eine Flüssigkeit an einen Festkörper, eine zweite Flüssigkeit oder ein Gas, so werden zwischen den Molekülen der Medien als Adhäsions-, Grenzflächen- bzw. Oberflächenspannungen bezeichnete Kräfte σ wirksam, so daß sich je nach der chemischen Zusammensetzung der Medien zwischen Feststoff- und Flüssigkeitsoberfläche ein Randwinkel ϑ ausbildet (SCHWEIGER 1967):

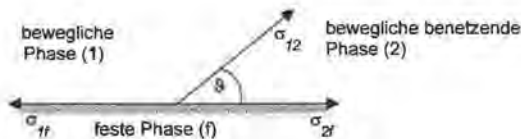


Abb. 4-37: Grenzflächenspannungen σ und Randwinkel ϑ zwischen angrenzenden Phasen - aus SCHWEIGER (1967)

Für die benetzende Phase resultiert eine Saugspannung, die in kreiszylindrischen Kapillaren als kapillare Steighöhe ausgedrückt werden kann, wie folgt:

$$h_c = \frac{2\sigma \cos \vartheta}{\rho g r} \quad (\text{Gl. 4-4})$$

Das poröse Medium Boden kann als ein System von Kapillaren unterschiedlichen Durchmessers verstanden werden. Abweichend von kreiszylindrischen Kapillaren ist die Porenraumstruktur im Boden zwischen den einzelnen Bodenkörnern unregelmäßig, was dazu führt, daß im Boden die aktive und die passive, kapillare Steighöhe (Saugspannung) unterschieden

werden müssen. Bei der Infiltration muß die Porenluft von der benetzenden Phase verdrängt werden, was in engen Porenraumzwickeln nicht vollständig möglich ist, so daß sich gegenüber einheitlichen kreiszylindrischen Kapillaren eine verminderte, aktive kapillare Steighöhe ergibt. Bei der Dränage (Entwässerung) wirkt in engen Porenraumzwickeln eine erhöhte kapillare Saugspannung, so daß sich gegenüber einheitlichen, kreiszylindrischen Kapillaren eine erhöhte, passive kapillare Steighöhe ergibt. Diese Phänomene führen bei alternierender Infiltration und Dränage zu einer Hysteresis der Saugspannungs-Sättigungskurve, wie in experimentellen Untersuchungen, wie z.B. in SCHWEIGER (1967) oder SCHIEGG (1979), festgestellt wurde (s. Abb. 4-38).

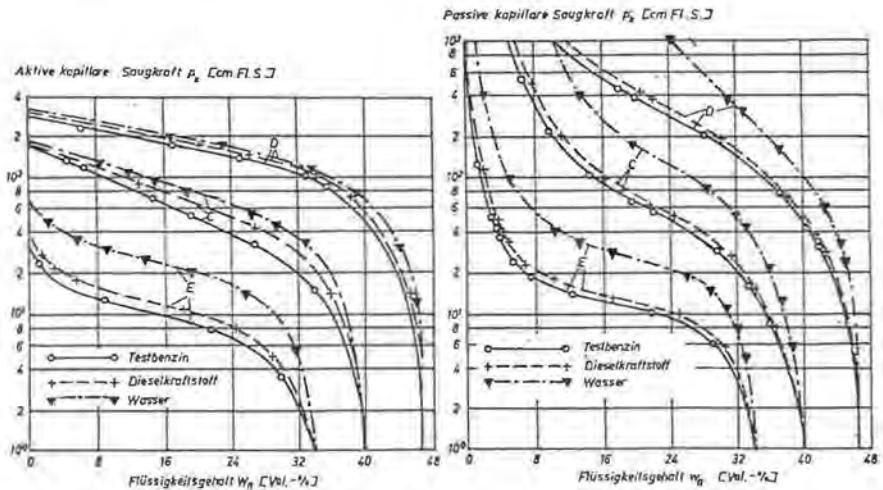


Abb. 4-38: Aktive Saugkraft-Sättigungs-Diagramme (Anstiegsmessungen) und passive Saugkraft-Sättigungs-Diagramme (Kapillarimeternmessungen) für die lufttrockenen Böden Mittelsand (E), schwach toniger schluffiger Sand (C) und schwach toniger sandiger Schluff (D) - aus SCHWEIGER (1967)

Bei der Infiltration von Benzin wirkt die aktive kapillare Saugspannung innerhalb des Sättigungsübergangs an der Infiltrationsfront als zusätzliche "Kraftkomponente" auf die Infiltrationsströmung. Für Simulationsberechnungen kann hierbei der tatsächlich allmähliche und durch Unregelmäßigkeiten der Porenraumstruktur verwischte Sättigungsübergang an der

Benzin-Infiltrationsfront als sprunghafter, horizontaler, ebener Sättigungsübergang vereinfacht werden.

Gegenüber lufttrockenen Böden ergaben sich für Testbenzin und Dieselmotorenöl in den wasserhaltigen Böden Mittelsand ($w_0 \sim 8\%$), schwach toniger schluffiger Sand ($w_0 \sim 20\%$) und schwach toniger sandiger Schluff ($w_0 \sim 25\%$) höhere kapillare Saugspannungen, die SCHWEIGER (1967) dadurch begründet, daß sich mit zunehmendem Vorwassergehalt die Poren, bedingt durch die gegenüber Mineralölen stärkeren Lyosphären des dipolaren Wassers (an Bodenkörner adsorptiv gebundenes, unbewegliches Porenwasser), stärker einengen und somit größere Saugspannungen entstehen. Die erhöhte, aktive kapillare Saugspannung für Benzin kann die Infiltration beschleunigen und somit nachteilig wirken.

SCHWEIGER (1967) stellte bei seinen experimentellen Untersuchungen weiterhin fest, daß kapillare Flüssigkeitsbewegungen langsam ablaufen. So wurden in Mittelsand noch nach 80 d und in schwach tonigen schluffigen Sanden und schwach sandigen tonigen Schluffen noch nach einem Jahr nennenswerte, kapillare Anstiege der Flüssigkeiten Testbenzin, Dieselmotorenöl und Wasser festgestellt.

Störungen der Bodenstruktur in oberflächennahen Bodenschichten:

Die Struktur oberflächennaher Bodenschichten ist durch biologische und klimatische Einwirkungen, wie Durchwurzelungen, Mausgänge, Regenwurmröhren und Schrumpfrisse gestört, die zu bevorzugten Wasserwegigkeiten führen können. BRAUNS et al. (1993) haben bei Schürfen an oberflächennahen mineralischen Abdichtungen gemäß RiStWag (1982) Durchwurzelungen bis in 1 m Tiefe, Mausgänge bis in 20 cm Tiefe und Regenwurmröhren mit bis zu 1 cm Durchmesser bis in 3 m Tiefe festgestellt. Bei feinkörnigen Böden können Schrumpfungen infolge Austrocknung während der trockenen Jahreszeit zur Bildung von Mikro- und Makrorissen führen, entlang derer eine beschleunigte Schadstoffverlagerung möglich ist. Nach FISCHER et al. (1968) führen die genannten oberflächennahen Störungen der Bodenstruktur zu Makroporen, die als offene, von Wassermenisken freie Strömungskanäle auch bei einer Wasserinfiltration nur wenig durch Quellwirkung eingeengt werden.

Bei den in Tab. 4-31 zusammengestellten Feldversuchen stellten FISCHER et al. (1968) bei der Infiltration von Benzin in oberflächennahe Böden sehr große Strömungsgeschwindigkeiten fest, die im Rahmen einer rechnerischen Simulation auch unter Berücksichtigung der Kapillarität nicht nachvollzogen werden können, so daß ein Einfluß oberflächennaher Störungen der Bodenstruktur angenommen wird.

Tabelle 4-31: Feldversuche zur Infiltration von Benzin in oberflächennahe gemischt- und feinkörnige Böden nach FISCHER et al. (1968)

Bodenart	Porengehalt ^{a)}	Vorwassergehalt ^{a)}	Sättigungsgrad ^{a)}	Durchlässigkeitsbeiwerte ^{a)}			Infiltration von Benzin ^{b)}		
	n	w	w/n	$k_{w, \text{mittel}}$	k_{Benzin}	$k_{\text{Benzin}}/k_{w, \text{mittel}}$	p_0 ^{c)}	v_A ^{d)}	Tiefe
	%	Vol-%	%	m/s	m/s	-	m	m/s	m
S, u, g, t'	35,8	17,6	49,2	$4,9 \cdot 10^{-4}$	$1,5 \cdot 10^{-5}$	3,1	1	$1,5 \cdot 10^{-3}$	1,7
S, u, t'	37	17,8	48,1	$6,7 \cdot 10^{-3}$	$1,0 \cdot 10^{-6}$	1,5	1	$5,0 \cdot 10^{-3}$	0,83
U, t, s'	42,4	20,8	49,1	$5,0 \cdot 10^{-3}$	$5,5 \cdot 10^{-6}$	11	1	$9,6 \cdot 10^{-4}$	1,5
S, g, u, t'	34,3	21,1	61,6	$5,7 \cdot 10^{-4}$	$7,5 \cdot 10^{-6}$	1,31	1	$3,1 \cdot 10^{-4}$	0,2
U, t, s'	40,7	37,7	92,8	$7,4 \cdot 10^{-6}$	$4,4 \cdot 10^{-6}$	0,6	1,35	$1,6 \cdot 10^{-3}$	1,43
U, t, s	36,3	30,2	83,2	$1,4 \cdot 10^{-6}$	$2,9 \cdot 10^{-6}$	2,1	1,35	$5,7 \cdot 10^{-4}$	1,43
U, t, s	38,3	30,9	80,7	$3,1 \cdot 10^{-6}$	$4,3 \cdot 10^{-6}$	1,4	1,35	$6,3 \cdot 10^{-4}$	0,87
U, t, s	43,1	37,9	87,9	$2,2 \cdot 10^{-6}$	$5,6 \cdot 10^{-6}$	2,5	1,35	$1,5 \cdot 10^{-3}$	1,55
U, t, s	38,1	34,3	90	$4,2 \cdot 10^{-6}$	$2,4 \cdot 10^{-7}$	5,7	2,8	$1,5 \cdot 10^{-5}$	0,3

^{a)} Laboruntersuchungen; ^{b)} Felduntersuchungen mittels Infiltrimeter nach BEYER (BEYER & SCHWEIGER 1968)
^{c)} Anfangsdruckhöhe in m Benzinsäule; ^{d)} mittlere Abstandsgeschwindigkeit

Infiltration von Ottokraftstoffen in Festgesteine:

In Festgesteinen erfolgt die Strömung von Fluiden durch Klüfte bzw. Karsthohlräume. Hinsichtlich der Infiltration von Ottokraftstoffen ist im Vergleich zu Lockergesteinen folgendes zu beachten:

- Sofern die Klüfte bzw. Karsthohlräume mit Bodenmaterial (Lockergesteine) gefüllt sind, läuft die Infiltration von Ottokraftstoffen bei mikroskopischer Betrachtungsweise wie bereits für Böden beschrieben ab.
- Bei makroskopischer Betrachtungsweise ist der vertikale Infiltrationsfortschritt von der räumlichen Ausrichtung der Klüfte abhängig. Das infiltrierte Volumen ist wegen des im Vergleich zu Lockergesteinen geringeren Porenvolumens ebenfalls geringer.

- Eine zutreffende Simulation von Strömungsprozessen in Festgesteinen im Labor ist erheblich erschwert und bei großem Kluftabstand nicht möglich. Daher werden zur Erkundung der hydraulischen Eigenschaften von Festgesteinen primär in-situ-Bohrlochversuche angewandt.
- Die zutreffende Abschätzung des räumlichen Infiltrationsverlaufes in geklüfteten Festgesteinen setzt die genaue Kenntnis der räumlichen Ausrichtung, der Öffnungsweiten, der Abstände und der Füllung der Klüfte voraus, was im Einzelfall mit einem erheblichen Erkundungsaufwand verbunden ist.

Wegen der genannten Schwierigkeiten bei der Erkundung und Simulation der hydraulischen Eigenschaften von Festgesteinen wird angeraten, die Infiltration von Ottokraftstoffen im Einzelfall anhand von in-situ-Bohrlochversuchen mit Wasser grob abzuschätzen.

Insgesamt muß bei geklüfteten oder verkarsteten Festgesteinen mit einer schnellen vertikalen Verlagerung von Ottokraftstoffen gerechnet werden, so daß Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen allenfalls bei massigen, sehr gering durchlässigen Festgesteinen ($k < 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$) als aktive Sicherheitskomponente berücksichtigt werden können. In ASCHERL (1995) wurde angeraten, bei klüftigen oder verkarsteten Festgesteinen als Grundwasserüberdeckung im Bereich von Straßen in Wassergewinnungsgebieten, eine mögliche Emission wassergefährdender Stoffe durch Unfälle (außergewöhnliche Einwirkungen) außerhalb der befestigten Fahrbahn durch geeignete bautechnische Schutzmaßnahmen* grundsätzlich zu verhindern.

Die Rückgewinnung eingedrungener wassergefährdender Stoffe im Rahmen von Sofort- und Folgemaßnahmen ist in Festgesteinen im Vergleich zu Lockergesteinen erheblich erschwert, da der Aushub der verunreinigten Bereiche entweder nicht oder nur mit sehr großem technischen und zeitlichen Aufwand möglich ist. Die erforderliche in-situ-Sanierung ist ebenfalls erheblich erschwert.

* Beispielsweise konvektionsdichte Fahrbahnbefestigung in Verbindung mit innerhalb eines geschlossenen (dichten) Entwässerungssystems angeordneten passiven Schutzeinrichtungen.

Eingabedauer von Ottokraftstoffen:

Nach Unfällen beim Transport wassergefährdender Stoffe sollten grundsätzlich die im folgenden genannten Maßnahmen ergriffen werden:

- Sofortmaßnahmen:
- Beendigung des Austritts wassergefährdender Stoffe
- Rückgewinnung/Bindung der wassergefährdenden Stoffe an der Oberfläche
- Folgemaßnahmen
- Aushub verunreinigten Bodens
- Erforderlichenfalls zusätzlich in-situ-Sanierung (Rückgewinnung oder Abbau/Umwandelung der Schadstoffe) des verunreinigten Bodens und ggf. des Grundwassers

Abhängig von der Organisation und Durchführung dieser Sofort- und Folgemaßnahmen ist die Versickerungsdauer und damit der im Rahmen einer Risikobetrachtung zu berücksichtigende Zeitraum begrenzt. In ASCHERL (1995) wurde hierzu für Straßen in Wassergewinnungsgebieten auf der Grundlage gezielter Unfalleinsatzpläne ein Zeitraum von 48 h vorgeschlagen.

Folgerungen:

Zur Simulation einer zeitlich begrenzten Infiltration von Benzin in die ungesättigte Bodenzone werden ausgehend von den dargelegten Zusammenhängen Grundsatzuntersuchungen unter in-situ-Randbedingungen angeraten:

- In-situ-Bedingungen entsprechend variierende Wassersättigung (klimatische und biologische Einflüsse)
- In-situ-Bedingungen entsprechende Lagerungsdichte des Untersuchungs-Bodens
- Punktförmige, dem Infiltrationsvolumen entsprechende Stoffeingabe bei konstantem Eingabedruck:

$$\frac{\partial p}{\partial t} = 0; \quad \frac{\partial V_{\text{Eingabe}}}{\partial t} = \frac{\partial V_{\text{Inf. Boden}}}{\partial t}$$

- Geringer Eingabedruck (zwischen 0,05 und 0,5 m Aufstau)
- Kontinuierliche Beobachtung des vertikalen Infiltrationsfortschrittes $z(t)$

In grobkörnigen Böden (ohne quellfähige Bestandteile) kann der zeitliche Infiltrationsverlauf bei residualer Wassersättigung näherungsweise als eindimensionale Strömung infolge Gravitation, wie in SCHIEGG (1977) beschrieben, abgeschätzt werden.

Im Einzelfall ist weiterhin die Querschnittstopographie, d.h. der Verlauf der Geländeoberfläche ausgehend vom Standort des verunfallten Fahrzeuges, zu berücksichtigen, da dieser einen erheblichen Einfluß auf die Schadstoffeingabe hat. Auf stark geneigten Böschungsflächen können wegen des verstärkten Oberflächenabflusses in Abhängigkeit von der Geländeneigung nur geringere Schadstoffmengen versickern. In Mulden, wie z.B. Entwässerungsgräben, und anderen Geländevertiefungen können sich die Schadstoffe sammeln, so daß dort größere Mengen einer Infiltration zur Verfügung stehen.

4.3.8 Emissionsbezogene Risikoabschätzung außergewöhnlicher Einwirkungen

4.3.8.1 Stoffspezifisches Gefährdungspotential

Zur Beurteilung des stoffspezifischen Gefährdungspotentials werden den im Rahmen der Datenbasis identifizierbaren Stoffarten bzw. -gruppen zunächst Wassergefährungsklassen zugeordnet:

Tabelle 4-32: Stoffspezifisches Gefährdungspotential (Wassergefährungsklassen gem. UBA 1991a) und relative Emissionshäufigkeit der im Rahmen der erhobenen Einzeldaten (vollständige Jahrgänge 1992 und 1993) identifizierbaren Stoffarten bzw. -gruppen

Stoffart bzw. Stoffgruppe	Wassergefährungsklasse	Emissionen	
		rel. Häufigkeit	Volumenanteil
anorganischer Stoff	nicht bestimmbar	8,5 %	14 %
leichtes Heizöl und Dieselmotorenkraftstoff	WGK 2 "wassergefährdend"	59,9 %	30,8 %
Ottomotorenkraftstoff (Benzin)	WGK 2 "wassergefährdend"	7,0 %	22,4 %
schweres Heizöl	WGK 1 "schwach wassergefährdend"	1,5 %	0,6 %
Altöl	WGK 3 "stark wassergefährdend"	0,6 %	0,06 %
Rohöl	WGK 1 "schwach wassergefährdend" (zähflüssige, feste Rohöle) WGK 2 "wassergefährdend" (leichtflüssige Rohöle)	0 %	0 %
Flugmotorenkraftstoff (Düsenantriebe)	WGK 2 "wassergefährdend"	0,2 %	0,01 %
andere Mineralölprodukte	nicht direkt bestimmbar / WGK 1, 2 "schwach wassergefährdend", "wassergefährdend"*	7,2 %	6,3 %
sonstige organische Stoffe	nicht bestimmbar	15,0 %	25,9 %

* In Anlehnung an die genannten Mineralölprodukte

Aufgrund ihrer großen relativen Emissionshäufigkeit von insgesamt 76,4 % sind die Mineralölprodukte als maßgebende Stoffgruppe der außergewöhnlichen Einwirkungen anzusehen. Das stoffspezifische Gefährdungspotential der Stoffgruppen "anorganische Stoffe" und "sonstige organische Stoffe" kann wegen der ungenauen Erfassung der Unfalldaten nicht angegeben werden. In einem weiteren Schritt wird anhand der vollständigen Daten der

Einzelenerhebung (831 Einzelunfälle) mit dem in Tabelle 4-33 angegebenen Bewertungsschema untersucht, ob bestimmte Stoffarten im Sinne des Risikobegriffs maßgebend sind:

- Eintretenswahrscheinlichkeit:
Unfallanzahl (U_A)
- Potentielles Schädigungsausmaß:
Mittleres ausgelaufenes Volumen (μ_V), hydrodynamische Eigenschaften (Migrationspotential M) und Wassergefährdungsklasse (G) der einzelnen Stoffe.

Tabelle 4-33: Vereinfachte emissionsbezogene Risikobewertung der einzelnen Unfälle nach Stoffarten getrennt (Auswertung aller Unfälle der Erhebung von Einzeldaten)

Bewertungsparameter	Anzahl	mittleres ausgelaufenes Volumen in l	Migrationsver- halten (MK, UBA 1991b)	Wassergefähr- dungsklasse (WGK, UBA 1991a)	Bewertung (in 10^3 , gerundet)
	U_A	μ_V	M (MK)	G (WGK)	$U_A \cdot \mu_V \cdot M \cdot G$
leichtes Heizöl/Diesel	479	407	2 (1)	2 (2)	780
Ottokraftstoffe (Benzin)	49	2774	3 (2)	2 (2)	816
schweres Heizöl	13	400	1 (0)	1 (1)	5,2
Altöl	13	100	1 (0)	3 (3)	3,9
Flugkraftstoff	4	60	3 (2)	2 (2)	1,4
andere Mineralölprodukte	58	1281	~2 (*)	~1,5 (*)	223

* Da im einzelnen nicht bekannt, wurden mittlere Werte zugrundegelegt

Im Sinne des Risikobegriffs sind Ottokraftstoffe (Benzin) der maßgebende Einzelstoff und Mineralölprodukte die maßgebende Stoffgruppe (s. Tab. 4-33).

4.3.8.2 Häufigkeitsabschätzung

Ein direkter Bezug zum betroffenen Streckenabschnitt kann anhand der vorliegenden Datenbasis nicht hergestellt werden, da in der amtlichen Statistik lediglich der Ort oder Landkreis der zuständigen Behörden angegeben wird*. Somit kann auch der Anteil der Innerortsunfälle, die nicht Gegenstand der Aufgabenstellung sind, aus den erhobenen Unfalldaten nicht

* Seit 1994 werden lt. Auskunft des Bayerischen Landesamtes für Wasserwirtschaft (1995, unveröff.) in der amtlichen Statistik Angaben zur wasserwirtschaftlichen Bedeutung (kein wasserwirtschaftlich bedeutsames Gebiet, WSZ I, WSZ II oder WSZ III) erhoben.

abgeleitet werden, so daß für die Ermittlung der Unfallhäufigkeiten alle 831 erhobenen Einzelunfälle verwendet werden. Der hiermit verbundene Fehler kann anhand von Untersuchungen der BAST abgeschätzt werden, die für den Zeitraum von 1982 bis 1984 (BRESSIN 1986) durchschnittlich 23 % Innerortsunfälle und für den Zeitraum von 1989 bis 1991 (PÖPPEL & KÜHNEN 1993) durchschnittlich 12 % Innerortsunfälle erfaßt haben. Die resultierende Überschätzung der Unfallhäufigkeiten ist konservativ, d.h. im Sinne des Grundwasserschutzes "auf der sicheren Seite" liegend.

Zur Abschätzung der streckenbezogenen Unfallhäufigkeit sind Annahmen zur Verteilung der UTWSS auf das Streckennetz des jeweiligen Erhebungsgebietes zu treffen. Hierzu kommen folgende grundlegend unterschiedliche Annahmen in Betracht:

- a) gleichmäßige (ungewichtete) Verteilung auf das gesamte Streckennetz
- b) Verteilung auf Straßenkategorien gemäß der von PÖPPEL & KÜHNEN (1993) und BRESSIN (1986) untersuchten Gefahrgutunfälle
- c) leistungsbezogene (DTV und Strecke) Verteilung auf das Streckennetz im Bezugsgebiet

Für die genannten Annahmen werden im folgenden Abschätzungen zur Unfallhäufigkeit durchgeführt und bewertet.

a) Gleichmäßige (ungewichtete) Verteilung auf das gesamte Streckennetz

Die in der amtlichen Statistik (STATISTISCHES BUNDESAMT 1987-1993) jährlich erfaßten UTWSS in den Jahren von 1983 bis 1992 und die zugehörigen Gesamtlängen der öffentlichen Straßen (überörtlicher Verkehr einschl. Ortsdurchfahrten) der alten Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland (aus DIW 1994) ergeben die in Abb. 4-39 dargestellten streckenbezogenen Unfallwiederholungsdauern in Jahren je km. Die mittlere Unfallwiederholungsdauer beträgt 568 Jahre je km.

Die je nach Straßenkategorie sehr unterschiedliche Transportleistung bleibt hierbei unberücksichtigt, so daß die Unfallhäufigkeit auf untergeordneten Strecken, wie Landes- und Kreisstraßen deutlich überschätzt werden dürfte, weil einerseits deren Streckenlänge größer ist als bei übergeordneten Straßen und andererseits die Transportleistung des Güterverkehrs kleiner ist als bei übergeordneten Straßen.

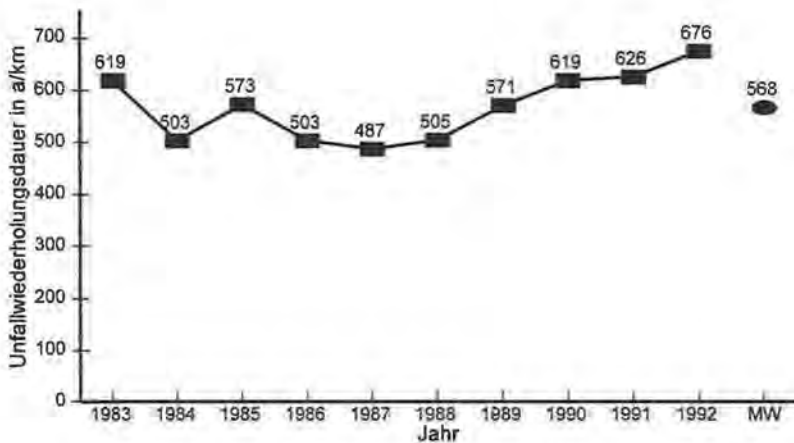


Abb. 4-39: Mittlere Wiederholungsdauern für Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe auf öffentlichen Straßen der alten Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland in Jahren je km im Zeitraum von 1983 bis 1992; Streckendaten aus DIW (1994); Unfalldaten aus STATISTISCHES BUNDESAMT (1986-1994)

b) Verteilung auf Straßenkategorien gemäß den von PÖPPEL & KÜHNEN (1993) und BRESSIN (1986) untersuchten Gefahrgutunfälle

Die Verteilung der UTwSSt auf Straßenkategorien gemäß den von PÖPPEL & KÜHNEN (1993) und BRESSIN (1986) untersuchten Gefahrgutunfällen wird dadurch bekräftigt, daß 77 % der 831 bei der Einzelerhebung erfaßten UTwSSt zugleich als Gefahrgut im Sinne der GGVS ausgewiesen sind. Zu den in den genannten Untersuchungen erfaßten 379 Gefahrgutunfällen werden folgende Ortsangaben gemacht:

- | | | |
|----------------------|-----|----------|
| • innerorts | 74 | (19,5 %) |
| • außerorts ohne BAB | 185 | (48,8 %) |
| • außerorts auf BAB | 120 | (31,7 %) |

Mit dem Mittelwert der in der amtlichen Statistik in den Jahren 1983 bis 1992 erfaßten UTwSSt (STATISTISCHES BUNDESAMT 1986-1994) werden anhand der obigen Angaben zur Ortslage in Verbindung mit dem Mittelwert der zugehörigen Streckenlängen (aus DIW 1994) folgende mittlere Unfallwiederholungsdauern in Jahren je km ermittelt:

- außerorts ohne BAB (B, L, K): 1094 a/km
- außerorts auf BAB: 87 a/km

Die 19,5 % Innerortsunfälle, die nicht Gegenstand der Aufgabenstellung sind, werden nicht weiter untersucht. Aufgrund der bereits angesprochenen Untererfassung der Gefahrgutunfälle in PÖPPEL & KÜHNEN (1993) sind auch Fehler bei der Zuordnung der Unfälle zu Straßenkategorien möglich, die mit dem verfügbaren Datenmaterial jedoch nicht identifiziert werden können.

c) Leistungsbezogene (DTV und Strecke) Verteilung auf das Streckennetz im Bezugsgebiet

Diese Annahme wird durch die bereits in Abschn. 4.3.4.3 festgestellten korrelativen Zusammenhänge zwischen der Güterverkehrs-Transportleistung und der jährlichen Unfallanzahl für bestimmte Stoffarten bundesweit ($r_{1992,1993} = 0,8$) und in Abschnitt 4.3.4.1 zwischen der Güterverkehrs-Transportleistung und der jährlichen Unfallanzahl nach Bundesländern ($r = 0,7$) bekräftigt. Zudem werden sowohl die Streckenlängen als auch die Transportleistungen der einzelnen Straßenkategorien berücksichtigt, wobei eine Proportionalität zwischen der Transportleistung des allgemeinen Straßengüterverkehrs und den Transporten wassergefährdender Stoffe hinsichtlich deren Verteilung auf die einzelnen Straßenkategorien angenommen wird, die durch die oben genannten korrelativen Zusammenhänge bestätigt wird.

Zunächst wird anhand des Zusammenhangs zwischen der Güterverkehrsstärke* [Lkw/24h] und der Gesamt-Verkehrsstärke [Kfz/24h] im Rahmen einer Korrelationsanalyse geprüft, ob die Gesamt-Verkehrsstärke (DTV) als Leitparameter geeignet ist. Um mögliche besondere Unterschiede der einzelnen Bundesländer oder einen relevanten Einfluß der Bezugsgebietsgröße ausschließen zu können, werden hierzu sowohl die Mittelwerte von fünf Bundesländern (Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Nordrhein-Westfalen, Rheinland-Pfalz) als auch die Einzeldaten der Regierungsbezirke Bayerns verwendet. Die Korrelationskoeffizienten $r_{\text{Bundesländer}} = 0,99$ und $r_{\text{Bay-Reg}} = 0,97$ ergeben eine nahezu vollständige Korrelation bzw. lineare

* Es wurden die Güterverkehrsstärken [GV-Kfz/24h] nicht jedoch die Schwerverkehrsstärken [Lkw/24h] erhoben.

Abhängigkeit zwischen der Güter-Verkehrsstärke und der Gesamt-Verkehrsstärke, so daß sich der DTV (Gesamt-Verkehrsstärke) als Leitparameter gut eignet.

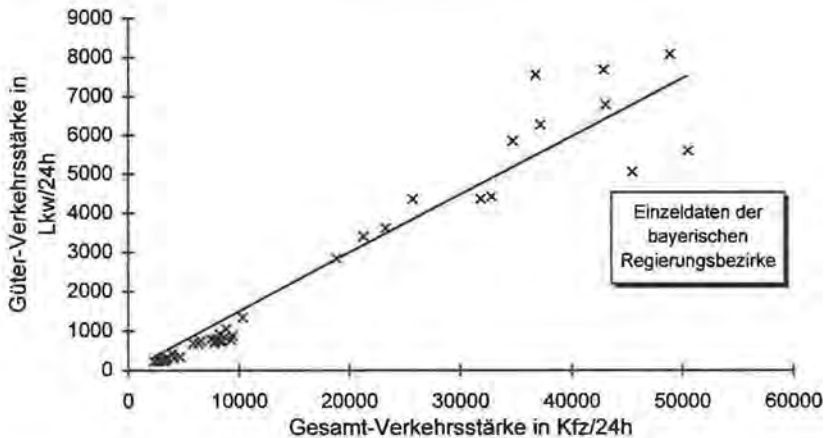
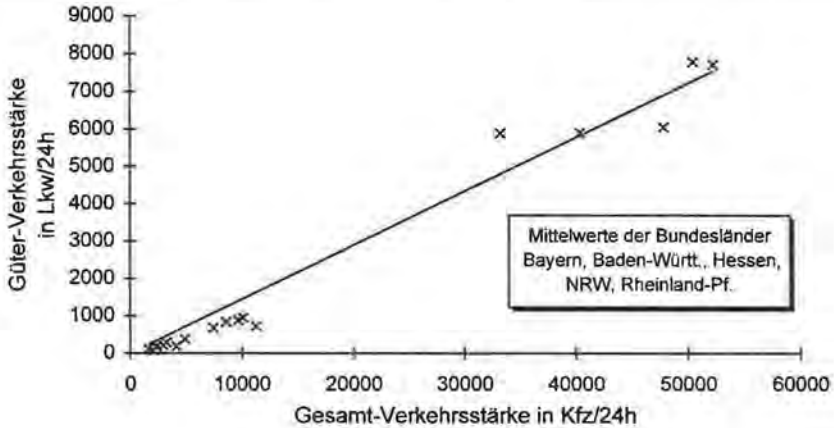


Abb. 4-40: Zusammenhang zwischen Güter-Verkehrsstärke und Gesamt-Verkehrsstärke (Mittelwerte nach Straßenkategorien) in den Bundesländern Bayern, Baden-Württemberg, Hessen, Nordrhein-Westfalen und Rheinland-Pfalz und in den bayerischen Regierungsbezirken (Datenquellen: OBERSTE BAU-BEHÖRDE IM BAYERISCHEN STAATSMINISTERIUM DES INNERN; STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG; HESSISCHES MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT, VERKEHR, TECHNOLOGIE UND EUROPAANGELEGENHEITEN; MINISTERIUM FÜR STADTENTWICKLUNG UND VERKEHR DES LANDES NORDRHEIN -WESTFALEN)

Daher werden die UTwSSt entsprechend der Verkehrsleistung des Straßengüterverkehrs (DTV [Kfz/24h] · S[km]) exemplarisch auf folgende DTV-Bereiche verteilt:

- DTV < 5000
- 5000 < DTV < 30000
- DTV > 30000

Für die einzelnen DTV-Bereiche werden folgende Anzahlen der UTwSSt abgeschätzt:

$$U_{\text{DTV-Ber}} = \frac{\sum_{\text{DTV-Ber}} (\text{DTV} \cdot S)}{\sum_{\text{GESAMT}} (\text{DTV} \cdot S)} \cdot U \quad (\text{Gl. 4-5})$$

mit:

U	Anzahl der UTwSSt je Zeiteinheit (i.d.R. 1 Jahr)
$U_{\text{DTV-Ber}}$	Anzahl der UTwSSt je DTV-Bereich
DTV	Verkehrsstärke in Kfz/24h
S	Strecke in km

Als charakteristische Größe werden weiterhin die Unfälle je km und Zeiteinheit ("spezifische Unfallanzahl") für die DTV-Kategorien ermittelt:

$$U_{\text{DTV-Ber}}^{\text{spez.}} = \frac{U_{\text{DTV-Ber}}}{\sum_{\text{DTV-Ber}} S} \quad (\text{Gl. 4-6})$$

Die Daten zum Streckennetz in den alten Bundesländern aus dem Jahre 1990 (DIW 1994) ergeben folgende Kenngrößen zur Verteilung der UTwSSt auf die genannten DTV-Bereiche:

Tabelle 4-34: Kenngrößen zur Verteilung der UTwSSt auf die DTV-Bereiche (Bezugsdaten aus DIW 1994)

DTV-Bereiche	< 5000	5000...30000	> 30000
Aufteilung der UTwSSt in %	26	40,5	33,5
Außerorts-Strecken der DTV-Kategorien in km	106270	29760	5670
Multiplikator für UTwSSt in 1/km	$2,45 \cdot 10^{-4}$	$1,361 \cdot 10^{-5}$	$5,908 \cdot 10^{-5}$

In Tabelle 4-35 sind die Unfälle nach DTV-Kategorie je Jahr und Strecken-km als Mittelwert der Jahre 1983 bis 1992 (vollständige Daten für die alten Bundesländer aus STATISTISCHES BUNDESAMT 1986-1994) dargestellt. Zur Veranschaulichung ist zusätzlich die korrespondierende Unfall-Wiederholungsdauer nach DTV-Bereich in Jahren je km angegeben.

Tabelle 4-35: Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe auf Straßen (Mittelwert der UTWSSt der Jahre 1983 bis 1992 in den alten Bundesländern aus STATISTISCHES BUNDESAMT 1986-1994) nach Verkehrsstärken-Bereichen als Anzahl je Jahr und km und als Wiederholungsdauer in Jahren je km (Abschätzung im Rahmen der Auswertung der Einzeldaten; Bezugsdaten aus DIW 1994)

Verkehrsstärken-Bereich	Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe auf Straßen	
DTV in Kfz/24 h	Anzahl je Jahr und km	Wiederholungsdauer in Jahren je km
DTV < 5000	$7,6 \cdot 10^{-4}$	1.323
5000 < DTV < 30000	$4,2 \cdot 10^{-3}$	238
DTV > 30000	0,018	55

Vergleich der Annahmen zur Verteilung der UTWSSt auf das Streckennetz

Die drei verschiedenen Annahmen zur Verteilung der UTWSSt auf das Streckennetz im Bezugsgebiet (alte Bundesländer) werden anhand der Unfall-Wiederholungsdauer in Jahren je km verglichen:

Tabelle 4-36: Vergleich der Annahmen zur Verteilung der UTWSSt auf das Streckennetz anhand der Unfallwiederholungsdauer in Jahren je km

Annahme a)	Annahme b)	Annahme c)
Leistungsbezogene Verteilung (DTV und Strecke) - unterteilt in drei DTV-Bereiche	Verteilung von Gefahrgutunfällen	ungewichteter Gesamtmittelwert
DTV < 5000: 1323	K, L, B - außerorts: 1094	L, K, B, BAB: 568
5000 < DTV < 30000: 238		
DTV > 30000: 55	BAB - außerorts: 87	
Unfalldaten aus STATISTISCHES BUNDESAMT (1986-1994); Verkehrsdaten aus DIW (1994); Daten zur Verteilung der Gefahrgutunfälle aus BRESSIN (1986) und PÖPPEL & KÜHNEN (1993)		

Die von BRESSIN (1986) und PÖPPEL & KÜHNEN (1993) festgestellte Verteilung von Gefahrgutunfällen auf das Streckennetz in den alten Bundesländern der Bundesrepublik Deutschland bestätigt die hier durchgeführte "leistungsbezogene" (DTV und Strecke) Abschätzung für drei DTV-Bereiche.

4.3.8.3 Hinweise zur Risikobewertung

Zur Bewertung des aus den in Abschnitt 4.3.8.2 abgeschätzten Unfallhäufigkeiten resultierenden Gefährdungspotentials werden die "Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen" (GruSiBau 1981) herangezogen, da Straßen als bauliche Anlagen anzusehen sind. Hierzu werden die außergewöhnlichen Einwirkungen folgendermaßen eingestuft:

- **Sicherheitsklasse 3:**
"große wirtschaftliche Folgen, große Beeinträchtigung der Nutzung"
- **Grenzzustand der "Gebrauchsfähigkeit"**
(des Grundwassers)

Für den Bezugszeitraum von einem Jahr ergibt sich aus der obigen Einstufung gemäß GruSiBau (1981) eine operative Versagenswahrscheinlichkeit $p_f \sim 2 \cdot 10^{-4}$, die im Sinne der Aufgabenstellung als akzeptables Risiko bzw. als "akzeptable jährliche Unfallanzahl" zu verstehen ist. Da die jährliche Unfallanzahl eine streckenbezogene Größe ist, muß zur Bewertung weiterhin eine Bezugsstrecke festgelegt werden. Für die folgende Sicherheitsbetrachtung wird daher als sinnvolle Basis-Bezugsstrecke 1 km verwendet. Zur Erläuterung der Bedeutung der Bezugsstrecke werden im folgenden Streckenlängen von Straßen in Wassergewinnungsgebieten genannt:

- Aus einer Erhebung zu Streckenlängen in Wassergewinnungsgebieten in Bayern (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT - nicht veröffentlicht) ergibt sich eine mittlere Streckenlänge von ca. 400 m.
- Die A 7 verläuft im Abschnitt Heidenheim-Westhausen auf ca. 20 km Strecke durch verschiedene Wasserschutzzonen (BADER, 1986).
- Unter Annahme einer kreisförmigen Gestalt würde der mittlere Durchmesser eines Trinkwasser- oder Heilquellenschutzgebietes in Hessen ca. 2 km betragen, die maximale Längenausdehnung eines Schutzgebietes in Hessen beträgt ca. 48 km (Daten aus HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT 1992).

In Abhängigkeit von den jeweiligen hydrogeologischen (Fläche des Wassergewinnungsgebietes) und geometrischen (Durchschneidung des Wassergewinnungsgebietes) Verhältnissen decken die beispielhaft genannten Streckenabschnitte einen sehr weiten Größenbereich ab.

Im Sinne der Risikodefinition sind neben der reinen Unfallanzahl (*Eintretenswahrscheinlichkeit*) auch die ausgelaufenen Volumina (*potentielles Schädigungsmaß*) zu berücksichtigen. Hierzu werden die für die drei DTV-Bereiche abgeschätzten Unfälle je km und Jahr (vgl. Tabelle 4-35) mit der relativen Häufigkeit der ausgelaufenen Volumina multipliziert und mit der operativen Versagenswahrscheinlichkeit $p_f \sim 2 \cdot 10^{-4}$ verglichen. Das Ergebnis ist in Abb. 4-41 unter folgenden Vorgaben dargestellt:

- relative Überschreitungshäufigkeit der ausgelaufenen Volumina (Auswertung der Einzeldaten - 831 Unfälle):
$$1 - \left(\frac{n_{\text{bes}} - n_{\text{vor}}}{\sum n} \right)$$
- multipliziert mit Unfällen je Jahr und km (nach DTV-Bereichen)
- dividiert durch die operative Versagenswahrscheinlichkeit $p_f \sim 2 \cdot 10^{-4}$
- in Abhängigkeit vom ausgelaufenen Volumen (Abszisse)

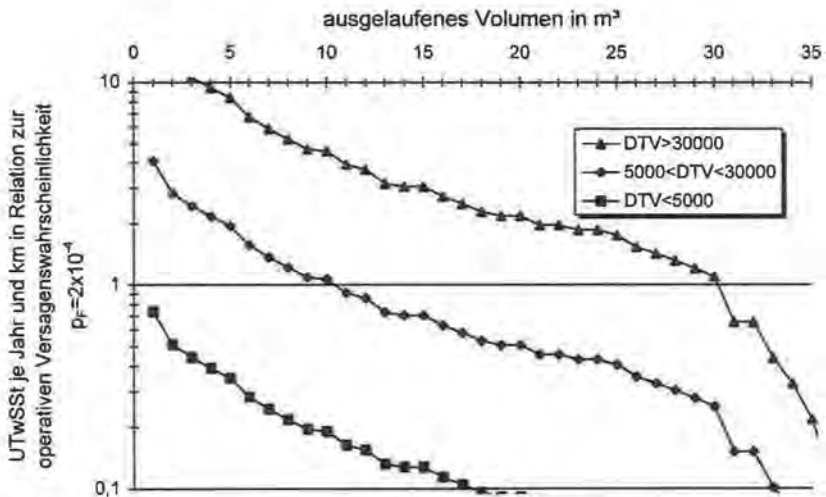


Abb. 4-41: Abgeschätzte Unfallhäufigkeit je Jahr und km nach ausgelaufenem Volumen in Relation zur operativen Versagenswahrscheinlichkeit $p_f \sim 2 \cdot 10^{-4}$ (Quotient) für drei DTV-Bereiche (DTV < 5000; 5000 < DTV < 30000; DTV > 30000)

Zur Bewertung des emissionsbezogenen Gefährdungspotentials wird folgendes angemerkt:

- Der Umfang einer möglichen Untererfassung der Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe auf Straßen bleibt unklar (unsichere Seite).
- Ohne Berücksichtigung aktiver (Sofort- und Folgemaßnahmen), passiv-technischer (Entwässerungseinrichtungen, Abdichtungen, Leichtstoffabscheider) und hydrogeologischer Schutzwirkungen wurden "große wirtschaftliche Folgen" oder eine "große Beeinträchtigung der Nutzung" postuliert (sichere Seite).
- Besonders lange Straßenabschnitte innerhalb eines Schutzgebietes führen zu einer Risikoerhöhung für die einzelne Wassergewinnungsanlage und müssen daher kritischer bewertet werden.

Die dargestellten Zusammenhänge können folgendermaßen bewertet werden:

- **DTV > 30000:**
Da die operative Versagenswahrscheinlichkeit erst bei einem ausgelaufenem Volumen von ca. 29 m³ unterschritten wird, kann das emissionsbezogene Gefährdungspotential bei 1 km Bezugsstreckenlänge als *nicht akzeptabel* bewertet werden.
- **5000 < DTV < 30000:**
Da die operative Versagenswahrscheinlichkeit erst bei einem ausgelaufenem Volumen von ca. 9,3 m³ unterschritten wird, kann das emissionsbezogene Gefährdungspotential bei 1 km Bezugsstreckenlänge als *nicht akzeptabel* bewertet werden.
- **DTV < 5000:**
Da die operative Versagenswahrscheinlichkeit bereits bei unter 1 m³ ausgelaufenem Volumen um ca. 25 % unterschritten wird, kann das emissionsbezogene Gefährdungspotential bei 1 km Bezugsstreckenlänge als *akzeptabel* bewertet werden.

Unabhängig von einer eventuellen Untererfassung kann der im Rahmen von Korrelationsanalysen bestätigte Zusammenhang zwischen Unfallanzahl und Transportleistung auch auf die durchgeführte Sicherheitsbetrachtung übertragen werden, so daß eine quantitative Abstufung der Anzahlen von UTwSSt entsprechend der Verkehrsstärke gefolgert werden kann.

4.3.9 Zusammenfassung und Folgerungen zu außergewöhnlichen Einwirkungen

Im folgenden sind die wesentlichen Ergebnisse (mit * gekennzeichnet) der zu außergewöhnlichen Einwirkungen auf das Grundwasser durchgeführten Literatur- und Datenauswertung zusammengefaßt (Folgerungen sind mit ► gekennzeichnet):

- Von der amtlichen Statistik wurden im Zeitraum von 1983 bis 1992 jährlich im Durchschnitt 309 Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe auf Straßen (minimal 258,

maximal 356) erfaßt (Auswertung der Daten aus STATISTISCHES BUNDESAMT 1986-1994). Als Bezugsgröße hierzu seien die jährlichen 254550 Unfälle mit schwerem Sachschaden* (Mittelwert von 1983 bis 1990; aus DIW 1994) genannt, so daß sich ein Verhältnis von 1 : 824 ergibt.

- Im Rahmen von Korrelationsanalysen konnte ein signifikanter korrelativer Zusammenhang sowohl zwischen der Transportleistung des Güterverkehrs und der Unfallanzahl nach Bundesländern als auch zwischen der Transportleistung und der Unfallanzahl bestimmter Stoffarten (bundesweit) festgestellt werden.
- ▶ Einer Abschätzung der Unfallhäufigkeit kann die zugehörige Transportleistung (indirekte Berücksichtigung der Transporthäufigkeit) zugrundegelegt werden. Zur Berücksichtigung und Beurteilung veränderlicher Einflußgrößen, wie technischer Fortschritt (Robustheit der Transportbehälter) oder neue Verordnungen/Richtlinien (Überwachung, Schulung der Fahrer, etc.), sollten die zugehörigen Daten kontinuierlich erhoben und ausgewertet werden.
- Das jährlich ausgelaufene Volumen betrug von 1986 bis 1992 durchschnittlich ca. 384 m³ und unterlag mit einer Standardabweichung von ca. 108 m³ starken Schwankungen, die im betrachteten Zeitraum keinem identifizierbaren Trend folgen (Auswertung der Daten aus STATISTISCHES BUNDESAMT 1986-1994).
- Die Wiedergewinnungsquote schwankte im Zeitraum von 1986 bis 1992 nur geringfügig um den Mittelwert von ca. 68 % bei einer Standardabweichung von ca. 4,4 %, wobei auch hier kein Trend erkennbar ist (Auswertung der Daten aus STATISTISCHES BUNDESAMT 1986-1994).
- ▶ Es kann im bundesweiten Durchschnitt ein gleichmäßiger Erfolg der Sofort- und Folgemaßnahmen gefolgert werden.
- Bei einer Spannweite von 0 bis 50 m³ sind bei 831 Unfällen durchschnittlich 1,65 m³ wassergefährdender Stoffe ausgelaufen; der Modalwert betrug 0,1 m³, der 95 %-Perzentilwert betrug 9,7 m³ (Auswertung von Einzeldaten).
- ▶ Die im Rahmen der Auswertung von 831 Einzelunfällen ermittelte empirische Häufigkeitsverteilung der ausgelaufenen Volumina kann der Dimensionierung des Rückhaltevolumens von Leichtstoffabscheidern zugrundegelegt werden.
- Bei den insgesamt untersuchten 831 Unfällen beim Transport wassergefährdender Stoffe auf Straßen wurden durchschnittlich 65,5 % des ausgelaufenen Volumens wiedergewonnen; ein Zusammenhang zwischen dem jeweils ausgelaufenem Volumen und wiedergewonnenem Volumen war bei einem Korrelationskoeffizienten $r_{x,y/w,v} = 0,03$ nicht erkennbar (Auswertung der Einzeldaten).
- Mit größter Häufigkeit (ca. 60 %) wurde leichtes Heizöl/Diesel emittiert (Auswertung der Einzeldaten für 1992 und 1993).
- Die oberirdische Verlagerung der durch Unfälle emittierten wassergefährdenden Stoffe hängt in erster Linie vom jeweiligen Unfallhergang ab, wobei die Grundfälle "Unfall auf der befestigten Fahrbahn" und "Unfall außerhalb der befestigten Fahrbahn" unterschieden werden können.

▪ Ab 3000 DM Sachschaden bei mindestens einem der Geschädigten (DIW 1994)

- Das Abkommen von der Fahrbahn war in einer Untersuchung der BAST (PÖPPEL & KÜHNEN 1993) mit 53 % Anteil die häufigste Unfallursache bei Unfällen mit Gefahrguttfahrzeugen.
- Auf passive Schutzeinrichtungen ist hinsichtlich des Unfallbergangs besonderes Augenmerk zu legen.
- Ottokraftstoffe werden vor allem wegen ihres hohen Migrationspotentials (MK 2) und weiterhin wegen des hohen je Unfall ausgelaufenen Volumens (Mittelwert) hinsichtlich der Verlagerung der durch Unfälle emittierten wassergefährdenden Stoffe als maßgebend (Leitparameter) bewertet.
- Bei der Versickerung bzw. Infiltration von Benzin in den Boden handelt es sich prinzipiell um eine hochgradig instationäre Mehrphasenströmung, da die Durchlässigkeit und die Kapillarität des Bodens für die einzelnen Phasen von der räumlich und zeitlich veränderlichen Sättigungsverteilung sowie bei feinkörnigen Böden zusätzlich von der durch Quell- und Schrumpfvorgänge veränderlichen Porenraumstruktur abhängen.
- Da die Schadstoffeingabe ohne nennenswerten Aufstau mit geringem Druck erfolgt, wirkt als "äußere" Kraftkomponente nahezu ausschließlich die Gravitation. Die aktive kapillare Saugspannung innerhalb der Sättigungsfront wirkt als weitere Kraftkomponente der Infiltrationsströmung.
- Bei Laboruntersuchungen der Durchlässigkeit von Böden gegenüber straßenspezifischen Mineralölprodukten sind die in-situ-Randbedingungen zu beachten: In humiden Klimazonen ist grundsätzlich eine nennenswerte Wassersättigung des Bodens ($w \geq w_{\text{residual}}$, w_{residual} ... Restwassersättigung) gegeben. Es wirkt nur ein geringer hydraulischer Gradient.
- Die Intensität kapillarer Saugspannungen für Ottokraftstoffe im Boden hängt von der Porenraumstruktur, der Sättigungsverteilung und der Benetzbarkeit des Bodens für Ottokraftstoffe ab. Die innerhalb der Grundwasserüberdeckung i.d.R. vorliegende teilweise Wassersättigung des Bodens kann durch den eingegengten, dynamisch wirksamen Porenraum zu erhöhten kapillaren Saugspannungen für Benzin führen und somit die Infiltration beschleunigen.
- Zur Simulation einer zeitlich begrenzten Infiltration von Ottokraftstoffen in die ungesättigte Bodenzone werden ausgehend von den dargelegten Zusammenhängen Grundsatzuntersuchungen unter in-situ-Randbedingungen angeraten.
- Für die zeitlich veränderliche in-situ-Wasser- und -Luftsättigung kann bei Risikobetrachtungen vereinfachend eine residuale (Rest-) Wassersättigung innerhalb der ungesättigten Bodenzone angenommen werden, was während Trockenperioden (v.a. Sommermonate) und in grobkörnigen Böden weitgehend zutreffend und ansonsten konservativ, d.h. auf der sicheren Seite liegend ist. Die punktförmige vertikale Infiltration eines Mineralölproduktes kann bei residualer Wassersättigung wegen der ungehinderten seitlichen Verdrängung der Porenluft als Einphasenströmung behandelt werden. Für Simulationsberechnungen kann der tatsächlich allmähliche und durch Unregelmäßigkeiten der Porenraumstruktur verwischte Sättigungsübergang an der Benzin-Infiltrationsfront als sprunghafter horizontaler ebener Sättigungsübergang vereinfacht werden.
- In der Regel muß bei geklüfteten oder verkarsteten Festgesteinen mit einer schnellen vertikalen Verlagerung von Ottokraftstoffen gerechnet werden.

- Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen können allenfalls bei massigen, sehr gering durchlässigen Festgesteinen ($k < 1 \cdot 10^{-8} \text{ m/s}$) als aktive Sicherheitskomponente berücksichtigt werden.
- Eine gleichmäßige (ungewichtete) Verteilung der in den Jahren von 1983 bis 1992 gemäß amtlicher Statistik erfaßten Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe auf Straßen (Daten aus STATISTISCHES BUNDESAMT 1987-1993) auf das gesamte Streckennetz öffentlicher Straßen (überörtlicher Verkehr einschl. Ortsdurchfahrten) der alten Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland (Daten aus DIW 1994) ergibt eine mittlere Unfallwiederholungsdauer von 568 Jahren je km.

5 Maßnahmen zur Risikominderung (Schutzmaßnahmen)

5.1 Überblick

Derzeit sind folgende in betrieblich, verkehrsregelnd, verkehrstechnisch und bautechnisch untergliederte Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers verfügbar:

Tabelle 5-1: Betriebliche, verkehrsregelnde, verkehrstechnische und bautechnische Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers

Betriebliche Maßnahmen	Verkehrstechnische Maßnahmen	Bautechnische Maßnahmen
▪ Reinigungs- und Pflegemaßnahmen	• Verminderung der Emissionen beim Betrieb der Kfz	• passive Schutzeinrichtungen
▪ Verringerung/Optimierung der Tausalzanwendung	• Allgemeine verkehrstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit	• Entwässerungseinrichtungen
▪ Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen beim Transport wassergefährdender Stoffe	• Erhöhung der Sicherheit von Fahrzeugen zum Transport wassergefährdender Stoffe • Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe und/oder gefährlicher Stoffe	• Untergrundabdichtungen

Im folgenden wird die Wirkungsweise der oben genannten Schutzmaßnahmen untersucht. Soweit erforderlich, werden Anforderungen an die Wirksamkeit und die Zuverlässigkeit der Maßnahmen erarbeitet, deren Erfüllung im Rahmen von Literatur- und Datenauswertungen untersucht und bewertet wird.

5.2 Betriebliche Maßnahmen

5.2.1 Reinigungs- und Pflegemaßnahmen

Im Einflußbereich von Straßen können mit folgenden Reinigungs- und Pflegemaßnahmen v.a. die straßenspezifischen Stoffe aus ständigen Einwirkungen zurückgehalten bzw. zurückgewonnen werden:

- Reinigung der Straßenoberfläche
- Mähen der Bankette und Entsorgung des Mähgutes

Durch eine maschinelle Straßenreinigung können auf der Straßenoberfläche abgelagerte Feststoffpartikel erfaßt und einer gezielten Entsorgung zugeführt werden. SIEKER & GROTTKER (1988, S. 34ff) haben die Effektivität der maschinellen Straßenreinigung in Abhängigkeit von den Parametern Schmutzvorrat und Partikelgröße (acht Korngrößenbereiche) funktional beschrieben. Nach SIEKER & GROTTKER (1988, S. 36) sollte das Reinigungsintervall auf ein Schmutzpotential von 30 % des Maximalwertes abgestimmt werden, da dann bereits eine hohe Reinigungseffektivität von ca. 30 % zu erwarten sei, ohne daß große Akkumulationsintervalle auftreten.

Nach KRIEGER (1996) müssen die Grünflächen an Straßen regelmäßig gepflegt werden, wobei jährlich 140000 t Grüngut anfallen (1987, alte Bundesländer - zit. in KRIEGER 1996). Nach UNGER & PRINZ (1992) weist der straßennahe Grünlandaufwuchs erhöhte und zum Teil kritische Schwermetallgehalte bis in 100 m Entfernung vom Fahrbahnrand auf, die Meßwerte überschritten jedoch nicht die Grenzwerte für Futtermittel. Nach KRIEGER (1996) könnte anhand der Untersuchungsergebnisse von UNGER & PRINZ (1992) das Schnittgut von Straßen bis zu einem DTV von 65000 Kfz/24h bedenkenlos kompostiert werden, was von früheren Untersuchungen der BASt aus dem Jahr 1988 abweicht, wo noch deutlich höhere Stoffgehalte ermittelt wurden.

5.2.2 Verringerung der Tausalzanwendung

Zur Verringerung der Tausalzanwendung kommen folgende Möglichkeiten in Betracht:

- optimierte Organisation des Winterdienstes
- Verzicht auf Tausalzanwendung

Durch die Nutzung von Informationssystemen für aktuelle Witterungs- und Verkehrsdaten kann der Winterdienst auf der Grundlage gezielter Schneeräum- und Streupläne ohne Einschränkungen der Verkehrssicherheit optimiert werden. Neben einer verstärkten mechanischen Schneeräumung sind hierbei nach BROD (1993) den Witterungsbedingungen angepasste Streumittel und deren dosierte und gezielte Ausbringung (Streubreite, -menge und -richtung) erforderlich.

Durch einen Verzicht auf Tausalzstreuung kann der Lastfall vorübergehende Einwirkungen vermieden werden. Diese Schutzmaßnahme ist jedoch im Hinblick auf die Verkehrssicherheit kritisch zu sehen, da sie ggf. zu einer unerwünschten Risikoverlagerung (Grundwassergefährdung → Gefährdung der Verkehrsteilnehmer) führt. Daher dürfte ein Verzicht auf Tausalzstreuung lediglich auf untergeordneten Strecken in Verbindung mit Glätte-Warnschildern, verstärkter mechanischer Schneeräumung und ggf. Streuung abstumpfender Stoffe vertretbar sein.

5.2.3 Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen mit wassergefährdenden Stoffen

Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen mit wassergefährdenden Stoffen werden in der einschlägigen Literatur (z.B. UBA 1990; LEO & LILIE 1987; RIDDER 1991) ausführlich behandelt, so daß an dieser Stelle nur ein Überblick gegeben wird. Die Untersuchung der grundsätzlich durchzuführenden Sofort- und Folgemaßnahmen bezieht sich im Rahmen dieser Arbeit darauf, inwieweit eine Verlagerung wassergefährdender Stoffe ins Grundwasser verhindert werden kann. Die Wirksamkeit hängt vor allem davon ab, ob folgende Anforderungen erfüllt sind:

- ausreichend geschulte Fahrzeugführer
- Ausstattung für Sofortmaßnahmen im Fahrzeug (Unfallmerkbblätter, Warningschilder, Bindemittel, ...)
- ständig besetzte Unfallmeldestelle (z.B. Polizei oder Feuerwehr)
- Zuständigkeiten geklärt - z.B. gem. RIDDER (1991) die Feuerwehr und/oder das Technische Hilfswerk für Sofortmaßnahmen und die unteren Wasserbehörden für Folgemaßnahmen
- Sachverständige kurzfristig verfügbar
- ausreichend geschultes Personal für die Durchführung von Folgemaßnahmen ständig verfügbar
- für die standortspezifischen Randbedingungen geeignetes technisches Gerät ständig verfügbar
- Standort und Verfügbarkeit von Sondergeräten (z.B. Hydraulikbagger oder Pumpen) bekannt (z.B. chemische Industrie)
- detaillierte Alarmierungs- und Unfalleinsatzpläne unter Berücksichtigung der standortspezifischen Randbedingungen (z.B. steiles Gelände) im jeweiligen Zuständigkeitsgebiet

Neben den oben genannten Anforderungen hängt der Grad der Risikominderung in erster Linie davon ab, ob und wie schnell die Sofort- und Folgemaßnahmen ergriffen werden. In diesem Zusammenhang sind folgende Gefährdungen der Wirksamkeit der Maßnahmen zu nennen:

- Unentdeckte Unfälle - z.B. nachts - werden nicht gemeldet.
- Bei "kleinen" Unfällen, wie beispielsweise beschädigte Treibstoffbehälter, werden keine Maßnahmen eingeleitet.

Im Hinblick auf die Zuverlässigkeit der Sofort- und Folgemaßnahmen sind regelmäßige Schulung des Personals, Wartung der technischen Ausrüstung, Bevorratung von Verbrauchsstoffen (z.B. Ölbindemittel) und Überprüfung/Aktualisierung der Unfalleinsatzpläne erforderlich.

Da der Erfolg (Wirksamkeit) der Sofort- und Folgemaßnahmen sehr stark von den jeweiligen Randbedingungen des einzelnen Unfalles abhängt, kann die Risikominderung nicht a priori quantifiziert werden. Als Anhaltswert sei die Wiedergewinnung der bei Unfällen ausgetretenen Stoffe im Rahmen von Sofort- und Folgemaßnahmen in den alten Bundesländern der Bundesrepublik Deutschland genannt, die von 1986 bis 1992 durchschnittlich 68 % betrug (Auswertung der Daten aus STATISTISCHES BUNDESAMT 1987-1994).

5.3 Verkehrstechnische Maßnahmen

5.3.1 Verminderung der Emissionen beim Betrieb von Kraftfahrzeugen

Zur Verminderung der Emissionen beim Betrieb von Kraftfahrzeugen können den einzelnen Stoffquellen folgende Maßnahmen zugeordnet werden:

- | | |
|---------------------------------------|--|
| Verbrennungs-
abgase: | <ul style="list-style-type: none">• direkte Reduktion des fahrzeugspezifischen Kraftstoffverbrauchs• Ausbau der Verkehrswege zur indirekten Reduktion des Kraftstoffverbrauchs• Geschwindigkeitsbeschränkung zur indirekten Reduktion des Kraftstoffverbrauchs• Zurückhaltung von Verbrennungsrückständen (z.B. Katalysator)• Verminderung des stoffspezifischen Gefährdungspotentials der Kraftstoffe• Entwicklung alternativer Antriebstechnologien |
| Bremsen-, Reifen-,
Straßenantrieb: | <ul style="list-style-type: none">• Verminderung des stoffspezifischen Gefährdungspotentials der abgeriebenen Stoffe (Bremsbeläge, -scheiben, Reifenmaterial, Fahrbahnbaustoffe)• Ausbau/Modernisierung des Streckennetzes zur indirekten Reduktion der Abriebvorgänge• Vergleichmäßigung des Verkehrsflusses zur indirekten Reduktion der Abriebvorgänge |
| Tropfverluste: | <ul style="list-style-type: none">• Kapselung der Kfz-Unterböden• regelmäßige Kontrollen auf Tropfverluste |

Die Wirksamkeit der einzelnen Maßnahmen kann jeweils durch Messungen am einzelnen Kfz oder durch experimentelle Untersuchungen bestimmt werden. Die tatsächliche Verminderung der Emissionen wassergefährdender Stoffe im Einflußbereich von Straßen kann jedoch nur anhand von in-situ-Untersuchungen nachvollzogen werden.

5.3.2 Allgemeine verkehrstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit

Zur Erhöhung der Verkehrssicherheit sind folgende verkehrsregelnde Schutzmaßnahmen verfügbar:

- | | |
|------------------------------|--|
| Gebote und Verbote: | <ul style="list-style-type: none">• Überholverbot• Geschwindigkeitsbeschränkung allgemein• Geschwindigkeitsbeschränkung bei Regen• Geschwindigkeitsbeschränkung für Transporte wassergefährdender Stoffen |
| Informationen und Warnungen: | <ul style="list-style-type: none">• Kurven• Aquaplaning• Schleudergefahr• winterliche Glätte• Notruftelefone |
| Verkehrssteuerung: | <ul style="list-style-type: none">• Verkehrsleitsysteme (den aktuellen Randbedingungen angepaßte Gebote und Verbote)• Lichtsignalanlagen an Knotenpunkten• bautechnische Umgestaltung von Knotenpunkten |

Die genannten Maßnahmen wirken ergänzend und teilweise risikomindernd gegenüber außergewöhnlichen Einwirkungen. Der Grad der Risikominderung (Wirksamkeit) kann vorab anhand von diesbezüglichen Studien und nachträglich durch Auswertung von Unfalldaten abgeschätzt werden. Im Hinblick auf die Wirksamkeit ist zu befürchten, daß die Ge- und Verbote vereinzelt nicht befolgt werden, so daß eine Überwachung erforderlich wäre.

5.3.3 Erhöhung der Sicherheit von Fahrzeugen zum Transport wassergefährdender Stoffe

Zur Erhöhung der Sicherheit von Fahrzeugen zum Transport wassergefährdender Stoffe kommt eine Vielzahl technischer Maßnahmen in Betracht, wie beispielsweise:

- Unterteilung des Transportbehälters in einzelne abgeschottete Kammern
- Doppelwandige Ausführung des Transportbehälters
- Zusätzlicher Anfahrschutz des Transportbehälters nach allen Seiten
- Behältermaterial mit hoher Festigkeit und Elastizität
- Ausreichende Kippstabilität (tiefer Schwerpunkt)
- Modifizierte Bremsanlage (z.B. Antiblockiersystem)
- Interne automatische Geschwindigkeitsbegrenzung (z.B. 80 km/h)

Die technischen Maßnahmen zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit werden insbesondere aufgrund spektakulärer Unfälle beim Transport gefährlicher Güter weiterentwickelt, wie der

diesbezüglichen Literatur entnommen werden kann (z.B. RIDDER 1991, BAUM et al, 1992 und PÖPPEL & KÜHNEN 1993). Die Wirkungsweise derartiger Maßnahmen kann im einzelnen experimentell untersucht werden. Die durch die Maßnahmen erzielte Risikominderung kann jedoch erst nachträglich durch die statistische Auswertung von Unfalldaten näherungsweise bestimmt werden.

5.3.4 Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe und/oder gefährlicher Stoffe

Als Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe und/oder gefährlicher Stoffe kommen

- das Zeichen 269 StVO (Fahrzeuge mit mehr als 3000 l wassergefährlicher Stoffe) und
- das Zeichen 261 StVO (Verbot für kennzeichnungspflichtige Kfz mit gefährlichen Gütern) zur Anwendung.

Im Hinblick auf die Wirksamkeit der Verbote ist zu befürchten, daß diese vereinzelt nicht befolgt werden, so daß eine Überwachung erforderlich wäre. Des weiteren müßten in den betroffenen Streckenabschnitten Umleitungsstrecken und Umkehrmöglichkeiten geschaffen werden. Je nach Lage und Ausdehnung der betroffenen Streckenabschnitte dürften dennoch Sondergenehmigungen für den häuslichen Lieferverkehr erforderlich werden, die die Wirksamkeit und die Zuverlässigkeit der Fahrverbote einschränken.

5.4 Bautechnische Maßnahmen

5.4.1 Passive Schutzeinrichtungen

5.4.1.1 Überblick

Um die Unfallschwere bei von der Fahrbahn abkommenden Fahrzeugen zu mindern, sind in Wasserschutz-zonen nach RPS (1989) und RiStWag (1982) abweisende passive Schutzeinrichtungen anzuordnen. Im Detail werden folgende Angaben zur Anordnung und Bauweise der passiven Schutzeinrichtungen in Wasserschutz-zonen gemacht:

RPS (1989):

- Grundsätzlich in Wasserschutz-zonen anzuordnen:
- WSZ III: Einfache Distanzschutzplanken mit 2 m Pfostenabstand (EDP/2,0)
- WSZ II: Doppelte Distanzschutzplanken mit 4 m Pfostenabstand (DDSP/4,0) oder Betongleitwände (BGLW)
- Auf Brücken grundsätzlich anzuordnen:
Distanzschutzplanken und Geländer mit in den Geländerholm eingelegtem Stahlseil als Absturz-sicherung

RiStWag (1982):

- WSZ IIIB:
Keine passiven Schutzeinrichtungen vorgesehen
- WSZ IIIA:
 - Distanzschutzplanken gemäß "Richtlinien für abweisende Schutzeinrichtungen an Bundesfernstraßen" (Vorläufer der RPS) an Mittel- und Seitenstreifen auf Dämmen oder in Geländehöhe; wenn die Böschung bei niedrigen Dämmen sehr flach ($1 : \geq 4$) ausgebildet wird, sind Schutzplanken nicht erforderlich
 - bei Anordnung von Distanzschutzplanken im Seitenstreifen kann auf eine Abdichtung der Einschnitts-böschung verzichtet werden
 - bei Einschnitten sind im Mittelstreifen stets Distanzschutzplanken vorzusehen
 - auf Brücken sind stets abweisende Schutzeinrichtungen gemäß den "Richtlinien für abweisende Schutzeinrichtungen an Bundesfernstraßen" (Vorläufer der RPS) anzuordnen
- WSZ II:
 - abweichend von den "Richtlinien für abweisende Schutzeinrichtungen an Bundesfernstraßen" (Vorläufer der RPS) 2,5 m breite Seitenstreifen und doppelte Distanzschutzplanken auf Dämmen oder in Geländehöhe
 - bei Einschnitten sind Distanzschutzplanken nur im Mittelstreifen vorzusehen
 - auf Brücken sind abweisende Schutzeinrichtungen gemäß den "Richtlinien für abweisende Schutzeinrichtungen an Bundesfernstraßen" (Vorläufer der RPS) und verstärkte Brückengeländer mit Stahlseilen in den Handläufen und Endholmen vorzusehen

Die Widersprüche zwischen den beiden vorgenannten Richtlinien dürften in erster Linie auf die zwischenzeitliche Überarbeitung der "Richtlinien für passive Schutzseinrichtungen" (RPS 1989) zurückzuführen sein. Wie in den alten "Richtlinien für abweisende Schutzseinrichtungen an Bundesfernstraßen" (1972) (Vorläufer der RPS) sind auch in den RiStWag aus dem Jahre 1982 keine Angaben zu Betongleitwänden enthalten. Auf der Grundlage der "Hinweise für Maßnahmen an bestehenden Straßen in Wasserschutzgebieten" (FGSV 1993a) werden folgende Bauweisen passiver abweisender Schutzseinrichtungen untersucht:

- Distanzschutzplanken aus Stahl
- Betongleitwände
- Erdwälle (Sonderbauweise, nicht in RPS genannt)
- auf Brücken:
 - Distanzschutzplanken aus Stahl und Stahlseile in Brückengeländern (Standardbauweise)
 - Betonleitschwellen mit aufgesetzten Distanzschutzplanken
 - Betongleitwände

Im Hinblick auf außergewöhnliche Einwirkungen ergeben sich folgende Anforderungen an die Wirksamkeit und die Zuverlässigkeit von passiven Schutzseinrichtungen:

Wirksamkeit

- **Durchbruchssicher** für 40 t-Tanklastzüge mit 80 km/h Anprallgeschwindigkeit, das heißt für eine Anprallenergie von 9,9 MJ und folgende Anprall-Impulse (senkrecht zur Längsachse):

90 ° Anprallwinkel:	$8,9 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ (= Extremfall)
20 ° Anprallwinkel:	$3,0 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ (maßgebend)
5 ° Anprallwinkel:	$0,7 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$

Nach LAMPRECHT (1976) lag der Anfahrwinkel in 80 % der Unfälle auf 160 km Strecken mit Betongleitwänden in Kalifornien (von 1972 bis 1975) unter 5 °. Ein Anprallwinkel > 20 ° bis zu maximal 90 ° ist bei hoher Geschwindigkeit aus Gründen der Fahrdynamik allenfalls nach einer Überquerung mehrerer Fahrspuren und/oder der Gegenfahrbahn und einem Anprall gegen die kurvenäußere passive Schutzseinrichtung möglich. Eine Untersuchung von insgesamt 226503 Unfällen aller Arten von Kfz auf Bundesstraßen in der Bundesrepublik Deutschland im Zeitraum von 1986 bis 1989 (SCHNÜLL et al. 1993) ergab für das "Abkommen von der Fahrbahn nach links" eine relative Häufigkeit von 3,4 %. Aus den genannten Gründen erscheint ein senkrecht zur Längsachse der passiven Schutzseinrichtung wirkender Anprallimpuls von $3,0 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$ bei 80 km/h Anprallgeschwindigkeit (unverzögert) und einem Anprallwinkel von 20 ° als Bemessungsgröße zweckmäßig.

- Im Hinblick auf das mögliche Austreten der transportierten wassergefährdenden Stoffe sollte die **Kippsicherheit** für Tankfahrzeuge während des Anprallvorgangs möglichst hoch sein.
- Im Hinblick auf das mögliche Austreten der transportierten wassergefährdenden Stoffe sollte das **Beschädigungsrisiko** für den Transportbehälter während des Anprallvorgangs möglichst gering sein. In diesem Zusammenhang erscheinen glatte dämpfende Anprallflächen vorteilhaft.

Zuverlässigkeit

- Die verwendeten Werkstoffe sollten eine ausreichende **Beständigkeit** gegenüber korrosiven straßenspezifischen Einwirkungen (Witterung, Tausalzstreuung, ...) aufweisen.
- Der erforderliche **Wartungsaufwand** (Häufigkeit und Umfang) sollte möglichst gering sein.
- Die **Robustheit** bei Anprallvorgängen sollte möglichst hoch sein, so daß der Reparaturbedarf nach Anprallvorgängen möglichst gering ist.

Die Wirksamkeit der passiven Schutzeinrichtungen wird im folgenden untersucht. Eine Literatur- und Datenauswertung zur Zuverlässigkeit der passiven Schutzeinrichtungen hinsichtlich der oben genannten Kriterien ist in Anlage 1 zusammengefaßt.

5.4.1.2 Distanzschutzplanken

BÖHRINGER et al. (1965, 1970) führten insgesamt 55 Anfahrversuche mit Pkw und Lkw an Stahlleitplanken unter Variation der Parameter Leitplankenkonstruktion, Fahrzeug, Anprallwinkel und Anprallgeschwindigkeit durch, deren Ergebnisse die Grundlage für die "Richtlinien für abweisende Schutzeinrichtungen an Bundesfernstraßen" (1972) lieferten. Die Untersuchungsergebnisse werden im Hinblick auf den Anprall von Gefahrguttankfahrzeugen folgendermaßen zusammengefaßt:

- Einfache Distanzschutzplanken mit Zugband auf der Rückseite:
ab einem Anprall-Impuls von $0,6 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, d.h. 1/5 des hier maßgebenden Anprall-Impulses, durchbrochen
- Doppelte Distanzschutzplanken (Ausführungsvorschlag):
bis max. $0,7 \cdot 10^5 \text{ kg} \cdot \text{m/s}$, d.h. gut 1/4 des hier maßgebenden Anprall-Impulses wirksam

SCHNÜLL et al. (1993) werteten 2586 Unfälle auf Bundesstraßen in Rheinland-Pfalz im Zeitraum von 1986 bis 1989 im Hinblick auf die Wirkungsweise von Schutzplanken aus

(s. Abb. 5-1). Der Schwerverkehr war bei einem Unfallanteil von nur 4 % für etwa 20 % der Durchbrüche verantwortlich (SCHNÜLL et al. 1993).

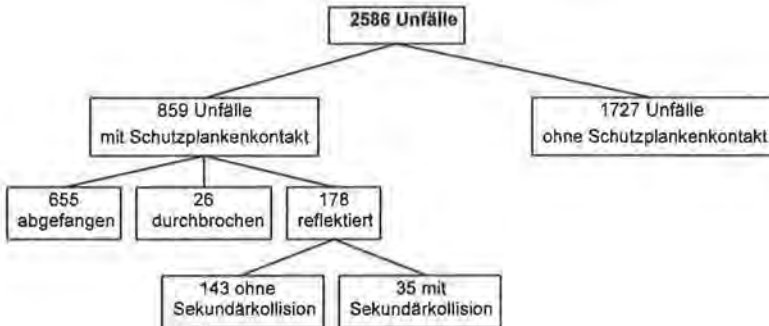


Abb. 5-1: Auswertung von 2586 Unfällen auf Bundesstraßen in Rheinland-Pfalz im Zeitraum von 1986 bis 1989 im Hinblick auf die Wirkungsweise von Schutzplanken (Daten aus SCHNÜLL et al. 1993)

Bei den von GÜNTHER (1980) untersuchten Anprallschäden bei passiven Schutzeinrichtungen auf Brücken wurde in 42 % der durch Schwerverkehr verursachten Fälle auch das der Distanzschutzplanke nachgeschaltete Brückengeländer beschädigt, so daß erhebliche Verformungen der Distanzschutzplanken stattgefunden haben, die sich ohne das sekundäre Sicherheitselement "Geländer mit eingelegten Stahlseilen" (= Redundanz) möglicherweise bis zu Durchbrüchen fortgesetzt hätten. Anhand der ausgewerteten Literatur kann die Wirksamkeit und die Zuverlässigkeit von Distanzschutzplanken folgendermaßen bewertet werden:

Bei einfachen Distanzschutzplanken erscheint die Durchbruchssicherheit für die maßgebenden Gefahrguttankfahrzeuge unzureichend. Die Durchbruchssicherheit doppelter Distanzschutzplanken war in den Untersuchungen von BÖHRINGER et al. (1965, 1970) nur bei einem Teil der (modifizierten) Konstruktionen bei bis zu maximal ca. 23 % des maßgebenden Anprall-Impulses ausreichend, so daß eine unzureichende Durchbruchssicherheit für 40 t-Gefahrguttankfahrzeuge gefolgt wird.

Die Kippsicherheit kann anhand der vorliegenden Literatur nicht zuverlässig bewertet werden. Die planmäßige, für Pkw dämpfend wirkende Nachgiebigkeit der Distanzschutzplanken

erscheint im Hinblick auf den Anprall von Tankfahrzeugen nachteilig, da zu befürchten ist, daß diese Fahrzeuge wegen ihres verhältnismäßig hohen Schwerpunktes über die Distanzschutzplanke hinweg kippen.

Aufgrund der zu erwartenden, erheblichen Deformationen der weichen, aus einzelnen profilierten Stahlteilen zusammengesetzten Konstruktion wird ein hohes Beschädigungsrisiko - vor allem für die Treibstofftanks - gefolgert. Dies wird durch die Anfahrversuche von BÖHRINGER et al. (1965, 1970) bekräftigt, in denen die Versuchsfahrzeuge teilweise erheblich beschädigt wurden.

5.4.1.3 Betongleitwände

LAMPRECHT (1976) nennt folgende international gesammelte Erfahrungen mit Betongleitwänden:

Auf 160 km Strecken mit Betongleitwänden in Kalifornien (von 1972 bis 1975)

- ereignete sich kein Durchbruch,
- verminderte sich die Unfallschwere erheblich (60 % weniger gemeldete Unfälle, 75 % weniger Unfalltote und 13 % weniger Verletzte)
- lag der Anfahrwinkel in 80 % der Unfälle unter 5 °

Bei einem Anfahrversuch eines 10 t-Lkw mit Aufsetztank unter einem ungewöhnlich steilen Winkel von 20 ° mit einer Geschwindigkeit von 72 km/h auf eine Leitwand mit "New-Yersey-Profil" wurde lediglich das Fahrzeug und die Betongleitwand beschädigt, ohne daß das Tankfahrzeug kippte oder die Betongleitwand durchbrach.

SCHULTE (1994) faßt die in der Bundesrepublik Deutschland von 1980 bis 1994 bei der Anwendung von Betongleitwänden gesammelten Erfahrungen wie folgt zusammen:

- Im Vergleich zu nachgiebigen passiven Schutzeinrichtungen ging die Unfallschwere durch Betongleitwände erheblich zurück.
- Betongleitwände können auch extreme Anprallsituationen bewältigen - so zerstörte ein senkrecht anprallender Lkw eine Wand auf 1,5 m Länge und ein Panzer auf 10 m Länge, wobei die Wand direkt über dem Fundament abgebrochen wurde, so daß Durchbrüche praktisch ausgeklammert werden können.

- Schwierige und kostspielige Unterhaltungs-, Instandsetzungs- und Erneuerungsarbeiten an den Betongleitwänden fallen nicht an.
- Die vorhandenen Schlitz- und Durchlässe im Wandfuß waren zur Entwässerung teilweise nicht ausreichend leistungsfähig, so daß wegen Verstopfungen ein erhöhter Unterhaltungsaufwand erforderlich wurde.
- Der Schneeräumdienst wird insofern erschwert, als anstelle von Schneepflügen grundsätzlich Schneefräsen eingesetzt werden müssen, da ansonsten der vor der geschlossenen Wand liegende Schnee während Tauphasen zu zusätzlichem Wasser auf der Fahrbahn (Seebildung) und in einer anschließenden Frostperiode zu Glatteis führen kann.
- Besondere Vorteile bieten Betonschutzwände als Straßenbegrenzung im Bereich von Wasserschutzgebieten, da nicht nur eine optimale Abdichtung von der Wandgründung in den Straßenbereich hergestellt werden kann, sondern diese Abdichtung auch dicht unter der Gründung liegen kann.
- Folgende Schwierigkeiten bei der Anwendung von Betonschutzwänden werden gesehen:
 - Demontageaufwand, Einsatz von Konstruktionen aus Stahl mit geeigneten Übergangskonstruktionen im Bereich von Fahrbahnüberfahrten
 - Fluchtwegbehinderung und Behinderung von Bergungsarbeiten an Unfallstellen
 - zusätzliche Belastung von Brückenkonstruktionen
 - optische Trennwirkung
- Weiterhin werden folgende Vorteile genannt:
 - verminderte Blendgefahr am Mittelstreifen
 - vermindertes Verletzungsrisiko für Motorradfahrer im Vergleich zu Distanzschutzplanken
 - Möglichkeit zur Bepflanzung zwischen zwei Betongleitwänden im Mittelstreifen oder zwischen Betongleitwand und Lärmschutzwand
 - Soll ein Abkommen auch von Lkw mit größtmöglicher Sicherheit ausgeschlossen werden, ist die Betonschutzwand gegenüber der Standardbauweise auf 1,15 m zu erhöhen

Anhand der ausgewerteten Literatur kann die Wirksamkeit von Betongleitwänden folgendermaßen bewertet werden:

Da im Rahmen der mehrjährigen internationalen Erfahrungen und der Anfahrversuche auch unter extremen Randbedingungen (steiler bis senkrechter Anprall) kein Durchbruch eines LKW durch eine Betongleitwand festgestellt wurde, erscheint die Durchbruchsicherheit ausreichend.

Aufgrund der gezielten Profilierung der Betongleitwände wird der von der Fahrbahn weg gerichtete Querbewegung des anprallenden Fahrzeuges durch ein begrenztes "Hochlaufen" (zugleich begrenzte Querneigung des Fahrzeuges) entgegengewirkt, so daß das Fahrzeug auf die Fahrbahn zurückgeführt wird. Aufgrund dieser Wirkungsweise und der ausgewerteten Erfahrungsberichte wird eine ausreichende Kippsicherheit gefolgert. Wie von SCHULTE

(1994) angeraten, ist gegenüber der Standardbauweise ggf. eine Erhöhung auf 1,15 m zweckmäßig.

Aufgrund der glatten linienförmigen Gestalt und der stabilen Massivbauweise erscheint das Beschädigungsrisiko für den Transportbehälter im Vergleich zu den anderen verfügbaren Bauweisen passiver Schutzeinrichtungen günstiger.

5.4.1.4 Erdwälle

Bei der Anordnung von Erdwällen als passive Schutzeinrichtungen handelt es sich um eine Sonderbauweise, die beispielsweise an der A7 im Abschnitt Heidenheim-Westhausen zusätzlich zur Distanzschutzplanke (BADER 1986) und an der A96 bei Leutkirch als einzige passive Schutzeinrichtung (SCHMIDT & HEYER 1995) angewandt wurde.

Da bei der Literaturrecherche keine Erfahrungsberichte zu Erdwällen als passive Schutzeinrichtungen gefunden wurden, müssen Sicherheit und Zuverlässigkeit anhand von theoretischen Überlegungen beurteilt werden:

Aufgrund der je nach Ausführung sehr hohen Masse (in den genannten Beispielen ca. 6000...20000 kg/m) und der wegen der beidseitigen Böschungen hohen Stabilität, wird eine ausreichende Durchbruchssicherheit gefolgert.

An der ausreichenden Kippsicherheit für Tankfahrzeuge während des Anprallvorgangs an Erdwälle bestehen folgende Zweifel: Aufgrund der hohen Radlasten können die zuerst von der befestigten Fahrbahn abkommenden Räder im Boden einsinken und somit einen Kippvorgang einleiten. Beim schrägen "Hochfahren" auf die steile Erdwallböschung kann das Tankfahrzeug kippen.

Das Beschädigungsrisiko für die Transportbehälter während des Anprallvorgangs kann wegen der glatten, verhältnismäßig weichen Oberfläche des Erdwalls zunächst als gering bewertet werden. Im Zusammenhang mit dem oben erläuterten erheblichen Kipprisiko ist - vor allem bei Abstürzen des zuvor hochgefahrenen Tankfahrzeuges (Abrollen der Böschung) - auch mit einem erhöhten Beschädigungsrisiko für den Transportbehälter zu rechnen.

5.4.1.5 Passive Schutzeinrichtungen auf Brücken

Als passive Schutzeinrichtungen auf Brücken sind gemäß RPS (1989) folgende Bauweisen verfügbar:

- Zwei einfache oder eine doppelte Distanzschutzplanken im Mittelstreifen
- Distanzschutzplanken und Geländer mit eingelegten Stahlseilen am Fahrbahnrand (Standardbauweise)
- Auf bestehenden Brücken alter Bauart Betonleitschwellen (ggf. mit aufgestockten Schutzplanken)
- Betongleitwände am Mittelstreifen (doppelseitig profiliert) und am Fahrbahnrand

Einfache und doppelte Distanzschutzplanken und Betongleitwände wurden bereits hinreichend untersucht, so daß im folgenden nur noch auf die Standardbauweise und die Betonleitschwellen alter Bauweise eingegangen wird:

Standardbauweise:

Eine von GÜNTHER (1980) durchgeführte Auswertung zu Anprallschäden an Distanzschutzplanken und Geländern in der Regelbauweise gemäß den "Richtlinien für abweisende Schutzeinrichtungen an Bundesfernstraßen" (1972) auf allen Brücken von Bundesfernstraßen im Zeitraum vom 1.10.1974 bis zum 30.09.1977 ergab im Hinblick auf den Schwerverkehr (Lkw, Lastzug, Sattelzug) folgendes:

- 31 Anprallschäden durch Lkw, Lastzüge oder Sattelzüge (10,2 % aller Anprallschäden)
- Länge der durch den Schwerverkehr verursachten Schadensstrecken:
Mittelwert = 31,1 m; Spannweite = 0...132 m
- 13 Fälle mit Geländerschäden (42 %) durch den Schwerverkehr
- 4 Abstürze von Schwerverkehrs-Fahrzeugen (15 %) - davon
- führen je ein Sattelzug und ein Lastzug bereits vor der Brücke auf die abgesenkte Schutzplanke und stürzten dann im Bauwerksbereich ab - zudem war in beiden Fällen das Geländer nicht durch ein Stahlseil geschützt, so daß es sich nicht um Durchbrüche mit darauffolgendem Absturz handelt.
- wurde ein Lkw von einem Lastzug hinten links gerammt und über die Schutzeinrichtungen gestoßen.
- durchbrach ein Lkw mit Anhänger die Schutzeinrichtungen am Autobahnmittelstreifen und durchbrach nahezu rechtwinklig die Schutzplanke und das Geländer der Gegenfahrbahn und stürzte ab.
- Die Distanzschutzplanken und das Geländer wurden nur in einem von 31 Fällen und zudem unter besonderen Umständen (siehe oben) durchbrochen.

Die Wirksamkeit der Kombinationsbauweise aus Distanzschutzplanken und Geländer mit eingelegten Stahlseilen kann folgendermaßen beurteilt werden:

Die Durchbruchssicherheit der Kombinationsbauweise aus Distanzschutzplanken und Geländer mit eingelegten Stahlseilen erscheint für die überwiegend unter kleinen Winkeln erfolgenden Anprallvorgänge ausreichend. Unter extremen Bedingungen sind jedoch, wie oben beschrieben, Durchbrüche möglich.

Die planmäßige, für Pkw dämpfend wirkende Nachgiebigkeit der Distanzschutzplanken wird im Hinblick auf den Anprall von Tankfahrzeugen negativ bewertet, da zu befürchten ist, daß diese Fahrzeuge wegen ihres verhältnismäßig hohen Schwerpunktes über die Distanzschutzplanke hinweg kippen. Eine theoretisch mögliche Auffangwirkung des Geländers mit eingelegtem Stahlseil für ein kippendes Tankfahrzeug wurde im Rahmen der gesichteten Untersuchungen nicht genannt und müßte daher durch entsprechende Anfahrversuche bestätigt werden. Wegen der erläuterten Zweifel kann die Kippsicherheit nicht zuverlässig bewertet werden.

Die zu erwartenden erheblichen Deformationen der weichen, aus einzelnen profilierten Stahlteilen zusammengesetzten Konstruktion werden im Hinblick auf das Beschädigungsrisiko für die Transportbehälter negativ bewertet. Besonders kritisch ist ein mögliches Kippen des Transportbehälters auf das Brückengeländer.

Betonleitschwellen:

In den Anfahrversuchen von BÖHRINGER et al. (1970) wurde die Wirkungsweise von Betonleitschwellen negativ bewertet, weil diese

- von Lkw überquert wurden und
- Pkw während des Anprallvorganges erheblich beschädigten,

so daß in Übereinstimmung mit den RPS (1989) von der alleinigen Anordnung von Betonleitschwellen grundsätzlich abzuraten ist. Die gemäß RPS (1989) vorgesehene Nachrüstung der Betonleitschwellen mit aufgesetzten Distanzschutzplanken wird mangels Erfahrungsberichten anhand theoretischer Überlegungen wie folgt beurteilt:

Die Durchbruchssicherheit der Kombinationsbauweise aus Betonleitschwellen und Distanzschutzplanken erscheint bei hinreichend bemessener Befestigung ausreichend. Unter extremen Bedingungen sind jedoch - in Anlehnung an die Untersuchungsergebnisse von BÖHRINGER et al. (1970) - Überquerungen denkbar.

Die Nachgiebigkeit der auf der Oberseite angeordneten Distanzschutzplanken in Verbindung mit der hohen Steifigkeit der unten liegenden Betonleitschwellen wird kritisch bewertet, da möglicherweise wegen des verhältnismäßig hohen Schwerpunktes des seitlich anprallenden Tankfahrzeuges eine Kippbewegung gefördert wird. Wegen der erläuterten Bedenken wird die Kippsicherheit als unzureichend bewertet. Abhilfe könnten Verbindungen in besonders kurzem Abstand und ein Überstand der Schutzplanke in Richtung der Fahrbahn schaffen, was durch entsprechende Anfahrversuche zu bestätigen wäre.

Aufgrund der zu erwartenden erheblichen Deformationen der weichen, aus einzelnen profilierten Stahlteilen zusammengesetzten Schutzplanken ist das Beschädigungsrisiko für die Transportbehälter als hoch zu bewerten.

Betongleitwände: *Siehe Betongleitwände (5.4.1.3)*

5.4.2 Entwässerungseinrichtungen

5.4.2.1 Überblick

In Abb. 5-2 sind Einrichtungen zur Entwässerung von Straßen zusammengestellt.



Abb. 5-2: Schematischer Überblick zu Entwässerungseinrichtungen an Straßen

Aufgrund der unterschiedlichen Wirkungsweise wird in Anlagen zur Entwässerung, Weiterleitung, Behandlung und Ableitung unterschieden.

An die Entwässerungseinrichtungen werden folgende Anforderungen gestellt:

Wirksamkeit:

- In Abhängigkeit von den standortspezifischen Randbedingungen (Witterung, zu entwässernde Fläche) ausreichende *hydraulische Leistungsfähigkeit*.
- *Rückhalte- und Reinigungsvermögen* für straßenspezifische wassergefährdende Stoffe und/oder *Sperrwirkung* gegenüber straßenspezifischen wassergefährdenden Stoffen.

Zuverlässigkeit:

- *Beständigkeit* gegenüber chemischen, biologischen und Witterungs-Einflüssen
- Möglichst geringer *Wartungsaufwand* (Häufigkeit und Umfang)

- Angemessener **Sanierungsaufwand** nach Unfällen beim Transport wassergefährdender Stoffe.

Aus den in den RAS-EW (1987) und den RiStWag (1982) genannten Bauweisen werden folgende untersucht:

Tabelle 5-2: Anlagen zur Weiterleitung und Anlagen zur Behandlung/Ableitung des Straßenoberflächenwassers (RAS-EW 1987, RiStWag 1982)

Weiterleitung	Behandlung	Ableitung
• Mulden: Rasenmulden, Mulden mit rauhem Sohlbefestigung, Rauhbetmulden • Gräben: Gräben ohne Sohlbefestigung, mit glatter Sohlbefestigung und mit rauhem Sohlbefestigung • offene Rinnen: Bordrinnen, Pendelrinnen, Spitzrinnen, Muldenrinnen • geschlossene Rinnen: Kastenrinnen, Schlitzrinnen, Schlitzrinnen mit angeformtem Hochbord • Gullys, Kanäle und Schächte	• Absetzbecken mit Abscheider für Leichtflüssigkeiten (Regenklärbecken)	• Versickerungsanlagen: Sickerschächte, -gräben, -mulden, -stränge, -becken, -flächen

Im folgenden wird die Wirksamkeit der Entwässerungseinrichtungen untersucht. Eine Literatur- und Datenauswertung zur Zuverlässigkeit der Entwässerungseinrichtungen hinsichtlich der oben genannten Kriterien ist in Anlage 1 zusammengefasst.

5.4.2.2 Fahrbahnoberfläche

Hinsichtlich einer ausreichenden Entwässerung der Fahrbahnoberfläche (hydraulische Leistungsfähigkeit) ist gemäß RAS-EW (1987) eine Mindestquerneigung von $q_{\min} = 2,5 \%$ einzuhalten.

Bezüglich des Rückhalte- und Reinigungsvermögens für straßenspezifische wassergefährdende Stoffe und/oder Sperrwirkung gegenüber straßenspezifischen wassergefährdenden

Stoffen ist eine konvektionsdichte Ausführung der Fahrbahnoberfläche anzustreben, die auch im Hinblick auf die Zuverlässigkeit des Straßenoberbaus wegen der schädigenden Wirkung eindringenden Niederschlagswassers (Frost, Erosion von Feinteilen infolge "Pumpwirkung" bei Überfahung) vorteilhaft ist. Gemäß RiStWag (1982) gelten Betondecken und Befestigungen mit im Heißeinbau hergestellte, bitumengebundene Deckschichten nach TV bit 3* oder TV bit 6* als wasserundurchlässig (=konvektionsdicht). Erforderlichenfalls kann eine zusätzliche Untergrundabdichtung (Bauweisen siehe Abschnitt 5.4.3) angeordnet werden, die an die Entwässerungseinrichtungen anzuschließen ist. Im Fahrbahnbereich muß weiterhin eine ausreichende Tragfähigkeit der Untergrundabdichtung sichergestellt werden.

5.4.2.3 Mulden und Gräben

Die ausreichende hydraulische Leistungsfähigkeit ist durch eine den standortspezifischen Randbedingungen entsprechende Bemessung sicherzustellen.

Im Hinblick auf das Rückhalte- und Reinigungsvermögen für straßenspezifische wassergefährdende Stoffe aus ständigen Einwirkungen sind Mulden und Gräben mit einer bewachsenen, durchgehend unverletzten belebten Bodenzone auszuführen.

Sofern hinsichtlich der Sperrwirkung gegenüber wassergefährdenden Stoffen aus vorübergehenden und außergewöhnlichen Einwirkungen unzureichend schützende hydrogeologische Schutzwirkungen vorliegen, sind die Mulden und Gräben durch zusätzliche Untergrundabdichtungen konvektionsdicht auszuführen (Wirksamkeit und Zuverlässigkeit von Untergrundabdichtungen siehe 5.4.3).

5.4.2.4 Rinnen

Die ausreichende hydraulische Leistungsfähigkeit ist durch eine den standortspezifischen Randbedingungen entsprechende Bemessung sicherzustellen.

* Technische Vorschriften und Richtlinien für den Bau bituminöser Fahrbahndecken (TV bit); Teil 3: Asphaltbeton und Sandasphalt (Heißeinbau); Teil 6: Gußasphalt und Asphaltmastix; Bundesminister für Verkehr, Bonn; zit. in RiStWag (1982)

Ein signifikantes Rückhalte- und Reinigungsvermögen für straßenspezifische wassergefährdende Stoffe ist bei den genannten Rinnen-Bauweisen nicht gegeben, so daß ggf. zusätzlich Absetzbecken mit Leichtstoffabscheidern erforderlich werden.

Sofern hinsichtlich der Sperrwirkung gegenüber wassergefährdenden Stoffen aus vorübergehenden und außergewöhnlichen Einwirkungen eine unzureichende Schutzwirkung (Filtration, Abbau und Umwandlung) der verbleibenden Grundwasserüberdeckung vorliegt, sind die Rinnen durch abgedichtete Fugenkonstruktionen und einen durchgehend dichten Anschluß an die befestigte Fahrbahnoberfläche konvektionsdicht auszuführen. Bezüglich der Ausführung dichter Fugenkonstruktionen kann auf die Erfahrungen bei der Abdichtung von Tankstellenflächen und Industrieflächen zurückgegriffen werden (z.B. FRITZE 1994, GRUNAU 1995).

5.4.2.5 Gullys, Kanäle und Schächte

Die ausreichende hydraulische Leistungsfähigkeit ist durch eine den standortspezifischen Randbedingungen entsprechende Bemessung sicherzustellen.

Trocken- und Naßgullys weisen, wie in SIEKER & GROTTKER (1988) untersucht und funktional beschrieben, ein nennenswertes Rückhalte- und Reinigungsvermögen für straßenspezifische Feststoffpartikel aus ständigen Einwirkungen auf. Bei Kanälen und Schächten kann kein nennenswertes Rückhalte- und Reinigungsvermögen berücksichtigt werden, so daß ggf. zusätzlich Absetzbecken mit Leichtstoffabscheidern erforderlich werden.

Eine ausreichende Sperrwirkung gegenüber straßenspezifischen wassergefährdenden Stoffen kann durch die bei Kanälen und Schächten in Wassergewinnungsgebieten gemäß ATV Arbeitsblatt A 142 (1992) vorgeschriebene regelmäßige Dichtigkeitsprüfung sichergestellt werden.

5.4.2.6 Absetzbecken und Leichtflüssigkeitsabscheider

Aufgrund ihrer komplementären Wirkungsweise wird grundsätzlich angeraten, Absetzbecken und Leichtstoffabscheider zu kombinieren, wobei dann das Absetzbecken wegen der

abgedichteten Bauweise als Naßbecken anzusehen ist. Diesbezügliche in-situ-Untersuchungen ergaben folgendes:

KRAUTH & KLEIN (1982) untersuchten einen kombinierten Leichtstoffabscheider, an den ca. 1,3 ha zu entwässernde Fläche der A 81 angeschlossen waren. Das dauerhaft eingestaute Rechteckbecken mit Tauchwänden hatte 107 m² Oberfläche, 30 m³ Rückhaltevolumen für Leichtflüssigkeiten und wurde auf eine Oberflächenbeschickung von q = 9 m/h bemessen.

KRAUTH & KLEIN (1982) untersuchten weiterhin ein Regenrückhaltebecken mit Leichtflüssigkeitsabscheider, an das ca. 3,8 ha zu entwässernde Fläche der A 6 angeschlossen waren. Das rechteckige Regenrückhaltebecken hatte maximal 412 m² Oberfläche und 500 m³ Inhalt. Der über eine Drosselstrecke nachgeschaltete Leichtstoffabscheider mit Schlammfang wurde mit maximal 50 l/s beschickt, was einer Oberflächenbeschickung des Schlammfanges von 18 m/h entspricht.

Die Zu- und Abläufe der Leichtstoffabscheider wurden an der A 81 von Februar bis September 1978 und an der A 6 von Februar bis Juli 1979 kontinuierlich untersucht, so daß folgender Vergleich der durchschnittlich erzielten Rückhalte- bzw. Reinigungswirkungsgrade möglich ist (s. Tab. 5-3):

$$\eta = \frac{C_{Zulau\!f} - C_{Ab\!lauf}}{C_{Zulau\!f}} \quad (\text{Gl. 5-1})$$

mit
η Reinigungswirkungsgrad
C Stoffkonzentration

Bei der Bewertung des Wirkungsgrades beider Anlagen ist nach KRAUTH & KLEIN (1982) zu beachten, daß diese in erster Linie zur Abscheidung und Rückhaltung größerer Mengen Mineralöls (= außergewöhnliche Einwirkungen; Anm. d. Verf.) bemessen und konstruiert wurden. Der erheblich größere Rückhalte- und Reinigungswirkungsgrad η für sedimentier- und abscheidbare straßenspezifische Stoffe und Parameter des Abscheiders an der A 81 ist darauf zurückzuführen, daß zusätzlich die Abscheidung von Sinkstoffen (= v.a. ständige Einwirkungen; Anm. d. Verf.) berücksichtigt wurde.

Tabelle 5-3: Vergleich der durchschnittlichen Rückhalte- und Reinigungswirkungsgrade η der unterschiedlich konstruierten Leichtstoffabscheider an der A 81 und an der A 6 für sedimentier- und abscheidbare straßenspezifische Stoffe und Parameter (Daten aus KRAUTH & KLEIN 1982)

Stoff bzw. Parameter	Rückhalte- und Reinigungswirkungsgrade η der unterschiedlich konstruierten kombinierten Absetzbecken mit Leichtstoffabscheider	
	A 81	A 6
Abfiltrierbare Stoffe	85 %	50 %
CSB	63 %	26 %
Vergaserkraftstoff	80 %	29 %
Mineralöl	80 %	29 %
Cadmium	63 %	28 %
Chrom	66 %	33 %
Kupfer	73 %	26 %
Eisen	74 %	45 %
Blei	79 %	39 %
Zink	50 %	37 %

Aus den genannten Untersuchungsergebnissen werden folgende Anforderungen an die Wirksamkeit kombinierter Absetzbecken und Leichtstoffabscheider abgeleitet:

Die ausreichende hydraulische Leistungsfähigkeit ist durch eine den standortspezifischen Randbedingungen (vor allem Regenspende und zu entwässernde Fläche) entsprechende Dimensionierung der Beckenoberfläche (Oberflächenbeschickung q in m/h) sicherzustellen.

Die Sperrwirkung gegenüber straßenspezifischen wassergefährdenden Stoffen ist durch eine dichte Bauweise bzw. bei Erdbecken durch eine Untergrundabdichtung sicherzustellen (Wirksamkeit und Zuverlässigkeit von Untergrundabdichtungen siehe 5.4.3).

Ein ausreichendes **Rückhaltevermögen** für partikelförmige, sedimentierbare, straßenspezifische wassergefährdende Stoffe aus ständigen Einwirkungen bedingt eine gegenüber der vertikalen Absetzdauer langsamere horizontale Durchströmung des Beckens. Aus der Literatur können diesbezüglich folgende Angaben entnommen werden:

- Im Merkblatt Nr. 42.1-12 "Beseitigung des Niederschlagswassers von befestigten Verkehrsflächen aus der Sicht des Gewässerschutzes" des Landes Bayern (BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT 1990) wird für die Sedimentation straßenspezifischer Partikel in Absetzanlagen eine Sinkgeschwindigkeit $v_s = 5 \text{ mm/s}$ für 0,01 mm Korndurchmesser genannt, was einer Oberflächenbeschickung von $q_k = 18 \text{ m/h}$ entspricht,

Da nach Harrison & Wilson (1985, zit. in REINIRKENS 1992) die straßenspezifischen Schwermetalle in nennenswertem Umfang auch in Partikelgrößen unter 0,01 mm Körndurchmesser vorliegen, erscheint die Oberflächenbeschickung $q_A = 18 \text{ m/h}$ für eine ausreichende Absetzwirkung zu hoch.

- In den RiStWag (1982) ist für die Bemessung von Leichtstoffabscheidern, die zugleich als Absetzbecken genutzt werden können, in Abhängigkeit von der Steiggeschwindigkeit von Leichtflüssigkeiten eine Oberflächenbeschickung $q = 9 \text{ m/h}$ vorgesehen. In einem für maximal $q = 9 \text{ m/h}$ Oberflächenbeschickung bemessenen Leichtstoffabscheider mit Absetzbecken an der A 81 (KRAUTH & KLEIN 1982, s. Tab. 5-3) wurden hohe Rückhalte- und Reinigungswirkungsgrade zwischen 50 und 85 % der straßenspezifischen Stoffe im Fahrbahnabfluß erzielt.
- In ATV (1995) wird für die Bemessung von Absetzbecken als Naßbecken, die einem Versickerungsbecken vorgeschaltet sind, eine Oberflächenbeschickung von $q = 10 \text{ m/h}$ angeraten.

Die straßenspezifischen Tausalze (vorübergehende Einwirkungen) können in Absetzbecken und/oder Leichtstoffabscheidern nicht zurückgehalten, gereinigt oder umgewandelt werden, da sie im Fahrbahnabfluß gelöst vorliegen (vgl. Abschn. 4.2.2 und 4.2.3). Als ausreichendes Volumen des Auffangraumes für wassergefährdende Stoffe aus Unfällen (außergewöhnliche Einwirkungen) wird im Hinblick auf den 95 %-Perzentilwert der ausgelaufenen Volumina von $9,7 \text{ m}^3$ (vgl. Abschn. 4.3.4.2) ein Bemessungsvolumen von 10 m^3 vorgeschlagen.

Die ausreichende Abscheide-Wirksamkeit von Leichtstoffabscheidern (ständige und außergewöhnliche Einwirkungen) ist durch eine den standortspezifischen Randbedingungen entsprechende Bemessung sicherzustellen: Oberfläche des Abscheideraumes aus dem Verhältnis aus Zuflußmenge und Steiggeschwindigkeit der Leichtflüssigkeit. In den RiStWag (1982) ist für die Bemessung von Leichtstoffabscheidern eine Steiggeschwindigkeit der Leichtflüssigkeiten von $v_s = 9 \text{ m/h}$ angegeben.

5.4.2.7 Versickerungsanlagen

Anlagen zur Versickerung von Niederschlagsabflüssen lassen sich prinzipiell in *dezentral* oder *zentral* unterscheiden. Ein weiteres Kriterium ist die Speicherfähigkeit, d.h. die Fähigkeit, Niederschlagsabflüsse bis zur allmählichen Versickerung zwischenzuspeichern. Die Flächenversickerung hat keine, Mulden, Rigolen oder kiesgefüllte Schächte haben eine geringe und Becken haben eine hohe Speicherfähigkeit (ATV 1995).

Dezentrale Versickerung des Fahrbahnabflusses:

Die breitflächige ungebundelte Versickerung des auf Straßenoberflächen anfallenden Niederschlagswassers über bewachsene Böschungen, Mulden und Flächen ist als *dezentrale* Versickerungsmaßnahme einzustufen.

Sofern die Rohr-, Rigolen- und Schachtversickerung ausgeschlossen werden, kann mit den genannten Versickerungsanlagen ein hohes Rückhalte- und Reinigungsvermögen (v.a. Filtration partikulärer Stoffe, s. Abschn. 4.1.1.1) für straßenspezifische Stoffe aus ständigen Einwirkungen im Fahrbahnabfluß erzielt werden. Der Wirkungsgrad kann anhand folgender Untersuchungen abgeschätzt werden:

- Von UNGER & PRINZ (1992) in unterschiedlicher Entfernung vom Fahrbahnrand der BAB A 5 untersuchte Bodenprofile (s. Abschn. 4.1.3.2)
- Untersuchungen des oberflächennahen Sickerwassers im Einflußbereich von Straßen (REINIRKENS 1992, CICHOS 1992, TEGETHOF & CICHOS 1994; s. Abschn. 4.1.3.3)
- Diverse Untersuchungen zur Mobilität im Boden filtrierter und/oder sorbierter Schwermetalle (s. Abschn. 4.1.3.5)

Aufgrund der hohen Mobilität der tausalzspezifischen Chloride im Boden (s. Abschn. 4.2.3) ist ein Rückhalte- und Reinigungsvermögen in Bezug auf vorübergehende Einwirkungen nicht gegeben. Sofern die in Abhängigkeit von den hydrogeologischen Randbedingungen (v.a. Mächtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Grundwasserleiters) resultierenden straßenspezifischen Chloridgehalte im Grundwasser nicht akzeptiert werden können, muß die dezentrale Versickerung des Fahrbahnabflusses, z.B. durch die Ableitung in eine Vorflut, verhindert werden.

Die bei Unfällen (außergewöhnliche Einwirkungen) in erster Linie emittierten Mineralölprodukte (s. Abschn. 4.3.4.3) können bei dezentraler Versickerung über Böschungen und Mulden nur bei geringer bis sehr geringer Durchlässigkeit ($k \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s) der oberflächennahen Bodenschichten der Grundwasserüberdeckung in für die Wiedergewinnung ausreichendem Maße zurückgehalten werden. Da diese Durchlässigkeitsanforderung einer ausreichenden Versickerungsleistung widerspricht, muß im Einzelfall ggf. das vom Lastfall außergewöhnliche Einwirkungen ausgehende Risiko auf ein akzeptables Maß begrenzt werden.

Zentrale Versickerung des Fahrbahnabflusses:

Die Bündelung des auf Straßenoberflächen anfallenden Niederschlagswassers und anschließende Versickerung über Sickerbecken und Sickerflächen ist als zentrale Versickerungsmaßnahme einzustufen. Der Quotient aus abflußwirksamer Fläche A_{red} , d.h. befestigte Straßenfläche und versickerungswirksamer Fläche A_s (= hydraulische Beschickung $A_{\text{red}} : A_s$) ist hierbei ein Maßstab für den Grad der Bündelung der Niederschlagsabflüsse. Nach ATV (1995) ist die hydraulische Beschickung von Versickerungsbecken i.d.R. größer als 15 : 1, so daß es sich um hydraulisch hoch belastete Anlagen handelt, die für eine ausreichende Versickerungsleistung Durchlässigkeiten von $k_f > 1 \cdot 10^{-5}$ m/s erfordern. Im Einzelfall ist die Fläche des Sickerbeckens oder der Sickerfläche in Abhängigkeit vom Niederschlagsverlauf, der hydraulischen Beschickung und der Durchlässigkeit des Untergrundes zu bemessen, wie beispielsweise in ATV Arbeitsblatt A 138 (1990) und ergänzend in ATV (1995) erläutert.

Die für eine ausreichende Versickerungsleistung erforderliche, möglichst hohe Durchlässigkeit der Bodenschichten unterhalb von Sickerbecken widerspricht prinzipiell einem hohen Rückhalte- und Reinigungsvermögen für straßenspezifische wassergefährdende Stoffe aus ständigen und außergewöhnlichen Einwirkungen, so daß ggf. Absetzbecken (ständige Einwirkungen) mit Leichtstoffabscheidern (außergewöhnliche Einwirkungen) vor zentralen Versickerungsanlagen anzuordnen sind.

Aufgrund der hohen Mobilität der tausalzspezifischen Chloride im Boden (s. Abschn. 4.2.3) ist ein Rückhalte- und Reinigungsvermögen in Bezug auf vorübergehende Einwirkungen auch bei zentralen Versickerungsanlagen nicht gegeben. Sofern die in Abhängigkeit von den hydrogeologischen Randbedingungen (v.a. Mächtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Grundwasserleiters) resultierenden straßenspezifischen Chloridgehalte im Grundwasser nicht akzeptiert werden können, ist die zentrale Versickerung von Fahrbahnabflüssen nicht tolerierbar.

Im Hinblick auf die Zuverlässigkeit ist bei zentralen Versickerungsanlagen vor allem eine abnehmende Versickerungsleistung durch Verschlammung der Sohle infolge Sedimentation von Feststoffen zu nennen. Durch ein vorgeschaltetes Absetzbecken kann dies verhindert oder zumindest vermindert werden.

5.4.3 Untergrundabdichtungen

5.4.3.1 Allgemeines

Für Dichtungssysteme zum Grundwasserschutz im Einflußbereich von Straßen kommen derzeit folgende Dichtungselemente zum Einsatz:

- Mineralische Abdichtung
- Kunststoffdichtungsbahnen (KDB)
- Bentonitdichtungsmatten bzw. geosynthetische Tondichtungen (GTD)
- Asphaltbetondichtungen

Dichtungssysteme zum Grundwasserschutz im Einflußbereich von Straßen stehen je nach Anordnung des Dichtungssystems in engem Wirkungszusammenhang mit folgenden Straßenentwässerungseinrichtungen:

Tabelle 5-4: Wirkungszusammenhang zwischen Untergrundabdichtungen und Straßen-Entwässerungseinrichtungen

Anordnung des Dichtungssystems	Betroffene Straßenentwässerungseinrichtung
Unterhalb der Fahrbahn	Planumsentwässerung und Anschluß an Einrichtungen zur Straßenlängsentwässerung (z.B. Teilsickerrohre)
Im Straßenrandbereich	Abdichtung von Einrichtungen zur Straßenlängsentwässerung und/oder zusätzliches Sicherheitselement für konvektionsdichte Einrichtungen zur Straßenlängsentwässerung
Unterhalb von Anlagen zur Behandlung des Fahrbahnabflusses	z.B. Absetzbecken mit Leichtstoffabscheider als Erdbecken

Die Dichtungselemente stehen in engem Zusammenhang mit den anderen Komponenten des Dichtungssystems:

- Untergrundplanum (Auflager)
- Ggf. angrenzende mineralische oder geotextile Filter- und/oder Dränageschichten
- Überschüttmaterial

Bei der Planung und Ausführung der anderen Komponenten des Dichtungssystems sind neben der grundsätzlichen Wirksamkeit und Eignung des gewählten Dichtungselementes die

Anforderungen an die Wirksamkeit und die Zuverlässigkeit des gesamten Dichtungssystems zu beachten.

5.4.3.2 Anforderungen an die Wirksamkeit von Dichtungssystemen zum Grundwasserschutz an Straßen

Auf der Grundlage der Literatur- und Datenauswertungen zu ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Einwirkungen (s. Abschnitt 4) wurden folgende grundsätzliche Anforderungen an die Wirksamkeit und die Zuverlässigkeit von Dichtungssystemen zum Grundwasserschutz im Einflußbereich von Straßen erarbeitet:

Wirksamkeit:

• **Durchlässigkeitsanforderung:**

Für eine ausreichende Sperrwirkung gegenüber straßenspezifischen wassergefährdenden Stoffen (konvektionsdicht) wird vorgeschlagen, von den material- und bauartspezifischen Eigenschaften des jeweiligen Dichtungssystems abhängige Durchlässigkeitsanforderungen festzulegen, die im Einzelfall unter in-situ-Randbedingungen zu untersuchen wären:

- a) bei ständigen Einwirkungen als Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s] - bzw. bei dünnlagigen Dichtungselementen als Permittivität ψ [1/s] - für die langfristige Durchströmung mit Wasser
- b) bei vorübergehenden Einwirkungen als Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s] - bzw. bei dünnlagigen Dichtungselementen als Permittivität ψ [1/s] - für die langfristige Durchströmung mit Tausalzlösungen
- c) bei außergewöhnlichen Einwirkungen als Durchlässigkeitsbeiwert k [m/s] - bzw. bei dünnlagigen Dichtungselementen als Permittivität ψ [1/s] - für die auf 48 h zeitlich begrenzte Durchströmung mit den Prüfflüssigkeiten 1, 2 und 3 gemäß BPG Kunststoffbahnen (1984)*:
 - Ottokraftstoffe nach DIN 51600
 - Flugkraftstoffe
 - Heizöl EL und Dieselmotorenkraftstoff nach DIN 51601 und DIN 51603 Teil 1

• **Homogenität:**

Im Hinblick auf die bei außergewöhnlichen Einwirkungen mögliche Emission großer Mengen von Ottokraftstoffen, die im Vergleich zu Wasser ein deutlich größeres Migrationspotential aufweisen, ist besonderes Augenmerk auf eine ungestörte, vollflächig möglichst homogene Ausbildung der Untergrundabdichtung zu legen, so daß für Kontrollprüfungen

* Aufgrund ihrer überwiegenden Emissionshäufigkeit von durchschnittlich 76,4 % (vgl. Abschnitt 4.3.4.3) wird vorgeschlagen, die Durchlässigkeitsanforderung bei außergewöhnlichen Einwirkungen auf Mineralölprodukte zu beschränken, in denen die hinsichtlich des Migrationspotentials maßgebenden Ottokraftstoffe enthalten sind.

der Durchlässigkeitsanforderung ein 95 %-Höchstquantil für den Durchlässigkeitsbeiwert festgelegt werden sollte.

• **Durchlässigkeit von Abschnittsgrenzen:**

Herstellungsbedingte Abschnittsgrenzen, wie Fügenähte und Überlappungen müssen ebenfalls die jeweiligen Durchlässigkeitsanforderungen erfüllen.

5.4.3.3 Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Dichtungssystemen zum Grundwasserschutz an Straßen

Um die Wirksamkeit einer Untergrundabdichtung zum Grundwasserschutz an Straßen während der gesamten Nutzungsdauer sicherstellen zu können, muß das Dichtungssystem ausreichend beständig sein gegenüber

- mechanischen Einwirkungen (M1..M7),
- chemischen Einwirkungen (C1, C2, C3),
- biologischen Einwirkungen (B1, B2, B3) und
- klimatischen Einwirkungen (K1, K2).

Die genannten Einwirkungen werden in die in Tabelle 5-5 (nächste Seite) erläuterten Lastfälle untergliedert.

Unabhängig von der Art des Dichtungselementes sind beim Entwurf von Dichtungssystemen im Hinblick auf die Zuverlässigkeit folgende Punkte zu berücksichtigen:

- Örtlich austretende Sicker-, Schicht- oder Stauwässer gefährden die Standsicherheit des Dichtungssystems durch einen Aufstau dieser Wasseraustritte hinter dem Dichtungssystem zusätzlich. Die Sicker-, Schicht- oder Stauwässer sollten daher durch ausreichend dimensionierte Flächendränagen aus Geotextilien oder mineralischen Materialien, die hinter bzw. unterhalb des Dichtungssystems anzuordnen und an eine Längsentwässerung anzuschließen sind, schadlos abgeleitet werden. Diese mögliche Gefährdung der Standsicherheit ist bei allen Arten von Dichtungselementen zu beachten, so daß hierauf im folgenden nicht nochmals eingegangen wird.
- Eine mögliche Beschädigung (Perforation) der Dichtungselemente durch von der Fahrbahn abkommende Fahrzeuge kann folgendermaßen verhindert werden:
- Anordnung ausreichend durchbruchssicherer passiver Schutzvorrichtungen am Fahrbahnrand oder
- besonders tiefe Anordnung des Dichtungselementes, wie in HEYER & SCHEUFELE (1989) angeraten.

Tabelle 5-5: Mechanische, chemische, biologische und klimatische Einwirkungen auf Untergrundabdichtungen zum Grundwasserschutz an Straßen

Nr*:	Erläuterung der Einwirkung	Auftretenshäufigkeit
M1	Einbaubeanspruchung - z.B. durch Überschüttung und Verdichtung	außergewöhnlich
M2	dynamische Belastung aus der Befahrung unbefestigter Baufahrstraßen	vorübergehend
M3	statische Belastung aus Eigengewicht des Straßenoberbaus und der Überschüttung / parkenden Fahrzeugen	ständig / vorübergehend
M4	dynamische Belastung aus Straßenbefahrung	ständig
M5	Befahrung durch abkommende Fahrzeuge	außergewöhnlich
M6	Standsicherheit von Böschungen	ständig
C1	ständige chemische Einwirkungen (Milieubedingungen im Boden, auswaschbare Bestandteile von Baustoffen, gelöste und partikuläre Stoffe aus Verkehrsemissionen)	ständig
C2	Tausalzstreuung	vorübergehend
C3	konzentrierte Stoffe bei Unfällen	außergewöhnlich
B1	Durchwurzelung	ständig
B2	Kleintierfäkalien	ständig
B3	mikrobieller Abbau	ständig
K1	Frost- / Tauwechsel	vorübergehend
K2	Trockenheit / Feuchte	ständig/vorübergehend

* Die hinsichtlich der Zuverlässigkeit zu berücksichtigenden Einwirkungen sind nach ihrer Art bezeichnet:
M... = mechanisch; C... = chemisch; B... = biologisch; K... = klimatisch

Der derzeitige Kenntnisstand zu den einzelnen Dichtungselementen ist nicht gleichwertig. Zur Zuverlässigkeit von mineralischen Abdichtungen, Kunststoffdichtungsbahnen und Asphaltbetondichtungen liegen bereits umfangreiche Untersuchungsergebnisse und langfristige baupraktische Erfahrungen aus verschiedenen Anwendungsgebieten vor. Hiervon abweichend ist der derzeitige Kenntnisstand zur Beurteilung der Beständigkeit des neuartigen Dichtungselements Bentonitdichtungsmatte (GTD) gegenüber den untersuchten straßenspezifischen Einwirkungen unzureichend, so daß hierzu weiterer Forschungsbedarf besteht.

In Anlage 1 ist eine umfangreiche Literatur- und Datenauswertung zum derzeitigen Kenntnisstand zur Beständigkeit (Zuverlässigkeit) der Dichtungselemente mineralische Abdichtungen, Kunststoffdichtungsbahnen, Bentonitdichtungsmatten und Asphaltbetondichtungen gegenüber den straßenspezifischen mechanischen Einwirkungen (M1..M7), chemischen Einwirkungen (C1, C2, C3), biologischen Einwirkungen (B1, B2, B3) und klimatischen Einwirkungen (K1, K2) enthalten.

5.4.3.4 Mineralische Abdichtungen

Für mineralische Abdichtungen zum Grundwasserschutz an Straßen in Wassergewinnungsgebieten ist in den RiStWag (1982) die Verwendung bindiger Erdstoffe vorgesehen, wobei hinsichtlich deren Eignung folgende Anforderungen gestellt werden:

- Korngröße $\leq 0,02$ mm: Anteil ≥ 15 m-%
- Korngröße $\leq 0,06$ mm: Anteil ≥ 20 m-%
- Ersatzweise gilt ein Durchlässigkeitsbeiwert $k \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s für den verdichteten Boden als ausreichend.

Nach HEYER & FLOSS (1994) sind die genannten Körnungskriterien häufig nicht zielführend, da beispielsweise schluffige Sande oder insbesondere intermittierend gestufte gemischtkörnige Böden stark durchlässig sein können, obgleich sie diese Kriterien einhalten, so daß der Durchlässigkeitsbeiwert das maßgebende Kriterium sein sollte. Hinsichtlich der genannten Durchlässigkeitsanforderung haben die Untersuchungen von HEYER (1989a,b) ergeben, daß in der Regel alle leicht, mittel und ausgeprägt plastischen Böden unter Einhaltung der derzeit gültigen Anforderung der RiStWag (1982) von $k \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s geeignet sind, wenn beachtet wird, daß der Boden entsprechend dem "nassen Ast" der Proctorkurve verdichtet wird, da die Durchlässigkeit auf der "trockenen Seite" der Proctorkurve aufgrund der dann andersartigen Bodenstruktur stark ansteigt. Die stark witterungs- und erosionsempfindlichen leichtplastischen Tone und Schluffe sollten nach FLOSS (1995) als Abdichtungsmaterial jedoch ausgeschlossen werden.

In Einzelfällen wären auch künstlich zusammengesetzte, durch Zugabe von Bentonit oder anderen Tonmehlen vergütete gemischtkörnige Böden als Dichtungsmaterial in Betracht zu ziehen, die durch die Wiederverwendung des örtlich anstehenden Aushubmaterials wirtschaftliche Vorteile böten. Weiterhin ist im Vergleich zu feinkörnigen plastischen Dichtungsmaterialien die Tragfähigkeit und die Standsicherheit im Böschungsbereich höher.

Anforderungen an die Wirksamkeit mineralischer Abdichtungen:

Für eine ausreichend gesicherte in-situ-Wirksamkeit der mineralischen Abdichtung werden folgende Durchlässigkeitsanforderungen mit allen in Abschnitt 5.4.3.2 genannten Prüfflüssigkeiten (Wasser, Tausalzlösung, Mineralölkohlenwasserstoffe) vorgeschlagen:

- Eignungsprüfung: $k \leq 1 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$
- Kontrollprüfungen
im Rahmen der Qualitätssicherung: $k \leq 5 \cdot 10^{-3} \text{ m/s}$ als 95 %-Höchstquantil

Die vollflächige Homogenität der mineralischen Abdichtung sollte im Rahmen der Qualitätssicherung auf der Baustelle sichergestellt werden. HEYER & FLOSS (1994) weisen darauf hin, daß die Ausführung mineralischer Abdichtungen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten einer umfassenden und auch als aufwendig zu bezeichnenden Eignungsprüfung und Qualitätssicherung bedarf. Im Rahmen der Eignungsprüfung sind neben den Versuchen zur Klassifizierung des vorgesehenen Materials, wie die Bestimmung der Korngrößenverteilung und der Bildsamkeitsgrenzen insbesondere die Durchlässigkeit, die Scher- und Verdichtungseigenschaften (Proctorversuch) zu untersuchen. Die Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen umfassen dann den Nachweis der Identität und Gleichmäßigkeit des Materials sowie die Bestimmung des Verdichtungsgrades und der Durchlässigkeitsbeiwerte. Der Mindestumfang dieser Prüfungen ergibt sich aus den ZTVE-StB 94 (1994), wobei jedoch der Umfang der Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen in Abhängigkeit von der im Einzelfall erforderlichen Risikominderung festgelegt werden sollte.

HEYER & SCHEUFELE (1989) empfehlen einen mehrlagigen - zumindest zweilagigen - Einbau und eine mehrlagige Verdichtung der mineralischen Abdichtung, um durchgehende Fehl- und Schwachstellen weitgehend auszuschließen. Hierbei ist durch eine versetzte Anordnung der Abschnittsgrenzen die Einhaltung der Durchlässigkeitsanforderungen auch in diesen Bereichen sicherzustellen, was bei einlagigem Einbau nicht ohne weiteres möglich wäre.

Beim Entwurf mineralischer Abdichtungen ist zu beachten, daß diese für die Ableitung von Sickerwasser stets ein ausreichendes Gefälle von mindestens 6 % (ZTVE-StB 94 1994) aufweisen sollten, da ansonsten nach HEYER & SCHEUFELE (1989) eine Aufweichung der Schichten stattfinden kann, was zur Ausbildung von Gleitflächen führen kann.

Bei den in der Regel für mineralische Abdichtungen verwendeten wenig tragfähigen plastischen Böden sind bei einer Anordnung unter der Fahrbahn oder anderen befestigten Bereichen Setzungsschäden zu befürchten, so daß die Anwendung dieser Dichtungsmaterialien auf nicht befestigte und nicht befahrene Bereiche, wie z.B. Böschungen, beschränkt werden sollte. In

Einzelfällen kann die Anordnung einer mineralische Abdichtung aus künstlich zusammengesetzten gemischtkörnigen Böden unterhalb der Fahrbahn in Betracht gezogen werden, sofern deren ausreichende Tragfähigkeit neben der generellen Wirksamkeit im Rahmen von Eignungsprüfungen nachgewiesen wird.

5.4.3.5 Kunststoffdichtungsbahnen

Kunststoffdichtungsbahnen (abgekürzt: KDB) sind aus Thermoplasten oder Elastomeren industriell gefertigte dünnlagige Dichtungselemente. In Abb. 5-3 sind die derzeit verfügbaren Roh- und Werkstoffe, deren Eigenschaften sowie die jeweiligen Fügeverfahren schematisch dargestellt.

Rohstoffe	Thermoplaste			Elastomere
	reine Fadenmoleküle			chemisch vernetzte Fadenmoleküle
	Homopolymerale	Polymere - Gemische	Copolymerale	
				weitausge vernetzt
Ableitbare ¹⁾ Eigenschaften	höherer E - Modul höhere Festigkeit höherer Permeationswiderstand höhere Spannungsdehnbarkeit geringere zul. Dehnung höhere Steifigkeit geringere Flexibilität	geringer E - Modul geringere Festigkeit geringer Permeationswiderstand geringere Spannungsdehnbarkeit höhere zul. Dehnung geringere Steifigkeit höhere Flexibilität		Nach verlaufende E - Modul - Kurve hohe zulässige Dehnungen hohe Flexibilität gute UV - und Alterungsbeständigkeit wegen der Vernetzung nicht plastifizierbar und somit auch nicht verschleißbar
Werkstoffe	zugeordnet zur Struktur: Polyethylen HD Polyethylen LD	Polymerisations- gemisch und Copolymere wie: PE -modifiziertes PE -ECCB -PCC -PVC -EVA -PE-VLD		EPDM CSM FKM BR NBR
Fügeverfahren	Schweißen/Kleben			Kleben/Vulkanisieren
	Warmgasschweißen Heizelementschweißen Extrusionsschweißen Diffusionskleben/ Quellschweißen Adhäsionskleben Heißkleben Vulkanisieren	X X X X X X X X X	X X X X X X X X X X	 X X X X X X X X

¹⁾bezogen auf Rohstofftypen für Dichtungsbahnen

Abb. 5-3: Überblick zu Roh- und Werkstoffen, deren Eigenschaften sowie den jeweiligen Fügeverfahren von Kunststoffdichtungsbahnen (aus DVWK-Merkblatt 225, 1992)

Aufgrund ihrer vollständigen Konvektionsdichtigkeit erfüllen alle Arten von Kunststoffdichtungsbahnen (KDB) die empfohlenen Durchlässigkeitsanforderungen an Dichtungssysteme zum Grundwasserschutz an Straßen. Für den Lastfall außergewöhnliche Einwirkungen ist hierbei die Beständigkeit gegenüber Mineralölkohlenwasserstoffen (Prüfflüssigkeiten 1-3 gem. BPG Kunststoffbahnen 1984) zu prüfen.

Tabelle 5-6: Anforderungen an Kunststoffdichtungsbahnen im Hinblick auf eine vollflächige Homogenität

Anforderung	Prüfung	Quelle
Oberflächenbeschaffenheit... geschlossene Oberfläche, frei von Rissen, Blasen und Poren, keine Beschädigungen	visuelle Prüfung gem. DIN 16726	DVWK-Merkblatt 225 (1992), BAM (1992)
Homogenität des Materials... frei von Poren, Lunkern, Fremdeinschlüssen	visuelle Prüfung gem. DIN 16726	DVWK-Merkblatt 225 (1992), BAM (1992)
Bahndicke... $\pm 5\%$ Abweichung des Mittelwertes vom Nennwert, -10% Abweichung des Minimalwertes vom Mittelwert	Messung gem. DIN 16726	DVWK-Merkblatt 225 (1992)
Kantengeradheit... ≤ 50 mm Abweichung auf 10 m Länge	Messung gem. DIN 16726	BAM (1992)
Planlage... ≤ 50 mm Abweichung von einer planen Unterlage	Messung gem. DIN 16726	BAM (1992)
Verhalten nach Warmlagerung... $\leq 2\%$ Maßänderung	Prüfung gem. DIN 16726	DVWK-Merkblatt 225 (1992)

Im Hinblick auf die vollflächige Homogenität werden die in Tabelle 5-6 genannten Anforderungen und Prüfungen der einschlägigen Richtlinien und Merkblätter empfohlen.

In Abhängigkeit von den material- und bauartspezifischen Randbedingungen werden zum Fügen der Kunststoffdichtungsbahnen Schweißverfahren, Klebeverfahren, Vulkanisation und mechanische Fügeverbindungen angewandt, die im DVWK-Merkblatt 225 (1992) erläutert sind. Im Hinblick auf die Einhaltung der Durchlässigkeitsanforderungen werden die Dichtigkeits- und Festigkeitsanforderungen an die Fügstellen gemäß DVWK-Merkblatt 225 (1992) sowie die dort erläuterten Prüftechniken empfohlen.

5.4.3.6 Bentonitdichtungsmatten

Bentonitdichtungsmatten oder geosynthetische Ton-Dichtungsbahnen (abgekürzt: GTD) sind werkstoffgefertigte dünnlagige Verbund-Dichtungselemente aus Bentonit und Geotextilien bzw. Geokunststoffen, die derzeit in folgenden Aufbauten erhältlich sind (s. Abb. 5-4):

- Bentonit adhäsiv zwischen oberer und unterer Geotextillage gebunden (1)
- Bentonit zwischen obere und untere Geotextillage eingenäht (2)
- Bentonit zwischen miteinander vernadelter oberer und unterer Geotextillage (3)
- Bentonit direkt auf einer Kunststoffbahn adhäsiv gebunden (Sonderbauweise) (4)

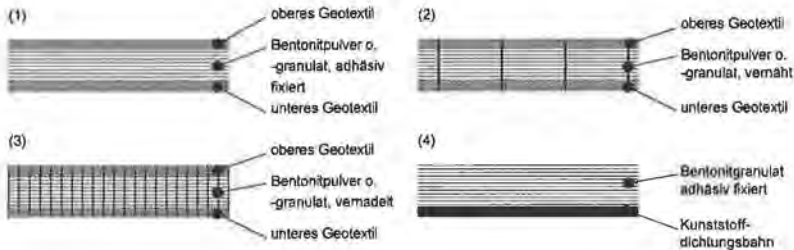


Abb. 5-4: Bauweisen von Bentonitdichtungsmatten bzw. Geokunststoff-Ton-Dichtungsbahnen (GTD)

Als Bentonit wird Natriumbentonit oder natriumaktivierter Calziumbentonit mit Flächengewichten zwischen 3000 g/m^2 und 5000 g/m^2 (bei ca. 10 % nat. Wassergehalt) verwendet. Als Geotextilien bzw. Geokunststoffe kommen folgende Materialien zum Einsatz:

- Vliesstoffe aus Polypropylen oder Polyäthylen (PEHD) mit Flächengewichten zwischen 200 g/m^2 und 500 g/m^2
- Verbundstoffe aus Vlies und Gewebe der o.g. Materialien mit Flächengewichten zwischen 400 g/m^2 und 800 g/m^2
- Gewebe der o.g. Materialien
- Kunststoffdichtungsbahnen aus Polyäthylen hoher Dichte (PEHD) mit Dicken zwischen 0,5 mm und 2 mm (Sonderbauweise)

Die Geotextilien bzw. Geokunststoffe dienen in erster Linie als Trägermaterial zur Fixierung des im trockenen Zustand pulverförmigen oder granulierten Bentonits. Bei einigen Produkten sind die obere und untere Geotextillage zur Erzielung einer ausreichenden Scherfestigkeit innerhalb der GTD miteinander vernadelt oder vernäht. Weiterhin sollen die Geotextillagen einen Verlust von Bentonit durch Erosion verhindern.

Die verwendeten Bentonite bestehen zum überwiegenden Teil aus dem quellfähigen Tonmineral Montmorillonit, das ein hohes Wasseraufnahmevermögen (bis zu 700 Gew.-%) aufweist, so daß bei Feuchtigkeit Zutritt Wassermoleküle um die Kationen des Tonminerals gelagert werden, wobei dieses stark quillt. Die insgesamt aufnehmbare Wassermenge bzw. der Sättigungsgrad hängt von der Zusammensetzung des Bentonites, dem Sättigungsdruck und der Sättigungsdauer ab. Das Wasseraufnahmevermögen der Natriumbentonite nach Enslin-Neff ist mit 400-700 Gew.-% deutlich größer als das der Calciumbentonite mit 100-300 Gew.-% (MADSEN & NÜESCH 1994). Daher werden für GTD nur Natriumbentonite oder natriumaktivierte Bentonite verwendet. Gequollener, wassergesättigter Bentonit ist gering wasserdurchlässig. Untersuchungen eines GTD-Produktes am Prüfamt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München haben Permittivitäten ψ von maximal $1 \cdot 10^{-8}$ 1/s, minimal $1 \cdot 10^{-10}$ 1/s und im Mittel $2,5 \cdot 10^{-9}$ 1/s ergeben, was unter Annahme einer für die verschiedenen Produkte üblichen Dicke von ca. 10 mm Durchlässigkeitsbeiwerten von $1 \cdot 10^{-10}$ m/s bis $1 \cdot 10^{-12}$ m/s entspricht (HEYER 1994, 1995). Aufgrund der Dünnlagigkeit der Bentonitdichtungsmatten (GTD) werden für die Abdichtung von Straßen gegenüber mineralischen Abdichtungen strengere Durchlässigkeitsanforderungen mit allen in Abschnitt 5.4.3.2 genannten Prüf Flüssigkeiten (Wasser, Tausalzlösung, Mineralölkohlenwasserstoffe) vorgeschlagen:

- Eignungsprüfung: Permittivität $\psi \leq 2,5 \cdot 10^{-9}$ 1/s
- 95 %-Höchstquantil bei Kontrollprüfungen
im Rahmen der Qualitätssicherung: Permittivität $\psi \leq 5 \cdot 10^{-9}$ 1/s

Neben der Durchlässigkeitsanforderung als 95 %-Höchstquantil bei der Qualitätssicherung kann die vollflächige Homogenität der Dichtungswirksamkeit zusätzlich durch eine mit geringem Aufwand auf der Baustelle durchführbare Bestimmung der Flächenmasse [g/m^2] der

trockenen GTD sichergestellt werden, die ein noch festzulegendes 5 %-Mindestquantil nicht unterschreiten sollte. Um hierbei Verfälschungen des Prüfergebnisses durch witterungs- und lagerungsbedingte Wassergehaltsschwankungen des Bentonits ausschließen zu können, sollte der jeweilige natürlich Wassergehalt der trockenen GTD bei der Berechnung der Flächenmasse abgezogen werden.

Die Einhaltung der Durchlässigkeitsanforderung im Überlappungsbereich ist durch Eignungsprüfungen der jeweiligen produktspezifischen Überlappungskonstruktionen zu gewährleisten. Beim Entwurf und der Ausführung von Abdichtungsmaßnahmen mit GTD ist hierbei zu beachten, daß die Überlappungen in Entwässerungsrichtung stets "dachziegelartig" auszuführen sind, um eine frontale, direkte Anströmung der Überlappungsfuge zu verhindern.

Im Hinblick auf die Wirksamkeit der Abdichtung und die Qualitätssicherung sollte bereits beim Entwurf der Abdichtungsmaßnahme ein detaillierter Verlegeplan angefertigt werden, wobei folgende bauartspezifische Besonderheiten zu beachten sind:

- Verlegung in Fallrichtung
- Überlappungen in Entwässerungsrichtung stets "dachziegelartig"
- Einbindegraben in der Böschungskrone
- keine Überlappungen in Hoch- oder Tiefpunkten
- keine 4-fachen Überlappungen (Kreuzstöße)
- Einhaltung der zur Ableitung von Sickerwasser erforderlichen Querneigung

Detailprobleme, wie z.B. Anschlüsse an Bauwerke oder Durchdringungen, sollten bereits in der Planungsphase geklärt werden. Für größere Abdichtungsmaßnahmen mit GTD wird grundsätzlich angeraten, Probefelder anzulegen, um eine fachgerechte Ausführung durch den Auftragnehmer zu gewährleisten, die Eignung der einzelnen Elemente des Dichtungssystems (GTD, Auflager- und Überschüttmaterialien, Entwässerungseinrichtungen, ...) zu prüfen und erforderlichenfalls Untersuchungen spezieller Fragestellungen vornehmen zu können (HEYER et al. 1995).

5.4.3.7 Asphaltbetondichtungen

In größerem Umfang wurde Asphaltbeton zur Abdichtung von Straßen in Wassergewinnungsgebieten an der A 7 im Abschnitt Heidenheim-Westhausen verwendet, worüber in BADER (1986) berichtet wird.

Für die Herstellung von Asphaltbetondichtungen im Bereich von Straßen sind gemäß ZTVE-StB 94 (1994) die *"Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau"* (EAAW 83, 1983) und das *"Merkblatt Asphalt dichtungen für Talsperren und Speicherbecken"* des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) zu beachten, in denen die Baustoffe und Bauweisen ausführlich erläutert sind.

Für die Anwendung von Asphaltbetondichtungen im Deponiebau wird derzeit vom Deutschen Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK) ein Merkblatt erarbeitet, das bereits als Gelbdruck vorliegt (DVWK 1995). Ebenfalls für den Deponiebau sind in KLUGE (1994) und in SCHUHBAUER (1994) Hinweise für den Entwurf, die Eignungsprüfung, die Herstellung und die Qualitätssicherung von Asphaltbetondichtungen enthalten. Unter Berücksichtigung der in Abschnitt 1.2, Tab. 1-1 genannten Unterschiede zum Deponiebau können diese Erkenntnisse auf Straßen übertragen werden.

Bei einem Hohlraumgehalt der eingebauten Asphaltbetondichtung von ≤ 3 Vol.-% ist diese als konvektionsdicht anzusehen (DVWK 1995, HAAS 1995a, KLUGE 1994, SCHELLENBERG 1995) und kann selbst bei extrem hohen hydraulischen Gradienten von bis zu $i = 1000$ und einem Druck von bis zu 2 MN/m^2 nicht durchströmt werden (Schönian 1978 - zit. in ARAND et al. 1992). Nach HAAS (1995a) setzt ab einem Hohlraumgehalt von ca. 5 Vol.-% eine Durchströmung ein, die jedoch, selbst wenn kein Bindemittel mehr vorhanden wäre, maximal die Durchlässigkeit des Mischgutes in der eingebauten Dichte erreichen kann, das in der Regel einen Durchlässigkeitsbeiwert von etwa $k = 1 \cdot 10^{-9} \text{ m/s}$ aufweist.

Nach DVWK (1995) können kohlenwasserstoffhaltige Flüssigkeiten ein wenige Millimeter tiefes Anlösen der Asphaltbetonoberfläche bewirken, das jedoch unberücksichtigt bleiben kann, da die Asphaltbetondichtungen allein aus statischen sowie einbautechnischen Gründen erheblich dicker ausgeführt werden. Bei der Untersuchung von Beständigkeit und Dichtigkeit

von Asphaltbetondichtungen mit durchschnittlich ca. 2 Vol.-% Hohlraumgehalt gegenüber Mineralölprodukten mit dem hinsichtlich des Lösevermögens maßgebenden Superbenzin kamen SPRINGER et al. (1991) zu folgenden Ergebnissen:

Tabelle 5-7: Ergebnisse der Untersuchungen von SPRINGER et al. (1991) zur Anlösung von Asphaltbetondichtungen durch Superbenzin

Versuchsdauer		Druckhöhe	maximale Anlösetiefe
Stunden	Tage	mWS (Meter Wassersäule)	mm
96	4	~ 0,7	10-11
96	4	~ 1,4	11-12
192	8	~ 0,7	14
192	8	~ 1,4	15
1008*	42	10	25

* Als Kugelkalotte mit 3 cm Absenkung auf 30 cm Durchmesser verformtes Probestück zur Simulation von Setzungsmulden

Zusammenfassend kann eine ausreichende Sperrwirkung gegenüber straßenspezifischen Stoffen aus ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Stoffen gefolgert werden, sofern die Dichtung - v.a. hinsichtlich des Hohlraumgehaltes - sachgerecht eingebaut ist.

Im Hinblick auf eine möglichst vollflächig homogene Ausführung der Asphaltbetonabdichtung ist besonderes Augenmerk auf die Qualitätssicherung auf der Baustelle zu legen, wozu auf DVWK (1995) und EAAW 83 (1983) verwiesen wird.

Um eine erhöhte Durchlässigkeit im Bereich von Abschnittsgrenzen zu vermeiden, sollten die Asphaltbetondichtungen - wie in DVWK (1995) angeraten - in zwei Lagen mit jeweils mindestens 5 cm Schichtdicke und versetzten Nähten ausgeführt werden.

5.4.3.8 Hinweise für die Auswahl von Dichtungselementen

Für die Anwendung zum Grundwasserschutz an Straßen sind folgende besondere Randbedingungen der Untergrundabdichtungen zu beachten:

- Die Dichtungssysteme sind ausschließlich oberflächennah angeordnet und nicht planmäßig eingestaut (geringe hydraulische Gradienten)

- Ständige und vorübergehende chemische Einwirkungen fallen nur in sehr geringen Konzentrationen an (i.d.R. unterhalb der Grenzwerte der Trinkwasserverordnung)
- Thermische Einwirkungen ergeben sich nur aus dem natürlichen Temperaturverlauf des umgebenden Bodens
- Konzentrierte Stoffe fallen nur als außergewöhnliche Einwirkung an; es sind die maßgebenden Mineralölkohlenwasserstoffe zu untersuchen

Bei der Auswahl eines Dichtungselementes im Einzelfall sind weiterhin folgende Kriterien zu berücksichtigen:

- erforderliche Risikominderung
- örtliche Randbedingungen in Verbindung mit den bauartspezifischen Eigenschaften der einzelnen Dichtungselemente
- Wechselwirkungen der Dichtungselemente mit anderen bautechnischen Schutzmaßnahmen
- Kenntnisstand zur Wirksamkeit und Zuverlässigkeit der einzelnen Dichtungselemente

Die Auswahl von Dichtungselementen und der Entwurf von Dichtungssystemen sollte zunächst in Abhängigkeit vom erforderlichen Grad der Risikominderung geschehen. So kann einerseits bei einem geringen Grad der erforderlichen Risikominderung ggf. bereits die Abdichtung der Entwässerungsmulde mit einem dünnlagigen Dichtungselement ausreichen, andererseits muß bei einem sehr hohen Grad der erforderlichen Risikominderung möglicherweise eine weitreichende Flächenabdichtung als Kombination mehrerer der untersuchten Dichtungselemente ausgeführt werden.

Die örtlichen Randbedingungen in Verbindung mit den bauartspezifischen Eigenschaften der einzelnen Dichtungselemente haben einen erheblichen Einfluß auf die Eignung der Dichtungselemente und die Ausführbarkeit von Dichtungssystemen. Zur Veranschaulichung des sehr breiten Spektrums der im Einzelfall möglichen örtlichen Randbedingungen seien exemplarisch folgende Fälle genannt: Bei grobkörniger Grundwasserüberdeckung und tiefem Grundwasserstand wären Kunststoffdichtungsbahnen oder Asphaltbetondichtungen wegen einer verstärkten Austrocknungsgefahr den mineralischen Abdichtungen oder den Bentonitdichtungsmatten vorzuziehen. Andererseits wären die mineralische Abdichtung und die Bentonitdichtungsmatte bei einer kapillaren Verbindung zum Grundwasserleiter nicht oder nur geringfügig austrocknungsgefährdet. Bei der Ausführung von Asphaltbetondichtungen sind hohe Anforderungen an die Tragfähigkeit des Untergrundes bzw. des Auflagers zu

stellen. Weiterhin bereiten wechselhafte Querschnittstopographien in Straßenlängsrichtung große Schwierigkeiten bei der Ausführung von Asphaltbetondichtungen. Bei gut schützenden, jedoch wechselhaften Untergrundverhältnissen sind ggf. nur vereinzelt kleine Flächen abzudichten, wozu sich die flexibel handhabbare Bentonitdichtungsmatte besonders eignet. An Steilböschungen im Gebirge sind alle Arten von Flächenabdichtungen im Straßenrandbereich wegen der schwierigen bautechnischen Ausführung und ggf. aufgrund von Standsicherheitsproblemen kritisch zu sehen, so daß ein konvektionsdichter Fahrbelag in Verbindung mit Betongleitwänden und einem dichten Entwässerungssystem eher vorzuziehen wäre.

Weiterhin sind vielfältige gegenseitige Wechselwirkungen der Dichtungselemente mit anderen bautechnischen Schutzmaßnahmen zu beachten. So können oberflächennah angeordnete Dichtungselemente bei der üblichen Verankerung von Distanzschutzplanken von diesen perforiert werden, so daß entweder eine besondere Verankerungskonstruktion (Fundamentbalken) oder eine tiefere Anordnung der Dichtungselemente erforderlich werden. Weiterhin bieten Erdwälle durch eine mögliche tiefe Einbindung der Dichtungselemente einen verstärkten Schutz gegenüber allen Arten von Einwirkungen. Eine konvektionsdicht ausgeführte Fahrbahnoberfläche kann an Betongleitwände und Entwässerungseinrichtungen angeschlossen werden, wodurch der Landschaftsverbrauch minimiert werden könnte. Entwässerungsmulden und -gräben können in Verbindung mit Dichtungselementen konvektionsdicht ausgeführt werden. Unterhalb von dichten Rohrleitungen in Tieflage angeordnete Dichtungselemente bieten eine zusätzliche Sicherheit für das Entwässerungssystem (Redundanz). Durchdringungen der Dichtungselemente von Entwässerungsschächten erfordern besondere Verbindungskonstruktionen, wie beispielsweise integrierte Kunststoff-Manschetten, die mit Kunststoffdichtungsbahnen verschweißt werden können. Derartige Wechselwirkungen sollten bereits beim Entwurf eines Straßenbauprojektes besonders beachtet werden, um konkurrierende Wechselwirkungen ausschließen und komplementäre (ergänzende) Wechselwirkungen nutzen zu können.

Der jeweilige Kenntnisstand muß eine vollständige und zutreffende Beurteilung der Wirksamkeit und der Zuverlässigkeit der verfügbaren Dichtungselemente unter den standortspezifischen Randbedingungen im Einzelfall erlauben. Für spezielle projektspezifische Fragestellungen bietet sich die Anlage eines Probefeldes oder, soweit möglich, eine Simulation im Labor an.

Bei der projektbezogenen Auswahl eines der verschiedenen Dichtungselemente sind die in Abb. 5-5 zusammengestellten Kriterien zu bewerten. Neben den Hauptkriterien Wirksamkeit und Zuverlässigkeit sind hierbei die Nebenkriterien Wirtschaftlichkeit und sonstige Kriterien in Abhängigkeit von den standortspezifischen Randbedingungen, wie beispielsweise als Dichtungsmaterial geeigneter Aushub, zu berücksichtigen.

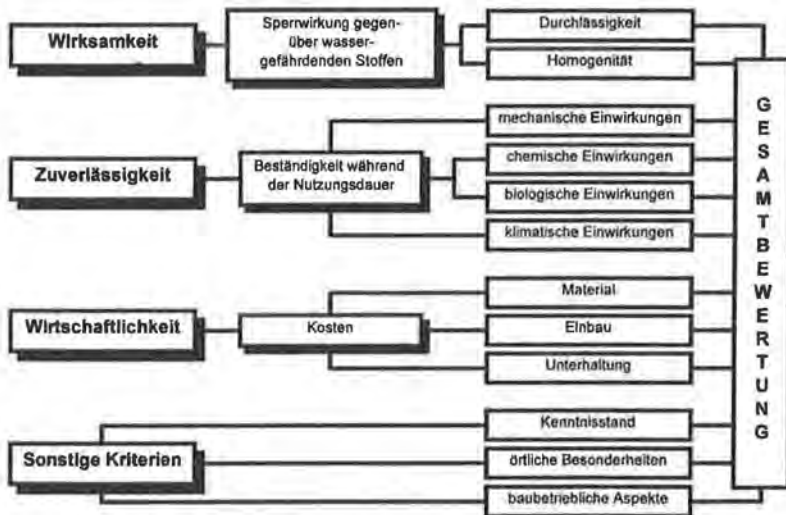


Abb. 5-5: Kriterien zur Bewertung von Dichtungselementen

Zusammenfassend werden folgende Schlüsse gezogen:

- Ein allgemeiner Vergleich der Wirksamkeit und der Zuverlässigkeit der Dichtungselemente ist wegen der vielfältigen Randbedingungen im Einzelfall nicht möglich.
- Von detaillierten Festlegungen bezüglich der Auswahl von Dichtungselementen und der Ausführung von Abdichtungssystemen in Richtlinien und Regelwerken wird abgeraten.
- Es wird jedoch angeraten, Hinweise für die Ausführung von Dichtungssystemen an Straßen unter Berücksichtigung der bauartspezifischen Besonderheiten der einzelnen Dichtungselemente - ggf. als gesonderte Merkblätter - zu erarbeiten.

Es wird empfohlen, das gesamte Dichtungssystem im Einzelfall den standortspezifischen Randbedingungen und den angrenzenden Komponenten des Gesamtbauwerks anzupassen.

5.5 Untersuchung der gemeinsamen Wirkungsweise von Schutzmaßnahmen

5.5.1 Vorbemerkungen

Zur Optimierung der angestrebten Risikominderung sollten die verfügbaren Schutzmaßnahmen ihrer Wirkungsweise entsprechend kombiniert werden. Hierbei sind folgende gegenseitige Wechselwirkungen möglich:

- komplementäre (ergänzende) Wechselwirkung
- konkurrierende Wechselwirkung
- substituierbare (gegenseitig ersetzbare) Schutzmaßnahmen
- indifferente (keine) Wechselwirkung

Komplementäre Wechselwirkungen, wie z.B. zwischen Abdichtungen und Entwässerungseinrichtungen, sind Vorbedingung oder zumindest vorteilhaft für die Wirksamkeit der beteiligten Schutzmaßnahmen, so daß komplementäre Schutzmaßnahmen prinzipiell gemeinsam angewandt werden sollten.

Bei konkurrierenden Wechselwirkungen ist i.d.R. eine Optimierung oder ggf. der Ausschuß einer der betroffenen Maßnahmen erforderlich.

Substituierbare Schutzmaßnahmen können alternativ angewandt oder als zusätzliches Sicherheitselement verknüpft werden (Redundanz).

Gegenüber anderen Schutzmaßnahmen indifferent wirkende Schutzmaßnahmen sind teilweise risikomindernd und können ohne Wechselwirkungen einzeln eingesetzt werden.

Im ersten Schritt werden die verfügbaren Schutzmaßnahmen den ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Einwirkungen zugeordnet, Anhand des *"elementaren Ablaufes einer möglichen Grundwasserverunreinigung durch Straßen"* wird der Wirkungsbereich der einzelnen Schutzmaßnahmen gekennzeichnet (s. Abb. 5-6, 5-8 und 5-10). Auf der Grundlage der identifizierten Wechselwirkungen werden dann unter Berücksichtigung komplementärer,

konkurrierender und substituierbarer Schutzmaßnahmen alternative Maßnahmenkombinationen erstellt und in Verbindung mit den indifferenten Schutzmaßnahmen im Rahmen von Fehlerbaumanalysen gemäß DIN 25424, T. 1 (1981) für ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen getrennt untersucht.

Bei der Fehlerbaumanalyse gemäß DIN 25424, T. 1 (1981) gibt man das unerwünschte Ereignis (hier: nicht akzeptable straßenspezifische Stoffeinträge in das Grundwasser) vor und sucht nach den Ursachen und deren Verknüpfung. Hierbei wird jeweils ein Versagen der einzelnen (durch Schattenwurf gekennzeichneten) Schutzmaßnahmen (s. Abb. 5-7, 5-9, 5-11) zugrundegelegt, da auch das unerwünschte Ereignis vorgegeben ist.

Auf der Grundlage der DIN 25424, T. 2 (1990) können die Fehlerbäume gemäß DIN 25424, T. 1 (1981) rechnerisch ausgewertet werden, wobei den einzelnen unerwünschten Ereignissen, d.h. dem Versagen von Schutzmaßnahmen, Häufigkeiten zuzuordnen sind. Die einzelnen Versagenshäufigkeiten können bei ausreichender Datenbasis ermittelt oder bei unzureichender Datenbasis geschätzt werden.

5.5.2 Schutzmaßnahmen gegen ständige Einwirkungen

Zwischen den gegenüber ständigen Einwirkungen verfügbaren Schutzmaßnahmen (s. Abb. 5-6) bestehen folgende Wechselwirkungen:

- I. komplementär: a) konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + breitflächige Versickerung über den Fahrbahnrand
b) konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte (ggf. Untergrundabdichtung) Weiterleitung des Fahrbahnabflusses + konvektionsdichte (ggf. Untergrundabdichtung) Behandlung des Fahrbahnabflusses + Ableitung des Fahrbahnabflusses
- II. konkurrierend: • keine konkurrierenden Wechselwirkungen
- III. substituierbar: • bei ausreichender Schutzwirkung der Grundwasserüberdeckung Maßnahmenkombination I-b durch Maßnahmenkombination I-a
- IV. indifferent: a) Verminderung der Emissionen beim Betrieb der Kfz.
b) Reinigungs- und Pflegemaßnahmen

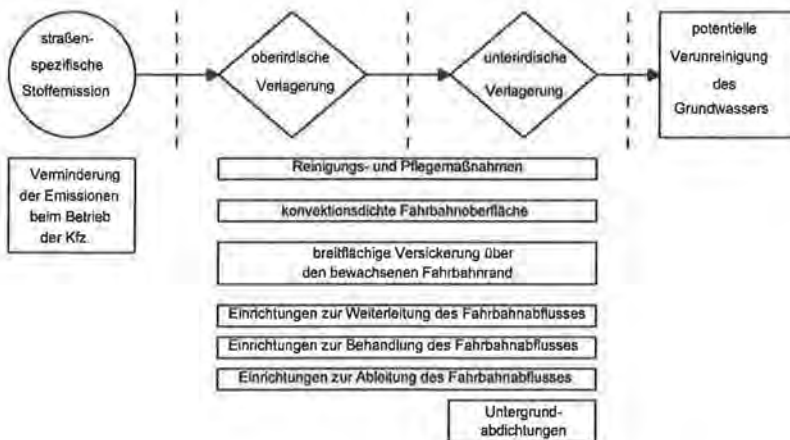


Abb. 5-6: Wirkungsbereich (Rahmenbreite in Relation zum "elementaren Ablauf einer möglichen Grundwasseranreicherung durch Straßen") der verfügbaren Schutzmaßnahmen gegenüber ständigen Einwirkungen

Die dezentrale breitflächige Versickerung über den Fahrbahnrand ist im Hinblick auf die Grundwasserneubildung und die hydraulische Belastung der Oberflächengewässer

grundsätzlich vorteilhaft, wobei die hohe Rückhalte- und Reinigungswirkung der bewachsenen, belebten Bodenzone gegenüber ständigen straßenspezifischen Stoffen genutzt wird.

Die indifferente Schutzmaßnahme "Verminderung der Emissionen beim Betrieb der Kfz" ist im Hinblick auf andere, nicht grundwasserspezifische Umweltauswirkungen von Straßen grundsätzlich anzustreben. Die regelmäßige Pflege der Grünflächen wird - unabhängig vom Grundwasserschutz - an allen Außerortsstraßen durchgeführt. Eine mechanische Reinigung der Fahrbahnoberfläche erscheint bei Außerortsstraßen wegen des hohen Reinigungsaufwandes und der Verkehrsbeeinträchtigung bei üblicherweise nur ca. 30 % Reinigungseffektivität (SIEKER & GROTTKER 1988) wenig zweckmäßig.

In Abhängigkeit von der Art der Fahrbahmentwässerung ergeben sich die zwei (fett markierten) "Hauptstämme" des Fehlerbaumes (s. Abb. 5-7, nächste Seite) zu ständigen Einwirkungen, die jeweils getrennt zu untersuchen sind.

Aus der Fehlerbaumanalyse gemäß DIN 25424 (1981) zu den (durch Schattenwurf gekennzeichneten) Schutzmaßnahmen gegenüber ständigen Einwirkungen (s. Abb. 5-7, nächste Seite) können unter Berücksichtigung der jeweiligen Wirkungsweise und der gegenseitigen Wechselwirkungen der einzelnen Schutzmaßnahmen folgende Maßnahmen-Kombinationen für eine vollständige Risikominderung abgeleitet werden (nach steigendem Aufwand gereiht):

- 1) breitflächige Versickerung über den Fahrbahnrand + Schutzwirkung der bewachsenen belebten Bodenzone + Schutzwirkung der verbleibenden Grundwasserüberdeckung
- 2) konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Weiterleitung des Fahrbahnabflusses + konvektionsdichte Behandlung des Fahrbahnabflusses (Sedimentation von Feststoffen und Abscheidung von Leichtstoffen)

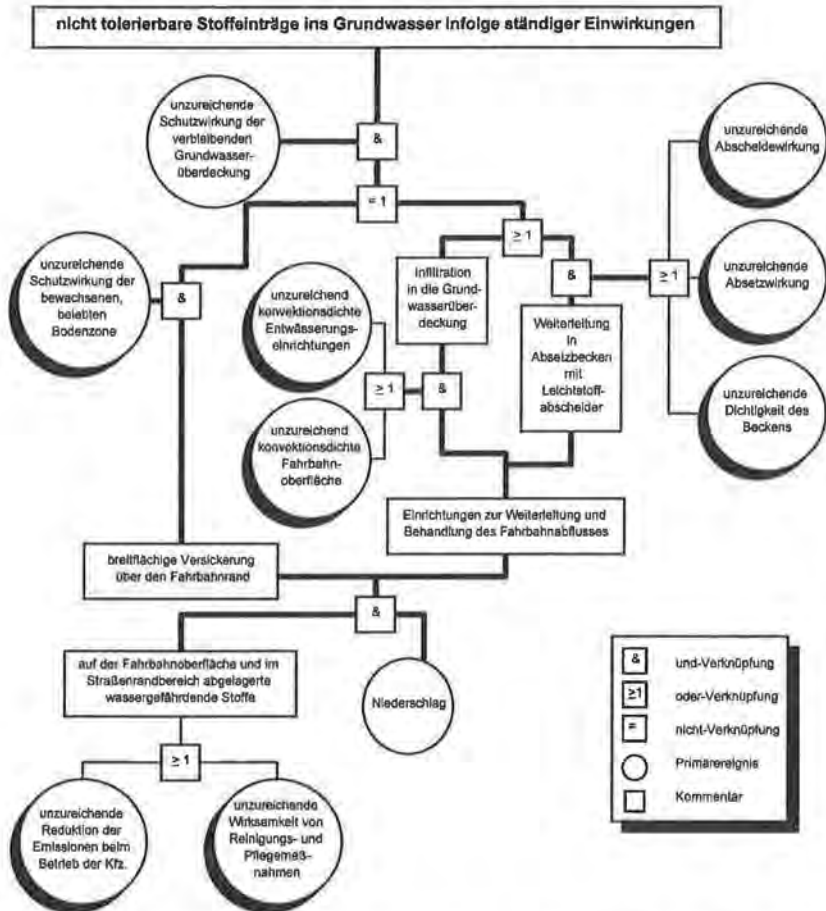


Abb. 5-7: Fehlerbaumanalyse gemäß DIN 25424 (1981) zu Schutzmaßnahmen gegenüber ständigen Einwirkungen

5.5.3 Schutzmaßnahmen gegen vorübergehende Einwirkungen

Zwischen den gegen vorübergehende Einwirkungen verfügbaren Schutzmaßnahmen (s. Abb. 5-8) bestehen folgende Wechselwirkungen:

- I. komplementär: a) konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte (ggf. Untergrundabdichtung) Weiterleitung des Fahrbahnabflusses + Ableitung des Fahrbahnabflusses
b) breitflächige Versickerung über den Fahrbahnrand
- II. konkurrierend: • die Verringerung der Tausalzanwendung steht in konkurrierender Wechselwirkung mit der Verkehrssicherheit (Risikoverlagerung)
- III. substituierbar: • bei ausreichenden hydrogeologischen Schutzwirkungen Maßnahmenkombination I-a durch I-b
- IV. indifferent: • keine indifferenten Wechselwirkungen



Abb. 5-8: Wirkungsbereich (Rahmenbreite in Relation zum "elementaren Ablauf einer möglichen Grundwasser-Verunreinigung durch Straßen") der verfügbaren Schutzmaßnahmen gegenüber vorübergehenden Einwirkungen.

In Abhängigkeit von der Art der Fahrbahntwässerung ergeben sich die zwei (fett markierten) "Hauptstämme" des Fehlerbaumes (s. Abb. 5-9, nächste Seite) zu vorübergehenden Einwirkungen, die jeweils getrennt zu untersuchen sind.

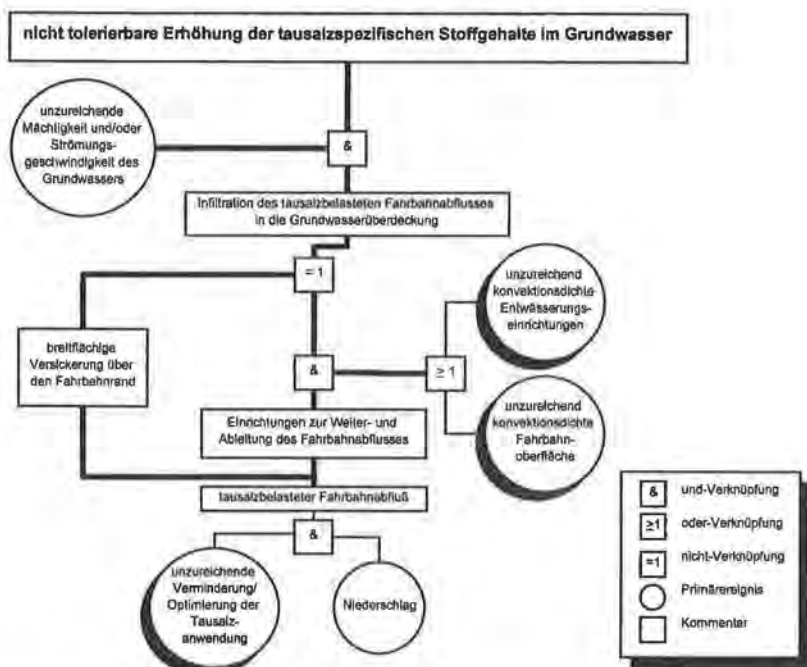


Abb. 5-9: Fehlerbaumanalyse gemäß DIN 25424 (1981) zu Schutzmaßnahmen gegenüber vorübergehenden Einwirkungen

Aus der Fehlerbaumanalyse gemäß DIN 25424 (1981) zu den (durch Schattenwurf gekennzeichneten) Schutzmaßnahmen gegenüber vorübergehenden Einwirkungen (s. Abb. 5-9) können unter Berücksichtigung der jeweiligen Wirkungsweise und der gegenseitigen Wechselwirkungen der einzelnen Schutzmaßnahmen folgende Maßnahmen-Kombinationen für eine vollständige Risikominderung abgeleitet werden (nach steigendem Aufwand gereiht):

- 1) Verzicht auf Tausalzanwendung
- 2) breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand + ausreichende Mächtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Grundwasserleiters (=hydrogeologische Schutzwirkung, die tausalzspezifische Stoffeinträge auf ein tolerierbares Maß beschränkt)
- 3) konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Ableitung aus dem gefährdeten Gebiet in eine Vorflut (z.B. Fließgewässer)

Eine Verringerung bzw. Optimierung der Tausalanzwendung ist grundsätzlich anzustreben und, sofern nur eine teilweise Risikominderung erforderlich ist, ggf. als einzige Schutzmaßnahme oder in Verbindung mit Maßnahmenkombination (2) ausreichend.

5.5.4 Schutzmaßnahmen gegen außergewöhnliche Einwirkungen

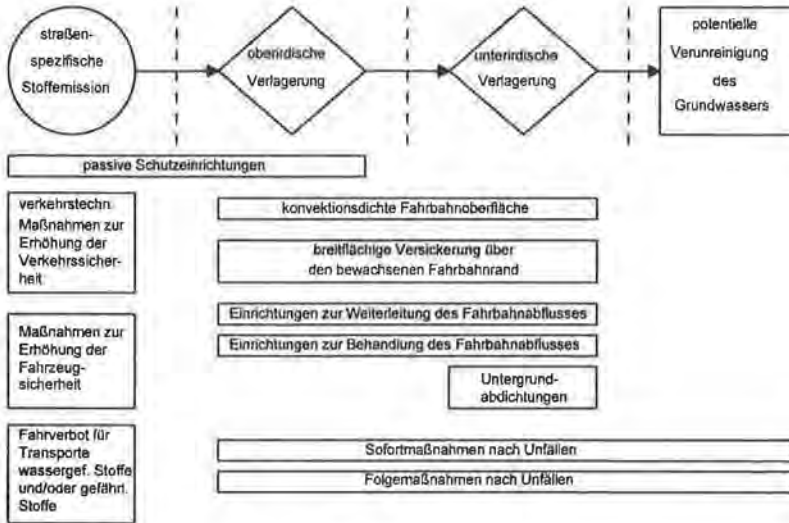


Abb. 5-10: Wirkungsbereich (Rahmenbreite in Relation zum "elementaren Ablauf einer möglichen Grundwasserunreinigung durch Straßen") der verfügbaren Schutzmaßnahmen gegenüber außergewöhnlichen Einwirkungen

Zwischen den gegenüber außergewöhnlichen Einwirkungen verfügbaren Schutzmaßnahmen (s. Abb. 5-10) bestehen folgende Wechselwirkungen:

- I. komplementär:
 - a) passive Schutzeinrichtungen + konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte (ggf. Untergrundabdichtung) Weiterleitung des Fahrbahnabflusses + konvektionsdichte (ggf. Untergrundabdichtung) Behandlung des Fahrbahnabflusses (Leichtstoffabscheider mit ausreichendem Rückhaltevolumen) + Ableitung des Fahrbahnabflusses
 - b) breitflächige Versickerung über den Fahrbahnrand + Sofortmaßnahmen nach Unfällen + Folgemaßnahmen nach Unfällen (bei geringer bis sehr geringer Durchlässigkeit der oberflächennahen Bodenschichten)
- II. konkurrierend:
 - keine konkurrierenden Wechselwirkungen
- III. substituierbar:
 - a) Maßnahmenkombination I-a durch ein Fahrverbot für Transporte wassergefährdender und/oder gefährlicher Stoffe
 - b) bei geringer bis sehr geringer Durchlässigkeit der oberflächennahen Bodenschichten Maßnahmenkombination I-a durch Maßnahmenkombination I-b

- IV. indifferent: a) Verkehrstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit
 b) Maßnahmen zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit

In Abhängigkeit vom Unfallhergang ergeben sich die zwei (fett markierten) "Hauptstämme" *Unfall abseits der Fahrbahn (A)* und *Unfall auf der Fahrbahn (B)* des Fehlerbaumes zu außergewöhnlichen Einwirkungen, wobei sich je nach Art der Fahrbahntwässerung eine weitere Verzweigung der "Hauptstammes" B ergibt (s. Abb 5-11, nächste Seite).

Aus der Fehlerbaumanalyse gemäß DIN 25424 (1981) zu den (durch Schattenwurf gekennzeichneten) Schutzmaßnahmen gegenüber außergewöhnlichen Einwirkungen (s. Abb. 5-11, nächste Seite) können unter Berücksichtigung der jeweiligen Wirkungsweise und der gegenseitigen Wechselwirkungen der einzelnen Schutzmaßnahmen folgende Maßnahmenkombinationen für eine vollständige Risikominderung abgeleitet werden (nach steigendem Aufwand gereiht):

- 1) Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe
- 2) Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen + breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand + geringe bis sehr geringe Durchlässigkeit der oberflächennahen Grundwasserüberdeckung (= hydrogeologische Schutzwirkung)
- 3) konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Weiterleitung des Fahrbahnabflusses + konvektionsdichte Behandlung des Fahrbahnabflusses (Absetzbecken, Leichtstoffabscheider und Rückhaltevolumen)

Bei der geringen bis sehr geringen Durchlässigkeit der oberflächennahen Grundwasserüberdeckung in Maßnahmenkombination (2) handelt es sich nicht um eine Schutzmaßnahme, jedoch um eine standortspezifische hydrogeologische Schutzwirkung.

Die indifferenten fahrzeugtechnischen und verkehrstechnischen Schutzmaßnahmen sollten bei den Maßnahmenkombinationen (2) und (3) ergänzend hinzugezogen werden.

Sofern nur eine teilweise Risikominderung erforderlich ist, können hierzu fahrzeugtechnische und verkehrstechnische Schutzmaßnahmen ergriffen werden, deren tatsächliche risikomindernde Wirkung von den standortspezifischen Randbedingungen im Einzelfall abhängt und deshalb nur näherungsweise anhand diesbezüglicher Studien oder durch die Auswertung von Unfalldaten abgeschätzt werden kann.

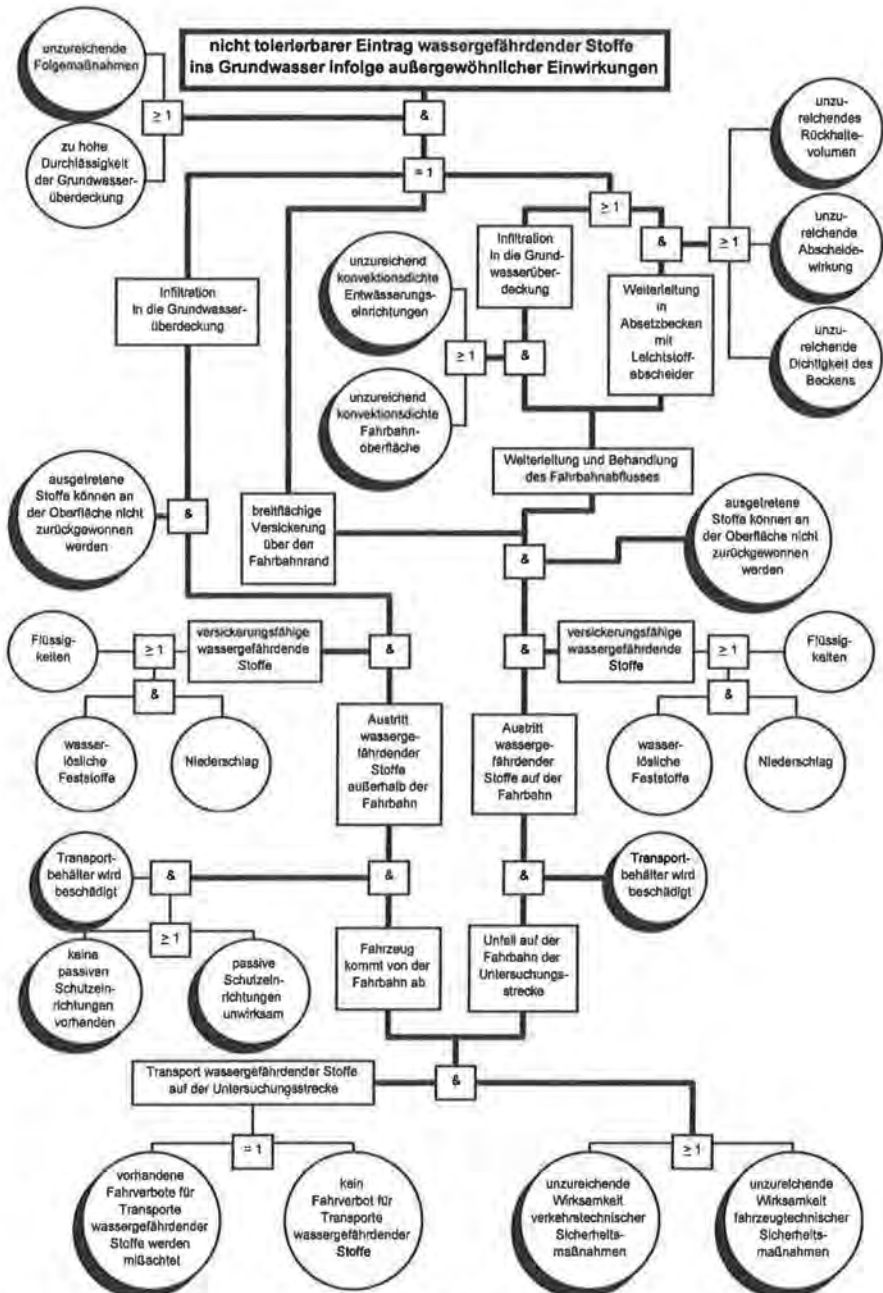


Abb. 5-11: Fehlerbaumanalyse gemäß DIN 25424 (1981) zu Schutzmaßnahmen gegenüber außergewöhnlichen Einwirkungen (Erläuterung der Symbole in Abb. 5-9 und 5-7).

5.5.5 Übergreifende Wechselwirkungen

Die gegenüber ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Einwirkungen verfügbaren Schutzmaßnahmen weisen folgende übergreifende Wechselwirkungen auf:

- I. komplementär: • ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen:
konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte (ggf. Untergrundabdichtung) Weiterleitung des Fahrbahnabflusses + konvektionsdichte (ggf. Untergrundabdichtung) Behandlung des Fahrbahnabflusses + Ableitung des Fahrbahnabflusses
- II. konkurrierend: • vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen:
Die Verringerung der Tausalanzwendung (vorübergehende Einwirkung) konkurriert mit der Verkehrssicherheit (außergewöhnliche Einwirkungen)
- III. substituierbar: • ständige und außergewöhnliche Einwirkungen:
bei geringer bis sehr geringer Durchlässigkeit der oberflächennahen Bodenschichten Maßnahmenkombination I (siehe oben) durch:
breitflächige Versickerung über den Fahrbahnrand + Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen
- IV. indifferent:
 - a) Verminderung der Emissionen beim Betrieb der Kfz
 - b) Reinigungs- und Pflegemaßnahmen
 - c) Verkehrstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit
 - d) Maßnahmen zur Erhöhung der Fahrzeugsicherheit

Die in I genannte übergreifende komplementäre Wechselwirkung sollte genutzt werden, sofern die genannte Maßnahmenkombination zumindest gegenüber einer der drei Einwirkungsarten (ständig, vorübergehend oder außergewöhnlich) erforderlich wird.

Im Hinblick auf die Verkehrssicherheit (außergewöhnliche Einwirkungen), wird bei der Verringerung der Tausalanzwendung eine Optimierung für die konkurrierenden Ziele erforderlich.

5.6 Risikominderung im Einzelfall

5.6.1 Auswahl und Kombination von Schutzmaßnahmen

Im Einzelfall richten sich die Auswahl und die Kombination der verfügbaren Schutzmaßnahmen nach den Ergebnissen der Risikobewertungen, d.h. nach dem Grad der gegenüber ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Einwirkungen erforderlichen Risikominderung. Es ergeben sich die in Tabelle 5-8 zusammengestellten $2^3 = 8$ Variationen des Gesamtergebnisses von Risikoanalysen:

Tabelle 5-8: Variationen des Gesamtergebnisses von Risikoanalysen zur Gefährdung des Grundwassers im Einflußbereich von Straßen

Bewertungsergebnis Variation	Erforderliche Risikominderung gegenüber straßenspezifischen Einwirkungen*		
	ständig	vorübergehend	außergewöhnlich
000	+	+	+
100	-	+	+
010	+	+	+
001	+	+	-
110	-	-	+
011	+	-	-
101	-	+	-
111	-	-	-

* + ... keine Risikominderung erforderlich; - ... Risikominderung erforderlich

Zu den Variationen 100 und 110 ist anzumerken, daß gegenüber außergewöhnlichen Einwirkungen ausreichende hydrogeologische Schutzwirkungen i.d.R. ebenfalls ausreichenden Schutz gegenüber ständigen Einwirkungen bieten.

Für alle Variationen des Gesamtergebnisses von Risikoanalysen werden im folgenden Verknüpfungen der verfügbaren Schutzmaßnahmen zusammengestellt und bewertet. Aus den jeweils 2^n (n = Anzahl der Schutzmaßnahmen) möglichen Verknüpfungen werden nur die Schutzmaßnahmen-Kombinationen untersucht, die jeweils zu einer vollständigen Risikominderung führen.

Tabelle 5-9: Vorschläge für Schutzmaßnahmenkombinationen für alle Variationen des Gesamtergebnisses von Risikoanalysen zur Gefährdung des Grundwassers im Einflußbereich von Straßen

Schutzmaßnahmen-Kombinationen	100		010			001			110			011					101			111				
	A	B	A	B	C	A	B	C	A	B	C	A	B	C	D	E	A	B	C	A	B	C	D	E
Reinigungs- und Pflegemaßnahmen	+	+							+	+	+						+	+	+	+	+	+	+	+
Reduktion der Emissionen beim Betrieb von Kfz	+	+							+	+	+						+	+	+	+	+	+	+	+
Verzicht auf Tausalzstreuung + Glättewarnschilder + mechanische Schneeräumung			●						○			○		○						○		○		
Verminderung/Optimierung der Tausalzstreuung				○	+				○	+		+		○	+					+		○	+	
Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe						●						○			○		○			○			○	
verkehrstechnische Sicherheitsmaßnahmen							+	+					+	+		+	+	+		+	+		+	+
fahrzeugtechnische Sicherheitsmaßnahmen							+	+					+	+		+	+	+		+	+		+	+
passive Schutzeinrichtungen							+	○					+	+		○		+	○		+	+		○
konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche	○	○			○		+	○	○	○	○		○	+		○	○	+	○	○	○	+		○
breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand	○			○					○	○			○				○	○		○	○	○	○	
ungebündelte dezentrale Versickerung über den bewachsenen Fahrbahnrand	○			○					○	○			○				○	○		○	○	○	○	
konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung)		○			○			○			○					○			○					○
konvektionsdichte Behandlung des Fahrbahnabflusses		○						○			○					○			○					○
Ableitung in ein Oberflächenfließgewässer					○						○					○								○
Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen							○						○	○		+		○	+		○	○		+
Mächtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Grundwasserleiters*				○	+					○	+		○		○						○		○	+
geringe bis sehr geringe Durchlässigkeit der Grundwasserüberdeckung*	+							○	+	+	+	+	○	○		+	+	○	+	+	○	○		+
Risikominderung: ● vollständig; ○ im Verbund vollständig (komplementär); + teilweise, ergänzend (indifferent)																								
* standortspezifische hydrogeologische Schutzwirkung																								

Die untersuchten Schutzmaßnahmen -Kombinationen sind nach steigendem Aufwand (...A < ...B < ...C usw.) geordnet. Es werden anschließend die Schutzmaßnahmen-Verknüpfungen bewertet, die für eine vollständige Risikominderung erforderlich sind (mit ● oder ○ gekennzeichnet). Auf ergänzende, indifferente Schutzmaßnahmen (mit + gekennzeichnet) wird nicht näher eingegangen.

Sofern die Grundwasserüberdeckung aus klüftigem Fels oder Karst mit wenig mächtiger Boden- und Lockergesteinüberdeckung besteht, ist folgendes zu beachten:

- Die Schutzmaßnahmen-Kombinationen 100A, 010B, 110A, 110B, 011D, 101A, 111A, 111D sind wegen der Entwässerung und Versickerung über den Fahrbahnrand kritisch zu sehen.
- Die Variationen 001B, 011B, 011C, 101B, 111B, 111C sind wegen der erforderlichen *geringen bis sehr geringen Durchlässigkeit der Grundwasserüberdeckung* (hydrogeologische Schutzwirkung) nicht plausibel.

Aus den genannten Gründen werden bei einer Grundwasserüberdeckung aus klüftigem Fels oder Karst mit wenig mächtiger Boden- und Lockergesteinüberdeckung folgende Schutzmaßnahmen-Kombinationen angeraten:

- 100B:
konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) + konvektionsdichte Behandlung des Fahrbahnabflusses
- 010A:
Verzicht auf Tausalzstreuung + Glättewarnschilder + mechanische Schneeräumung
- 010C:
konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) + Ableitung in ein Oberflächenfließgewässer (Vorflut)
- 001A:
Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe
- 001C:
passive Schutzeinrichtungen + konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) + konvektionsdichte Behandlung des Fahrbahnabflusses
- 110C:
konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) + konvektionsdichte Behandlung des Fahrbahnabflusses + Ableitung in ein Oberflächenfließgewässer (Vorflut)
- 011A:
Verzicht auf Tausalzstreuung, Glättewarnschilder und mechanische Schneeräumung + Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe
- 101C:
passive Schutzeinrichtungen + konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) + konvektionsdichte Behandlung des Fahrbahnabflusses
- 111E:
passive Schutzeinrichtungen + konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte

Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) + konvektionsdichte Behandlung des Fahrabflusses + Ableitung in ein Oberflächenfließgewässer (Vorflut)

5.6.2 Hinweise zur Bewertung der Schutzmaßnahmen-Kombinationen

5.6.2.1 Allgemeines

Neben der Wirksamkeit werden die Schutzmaßnahmen-Kombinationen im folgenden anhand der Kriterien

- allgemeiner technischer Aufwand,
- zusätzlicher Aufwand bei nachträglicher Durchführung,
- Nutzungsbeschränkung,
- zusätzlicher Flächenverbrauch,
- zusätzliche Flächenversiegelung und
- zusätzliche Stoffeinträge in den Boden

qualitativ bewertet.

5.6.2.2 Variation 100, ständige Einwirkungen

Folgende Schutzmaßnahmen- Kombinationen werden bewertet:

- 100A:
konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand + ungebündelte dezentrale Versickerung über den bewachsenen Fahrbahnrand
- 100B:
konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) + konvektionsdichte Behandlung des Fahrabflusses

Tabelle 5-10: Qualitative Bewertung von Schutzmaßnahmen-Kombinationen gegen ständige Einwirkungen

Schutzmaßnahmen - Kombination	100A	100B
allgemeiner technischer Aufwand	○	-
zusätzlicher Aufwand bei nachträglicher Durchführung	○	-
Nutzungsbeschränkung	*	*
zusätzlicher Flächenverbrauch	++	-
zusätzliche Flächenversiegelung	++	-
zusätzliche Stoffeinträge in den Boden	-	++
++ = sehr gering; + = gering; ○ = mittel; - = hoch; -- = sehr hoch; * = nicht gegeben		

5.6.2.3 Variation 010, vorübergehende Einwirkungen

Folgende Schutzmaßnahmen-Kombinationen werden bewertet:

- 010A:
Verzicht auf Tausalzstreuung + Glättewarnschilder + mechanische Schneeräumung
- 010B:
Verminderung/Optimierung der Tausalzstreuung + breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand + ungebundelte dezentrale Versickerung über den bewachsenen Fahrbahnrand + *Mächtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Grundwasserleiters* (=hydrogeologische Schutzwirkung)
- 010C:
konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) + Ableitung in ein Oberflächenfließgewässer (Vorflut)

Tabelle 5-11: Qualitative Bewertung von Schutzmaßnahmen-Kombinationen gegen vorübergehende Einwirkungen

Schutzmaßnahmen - Kombination	010A	010B	010C
allgemeiner technischer Aufwand	++	+	-
zusätzlicher Aufwand bei nachträglicher Durchführung	*	+	-
Nutzungsbeschränkung	-	*	*
zusätzlicher Flächenverbrauch	*	++	-
zusätzliche Flächenversiegelung	*	++	--
zusätzliche Stoffeinträge in den Boden	*	-	++
++ = sehr gering; + = gering; ○ = mittel; - = hoch; -- = sehr hoch; * = nicht gegeben			

5.6.2.4 Variation 001, außergewöhnliche Einwirkungen

Folgende Schutzmaßnahmen-Kombinationen werden bewertet:

- 001A:
Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe
- 001B:
Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen + *geringe bis sehr geringe Durchlässigkeit der Grundwasserüberdeckung* (=standortspezifische hydrogeologische Schutzwirkung)
- 001C:
passive Schutzeinrichtungen + konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) + konvektionsdichte Behandlung des Fahrbahnabflusses

Tabelle 5-12: Qualitative Bewertung von Schutzmaßnahmen-Kombinationen gegen außergewöhnliche Einwirkungen

Schutzmaßnahmen - Kombination	001A	001B	001C
allgemeiner technischer Aufwand	++	+	--
zusätzlicher Aufwand bei nachträglicher Durchführung	*	*	-
Nutzungsbeschränkung	-	*	*
zusätzlicher Flächenverbrauch	*	*	-
zusätzliche Flächenversiegelung	+	+	--
zusätzliche Stoffeinträge in den Boden	*	-	++
++ = sehr gering; + = gering; ○ = mittel; - = hoch; -- = sehr hoch; * = nicht gegeben			

5.6.2.5 Variation 110, ständige und vorübergehende Einwirkungen

Folgende Schutzmaßnahmen-Kombinationen werden bewertet:

- 110A:
Verzicht auf Tausalzstreuung, Glättewarnschilder und mechanische Schneeräumung + konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand + ungebündelte dezentrale Versickerung über den bewachsenen Fahrbahnrand
- 110B:
Verminderung/Optimierung der Tausalzstreuung + konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand + ungebündelte dezentrale Versickerung über den bewachsenen Fahrbahnrand + *Mächtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Grundwasserleiters*

- 110C:
konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) + konvektionsdichte Behandlung des Fahrbahnabflusses + Ableitung in ein Oberflächenfließgewässer (Vorflut)

Tabelle 5-13: Qualitative Bewertung von Schutzmaßnahmen-Kombinationen gegen ständige und vorübergehende Einwirkungen

Schutzmaßnahmen - Kombination	110A	110B	110C
allgemeiner technischer Aufwand	○	○	-
zusätzlicher Aufwand bei nachträglicher Durchführung	○	○	-
Nutzungsbeschränkung	-	*	*
zusätzlicher Flächenverbrauch	++	++	-
zusätzliche Flächenversiegelung	++	++	--
zusätzliche Stoffeinträge in den Boden	-	-	++
++ = sehr gering; + = gering; ○ = mittel; - = hoch; -- = sehr hoch; * = nicht gegeben			

5.6.2.6 Variation 011, vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen

Folgende Schutzmaßnahmen-Kombinationen werden bewertet:

- 011A:
Verzicht auf Tausalzstreuung, Glättewarnschilder und mechanische Schneeräumung + Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe
- 011B:
konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand + ungebündelte dezentrale Versickerung über den bewachsenen Fahrbahnrand + Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen + *Mächtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Grundwasserleiters* + *geringe bis sehr geringe Durchlässigkeit der Grundwasserüberdeckung*
- 011C:
Verzicht auf Tausalzstreuung, Glättewarnschilder und mechanische Schneeräumung + Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen + *geringe bis sehr geringe Durchlässigkeit der Grundwasserüberdeckung*
- 011D:
Verminderung/Optimierung der Tausalzstreuung + Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe + *Mächtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Grundwasserleiters*
- 011E:
passive Schutzeinrichtungen + konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) + konvektionsdichte Behandlung des Fahrbahnabflusses + Ableitung in ein Oberflächenfließgewässer (Vorflut)

Tabelle 5-14: Qualitative Bewertung von Schutzmaßnahmen-Kombinationen gegen vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen

Schutzmaßnahmen - Kombination	011A	011B	011C	011D	011E
allgemeiner technischer Aufwand	+	○	+	+	--
zusätzlicher Aufwand bei nachträglicher Durchführung	*	○	*	*	-
Nutzungsbeschränkung	--	*	-	-	*
zusätzlicher Flächenverbrauch	*	++	*	*	-
zusätzliche Flächenversiegelung	*	++	*	*	--
zusätzliche Stoffeinträge in den Boden	*	-	-	-	++
++ = sehr gering; + = gering; ○ = mittel; - = hoch; -- = sehr hoch; * = nicht gegeben					

5.6.2.7 Variation 101, ständige und außergewöhnliche Einwirkungen

Folgende Schutzmaßnahmen-Kombinationen werden bewertet:

- 101A:
Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe + konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand + ungebündelte dezentrale Versickerung über den bewachsenen Fahrbahnrand
- 101B:
breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand + ungebündelte dezentrale Versickerung über den bewachsenen Fahrbahnrand + Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen + *geringe bis sehr geringe Durchlässigkeit der Grundwasserüberdeckung*
- 101C:
passive Schutzeinrichtungen + konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) + konvektionsdichte Behandlung des Fahrbahnabflusses

Tabelle 5-15: Qualitative Bewertung von Schutzmaßnahmen-Kombinationen gegen ständige und außergewöhnliche Einwirkungen

Schutzmaßnahmen - Kombination	101A	101B	101C
allgemeiner technischer Aufwand	○	+	--
zusätzlicher Aufwand bei nachträglicher Durchführung	○	+	-
Nutzungsbeschränkung	-	*	*
zusätzlicher Flächenverbrauch	++	++	-
zusätzliche Flächenversiegelung	++	++	--
zusätzliche Stoffeinträge in den Boden	-	-	++
++ = sehr gering; + = gering; ○ = mittel; - = hoch; -- = sehr hoch; * = nicht gegeben			

5.6.2.8 Variation 111, ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen

Folgende Schutzmaßnahmen-Kombinationen werden bewertet:

- 111A:
Verzicht auf Tausalzstreuung, Glättewarnschilder und mechanische Schneeräumung + Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe + konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand + ungebündelte dezentrale Versickerung über den bewachsenen Fahrbahnrand
- 111B:
konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand + ungebündelte dezentrale Versickerung über den bewachsenen Fahrbahnrand + Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen + *Mächtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Grundwasserleiters* + *geringe bis sehr geringe Durchlässigkeit der Grundwasserüberdeckung*
- 111C:
Verzicht auf Tausalzstreuung, Glättewarnschilder und mechanische Schneeräumung + breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand + ungebündelte dezentrale Versickerung über den bewachsenen Fahrbahnrand + Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen + *geringe bis sehr geringe Durchlässigkeit der Grundwasserüberdeckung*
- 011D:
Verminderung/Optimierung der Tausalzstreuung + Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe + breitflächige Entwässerung über den Fahrbahnrand + ungebündelte dezentrale Versickerung über den bewachsenen Fahrbahnrand + *Mächtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Grundwasserleiters*
- 111E:
passive Schutzeinrichtungen + konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche + konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) + konvektionsdichte Behandlung des Fahrbahnabflusses + Ableitung in ein Oberflächenfließgewässer (Vorflut)

Tabelle 5-16: Qualitative Bewertung von Schutzmaßnahmen-Kombinationen gegen ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen

Schutzmaßnahmen - Kombination	111A	111B	111C	111D	111E
allgemeiner technischer Aufwand	○	○	=	+	++
zusätzlicher Aufwand bei nachträglicher Durchführung	○	○	+	+	-
Nutzungsbeschränkung	++	*	-	-	*
zusätzlicher Flächenverbrauch	*	++	*	*	-
zusätzliche Flächenversiegelung	*	++	*	*	++
zusätzliche Stoffeinträge in den Boden	-	-	-	-	++
++ = sehr gering; + = gering; ○ = mittel; - = hoch; -- = sehr hoch; * = nicht gegeben					

6 Hinweise für Risikoanalysen im Einzelfall

6.1 Allgemeine Hinweise

6.1.1 Beschreibung der Ausgangssituation

Die Durchführung einer Risikoanalyse erfordert im Einzelfall eine möglichst detaillierte Beschreibung der Verhältnisse im Untersuchungsgebiet (Ausgangssituation). In den Hinweisen für Maßnahmen an bestehenden Straßen in Wassergewinnungsgebieten (FGSV 1993a) und zusätzlich in KOCH (1989) werden Einflußgrößen für das Risiko einer Grundwasserverunreinigung durch Straßen genannt:

- **Verkehrliche Merkmale:**

- Verkehrsbelastung (DTV) und Verkehrszusammensetzung (Güterverkehrsanteil)
- voraussichtliche Verkehrsentwicklung
- Transport von wassergefährdenden Stoffen
- Unfallgeschehen (an bestehenden Straßen)
- Umfang der Tausalzstreuung auf nahegelegenen Strecken unter ähnlichen Witterungsbedingungen

- **Straßenbauliche Gegebenheiten:**

- Abstand der Straßentrasse von einer vorhandenen oder geplanten Wassergewinnungsanlage unter Berücksichtigung der Grundwasserströmungsrichtung und -geschwindigkeit
- Querschnittstopographie (Damm/Gleichlage/Einschnitt) und Querschnittsgestaltung
- Entwurfsgeschwindigkeit
- Trassierung in Grund- und Aufriß
- Art der Straßenentwässerung
- passive Schutzeinrichtungen
- beabsichtigter Straßenausbau (bestehende Straßen)

- **Witterung:**

- vorherrschende Winde (Richtung und Stärke)
- Niederschlag (Häufigkeit, Menge)
- jahreszeitlicher Temperaturverlauf (Frost)

- **Wasserbeschaffenheit:**

- straßenunabhängige Rohwasserbeschaffenheit
- straßenspezifische Auffälligkeiten der Rohwasserbeschaffenheit (an bestehenden Straßen)

- **Hydrogeologische Gegebenheiten:**

- Lage der Schutzzonen
- Aufbau und Mächtigkeit der Grundwasserüberdeckung (Locker- und Festgesteine): Benennung und Beschreibung von Boden und Fels gemäß DIN 4022, Bodenklassifikation gem. DIN 18196 und Durchlässigkeit gemäß DIN 18130
- Art (Poren-, Karst- oder Kluftgrundwasserleiter), Aufbau und Mächtigkeit des Grundwasserleiters
- Strömungsrichtung und -geschwindigkeit des Grundwassers im jahreszeitlichen Verlauf

Zur besseren Übersichtlichkeit und Handhabung sollten die genannten Einflußgrößen, soweit möglich, in Lage- und Höhenplänen (Schnitte) gemeinsam dargestellt werden. Die anschließende Risikoanalyse sollte die gesamte Trasse innerhalb der Schutzzonen umfassen.

Ausgehend von der Fahrbahnachse ist das der Risikoanalyse zugrundeliegende Untersuchungsgebiet nach unten durch die Grundwasseroberfläche, senkrecht zur Fahrbahnachse durch die Verlagerungsreichweite straßenspezifischer Schadstoffe und in Richtung der Fahrbahnachse durch die Strecke der Straße im Wassergewinnungsgebiet begrenzt.

6.1.2 Risikoakzeptanz

Wie bereits in Abschnitt 2.2 erläutert, ist bei der Risikobewertung zu entscheiden, ob die festgestellten Risiken akzeptiert werden können oder eine Minderung oder Vermeidung der Risiken erforderlich ist.

Das akzeptable Risiko ist eine zweidimensionale Größe (vgl. Abschn. 2.1, Abb. 2-1), die im Sinne der Aufgabenstellung durch das Produkt des Ausmaßes und der Wahrscheinlichkeit akzeptabler Beeinträchtigungen des Grundwassers definiert ist. Die Menge akzeptabler Risiken kann im kartesischen Koordinatensystem als eine Fläche dargestellt werden, die nach unten durch die Stoffmengenachse und die Häufigkeitsachse und nach oben durch eine Hyperbel-Kurve begrenzt ist (siehe Abb. 6-1).



Abb. 6-1: Qualitative Darstellung der Menge akzeptabler Risiken

Aus der Literatur werden folgende Aussagen zu akzeptablen Risiken für das Grundwasser entnommen:

- "Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts" (WHG 1986, § 1a, Abs. 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."

- "Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete ..." (DVGW-Arbeitsblatt W101 1975, Abschn. 1):

"Die Möglichkeit, Verunreinigungen, und sonstige Beeinträchtigungen des Grundwassers durch Aufbereitung zu beseitigen oder unschädlich zu machen, ist begrenzt. Dies gilt vor allem bei unvorhergesehenen oder bei kurzfristig eintretenden Veränderungen der Wasserbeschaffenheit. Deshalb sind von vornherein Verunreinigungen und sonstige Beeinträchtigungen fernzuhalten."

- "Die wasserrechtlichen Anforderungen an den Umgang mit wassergefährdenden Stoffen" (HOLTMEIER 1988):

Nach HOLTMEIER (1988) spielt der Besorgnisgrundsatz des WHG in Literatur und Rechtsprechung eine herausragende Rolle: "Er ist so zu verstehen, daß keine auch noch so wenig naheliegende Wahrscheinlichkeit der Verunreinigung des Wassers oder einer sonstigen nachteiligen Veränderung seiner Eigenschaften bestehen darf. Wenn auch die

reine Möglichkeit eines Schadenseintritts nicht völlig ausgeschlossen werden kann, muß doch der Schadenseintritt nach menschlicher Erfahrung unwahrscheinlich sein."

- *"Maßnahmen an bestehenden Straßen in Wassergewinnungsgebieten"* (HEIDE 1992):

Der Besorgnisgrundsatz des WHG (1986) wurde am 13.09.1985 durch ein Urteil des Bundesverwaltungsgerichtes bekräftigt, so daß an Straßen in Wassergewinnungsgebieten bezüglich des Grundwasserschutzes das Verursacherprinzip auf den Straßenbaulastträger anzuwenden ist.

- *"Die Grundwasserqualität westdeutscher Trinkwasserressourcen"* (SCHLEYER & KERNDORFF 1992):

"Die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung sind gesetzlich zugelassene Höchstkonzentrationen für das Produkt "Trinkwasser", die nach hygienisch-toxikologischen sowie gewinnungstechnischen Kriterien der DIN 2000 erarbeitet wurden. Ein Vergleich der hier abgeleiteten Orientierungswerte* mit den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung zeigt, daß die geogene Qualität von Grundwasservorkommen bezüglich der meisten Inhaltsstoffe deutlich besser ist als die Qualitätsanforderungen für Trinkwasser." ... "Aus diesem Grund dürfen die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung unter keinen Umständen als Maßstab für den prophylaktischen Grundwasserschutz herangezogen werden, da dies langfristig zu einer unvermeidlichen und teilweise extremen Aufstockung der Konzentrationen vieler Inhaltsstoffe führen würde. Im Grundwasserbereich können die Grenzwerte der Trinkwasserverordnung allenfalls als Sanierungsziele unter den nutzungsbezogenen Aspekten der Trinkwassergewinnung Anwendung finden."

Da akzeptable Verlagerungen straßenspezifischer Schadstoffe ins Grundwasser nicht genannt werden, können die zitierten Aussagen im Sinne des präventiven Grundwasserschutzes zunächst nur so verstanden werden, daß auch geringfügige Einträge straßenspezifischer wassergefährdender Stoffe ins Grundwasser nicht tolerierbar sind. Hierzu wird angemerkt, daß wassergefährdende Stoffe mit hochauflösenden Analyseverfahren teilweise bereits in minimalen, gesundheitlich und für den präventiven Grundwasserschutz nicht relevanten Konzentrationen bestimmt werden können, so daß von den betroffenen Entscheidungsträgern zu prüfen wäre, ob im Einzelfall geringfügige straßenspezifische Stoffeinträge innerhalb der Schwankungsbreiten der jeweiligen geogenen Stoffgehalte akzeptiert werden können. Als Bewertungsmaßstab für die Verhältnisse in Deutschland eignen sich hierzu die von SCHLEYER &

* Der als überwiegend geogen zu bezeichnende Konzentrationsbereich natürlicher Grundwässer unterhalb des 84,1 %-Perzentilwertes von insgesamt 2793 Einzelanalysen westdeutscher als Trinkwasser genutzter Grundwasser in Lockersedimenten (SCHLEYER & KERNDORFF 1992).

KERNENDORFF (1992) als Obergrenze geogen bedingter Stoffgehalte im Grundwasser definierten 84,1 %-Perzentilwerte von insgesamt 2793 Einzelanalysen westdeutscher Grundwässer.

6.1.3 Berücksichtigung von Wasserschutzzonen

Gemäß DVGW-Arbeitsblatt W 101 (1995) sollen Wasserschutzzonen nach folgenden Kriterien in die Wasserschutzzonen I, II und III untergliedert werden:

"Die Zone III soll den Schutz vor weitreichenden Beeinträchtigungen, insbesondere vor nicht oder nur schwer abbaubaren chemischen oder vor radioaktiven Verunreinigungen gewährleisten."

"Die Zone II soll den Schutz vor Verunreinigungen durch pathogene Mikroorganismen (z.B. Bakterien, Viren, Parasiten und Wurmeier) sowie vor sonstigen Beeinträchtigungen gewährleisten, die bei geringer Fließdauer und -strecke zur Trinkwassergewinnungsanlage gefährlich sind."

"Die Zone I soll den Schutz der Trinkwassergewinnungsanlage und ihrer unmittelbaren Umgebung vor jeglichen Verunreinigungen gewährleisten."

Das wesentliche Kriterium der Untergliederung ist die Wirkungsintensität und -reichweite bestimmter Stoffgruppen. Je nach Stoffart werden Verdünnungsprozesse (persistente chemische oder radioaktive Stoffe in WSZ III) und Abbau- und Umwandlungsprozesse (pathogene Stoffe bzw. organische Verunreinigungen in WSZ II) im strömenden Grundwasser zwischen der Stoffeingebe und der Wassergewinnungsanlage berücksichtigt. Diese indirekte, abgestufte Berücksichtigung akzeptabler Risiken bei der Festlegung von Wasserschutzzonen ist hinsichtlich der Gefährdung des Grundwassers durch Straßen kritisch zu sehen:

- Von der Anlage und dem Betrieb von Straßen geht eine Vielzahl unterschiedlich wirkender organischer und anorganischer Stoffe aus (siehe Abschnitt 3.1), so daß eine räumliche Unterteilung im Sinne der Schutzzonen nicht möglich ist.
- Zwischen der Verdünnung und der Verlagerung von Stoffen im strömenden Grundwasser liegt ein Zielkonflikt vor: Bei Unfällen beim Transport wassergefährdender Stoffe können örtlich größere Mengen emittiert werden (s. Abschn. 4.3.4.2). Die bei geringen Stoffkonzentrationen schützend wirkende Verdünnung im strömenden Grundwasser (= Dispersion - s. Abschn. 3.2.2.2) würde in diesem Fall zu einer weitreichenden Ausbreitung der konzentrierten wassergefährdenden Stoffe führen.

Es wird daher vorgeschlagen, die akzeptablen Risiken in Abhängigkeit von der Schutzbedürftigkeit des jeweils betroffenen Grundwasservorkommens auf der Grundlage der standortspezifischen Randbedingungen im Einzelfall zu erarbeiten. Hierzu müßten tolerierbare Mengen bzw. Konzentrationen der einzelnen verkehrsspezifischen wassergefährdenden Stoffe im Grundwasser anhand von Dosis/Wirkungs-Beziehungen auf der Grundlage der jeweiligen Toxizität, Mobilität und Persistenz festgelegt werden.

6.1.4 Abstufungsrahmen

Eine stufenlose Risikobestimmung und -bewertung ist zwar theoretisch möglich, jedoch im Einzelfall aus folgenden Gründen nicht zweckmäßig:

- Datenbasis unzureichend
- Schwierigkeiten bei der Umsetzung in einheitliche, widerspruchsfreie und praxisgerechte Richtlinien und Regelwerke
- unangemessen hoher Aufwand für Voruntersuchungen im Einzelfall
- hohe Anforderungen an den Anwender
- verfügbare Schutzmaßnahmen können nur teilweise stufenlos angepaßt werden

Für derartige Fälle wird ein vereinfachter Abstufungsrahmen für die gesamte Risikobetrachtung vorgeschlagen. Zur gemeinsamen Anwendung für ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen eignen sich hierzu die übergeordneten Kriterien Verkehrsmenge (DTV) und Straßenkategorie:

- Der DTV ist die wesentliche Bestimmungsgröße für Stoffemissionen aus ständigen Einwirkungen (s. Abschn. 4.1.1.5).
- Die insgesamt anfallende Tausalzmenge (vorübergehende Einwirkungen) hängt bei einheitlichen Witterungsbedingungen von der aufzutauenden Fläche (Breite bzw. Straßenquerschnitt) und somit indirekt von der Straßenkategorie ab (s. Abschn. 4.2.1).
- Der DTV ist eine Bestimmungsgröße für den Einsatzbereich der Regelquerschnitte (gem. RAS-Q) und zugleich der Straßenkategorie.
- Die Unfallanzahl steht in Zusammenhang mit der Transportleistung und folglich auch mit dem DTV (s. Abschn. 4.3.4).

Im Hinblick auf die Umsetzung in Richtlinien und Merkblätter, wie die RiStWag (1982), bietet es sich an, die Abstufung am derzeitigen Streckennetz der Bundesrepublik Deutschland zu

orientieren. Zur Veranschaulichung sind in Abb. 6-2 die Streckenlängen der einzelnen Straßenkategorien in Abhängigkeit vom DTV dargestellt (Daten aus DIW 1994). Den überwiegenden Anteil am Streckennetz haben untergeordnete Kreis- und Landesstraßen mit geringem Verkehrsaufkommen (75 % DTV < 5000). Übergeordnete Straßen mit hohem Verkehrsaufkommen haben nur einen sehr geringen Anteil am Streckennetz (4 % DTV > 30000).

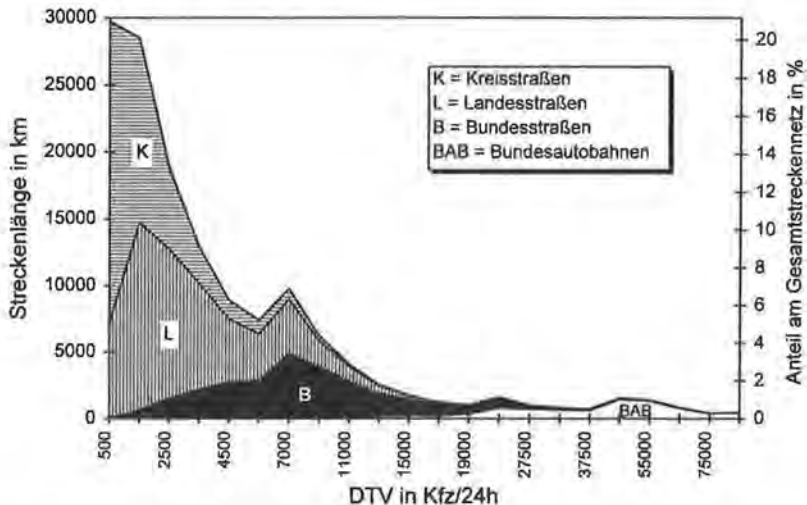


Abb. 6-2: Streckennetz der Bundesrepublik Deutschland (alte Bundesländer): Streckenlänge in Abhängigkeit von der Verkehrsstärke und dem %-Anteil am Gesamtstreckennetz nach Straßenkategorien; (Stand: 1990 - Daten aus DIW 1994)

An den Abstufungsrahmen werden folgende Anforderungen gestellt:

- Berücksichtigung der charakteristischen Verteilung der Verkehrsstärken auf das Straßennetz der Bundesrepublik Deutschland:
Flächenverteilung und Knickpunkte der graphischen Darstellung der Streckenlängen in Abhängigkeit von den Verkehrsstärken im Streckennetz der Bundesrepublik Deutschland (siehe Abb. 6-2)
- Indirekte Berücksichtigung unterschiedlicher Straßenquerschnitte durch maßgebende Straßenkategorien:
 - Landes- und Kreisstraßen (L + K)
 - Bundesstraßen (B)
 - Bundesautobahnen (BAB)

- Differenzierung und zugleich einfache Handhabung:
Unterteilung in 3 Stufen

Unter Berücksichtigung der genannten Anforderungen wird die in Tabelle 6-1 mit zusätzlichen Erläuterungen angegebene Abstufung in drei **DTV-Kategorien** abgeleitet.

Tabelle 6-1: Abgestufte Unterteilung des Straßennetzes der Bundesrepublik Deutschland anhand der Verkehrsmenge DTV (*Daten zur Erläuterung aus DIW 1994)

Verkehrsmenge (DTV)			*Anteil am Gesamt-Streckennetz	*Anteil der Straßenkategorien am DTV-Bereich				Maßgebende Straßenkat. (bzgl. DTV)
DTV-Bereich	Benennung	DTV-Kat.		BAB	B	L	K	
Kfz/24h			%	%	%	%	%	
< 5000	gering	<i>I</i>	75	0,2	9,3	45,7	44,8	L + K
5000 - 30000	mittel	<i>II</i>	21	11,8	55,1	28,2	4,9	B
> 30000	hoch	<i>III</i>	4	94,1	5,5	0,4	-	BAB

Um den Abstufungsrahmen auch auf Straßen in Wassergewinnungsgebieten übertragen zu können, wird geprüft, ob sich die Straßen in Wassergewinnungsgebieten zu ähnlichen Teilen auf die Straßenkategorien (BAB, B, L, K) verteilen, wie das jeweilige Gesamtstreckennetz. Dies erfolgt anhand detaillierter Einzeldaten zu Straßen in Wassergewinnungsgebieten, die jedoch nur für einzelne Bundesländer verfügbar waren (s. Tabelle 6-2, nächste Seite).

In Bayern und Hessen ergibt sich eine sehr gute Übereinstimmung zwischen dem Gesamtstreckennetz und Straßen in Wassergewinnungsgebieten. Aufgrund des relativ hohen Anteils von BAB in Wassergewinnungsgebieten ergibt sich in Nordrhein-Westfalen nur eine mäßige Übereinstimmung. Dennoch wird im folgenden angenommen, daß die Zusammensetzung des Gesamtstraßennetzes auf die Zusammensetzung der Straßen in Wassergewinnungsgebieten übertragen werden kann.

Tabelle 6-2: Streckenbezogene Anteile der Straßenkategorien Bundesautobahnen (BAB), Bundesstraßen (B), Landesstraßen (L) und Kreisstraßen (K) von Straßen in Wassergewinnungsgebieten und vom Gesamtstreckennetz in Bayern, Hessen und Nordrhein-Westfalen

Bundesland	Bezugsgebiet	BAB	B	L	K	Datenquelle
Bayern	Straßen in Wasserschutz-zonen	4,5 %	19,2 %	35,9 %	40,3 %	BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT 1995 - unveröff.
	Gesamt-Streckennetz	5,0 %	17,3 %	33,2 %	45,5 %	DIW 1994
Hessen	Straßen in Wasserschutz-zonen	4,6 %	20,6 %	42,2 %	31,6 %	HESSISCHES MINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFT UND TECHNIK 1989 - unveröff.
	Gesamt-Streckennetz	5,7 %	19,8 %	42,8 %	30,7 %	DIW 1994
Nordrhein-Westfalen	Straßen in Wasserschutz-zonen	22,4 %	24,2 %	53,4 %		LANDSCHAFTSVERBAND RHEINLAND 1995 - unveröff.
	Gesamt-Streckennetz	7,2 %	17,2 %	75,6 %		MINISTERIUM FÜR STADTENTWICKLUNG UND VERKEHR DES LANDES NORDRHEIN-WESTFALEN 1994 - unveröff.

6.2 Durchführung von Risikoanalysen für straßenspezifische Einwirkungen

6.2.1 Vorbemerkung

Im Hinblick auf einen möglichst gezielten Einsatz der i.d.R. öffentlichen Mittel im Einzelfall werden im folgenden aus den Fehlerbaumanalysen zu ständigen Einwirkungen (s. Abschn. 5.5.2), vorübergehenden Einwirkungen (s. Abschn. 5.5.3) und außergewöhnlichen Einwirkungen (s. Abschn. 5.5.4) Vorschläge zur Reihenfolge der zu untersuchenden Fragestellungen bei der Risikoanalyse und -bewertung erarbeitet.

6.2.2 Ständige Einwirkungen

Für die bei der Risikoanalyse und -bewertung ständiger Einwirkungen zu untersuchenden Fragestellungen wird folgende Reihenfolge vorgeschlagen:

- 1) Kann eine breitflächige, ungebündelte (=dezentral gem. ATV A 138) Entwässerung und Versickerung über den bewachsenen Fahrbahnrand die straßenspezifischen Stoffgehalte im Sickerwasser auf ein akzeptables Maß begrenzen?

- 2) Kann die verbleibende Grundwasserüberdeckung in Verbindung mit der bewachsenen belebten Bodenzone (1) die straßenspezifischen Stoffgehalte im Sickerwasser auf ein akzeptables Maß reduzieren?
- 3) Kann der Eintrag straßenspezifischer Stoffe ins Grundwasser durch eine konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche, konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen (Weiterleitung) und eine konvektionsdichte Behandlung des Fahrbahnabflusses (Absetzbecken mit Leichtstoffabscheider) auf ein akzeptables Maß begrenzt werden?

Die grundsätzlich anzustrebende Reduktion der Emissionen beim Betrieb der Kfz ist nur schwer und langfristig durchsetzbar und dürfte wegen der Betriebsdauer des hohen Fahrzeugbestandes nur stark zeitverzögert wirksam werden, so daß diese "Schutzmaßnahme" bei einer Risikoanalyse im Einzelfall ggf. nur langfristig berücksichtigt werden kann.

Die regelmäßige Pflege der Grünflächen wird - unabhängig vom Grundwasserschutz - an allen Außerortsstraßen durchgeführt. Eine mechanische Reinigung der Fahrbahnoberfläche erscheint bei Außerortsstraßen wegen des hohen Reinigungsaufwandes und der Verkehrsbeeinträchtigung bei üblicherweise nur ca. 30 % Reinigungseffektivität (SIEKER & GROTTKER 1988) wenig zweckmäßig, so daß diese "Schutzmaßnahme" nur in Sonderfällen zum Einsatz kommen dürfte.

6.2.3 Vorübergehende Einwirkungen

Für die bei der Risikoanalyse und -bewertung vorübergehender Einwirkungen zu untersuchenden Fragestellungen wird folgende Reihenfolge vorgeschlagen:

- 1) Kann auf die Tausalanzwendung verzichtet werden?
- 2) Können die tausalzspezifischen Stoffeinträge ins Grundwasser durch eine Verminderung bzw. Optimierung der Tausalzstreuung auf ein akzeptables Maß begrenzt werden?
- 3) Können tausalzspezifische Stoffeinträge ins Grundwasser durch eine konvektionsdichte Fahrbahnoberfläche und eine konvektionsdichte Ableitung aus dem gefährdeten Gebiet verhindert werden?

Wegen der bereits erwähnten Risikoverlagerung (s. Abschn. 5.2.2) ist ein Verzicht auf Tausalanzwendung kritisch zu sehen.

Die Optimierung der Tausalzstreuung ist aus Kostengründen grundsätzlich anzustreben.

6.2.4 Außergewöhnliche Einwirkungen

Für die bei der Risikoanalyse und -bewertung außergewöhnlicher Einwirkungen zu untersuchenden Fragestellungen wird folgende Reihenfolge vorgeschlagen:

- 1) Kann das Risiko der Emission wassergefährdender Stoffe durch Unfälle akzeptiert werden?
- 2) Bietet die Durchlässigkeit der oberflächennahen Bodenschichten in Verbindung mit Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen ausreichenden Schutz für das Grundwasser?
- 3) Kann das Unfallrisiko durch verkehrstechnische Sicherheitsmaßnahmen auf ein akzeptables Maß begrenzt werden?
- 4) Kann das Unfallrisiko durch Fahrverbote für Transporte wassergefährdender Stoffe auf ein akzeptables Maß begrenzt werden?
- 5) Kann die Gefährdung des Grundwassers durch folgende Schutzmaßnahmen auf ein akzeptables Maß begrenzt werden?
 - passive Schutzeinrichtungen
 - konvektionsdichte Entwässerungseinrichtungen
 - Absetzbecken mit Leichtstoffabscheidern und Rückhaltevolumen

Die grundsätzlich anzustrebenden Verbesserungen der allgemeinen Fahrzeugsicherheit und der Sicherheit der Transportbehälter sind wegen des internationalen Transitverkehrs nur schwer und langfristig durchsetzbar und dürften wegen des hohen Fahrzeugbestandes stark zeitverzögert wirksam werden, so daß diese "Schutzmaßnahmen" bei einer Risikoanalyse im Einzelfall nicht berücksichtigt werden können.

7 Zusammenfassung und Schlußfolgerungen

Im Rahmen von Literatur- und Datenauswertungen wurden mögliche Gefährdungen des Grundwassers im Einflußbereich von Straßen erfaßt und hinsichtlich der Kriterien stoffliche Beschaffenheit, Menge, zeitliches Auftreten, oberirdische und unterirdische Verlagerung beschrieben. Auf dieser Grundlage wurde dann die Wirkungsweise der verfügbaren Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers untersucht, um deren Art und Umfang variierenden standort-spezifischen Randbedingungen anpassen zu können.

Die beim normalen Straßenbetrieb vor allem durch Verbrennungsabgase, Abrieb von Brems- und Fahrbahnbelägen und Tropfverluste emittierten wassergefährdenden Stoffe, die einer potentiellen Verlagerung ins Grundwasser zur Verfügung stehen, werden als **ständige Einwirkungen** definiert. Die Erkenntnisse der zu ständigen Einwirkungen durchgeführten Literatur- und Datenauswertungen werden wie folgt zusammengefaßt:

Die Konzentrationen der Stoffe aus ständigen Einwirkungen im Fahrbahnabfluß unterliegen großen, von der Intensität des einzelnen Niederschlagsereignisses abhängigen Schwankungen. Straßenspezifische Schwermetalle liegen im Fahrbahnabfluß überwiegend als Feststoffpartikel oder an Feststoffpartikel gebunden vor, die durch Sedimentation und/oder Filtration zurückgehalten werden können. Der Fahrbahnrand und die Entwässerungsmulde bis ca. 2 m Abstand vom Fahrbahnrand sind der durch Fahrbahnabfluß und Spritzwasser am stärksten belastete Bereich. Ein Vergleich der mittleren Stoffgehalte im Fahrbahnabfluß von Bundesautobahnen mit großer Verkehrsbelastung mit den Grenz- und Richtwerten der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990) ergibt beim CSB und den Mineralölkohlenwasserstoffen eine erhebliche Überschreitung. Hintergrundbelastungen aus anderen, nicht straßenspezifischen anthropogenen Emittenten können in Abhängigkeit von der Siedlungs- und Gewerbestruktur der Umgebung einen nennenswerten Anteil an den Stoffgehalten im Fahrbahnabfluß haben.

Bei den meisten straßenspezifischen Stoffen aus ständigen Einwirkungen liegt ein signifikanter linearer Zusammenhang zur Verkehrsstärke vor, so daß sich die durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke (DTV in Kfz/24h) als Bestimmungsgröße zur indirekten Quantifizierung ständiger Einwirkungen eignet.

Innerhalb der obersten Bodenschicht wird bereits ein großer Teil der Stoffe aus ständigen Einwirkungen zurückgehalten. Nur ein sehr geringer Teil der straßenspezifischen Schwermetalle wird mit dem oberflächennahen Sickerwasser verlagert. Daher ist eine breitflächige ungebundelte Entwässerung und Versickerung des Fahrbahnabflusses (Begrenzung der Stofffrachten) über bewachsene Seitenstreifen grundsätzlich vorteilhaft. Festgesteine sind im Vergleich zu Lockergesteinen als weniger schützend zu bewerten, da die Wasserbewegung über Klüfte bzw. Karsthohlräume abläuft. Dies vermindert im Vergleich mit Lockergesteinen gleicher Systemdurchlässigkeit, das heißt bei gleichem Massentransport je Fläche und Zeit, die Filtration (größerer Durchmesser der einzelnen durchströmten Porenkanäle), die Sorption (geringeren Sorptionsflächen und kürzerer Verweildauer), den Abbau und die Umwandlung (kürzere Verweildauer in Strömungsrichtung), so daß das Rückhalte- und Reinigungsvermögen klüftiger Festgesteine für Stoffe aus ständigen Einwirkungen reduziert ist.

Die Anwendung von Tausalz zur Bekämpfung der winterlichen Straßenglätte wird als **vorübergehende Einwirkung** definiert. Die Erkenntnisse der zur Tausalzstreuung durchgeführten Literatur- und Datenauswertungen werden wie folgt zusammengefaßt:

In Abhängigkeit von den örtlichen Verhältnissen kann das Grundwasser bereits durch geogene Salzgehalte (Gesteinsart des Grundwasserleiters) sowie eine Vielzahl anderer anthropogener Salzemittenten (z.B. Landwirtschaft) vorbelastet sein.

Die flächenbezogen ausgebrachte Tausalzmenge und damit die Tausalzkonzentrationen im Fahrbahnabfluß sind in erster Linie witterungsabhängig. Das Verkehrsaufkommen, die Ausbringungstechnik und die Organisation des Winterdienstes sind weitere Einflußgrößen. Die streckenbezogen anfallende Tausalzmenge hängt bei einheitlichen Witterungsbedingungen von der aufzutauenden Fläche (Breite bzw. Straßenquerschnitt) ab.

Quentin (1972 - zit. in BROD 1993) bewertet Natriumchlorid als störenden Stoff; laut UBA (1991a) kann NaCl als "*im allgemeinen nicht wassergefährdend*" (Wassergefährdungsklasse 0) eingestuft werden. Im Rahmen der ausgewerteten Untersuchungen überschritten die Gehalte tausalzspezifischer Stoffe im Fahrbahnabfluß während der Wintermonate

und teilweise auch als Jahresmittelwerte die Grenz- und Richtwerte der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990).

Die oberirdische Verlagerung der tausalzspezifischen Stoffe erfolgt überwiegend mit dem Fahrabfluß. Die tausalzspezifischen Natriumgehalte werden infolge Sorption (Ionenaustausch) bereits in der obersten Bodenschicht stark reduziert. Die tausalzspezifischen Chloride sind im Untergrund sehr mobil, da sie weder mikrobiell abgebaut, noch nennenswert durch chemische Ausfällungen, Mitfällereffekte oder Ionenaustausch vermindert werden. Deshalb liegt zwischen der für die Grundwasserneubildung als vorteilhaft anzusehenden breitflächigen Entwässerung und Versickerung über den Fahrabfluß einerseits und dem Grundwasserschutz andererseits ein Zielkonflikt vor. Bei geringer Bodendurchlässigkeit kann es in Abhängigkeit von der Niederschlags- und Sickerwassermenge zur Akkumulation der tausalzspezifischen Stoffe in den oberen Bodenschichten kommen.

Die Emission wassergefährdender Stoffe aufgrund von Straßenverkehrsunfällen wird als **außergewöhnliche Einwirkung** definiert. Die Erkenntnisse der hierzu durchgeführten Literatur- und Datenauswertungen werden wie folgt zusammengefaßt:

Von der amtlichen Statistik wurden im Zeitraum von 1983 bis 1992 jährlich im Durchschnitt 309 Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe auf Straßen (minimal 258, maximal 356) erfaßt (Auswertung der Daten aus STATISTISCHES BUNDESAMT 1986 -1994).

Das jährlich ausgelaufene Volumen betrug von 1986 bis 1992 durchschnittlich ca. 384 m³ und unterlag mit einer Standardabweichung von ca. 108 m³ starken Schwankungen, die im betrachteten Zeitraum keinem identifizierbaren Trend folgen. Die Wiedergewinnungsquote schwankte dabei nur geringfügig um den Mittelwert von ca. 68 % bei einer Standardabweichung von ca. 4,4 %, wobei auch hier kein Trend erkennbar war (Auswertung der Daten aus STATISTISCHES BUNDESAMT 1986 -1994). Bei einer Spannweite von 0 bis 50 m³ sind bei 831 ausgewerteten Einzel-Unfällen durchschnittlich 1,65 m³ wassergefährdender Stoffe ausgelaufen; der Modalwert betrug 0,1 m³, der 95 %-Perzentilwert 9,7 m³ (Auswertung von Einzeldaten). Mit größter Häufigkeit (ca. 60 %) wurde leichtes Heizöl/Diesel emittiert (Auswertung von Einzeldaten). Eine gleichmäßige (ungewichtete) Verteilung der in den

Jahren von 1983 bis 1992 gemäß amtlicher Statistik erfaßten Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe auf Straßen (Daten aus STATISTISCHES BUNDESAMT 1987-1993) auf das gesamte Streckennetz öffentlicher Straßen (überörtlicher Verkehr einschl. Ortsdurchfahrten) der alten Bundesländer der Bundesrepublik Deutschland (Daten aus DIW 1994) ergibt eine mittlere Unfallwiederholungsdauer von 568 Jahren je km.

Die oberirdische Verlagerung der durch Unfälle emittierten wassergefährdenden Stoffe hängt in erster Linie vom jeweiligen Unfallhergang ab, wobei die Grundfälle "*Unfall auf der befestigten Fahrbahn*" und "*Unfall außerhalb der befestigten Fahrbahn*" unterschieden werden können. Das Abkommen von der Fahrbahn war in einer Untersuchung der BASt (PÖPPEL & KÜHNEN 1993) mit 53 % Anteil die häufigste Unfallursache bei Gefahrguttfahrzeugen, so daß auf passive Schutzeinrichtungen hinsichtlich des Unfallherganges besonderes Augenmerk zu legen ist.

Ottokraftstoffe werden vor allem wegen ihres hohen Migrationspotentials (MK 2) und weiterhin wegen des hohen, je Unfall ausgelaufenen Volumens (Mittelwert) hinsichtlich der unterirdischen Verlagerung der durch Unfälle emittierten wassergefährdenden Stoffe als maßgebend (Leitparameter) bewertet. Bei der Infiltration von Ottokraftstoffen in den Boden handelt es sich prinzipiell um eine hochgradig instationäre Mehrphasenströmung, da die Durchlässigkeit und die Kapillarität des Bodens für die einzelnen Phasen von der räumlich und zeitlich veränderlichen Sättigungsverteilung sowie bei feinkörnigen Böden zusätzlich von der durch Quell- und Schrumpfvorgänge veränderlichen Porenraumstruktur abhängen. Da die Schadstoffeingabe ohne nennenswerten Aufstau mit geringem Druck erfolgt, wirkt als "äußere" Kraftkomponente nahezu ausschließlich die Gravitation. Die aktive kapillare Saugspannung innerhalb der Sättigungsfront wirkt als weitere Kraftkomponente der Infiltrationsströmung. In geklüfteten oder verkarsteten Festgesteinen muß mit einer schnelleren vertikalen Verlagerung von Ottokraftstoffen als in Lockergesteinen gerechnet werden.

Im Rahmen von Risikobetrachtungen und -bewertungen ist im Einzelfall zu ermitteln, ob das vorhandene Risiko aus ständigen, vorübergehenden und außergewöhnlichen Einwirkungen akzeptiert werden kann, durch Schutzmaßnahmen zu mindern ist oder ausgeschlossen werden muß.

Folgende hydrogeologische Schutzwirkungen können hierbei berücksichtigt werden:

Ständige Einwirkungen	• unverletzte bewachsene belebte Bodenzone • Aufbau und Durchlässigkeit der verbleibenden Grundwasserüberdeckung
Vorübergehende Einwirkungen	• Mächtigkeit und Strömungsgeschwindigkeit des Grundwassers
Außergewöhnliche Einwirkungen	• Mächtigkeit und Durchlässigkeit der oberflächennahen Grundwasserüberdeckung (ab etwa - 1 m unter Gelände)

Aus den drei Teil-Bewertungen des vorhandenen Risikos für ständige, vorübergehende und außergewöhnliche Einwirkungen ergeben sich unter Berücksichtigung der zwei Bewertungsmöglichkeiten "*Risikominderung erforderlich / nicht erforderlich*" acht mögliche Variationen der Gesamtbewertung. Bei sieben dieser Bewertungs-Variationen werden zusätzliche Schutzmaßnahmen zur Risikominderung erforderlich. Folgende Arten von Schutzmaßnahmen stehen hierfür zur Verfügung:

Betriebliche Maßnahmen	Verkehrstechnische Maßnahmen	Bautechnische Maßnahmen
• Reinigungs- und Pflegemaßnahmen	• Verminderung der Emissionen beim Betrieb der Kfz	• passive Schutzeinrichtungen
• Verringerung/Optimierung der Tausalzanwendung	• Allgemeine verkehrstechnische Maßnahmen zur Erhöhung der Verkehrssicherheit	• Entwässerungseinrichtungen
• Sofort- und Folgemaßnahmen nach Unfällen beim Transport wassergefährdender Stoffe	• Erhöhung der Sicherheit von Fahrzeugen zum Transport wassergefährdender Stoffe • Fahrverbot für Transporte wassergefährdender Stoffe und/oder gefährlicher Stoffe	• Untergrundabdichtungen

Die Art und der Umfang der zusätzlich zu ergreifenden Schutzmaßnahmen sind im Einzelfall neben den Erfordernissen des Grundwasserschutzes auch an die gegebenen Randbedingungen anzupassen. Exemplarisch seien die örtlichen Verhältnisse (Querschnittstopographie, Hydrogeologie), bautechnische Gegebenheiten (Neubaustrecke oder bestehende Strecke) und wirtschaftliche Überlegungen (z.B. als Dichtungsmaterial geeigneter Aushub) genannt.

Alle in Betracht kommenden Schutzmaßnahmen sind auf ihre Wirksamkeit zu prüfen. Die genannten Arten bautechnischer Schutzmaßnahmen sind im Hinblick auf die Wirksamkeit und die Zuverlässigkeit nach folgenden Kriterien zu prüfen:

- BÖHRINGER, A.; RÖSCHMANN, R.; DOMHAN, M. (1965): Durchführung von Anfahrversuchen an Leitplanken zur Erzielung einer möglichst hohen Verkehrssicherheit an Bundesfernstraßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 42, Bonn, 91 S.
- BÖHRINGER, A.; RÖSCHMANN, R.; DOMHAN, M. (1970): Anfahrversuche an Leitplanken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 98, Bonn, 156 S.
- BRAUNS, J.; KAST, K.; REITH, H. (1993): Langzeitverhalten von oberflächennahen Bodenabdichtungen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten. Forschungsvorhaben FE 05.097 G91G im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Schlußbericht. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe
- BREITENSTEIN, J. (1995): Entwicklung einer Kenngröße der Winterlichkeit zur Bewertung des Tausalzverbrauchs. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hrsg.), Reihe Verkehrstechnik, Heft V18. Bergisch Gladbach. 29 S.
- BREITENSTEIN, J. (1996): Bewertung des Streusalzverbrauchs. Straße + Autobahn, 47. Jg., H. 2, S. 68-73
- BRESSIN, M. (1985): Unfälle beim Transport gefährlicher Güter auf der Straße 1982-1984. Forschungsberichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Bereich Unfallforschung, Heft 126, Bergisch-Gladbach
- BROD, H.G. (1979): Auswirkungen von Auftausalzen auf Boden, Oberflächen- und Grundwasser entlang der Bundesautobahnen. In: Zeitschrift für Vegetationstechnik 2, Juli-September, S. 93-153
- BROD, H.G. (1993): Langzeitwirkung von Streusalz auf die Umwelt. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hrsg.), Reihe Verkehrstechnik, Heft V2. Bergisch Gladbach. 165 S.
- BROD, H.G. (1995): Risiko-Abschätzung für den Einsatz von Tausalzen - Folgen für die Umweltmedien unter Berücksichtigung neuester Tendenzen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hrsg.), Reihe Verkehrstechnik, Heft V21. Bergisch Gladbach. 60 S.
- BRONSTEIN, I.N.; SEMENDJAJAEW, K.A. (1987): Taschenbuch der Mathematik. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main
- BUNDESAMT FÜR GÜTERVERKEHR; KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (1992a): Fernverkehr Deutscher Lastkraftfahrzeuge 1992. Band LD, Bundesamt für Güterverkehr, Köln (Hrsg.)
- BUNDESAMT FÜR GÜTERVERKEHR; KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (1992b): Grenzüberschreitender Fernverkehr ausländischer Lastkraftfahrzeuge 1992. Band LA, Bundesamt für Güterverkehr, Köln (Hrsg.)
- BUNDESAMT FÜR GÜTERVERKEHR; KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (1993a): Fernverkehr Deutscher Lastkraftfahrzeuge 1993. Band LD, Bundesamt für Güterverkehr, Köln (Hrsg.)

- BUNDESAMT FÜR GÜTERVERKEHR; KRAFTFAHRT-BUNDESAMT (1993b): Grenzüberschreitender Fernverkehr ausländischer Lastkraftfahrzeuge 1993. Band LA, Bundesamt für Güterverkehr, Köln (Hrsg.)
- BUNDESMINISTER FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ UND REAKTORSICHERHEIT (1990): Allgemeine Verwaltungsvorschrift über die nähere Bestimmung wassergefährdender Stoffe und ihre Einstufung entsprechend ihrer Gefährlichkeit - VwV wassergefährdende Stoffe (VwVwS) -. Bonn.
- BURKHARDT, G.; EGLOFFSTEIN, TH. (1995): Risikostudien für Deponiestandorte. Seminar "Deponiestandorte mit Risikofaktoren - Gleichwertigkeit von Dichtungssystemen für Erleichterung und Systemverbesserung" des VDI-Bildungswerkes, Schriftenreihe des Lehrstuhles für angewandte Geologie der Universität Karlsruhe, H. 35, S. 4-1...4-18
- CICHOS, A. (1992): Vertikale Schwermetallverlagerung im Bankettbereich stark befahrener Bundesfernstraßen. Abschlußbericht im Auftrag der Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Projekt-Nr.: 91 604, Bergisch Gladbach, 98 S.
- CONRAD, J. (Hrsg.) (1983): Gesellschaft, Technik und Risikopolitik; BMFT-Risiko- und Sicherheitsforschung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer
- DAM, J., van (1967): Die Ausbreitung von Mineralöl in grundwasserführenden Schichten. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Jg. 11, H. 1, S. 15-28
- DAUSCHECK, H.; BISCHOFBERGER, W. (1986): Beeinträchtigung von Grund- und Oberflächenwasser durch Auftausalze in Schutzzonen. Berichte aus Wassergütwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Nr. 30, Lehrstuhl für Wassergüte und Gesundheitsingenieurwesen, Technische Universität München, 135 S.
- DEMME, S. (1993): Analyse des Emissionsverhaltens einer Kombinationsabdichtung im Rahmen der Risikobetrachtung von Abfalldeponien. Schriftenreihe des Instituts für Grundbau, Heft 21, Diss., Ruhr-Universität Bochum
- DIW (DEUTSCHES INSTITUT FÜR WIRTSCHAFTSFORSCHUNG) (1994): Verkehr in Zahlen 1994. Der Bundesminister für Verkehr, Bonn (Hrsg.). Berlin: 355 S.
- DREYHAUPT, F.-J. (Hrsg.) (1994): Lexikon Umwelttechnik. Düsseldorf: VDI-Verlag, 1349 S.
- EICHMEYER, H.; BOEHM, W.; BREDEL-SCHÜRMANN, S. (1995): Untersuchung der Eignung bergmännischer Verfahren zur nachträglichen Sohlabdichtung von Deponien. In: 3. Arbeitstagung "Deponieabdichtungssysteme", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin. S. 367-375
- ESSER, J. (1980): Untersuchungen über die Abgaskonzentration in Abhängigkeit von den Verkehrsdaten. Bundesanstalt für Straßenwesen (BAST), Bergisch-Gladbach, 32 S.
- ESSER, J. (1981): Das Problem der Abgasausbreitung und der Schadstoffanreicherung im Nahbereich von Straßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 352, Bonn-Bad Godesberg, S. 129-140
- FILLIBECK, J. (1994): Untersuchungen zur Eignung von Kunststoff-Dichtungsbahnen für die Anwendung als Abdichtungsmaterial bei Straßen in Wassergewinnungsgebieten.

Schlußbericht zum Forschungsvorhaben FE 05.095 G89G im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München

- FINSTERWALDER, K. (1992): Stofftransport durch mineralische Abdichtungen. In: THOME-KOZSMIENSKY, K.J. (Hrsg.): Deponie - Ablagerung von Abfällen 4. Berlin, S. 141-157
- FISCHER, B.; HEINING, H.; BEYER, W.; SCHWEIGER, K.H. (1968): Grundwasserschutz bei oberirdischer Mineralöllagerung - Problematik und ökonomische Lösungen. Deutsche Bauakademie zu Berlin, Schriftenreihen der Bauforschung, Reihe Ingenieur- und Tiefbau, H. 9, S. 8-16
- FLOSS, R. (1995): Konstruktive Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers. Seminar "Erdbau für Verkehrswege" der Landesgewerbeanstalt Bayern (LGA), 16. und 17.02.1994 in Nürnberg
- FRITZE, E. (1994): Sorgenkind Tankstelle. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Heft 7, S. 25-27
- GOLWER, A., SCHNEIDER, W. (1983a): Untersuchungen über die Belastung des unterirdischen Wassers mit anorganischen toxischen Spurstoffen im Gebiet von Straßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 391, Bonn, S. 1-23
- GOLWER, A., SCHNEIDER, W. (1983b): Untersuchungen über die Belastung des Grundwassers mit organischen Stoffen im Bereich von Straßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 391, Bonn, S. 25-47
- GOLWER, A. (1991): Belastung von Böden und Grundwasser durch Verkehrswege. In: Forum Städte-Hygiene, Berlin, S. 266-275
- GRUNAU, E.B. (1995): Abdichtung gegen Öle, Treibstoffe und Chemikalien. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Heft 1, S. 14-19
- GruSiBau (1981): Grundlagen zur Festlegung von Sicherheitsanforderungen für bauliche Anlagen. Deutsches Institut für Normung (DIN), Berlin
- GÜNTHER, G.H. (1980): Anprallschäden an Distanzschutzplanken und Geländern auf Brücken von Bundesfernstraßen. Straße und Autobahn, Heft 12/1980, S. 536-539
- HAAS, H. (1995a): Anmerkungen zum Forschungsbericht 201 der Bundesanstalt für Materialforschung und Materialprüfung. Bitumen 1/95, S. 16-19
- HAAS, H. (1995b): Abschließender Kommentar zur Stellungnahme von Prof. Dr. H. August zu dem in dieser Zeitschrift, Heft 1/95 veröffentlichten Aufsatz "Deponieabdichtungssysteme mit Asphalt - Anmerkungen zum Forschungsbericht 201 der Bundesanstalt für Materialforschung und Materialprüfung". Bitumen 3/95, S. 120-121
- HAUS, R. (1993): Mikrogefügeänderungen toniger Böden nach Kohlenwasserstoffkontamination und Tensideinsatz - Porenverteilung, Durchlässigkeit und Sorption -. Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Heft 25

- HEIDE (1992): Maßnahmen an bestehenden Straßen in Wassergewinnungsgebieten. Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), 32. Erfahrungsaustausch über Erdarbeiten im Straßenbau, S. 70-75
- HENSEN, W. (1960): Das Aufnahmevermögen von Sanden für Mineralölprodukte. In: Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau, Heft 18, Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover. S. 178-204
- HESSISCHE LANDESANSTALT FÜR UMWELT (1992): Trinkwasser- und Heilquellenschutzgebiete in Hessen. Umweltplanung, Arbeits- und Umweltschutz, Heft Nr. 145, Wiesbaden
- HEYER, D. (1989a): Natürliche Dichtungsstoffe zum Grundwasserschutz. In: Erd- und Grundbautagung 1989 in Würzburg, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Schriftenreihe der Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Heft 5, Bonn, S. 5-8
- HEYER, D. (1989b): Geotechnische Untersuchungen von Abdichtungsmaterialien. Ergänzung zum Forschungsbericht 102 02 207 im Auftrag des Umweltbundesamtes, in: Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 104, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV) (Hrsg.), Köln, S. 55-65
- HEYER, D. (1994): Grundsatzuntersuchungen zur Wirksamkeit von Bentonitdichtungsmatten. In: Fachtagung "Geokunststoff-Ton-Dichtungen GTD", 14./15.04.1994; Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 71, Nürnberg. S. 111-124
- HEYER, D. (1995): Einsatz und Eigenschaften von Bentonitmatten. Lehrstuhl und Prüfamf für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München, Schriftenreihe, Heft 21, S. 75-88
- HEYER, D.; BEER, N.; ASCHERL, R. (1995): Bedeutung der Fremdüberwachung bei Abdichtungsmaßnahmen mit Bentonitmatten. 4. Informations- und Vortragsveranstaltung "Kunststoffe in der Geotechnik", GEOTECHNIK, Sonderheft 1995, S. 129-135
- HEYER, D.; FLOSS, R. (1994): Abdichtungsmaßnahmen zum Grundwasserschutz an Verkehrsflächen. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (Hrsg.), Vorträge der Baugrundtagung 1994 in Köln, S. 465-475
- HEYER, D.; SCHEUFELE, G. (1989): Auswertung und Beurteilung bisher in der Praxis angewandter bautechnischer Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten. Forschungsbericht 102 02 207 im Auftrag des Umweltbundesamtes, in: Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 104, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV) (Hrsg.), Köln, S. 1-54
- HÖLTING, B. (1991): Geogene Grundwasserbeschaffenheit und ihre regionale Verbreitung in der Bundesrepublik Deutschland. In: ROSENKRANZ, EINSELE & HARRES (Hrsg.): Bodenschutz - Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen ..., Band 1. 1300, S. 1-36, Erich Schmidt Verl. Berlin
- HOLTMEIER, E.-L. (1988): Die wasserrechtlichen Anforderungen an den Umgang mit wassergefährdenden Stoffen. Symposium "Umweltsicherheit beim Umgang mit

- wassergefährdenden Stoffen", Aachen, 3. und 4.03.1988, IWS-Schriftenreihe, Bd. 4, Berlin, S. 49-67
- HOSSER, D.; KÖNIG, G.; SPREY, W. (1988): Probabilistische Zuverlässigkeitsanalysen. In: Abschlußbericht "Sicherheitsuntersuchungen auf probabilistischer Grundlage für Staudämme", Grundlagenband, Teil IX. Frankfurt. S. 298-355
- JESSBERGER, H.L.; ONNICH, K.; FINSTERWALDER, K.; MANN, U. (1993): Versuche und Berechnungen zum Schadstofftransport durch mineralische Abdichtungen und daraus resultierende Materialentwicklungen. In: Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM) (Hrsg.), BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme, 3. Arbeitstagung (Statusseminar), 21. März - 23. März 1995, Berlin. S. 267-281
- JESSBERGER, H.L.; ONNICH, K.; FINSTERWALDER, K.; BEYER, K. (1995): Versuche und Berechnungen zum Schadstofftransport durch mineralische Abdichtungen und daraus resultierende Materialentwicklungen. In: BMBF-Verbundforschungsvorhaben Weiterentwicklung von Deponieabdichtungssystemen, 2. Arbeitstagung, 17. März - 19. März 1993, Berlin. S. 175-184
- KLEINSCHROTH, A. (1994): Einführung in die Hydrologie. Vorlesung im Fachbereich Bauingenieurwesen; Lehrstuhl für Hydraulik und Gewässerkunde der Technischen Universität München, S. 5
- KLUGE, H.-J. (1994): Besonderheiten bei Eignungsprüfungen, Herstellung und Einbau von Asphalt im Wasserbau und im Deponiebau. Bitumen 4/94, S. 166-173
- KOCH, M. (1989): Die Umweltverträglichkeitsprüfung von Vorhaben - Straßen. In: Handbuch der Umweltverträglichkeitsprüfung (HdUVP), 4595, Berlin: Erich Schmid-Verlag, 74 S.
- KOHLRAUSCH, F. (1968): Praktische Physik - Band 1. Stuttgart: Teubner, 621 S.
- KORECK, H.-W. (1979): Probleme bei der Lagerung von Mineralöl. In: Festschrift zum 65. Geburtstag von o. Prof. Dr.-Ing. Richard Jelinek, Lehrstuhl und Prüfamt für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität München. S. 175-195
- KRASS, K. (1985): Industrielle Nebenprodukte - Ökonomische Straßenbaustoffe oder ökologische Gefahr? Straße und Autobahn, Heft 10/1985, S. 403-407
- KRAUTH, KH.; KLEIN, H. (1982): Untersuchungen über die Beschaffenheit des Oberflächenwassers von Bundesautobahnen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 363, Bonn-Bad Godesberg, 73 S.
- KRIEGER, B. (1996): Schadstoffe im Straßenbegleitgrün - Erfassung, Beschreibung und Beurteilung. Straße + Autobahn 2/96, S. 84-86
- KROLEWSKI, H. (1959): Über das Verhalten von Mineralöl im Boden. Dissertation. In: Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau, Heft 16, Franzius-Institut der Technischen Hochschule Hannover. S. 191-274
- KUCHLING, H. (1988): Taschenbuch der Physik. Verlag Harri Deutsch, Thun und Frankfurt/Main, 10. Aufl., 672 S.

- LAMPRECHT, H.O. (1976): Größere Sicherheit im Straßenverkehr durch Betonleitwände. Straße und Autobahn 27, Heft 10, S. 407-408
- LANGE, G.; MOOG, K.-H.; GOLWER A. (1993): Potentielle Beeinträchtigung des Grundwassers durch den Verkehr - Problemanalyse. Hrsg.: Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau (DVWK), i.A. d. Büros für Technologiefolgenabschätzung des Deutschen Bundestages (TAB), Bonn, 242 S.
- LEO, R.; R. H. LILJE (1987): Ölwehrhandbuch - Bekämpfung von Ölunfällen im Inland und auf See, Hamburg, 252 S.
- MADSEN, F.; NÜESCH, R. (1994): Eigenschaften und abdichtende Wirkung von Bentoniten. In: Fachtagung "Geokunststoff-Ton-Dichtungen GTD", 14./15.04.1994; Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 71, Nürnberg, S. 39-58
- MELCHIOR, S.; VIELHABER, B.; BERGER, K.; MIEHLICH, G. (1994a): In-situ-Untersuchungen zur Austrocknung bindiger, mineralischer Oberflächenabdichtungen. In: "Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien - 1994 -", 10. Nürnberger Deponieseminar, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Landesgewerbeanstalt Bayern (LGA), H. 72, Nürnberg, S. 265-277
- MELCHIOR, S.; VIELHABER, B.; BERGER, K.; MIEHLICH, G. (1994b): Das Austrocknungsverhalten von mineralischen Oberflächenabdichtungen. Seminar "Oberflächenabdichtungssysteme für Deponien und Altlasten" des VDI-Bildungswerkes, Schriftenreihe des Lehrstuhles für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe, H. 34, S. 223-241
- MULL, R. (1969): Modellmäßige Beschreibung der Ausbreitung von Mineralölprodukten im Boden. Diss., Mitt. aus d. Inst. f. Wasserwirt. u. landwirt. Wasserbau, TU Hannover, H. 15
- ONNICH, K.; MANN, U.; JESSBERGER, H. L.; FINSTERWALDER, K. (1991): Versuche und Berechnungen zum Schadstofftransport durch mineralische Abdichtungen und daraus resultierende Materialentwicklungen. In: BMFT-Verbundvorhaben Deponieabdichtungssysteme, 1. Arbeitstagung, 23. September - 25. September 1991, Berlin, S. 125-132
- PPAFF, T. (1995): Risikoanalysen für Deponiestandorte. In: Fachtagung "Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien - 1995 -", 11. Nürnberger Deponieseminar; Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Nürnberg, S. 185-200
- PÖPPEL, M.; KÖHNEN, M. (1993): Straßenverkehrsunfälle von Gefahrguttfahrzeugen 1989 bis 1991. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt), Unterreihe "Mensch und Sicherheit", Heft M 5, Bergisch-Gladbach, 62 S.
- RACKWITZ, R. (1993): Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik im konstruktiven Ingenieurbau. Manuskript zur Vertiefervorlesung im Fach Massivbau, Technische Universität München, S. 1.1

- REINIRKENS, P. (1992): Ermittlung und Beurteilung straßenbedingter Auswirkungen auf die Landschaftsfaktoren Boden und Wasser. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 626, Bonn-Bad Godesberg, 144 S.
- REUTER, E. (1988): Durchlässigkeitsverhalten von Tonen gegenüber anorganischen und organischen Säuren. Diss., Mitt. d. Inst. f. Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, H. 26
- RIDDER, K. (1991): Gefährliche Transportgüter - Maßnahmen zur Bekämpfung von Gefahrgutunfällen. In: Verkehrsnachrichten 1/2-91. S. 17-22
- ROWE, W.D. (1983): Ansätze und Methoden der Risikoforschung; in: CONRAD, J. (Hrsg.) (1983): Gesellschaft, Technik und Risikopolitik; BMFT-Risiko- und Sicherheitsforschung. Berlin, Heidelberg, New York: Springer, S. 15-43
- SCHALLES, K. (1988): Markierungen und Umwelt. Internat. Straßen- und Verkehrskonferenz "Straßen und Verkehr 2000", Proc., Band 2, Berlin, S. 205 f
- SCELLENBERG, K. (1995): Neuere Untersuchungen zum Einsatz von Asphalt im Deponiebau. In: 3. Arbeitstagung "Deponieabdichtungssysteme", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin. S. 61-70
- SCHIEGG, H.O. (1977): Methode zur Abschätzung der Ausbreitung von Erdölderivaten in mit Wasser und Luft erfüllten Böden. Heft Nr. 22 der Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich.
- SCHIEGG, H.O. (1979): Verdrängungs-Simulation dreier nicht mischbarer Fluide in poröser Matrix (Ausbreitung von Erdölderivaten in Grundwasserträgern). Heft Nr. 40 der Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, 271 S.
- SCHIEGG, H.O. (1980): Grundlagen, Aufbau und Resultate von Laborexperimenten zur Erforschung von Ölausbreitungen in Grundwasserträgern. Heft Nr. 43 der Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich, 191 S.
- SCHLEYER, R.; KERNDORFF, H. (1992): Die Grundwasserqualität westdeutscher Trinkwasserressourcen - Eine Bestandsaufnahme für den vorbeugenden Grundwasserschutz sowie zur Erkennung von Grundwasserverunreinigungen. VCH Verl. Weinheim
- SCHMIDT, R.; HEYER, D. (1995): Bentonitdichtungsmatten und ein geschlossenes Gußrohrsystem zum Schutz des Grundwassers bei Straßen in Wassergewinnungsgebieten - Ein neues Baukonzept sichert die Grundwasserqualität im Zuge der A 96 in Leutkirch. Straße + Autobahn, 46. Jg., H. 7, S. 394-399
- SCHNEIDER, W.; GÖTTNER, J.-J. (1991): Schadstofftransport in mineralischen Tonabdichtungen und natürlichen Tonschichten. Geologisches Jahrbuch, Reihe C, Heft 58. Hannover
- SCHNEIDER, W. (1991): Empfehlungen des Arbeitskreises "Geotechnik der Deponien und Altlasten" - E 6-2: Stofftransportmodelle - ein Beurteilungsinstrument für die

Barrierenwirkung von Abdichtungsschichten (Entwurf). In: Bautechnik 68, H. 9, S. 312-315

SCHNEIDER, J. (1994): Sicherheit und Zuverlässigkeit im Bauwesen. Zürich: Verl. der Fachvereine; Stuttgart: Teubner-Verl.

SCHNÜLL, R.; HANDKE, N.; GAUSE, F.; GÖCKE, B.; PATZSCHKE, P.; PRENZLOW, U.; SCHRÖDER, T.; WIEBESIEK, S.; ENGEL, W. (1993): Schutzeinrichtungen an Bundesfernstraßen. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hrsg.), Reihe Verkehrstechnik, Heft V6. Bergisch Gladbach. 111 S.

SCHORB, A. (1988): Untersuchungen zum Einfluß von Straßen auf Boden, Grund- und Oberflächenwässer am Beispiel eines Testgebietes im Kleinen Odenwald. Diss., Heidelberger geographische Arbeiten, H. 80

SCHUHBAUER, A. (1994): Asphaltbeton als Basisabdichtung von Deponien? Bautechnik 71 (1994), H. 9, S. 566-581

SCHULTE, W. (1994): Anwendungen und Erfahrungen bei Betonschutzwänden in Deutschland. In: Informationen - Verkehrsplanung und Straßenwesen - Univ. d. Bundeswehr, Heft 40, München, S. 189-202

SCHWEIGER, K.-H. (1966): Beitrag zur Untersuchung der Durchlässigkeit fein- und grobkörniger Böden für Wasser und Mineralöle. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 15, Heft 5. S. 941-952

SCHWEIGER, K.-H. (1967): Beitrag zur Untersuchung der Kapillarität fein- und grobkörniger Böden für Wasser und Mineralöle. In: Wissenschaftliche Zeitschrift der Technischen Universität Dresden, 16, Heft 1. S. 161-167

SCHWILLE, F. (1966): Die Kontamination des Untergrundes durch Mineralöl - ein hydrologisches Problem. Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen, Jg. 10, H. 6, S. 194-207

SIEKER, F.; GROTTKE, M. (1988): Beschaffenheit von Straßenoberflächenwasser bei mittlerer Verkehrsbelastung. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 530, Bonn-Bad Godesberg, 158 S.

SPRINGER, E.; BEIER, A.; KLUGE, H.-J. (1991): Beständigkeit und Dichtigkeit von Asphalt gegen Mineralölprodukte. Bitumen 2/91, S. 84-88

STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.) (1987): Ergebnisbericht zur Statistik der Unfälle bei der Lagerung und beim Transport wassergefährdender Stoffe 1984-1986. Beirat beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit "Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe (LTwS)", Ausschuß "Statistik", Wiesbaden, 18 S.

STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.) (1989): Ergebnisbericht zur Statistik der Unfälle bei der Lagerung und beim Transport wassergefährdender Stoffe 1985-1987. Beirat beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit "Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe (LTwS)", Ausschuß "Statistik", Wiesbaden, 18 S.

- STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.) (1990): Ergebnisbericht zur Statistik der Unfälle bei der Lagerung und beim Transport wassergefährdender Stoffe 1986-1988. Beirat beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit "Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe (LTwS)". Ausschuß "Statistik", Wiesbaden, 18 S.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.) (1991): Ergebnisbericht zur Statistik der Unfälle bei der Lagerung und beim Transport wassergefährdender Stoffe 1987-1989. Beirat beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit "Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe (LTwS)". Ausschuß "Statistik", Wiesbaden, 18 S.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (Hrsg.) (1992): Ergebnisbericht zur Statistik der Unfälle bei der Lagerung und beim Transport wassergefährdender Stoffe 1988-1990. Beirat beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit "Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe (LTwS)". Ausschuß "Statistik", Wiesbaden, 21 S.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (1993): Ergebnisbericht zur Statistik der Unfälle bei der Lagerung und beim Transport wassergefährdender Stoffe 1989-1991. Wiesbaden, 21 S.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (1994): Ergebnisbericht zur Statistik der Unfälle bei der Lagerung und beim Transport wassergefährdender Stoffe 1992. Wiesbaden, 26 S.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (1995): Unfälle bei der Lagerung und beim Transport wassergefährdender Stoffe 1993 - ausgewählte Ergebnisse (Arbeitsunterlage). Berlin, 26 S.
- STOCKMEYER, M.R.; MÜLLER, E.R.; STIEFEL, A. (1994): Wechselwirkung Sickerwasser-Tonmineralien; Adsorption und Retardation von Schadstoffen durch mineralische Basisabdichtungen. In: Fachtagung "Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien - 1994 -", 10. Nürnberger Deponieseminar; Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 72. Nürnberg. S. 129-145
- STÖTZ, G.; KRAUTH, K. (1987): Menge und Beschaffenheit von Straßenoberflächenwasser beim Abfluß über bewachsene Seitenstreifen, Mulden und Böschungen - Auswertung von Forschungsarbeiten. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 509, Bonn-Bad Godesberg
- TEGETHOF, U.; CICHOS, A. (1994): Vertikale Schwermetallverlagerung in Banketten von Bundesautobahnen. In: Straße + Autobahn 10/94, S. 627-638
- UBA, UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1990): Beurteilung und Behandlung von Mineralölschadensfällen im Hinblick auf den Grundwasserschutz. Beirat beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Ausschuß "Wasser/Mineralöl" des Beirates Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe (LTwS), Berlin. 143 S.
- UBA, UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1991a): Katalog wassergefährdender Stoffe. Beirat beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Beirat Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe (LTwS), Berlin. 243 S.

- UBA, UMWELTBUNDESAMT (Hrsg.) (1991b): Überlegungen für ein stoffspezifisches Bewertungsschema für das Verhalten von wassergefährdenden Stoffen im Untergrund. Beirat beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit, Ausschuß "Verhalten von wassergefährdenden Stoffen" des Beirates Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe (LTWS), LTWS Nr. 25, Berlin. 27 S.
- UNGER, H.-J.; PRINZ, D. (1992): Verkehrsbedingte Immissionen in Baden-Württemberg - Schwermetalle und organische Fremdstoffe in straßennahen Böden und Aufwuchs. Ministerium für Umwelt Baden-Württemberg (Hrsg.), Reihe "Luft, Boden, Abfall", Heft 19, Stuttgart, 191 S.
- WALZENBACH, J. (1991): Mineralöle in Locker- und Festgesteinen - Untersuchungen zur Durchlässigkeit, Saugspannung und Kapillarität. In: Schriftenreihe Angewandte Geologie Karlsruhe, Heft 12
- ZECH, J. (1983): Ausgewählte Probleme im Verhältnis von öffentlichem Straßenbau und Grundwasser. (Diss.) Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Schriftenreihe "Straßenrecht", Heft 13, Bonn

8.2 Normen, Richtlinien, Merkblätter

- ATV Arbeitsblatt A 138 (1990): Bau und Bemessung von Anlagen zur dezentralen Versickerung von nicht schädlich verunreinigtem Niederschlagswasser. Abwassertechnische Vereinigung, Regelwerk Abwasser-Abfall, St. Augustin, 15 S.
- ATV Arbeitsblatt A 142 (1992): Abwasserkanäle und -leitungen in Wassergewinnungsgebieten. Abwassertechnische Vereinigung, Regelwerk Abwasser-Abfall, St. Augustin, 9 S.
- BAM (1992): Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsabdichtung für Siedlungs- und Sonderabfalldeponien sowie für Abdichtungen von Altlasten. Bundesanstalt für Materialforschung- und Prüfung (BAM), Berlin
- BAYERISCHES LANDESAMT FÜR WASSERWIRTSCHAFT (1990): Beseitigung des Niederschlagswassers von befestigten Verkehrsflächen aus der Sicht des Gewässerschutzes. Slg.LfW, Teil 4, Merkblatt Nr. 42.1-12 vom 07.05.1990, München, 16 S.
- BPG Kunststoffbahnen (1984): Bau- und Prüfgrundsätze für Kunststoffbahnen als Abdichtungsmittel von Auffangwannen und Auffangräumen für die Lagerung wassergefährdender Flüssigkeiten. Bau- und Prüfgrundsätze für den Gewässerschutz, Teil 1, Schriften des Instituts für Bautechnik - IfBt - (Hrsg.), Reihe B, H. 1, Berlin, S. 28-60
- DIN 4022/1 (1986): Benennen und Beschreiben von Bodenarten und Fels; Schichtenverzeichnis für Bohrungen ohne durchgehende Gewinnung von gekernteten Proben im Boden und im Fels. Deutsches Institut für Normung, Berlin

- DIN 16726 (1986): Kunststoff-Dachbahnen, Kunststoff-Dichtungsbahnen - Prüfungen. Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DIN 18130 (1983): Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwertes; Laborversuche. Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DIN 18196 (1988): Erdbau; Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke und Methoden zum Erkennen von Bodengruppen. Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DIN 25424, Teil 1 (1981): Fehlerbaumanalyse; Methode und Bildzeichen. Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DIN 25424, Teil 2 (1990): Fehlerbaumanalyse; Handrechenverfahren zur Auswertung eines Fehlerbaumes. Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DVGW Arbeitsblatt W 101 (1975): Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; 1. Teil "Schutzgebiete für Grundwasser". DVGW-Regelwerk, Deutscher Verein von Gas- und Wasserfachmännern e.V., Eschborn
- DVGW Arbeitsblatt W 101 (1995): Richtlinien für Trinkwasserschutzgebiete; 1. Teil "Schutzgebiete für Grundwasser". DVGW-Regelwerk (Technische Regel), Deutscher Verein des Gas- und Wasserfachs e.V., Eschborn
- DVWK-Merkblatt 225 (1992): Anwendung von Kunststoffdichtungsbahnen im Wasserbau und für den Grundwasserschutz. Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Hamburg, Berlin
- DVWK (1995): Deponieabdichtungen in Asphaltbauweise - Entwurf Januar 1995 -. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Bonn.
- EAAW 83 (1983): Empfehlungen für die Ausführung von Asphaltarbeiten im Wasserbau (4. Ausg.). Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau (DGEG) (Hrsg.), Essen
- FGSV (1984): Merkblatt über die Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau, Teil: Nebengestein der Steinkohle. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe "Mineralstoffe im Erdbau", Köln. S. 7-8
- FGSV (1986): Merkblatt über die Verwendung von industriellen Nebenprodukten im Straßenbau, Teil: Müllverbrennungssasche (MV-Asche). Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe "Mineralstoffe im Erdbau", Köln. 9 S.
- FGSV (1993a): Hinweise für Maßnahmen an bestehenden Straßen in Wassergewinnungsgebieten. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen, Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Arbeitsausschuß "Bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten", Köln. 14 S.
- FGSV (1993b): Merkblatt für die Verwendung pechhaltiger Ausbaustoffe im Straßenbau unter Verwendung von Bitumenemulsionen. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe "Asphaltstraßen", Köln

- FGSV (1994): Merkblatt für die Verwendung von Ausbauasphalt und pechhaltigem Straßen-
aufbruch in Tragschichten mit hydraulischen Bindemitteln. Forschungsgesell-
schaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe "Betonstraßen",
Köln
- Gesetz zur Ordnung des Wasserhaushalts (Wasserhaushaltsgesetz - WHG) (1986), BGBl. T I,
v. 23.09.1986, 1529-1654
- GGVS (Gefahrgutverordnung Straße) (1987). BGBl. I, S. 1550 v. 22.07.1985; u. BGBl. I,
S. 2885 v. 21.12.1987
- RAS-EW (1987): Richtlinie für die Anlage von Straßen (RAS), Teil: Entwässerung (RAS-
Ew), Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeits-
gruppe "Erd- und Grundbau", Köln, 49 S.
- RiStWag (1982): Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewin-
nungsgebieten. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV),
Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Köln
- RPS (1989): Richtlinien für passive Schutzeinrichtungen an Straßen. Forschungsgesellschaft
für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe "Verkehrsführung und
Verkehrssicherheit", Köln
- TL SFA-StB 93 (1993): Technische Lieferbedingungen für Steinkohlenflugasche im Straßen-
bau. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeits-
gruppe "Mineralstoffe im Straßenbau", Köln
- TrinkwV (Trinkwasserverordnung) (1990): Verordnung über Trinkwasser und über Wasser
für Lebensmittelbetriebe. BGBl. I, S. 2613
- ZTVE-StB 94 (1994): Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten
im Straßenbau. Der Bundesminister für Verkehr (Hrsg.), Abteilung Straßenbau,
Bonn. 107 S.

9 Anlagen

Anlage 1: Literatur- und Datenauswertung zur Zuverlässigkeit von Schutzmaßnahmen

Anlage 2: Formblatt "Erhebung über Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe 1992", aus STATISTISCHES BUNDESAMT (1993)

Anlage 3: Formblatt "Unfall mit gefährlichen Gütern in Tanks oder Tankfahrzeugen", aus PÖPPEL & KÜHNEN (1993)

Anlage 4: Grenz- und Richtwerte für Stoffe und Parameter im Wasser

Anlage 5: Abkürzungen

Anlage 1: Literatur- und Datenauswertung zur Zuverlässigkeit von Schutzmaßnahmen

Inhalt

1 Zuverlässigkeit passiver Schutzeinrichtungen	1
1.1 Allgemeines	1
1.2 Distanzschutzplanken	1
1.3 Betongleitwände	1
1.4 Erdwälle	2
1.5 Passive Schutzeinrichtungen auf Brücken	2
2 Zuverlässigkeit von Entwässerungseinrichtungen	3
2.1 Fahrbahnoberfläche	3
2.2 Mulden und Gräben	3
2.3 Rinnen	4
2.4 Kanäle und Schächte	4
2.5 Absetzbecken und Leichtstoffabscheider	5
3 Zuverlässigkeit von Dichtungselementen	5
3.1 Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Dichtungselementen	5
3.2 Mineralische Abdichtungen	6
3.3 Kunststoffdichtungsbahnen (KDB)	12
3.4 Bentonitdichtungsmatten (GTD)	17
3.5 Asphaltbetondichtungen	25
4 Literatur zu Anlage 1	28

1 Zuverlässigkeit passiver Schutzeinrichtungen

1.1 Allgemeines

Die Beurteilung der Zuverlässigkeit passiver Schutzeinrichtungen umfaßt folgende Kriterien:

- **Beständigkeit** der verwendeten Werkstoffe gegenüber korrosiven straßenspezifischen Einwirkungen (Witterung, Tausalzstreuung, ...).
- Der erforderliche **Wartungsaufwand** (Häufigkeit und Umfang) sollte möglichst gering sein.
- Die **Robustheit** bei Anprallvorgängen sollte möglichst hoch sein, so daß der Reparaturbedarf nach Anprallvorgängen möglichst gering ist.

1.2 Distanzschutzplanken

Schutzplanken und Pfosten sind gemäß RPS (1989) feuerverzinkt auszuführen, so daß eine ausreichende **Beständigkeit** gegenüber straßenspezifischen Einflüssen (Witterung, Tausalzstreuung, ...) angenommen werden kann.

Bezüglich des **Wartungsaufwandes** ist anzumerken, daß

- Dilatationsstöße und geschraubte Fußplattenverankerungen der Pfosten einmal jährlich zu prüfen sind (RPS 1989) und
- die Schutzplanken an Straßen mit großer Verkehrsbelastung wegen der Gefährdung des Korrosionsschutzes periodisch von Schmutzschichten zu reinigen sind (RPS 1989).

Die **Robustheit** erscheint gering, weil die Stahlleitplanken bei insgesamt 55 Anfahrversuchen mit Pkw und Lkw (BÖHRINGER et al. 1965, 1970) jeweils erheblich deformiert wurden, so daß nach Anprallvorgängen in der Regel zumindest Teilstücke der Schutzplanken auszu-tauschen sind.

1.3 Betongleitwände

Bei ausreichender Berücksichtigung des Korrosionsschutzes (Betonüberdeckung und Beton-zusammensetzung) können keine Zweifel an der **Beständigkeit** der Betongleitwände begrün-det werden.

Obwohl die Betongleitwände selbst als wartungsfrei anzusehen sind, können die in Abschnitt 5.4.1.3 angesprochenen Entwässerungsprobleme und die Behinderung des Winterdienstes zu nennenswertem *Wartungsaufwand* führen.

Im Vergleich zu den anderen verfügbaren Bauweisen passiver Schutzeinrichtungen weisen Betongleitwände die höchste *Robustheit* bei Anprallvorgängen auf.

1.4 Erdwälle

Zweifel an der *Beständigkeit* gegenüber straßenspezifischen Einflüssen (Witterung, Tausalzstreuung, ...) können bei sachgerechter erdbautechnischer Ausführung (Standicherheit) nicht begründet werden.

Der *Wartungsaufwand* beschränkt sich auf die Pflege der Bepflanzung und wird deshalb wegen der längs der Strecke grundsätzlich erforderlichen Pflegemaßnahmen als gering bewertet.

Die *Robustheit* der massiven Erdwälle bei Anprallvorgängen wird als hoch bewertet. Zudem ist nach Anprallvorgängen nur mit einem geringen erdbautechnischen Reparaturaufwand zu rechnen.

1.5 Passive Schutzeinrichtungen auf Brücken

- **Distanzschutzplanken und Geländer mit eingelegten Stahlseilen am Fahrbahnrand (Standardbauweise)**

Schutzplanken und Pfosten sind gemäß RPS (1989) feuerverzinkt auszuführen, so daß eine ausreichende *Beständigkeit* gegenüber straßenspezifischen Einflüssen (Witterung, Tausalzstreuung, ...) angenommen werden kann.

Bezüglich des *Wartungsaufwandes* ist anzumerken, daß

- Dilatationssöße und geschraubte Fußplattenverankerungen der Pfosten einmal jährlich zu prüfen sind (RPS 1989) und
- die Schutzplanken an Straßen mit großer Verkehrsbelastung wegen der Gefährdung des Korrosionsschutzes periodisch von Schmutzschichten zu reinigen sind (RPS 1989).

Die *Robustheit* erscheint gering, weil die Stahlleitplanken bei insgesamt 55 Anfahrversuchen mit Pkw und Lkw (BÖHRINGER et al. 1965, 1970) jeweils erheblich deformiert wurden, so

daß nach Anprallvorgängen in der Regel zumindest Teilstücke der Schutzplanken auszu-tauschen sind.

Betonleitschwellen (ggf. mit aufgestockten Schutzplanken):

Siehe oben: Distanzschutzplanken und Betongleitwände

Betongleitwände: *Siehe oben: Betongleitwände*

2 Zuverlässigkeit von Entwässerungseinrichtungen

2.1 Fahrbahnoberfläche

Die gemäß RiStWag (1982) konvektionsdicht ausführbaren Betondecken und Befestigungen mit im Heißeinbau gefertigten bitumengebundenen Deckschichten sollten nach TV bit 3* oder TV bit 6* hergestellt werden. Im Hinblick auf die Konvektionsdichtigkeit der Fahrbahnoberfläche ist neben einem sachgerechten Einbau der Deckschichten (bituminöse Bauweise) bzw. der Decke (Betonbauweise) insbesondere auf eine ausreichende Frostsicherheit und Steifigkeit (Baustoffe und Einbauqualität) der Tragschichten und des Straßen-Unterbaus zu achten, um schädigende Verformungen zu vermeiden. Im Zusammenhang mit der Frost- und Standsicherheit ist weiterhin eine ausreichend leistungsfähige Planumsentwässerung zu beachten.

2.2 Mulden und Gräben

Anforderungen an die **Beständigkeit** gegenüber chemischen, biologischen und Witterungs-Einflüssen betreffen vor allem die ggf. zusätzlich angeordneten Untergrundabdichtungen, so daß hierzu auf Abschnitt 5.4.3 verwiesen wird.

Der **Wartungsaufwand** beschränkt sich auf die Pflege der Bepflanzung, die im Rahmen der Pflegemaßnahmen längs der Strecke grundsätzlich erforderlich ist.

* Technische Vorschriften und Richtlinien für den Bau bituminöser Fahrbahndecken (TV bit); Teil 3: Asphaltbeton und Sandasphalt (Heißeinbau); Teil 6: Gußasphalt und Asphaltmastix; Bundesminister für Verkehr, Bonn; zit. in RiStWag (1982)

Der **Sanierungsaufwand** nach Unfällen beim Transport wassergefährdender Stoffe im Bereich bewachsener Mulden und Gräben kann durch eine zusätzlich angeordnete Untergrundabdichtung stark eingeschränkt werden, weil der Bewuchs und die Bodenüberdeckung der Untergrundabdichtung eine großflächige Stoffausbreitung und -verlagerung behindern.

2.3 Rinnen

Bei der Abdichtung von Tankstellenflächen und Industrieflächen wurden im Hinblick auf die **Beständigkeit** abgedichteter Fugenkonstruktionen gegenüber chemischen, biologischen und Witterungs-Einflüssen bei sorgfältiger Ausführung Funktionsdauern von bis über 25 Jahre festgestellt (GRUNAU 1995). Für eine abschließende Bewertung der Beständigkeit abgedichteter Fugenkonstruktionen an Straßen erscheint der derzeitige Kenntnisstand - vor allem wegen der im Vergleich zu Tankstellenflächen andersartigen Beanspruchungen - jedoch unzureichend.

Bei ausreichender Beständigkeit beschränkt sich der zusätzliche **Wartungsaufwand** auf Reinigungsmaßnahmen.

Der **Sanierungsaufwand** bei Unfällen ergibt sich aus dem Reinigungsaufwand für die betroffenen Rinnenabschnitte und Entwässerungseinrichtungen und ist somit von den standort-spezifischen Randbedingungen, wie beispielsweise der Länge und der Zugänglichkeit der Rinnen abhängig.

2.4 Kanäle und Schächte

Bei ausreichender Berücksichtigung des Korrosionsschutzes (z.B. Schutzanstriche und Betonüberdeckung) können keine Zweifel an der **Beständigkeit** der Kanäle und Schächte begründet werden.

Der **Wartungsaufwand** ist in den ATV-Arbeitsblättern A 140, A 147 und A 148 geregelt und bezieht sich vor allem auf regelmäßige Reinigung und Prüfung.

Der *Sanierungsaufwand* bei Unfällen ergibt sich aus dem Reinigungsaufwand für die betroffenen Kanalabschnitte und die angeschlossenen Absetzbecken mit Leichtstoffabscheidern und ist somit von den standortspezifischen Randbedingungen, wie beispielsweise der Länge und der Zugänglichkeit der Kanäle, abhängig.

2.5 Absetzbecken und Leichtstoffabscheider

Die *Beständigkeit* gegenüber chemischen, biologischen und Witterungs-Einflüssen ist durch die Baustoffe und die Bauweise sicherzustellen. Bei abgedichteten Erdbecken wird auf Abschnitt 5.4.3 (Untergrundabdichtungen) verwiesen.

Der *Wartungsaufwand* ergibt sich vor allem durch die regelmäßig erforderliche Reinigung und Schlammräumung sowie bei Kombination mit einem Leichtstoffabscheider die regelmäßige Rückgewinnung von Leichtstoffen aus ständigen Einwirkungen.

Sofern das Absetzbecken mit einem Leichtstoffabscheider kombiniert ist, beschränkt sich der *Sanierungsaufwand* auf das kurzfristige Abpumpen der zurückgehaltenen Leichtstoffe und die Reinigung des Absetzbeckens nach Unfällen (außergewöhnliche Einwirkungen).

3 Zuverlässigkeit von Dichtungselementen

3.1 Anforderungen an die Zuverlässigkeit von Dichtungselementen

Hinsichtlich der Zuverlässigkeit wird eine ausreichende Beständigkeit der Dichtungselemente gegenüber folgenden mechanischen, chemischen, biologischen und klimatischen Einwirkungen (vgl. Abschnitt 5.4.3.3) gefordert:

Tabelle A-1: Mechanische, chemische, biologische und klimatische Einwirkungen auf Untergrundabdichtungen zum Grundwasserschutz an Straßen

Nr*:	Erläuterung der Einwirkung	Auftretenshäufigkeit
M1	Einbaubeanspruchung - z.B. durch Überschüttung und Verdichtung	außergewöhnlich
M2	dynamische Belastung aus der Befahrung unbefestigter Baufahrstraßen	vorübergehend
M3	statische Belastung aus Eigengewicht des Straßenoberbaus und der Überschüttung / parkenden Fahrzeugen	ständig / vorübergehend
M4	dynamische Belastung aus Straßenbefahrung	ständig
M5	Befahrung durch abkommende Fahrzeuge	außergewöhnlich
M6	Standsicherheit von Böschungen	ständig
C1	ständige chemische Einwirkungen (Milieubedingungen im Boden, auswaschbare Bestandteile von Baustoffen, gelöste und partikuläre Stoffe aus Verkehrsemissionen)	ständig
C2	Tausalzstreuung	vorübergehend
C3	konzentrierte Stoffe bei Unfällen	außergewöhnlich
B1	Durchwurzelung	ständig
B2	Kleintieraktivität	ständig
B3	mikrobieller Abbau	ständig
K1	Frost- / Tauwechsel	vorübergehend
K2	Trockenheit / Feuchte	ständig/vorübergehend

* Die hinsichtlich der Zuverlässigkeit zu berücksichtigenden Einwirkungen sind nach ihrer Art bezeichnet:
M... = mechanisch; C... = chemisch; B... = biologisch; K... = klimatisch

3.2 Mineralische Abdichtungen

Einbaubeanspruchungen (**Lastfall M1**) sind nicht relevant, da keine nachteilige Wirkung gegeben ist.

Dynamische Belastungen (**Lastfall M2**) aus der Befahrung unbefestigter Baufahrstraßen oberhalb mineralischer Abdichtungen aus feinkörnigen plastischen Böden sollten wegen möglicher Deformationen, die zu einer Beeinträchtigung der Dichtungswirksamkeit führen können, weitestgehend vermieden werden.

Gleichmäßige statische Belastungen aus dem Eigengewicht des Straßenoberbaus, der Überschüttung und aus parkenden Fahrzeugen (**Lastfall M3**) sind bei mineralischen Abdichtungen vorteilhaft, indem sie zu einer Verringerung des Porenvolumens und damit der Durchlässigkeit infolge Konsolidierung führen, so daß keine Gefährdung gegeben ist.

Wegen der großflächigen Spannungsausbreitung unter den steifen Trag- und Deckschichten, ist eine Gefährdung mineralischer Abdichtungen durch dynamische Lasten aus der Straßenbefahrung (**Lastfall M4**) nicht zu befürchten.

Bei Befahrung durch abkommende Fahrzeuge (**Lastfall M5**) ist eine Perforation der mineralischen Abdichtung bei geringer Überschüttungshöhe und/oder wenig tragfähiger Überschüttung und/oder geringer Mächtigkeit der mineralischen Abdichtung zu befürchten. Zum Schutz der mineralischen Abdichtung können folgende Maßnahmen ergriffen werden:

- Vergrößerung der Überschüttungshöhe und ausreichende Verdichtung der Überschüttung
- Anordnung passiver Schutzeinrichtungen, die ein Abkommen von der Fahrbahn verhindern
- Verwendung ausreichend tragfähiger, künstlich zusammengesetzter gemischtkörniger Böden als Dichtungsmaterial.

Die Erhöhung und ausreichende Verdichtung der Überschüttung ist grundsätzlich vorteilhaft, da diese eine zusätzliche schützende Wirkung gegenüber den Einwirkungen Durchwurzelung, Kleintiertätigkeit, Frost und Trockenheit bietet. Wegen der Kippgefahr für abkommende Tankfahrzeuge und damit im Hinblick auf außergewöhnliche Einwirkungen sollte das Abkommen von der Fahrbahn durch ausreichend dimensionierte passive Schutzeinrichtungen prinzipiell verhindert werden, so daß dann auch dieser Lastfall vermieden würde. Die Verwendung tragfähiger künstlich zusammengesetzter gemischtkörniger Böden als Dichtungsmaterial ist bei nachgewiesener Wirksamkeit grundsätzlich sinnvoll, da diese Böden im Vergleich zu feinkörnigen Böden zu einer Erhöhung der Standsicherheit führen.

Bei unzureichender Standsicherheit von Böschungen (**Lastfall M6**) ist die Wirksamkeit des Dichtungssystems gefährdet. Es können folgende Schutzmaßnahmen ergriffen werden:

- Ermittlung der Scherparameter und der maßgebenden Scherfugen unter in-situ-Randbedingungen in Laboruntersuchungen und rechnerischer Nachweis der Standsicherheit.
- Erforderlichenfalls Erhöhung der Standsicherheit durch Bewehrungselemente oder die Verwendung natürlicher oder im Hinblick auf die Dichtungswirksamkeit vergüteter gemischtkörniger Böden als Dichtungsmaterial.
- Große Sorgfalt beim Einbau und der Verdichtung im Böschungsbereich - erforderlichenfalls sind besondere Bauweisen, wie ein sukzessiver Aufbau aus stufenartigen horizontalen Lagen (HEYER & SCHEUFELE 1989), oder besondere Bautechniken, wie von der Böschungskrone an Seilen geführte Verdichtungswalzen, hilfreich.

Bei ausreichender Berücksichtigung der genannten Schutzmaßnahmen in Abhängigkeit von den standortspezifischen Randbedingungen kann eine Gefährdung der Wirksamkeit vermieden werden.

Wegen der möglichen Eindringung der Stoffe aus ständigen und vorübergehenden Einwirkungen in die mineralische Abdichtung (**Lastfälle C1 und C2**) ist eine mögliche Beeinträchtigung der dichtungswirksamen Eigenschaften (v.a. Quellvermögen) zu untersuchen. In den Untersuchungen von BRAUNS et al. (1993) zum Langzeitverhalten unterschiedlich zusammengesetzter mineralischer Abdichtungen gemäß RiStWag (1982) an sechs Straßenstandorten in Baden-Württemberg und Hessen (B27 - UL; A98 - TM; L597 - UM; A66 - TL; A66 - TL; A66 - TM) konnte keine Beeinflussung der Dichtungswirksamkeit durch geochemische und mineralogische Veränderungen infolge der genannten chemischen Einwirkungen festgestellt werden. Deshalb und aufgrund der geringen Konzentrationen wassergefährdender Stoffe aus ständigen Einwirkungen im Fahrabfluß (s. Abschn. 4.1.1.3) kann die resultierende Gefährdung der Wirksamkeit mineralischer Abdichtungen als gering bewertet werden, so daß die genannten zusätzlichen Schutzmaßnahmen nicht erforderlich sein dürften. Jedoch sollte die chemische Beständigkeit vorgesehener Dichtungsmaterialien gegenüber straßenspezifischen Stoffen aus ständigen und vorübergehenden Einwirkungen im Rahmen der Eignungsuntersuchungen grundsätzlich beurteilt werden.

Hinsichtlich der möglichen Eindringung der bei Unfällen austretenden konzentrierten wassergefährdenden Stoffe (außergewöhnliche Einwirkungen) in die mineralische Abdichtung (**Lastfall C3**) ist eine mögliche Beeinträchtigung der dichtungswirksamen Eigenschaften (v.a. Quellvermögen) zu untersuchen. Im Rahmen der nach Unfällen beim Transport wassergefährdender Stoffe kurzfristig durchzuführenden Sofort- und Folgemaßnahmen zur Rückgewinnung der ausgetretenen wassergefährdenden Stoffe ist eine Sanierung der betroffenen Bereiche der mineralischen Abdichtung grundsätzlich anzuraten, so daß dann eine langfristige Beständigkeit gegenüber diesen außergewöhnlichen chemischen Einwirkungen nicht erforderlich ist.

Die Durchwurzelung mineralischer Abdichtungen (**Lastfall B1**) kann zu einer verminderten Dichtungswirksamkeit längs der Wurzelkanäle führen, die bei den Untersuchungen von BRAUNS et al. (1993) in nennenswertem Umfang bis in 1 m Tiefe reichten. In den Untersuchungen von BRAUNS et al. (1993) an bis zu 10 Jahre alten ungestörten oder weitgehend ungestörten durchwurzelten Proben lagen die Durchlässigkeitsbeiwerte stets unterhalb der Anforderung von $k = 1 \cdot 10^{-7}$ m/s gemäß RiStWag (1982), so daß BRAUNS et al. (1993) eine nur untergeordnete Beeinflussung der Durchlässigkeitseigenschaften folgern. Sofern die mineralische Abdichtung gut verdichtet sowie in ausreichender Mächtigkeit mit kulturfähigem Material mit ausschließlich flachwurzelndem Bewuchs überdeckt wird, kann nach BRAUNS et al. (1993) die Beeinträchtigung der Dichtungswirksamkeit infolge Durchwurzelung minimiert werden.

Kleintiertätigkeit (**Lastfall B2**) kann zu durchgehenden Perforationen (Regenwurmrohren und Mausgänge) in der mineralischen Abdichtung und somit zu einer Beeinträchtigung der Dichtungswirksamkeit führen. In den Untersuchungen von BRAUNS et al. (1993) reichten Mauslöcher lediglich bis in eine Tiefe von ca. 20 cm, so daß bei ausreichender Mutterbodenüberdeckung eine diesbezügliche Gefährdung vermieden werden kann. Jedoch reichten Regenwurmrohren bei bis zu ca. 1 cm Durchmesser bis zu 3 m tief in den Untergrund, so daß längs dieser "Kanäle" eine bevorzugte Wasserwegigkeit und somit insgesamt eine verminderte Dichtungswirksamkeit gegeben ist. Nach BRAUNS et al. (1993) kann die mineralische Abdichtung durch eine ausreichend mächtige kulturfähige Überdeckung, eine Begrenzung des organischen Anteils im Dichtungsmaterial, eine gute Verdichtung der mineralischen

Abdichtung und ausreichende Pflegemaßnahmen - oftmaliges Mähen, und sofortige Entfernung von Nährückständen geschützt werden. Da eine Bewertung des Einflusses der Kleintier-tätigkeit auf die Dichtungswirksamkeit oberflächennaher mineralischer Abdichtungen nach BRAUNS et al. (1993) schwierig ist, sollte die resultierende Gefährdung durch die genannten Maßnahmen minimiert werden. Eine örtlich begrenzte Gefährdung der Wirksamkeit kann zwar nicht ausgeschlossen werden, dürfte jedoch kaum zu einer erheblichen Gefährdung der Wirksamkeit der mineralischen Abdichtung führen.

Eine Gefährdung der nahezu vollständig aus anorganischen Materialien bestehenden minerali-schen Abdichtungen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten durch mikrobiellen Abbau (**Lastfall B3**) ist nicht zu befürchten.

Wechselnde Frost- und Taueinwirkungen (**Lastfall K1**) auf bindige mineralische Dichtungs-materialien führen zu räumlichen Zergliederungen und Aggregationen, die je nach Art und Umfang der eingetretenen Gefügestörungen wiederum zu einer Verminderung der Dichtungs-wirksamkeit führen können. Bei den als "gering bis mittel frostempfindlich" oder "sehr frost-empfindlich" (ZTVE-StB 94 1994) zu klassifizierenden mineralischen Dichtungsmaterialien können Frosteinwirkungen weiterhin zu Verformungen (Eislinsenbildung) oder zu einem Ab-fall der Tragfähigkeit (Frostaufgang) führen. Es können folgende Schutzmaßnahmen ergriffen werden:

- Eignungsprüfungen mit Dichtungsmaterialien unter realistischen in-situ-Bedingungen. sind prinzipiell anzuraten. BRAUNS et al. (1993) schlagen einen "Vorhaltungswert" (Sicherheitszuschlag) von z.B. einer halben Zehnerpotenz auf den geforderten Laborwert der Durchlässigkeit zur Berücksichtigung eventueller frostbedingter Erhöhungen der Durchlässigkeit in situ vor.
- In befahrenen Bereichen sollte zur Gewährleistung einer ausreichenden Tragfähigkeit grundsätzlich eine Trag- und Frostschutzschicht über der mineralischen Abdichtung an-geordnet werden.
- Gegenüber der derzeitigen RiStWag (1982), in der lediglich eine Überdeckung mit ca. 0,2 m Mutterboden vorgesehen ist, wird in nicht befahrenen Bereichen eine Vergröße-rung der Überdeckung in Abhängigkeit von der standortspezifischen Frosteindringtiefe an-geraten, die zudem gegenüber anderen Einwirkungen, wie Perforation durch abkommende Fahrzeuge, Durchwurzelung und Austrocknung, schützend wirkt. Als Anhaltswerte für die Verhältnisse in Deutschland werden in Tabelle A-2 die von BEHR (1984) im Rahmen von statistischen Auswertungen ermittelten Frosteindringtiefen genannt:

Tabelle A-2: Mindesttiefen der Frosteindringung [cm] alle m Jahre (aus BEHR 1984)

m	Münster	Hamburg	Bamberg Nürnberg	München	Kahler Asten
3	51	60	64	71	82
5	54	69	71	76	85
10	65	83	86	85	95

Aus den Anhaltswerten wird eine Spannweite der erforderlichen frostschtützenden Überdeckung von 0,6 m bis 1 m abgeleitet (in Hochlagen ggf. noch größer). Bei Beachtung der genannten Schutzmaßnahmen kann eine Gefährdung der Wirksamkeit der mineralischen Abdichtung durch Frosteinwirkung vermieden werden.

- Die in befahrenen Bereichen einzubauende Frostschtutzschicht zur Gewährleistung einer ausreichenden Tragfähigkeit richtet sich nach den einschlägigen Richtlinien, wie z.B. den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO).
- Eine Zugabe von Zement oder Kalk zur Verringerung der Frostempfindlichkeit ist bei Dichtungsmaterialien kritisch zu sehen, da sie zu einem Anstieg der Durchlässigkeit führt. Im Rahmen von Eignungsuntersuchungen ist ggf. eine Optimierung der konkurrierenden Ziele - Frostschtutz und Dichtungswirksamkeit - möglich.
- Nach VOIGT (1994) sollte ein Gefrieren der mineralischen Abdichtung während des Einbaus aufgrund der dann besonders großen Gefährdung grundsätzlich ausgeschlossen werden.

Witterungsbedingte Schwankungen des Boden-Wasserhaushalts (**Lastfall K2**) können zu folgenden Gefährdungen der Dichtungswirksamkeit mineralischer Abdichtungen führen:

- Langfristige - ggf. irreversible - Störung der Struktur und damit der Dichtungswirksamkeit durch alternierende Quell- und Schrumpfvorgänge.
- Vorübergehend eingeschränkte Dichtungswirksamkeit während Trockenperioden in den Sommermonaten aufgrund von durchgehenden Trockenrissen in der mineralischen Abdichtung, die durch anschließende Quellung wieder geschlossen werden.

Eine zur Gefährdung der Wirksamkeit mineralischer Abdichtungen durch Austrocknungsvorgänge (**Lastfall K2**) durchgeführte Literatur- und Datenauswertung wird wie folgt zusammengefaßt:

- Nach BRAUNS et al. (1993) ist aufgrund von Austrocknungseffekten zumindest temporär mit einer verminderten Dichtungswirksamkeit oberflächennaher mineralischer Abdichtungen im Bereich von Straßen zu rechnen, die jedoch bei ausreichenden Anteilen quellfähiger Tonminerale reversibel sei.
- Zur Austrocknungsgefährdung von Deponieabdichtungen werden derzeit Labor- und Felduntersuchungen im Rahmen mehrerer Forschungsvorhaben durchgeführt, die jedoch noch

nicht abgeschlossen sind (GOTTHEIL & BRAUNS 1993,1995; GRÄSLE et al. 1995; HORN & BAUMGARTL 1995; HOLZLÖHNER 1993, HOLZLÖHNER & ZIEGLER 1995; MELCHIOR et al. 1994a,b; SAVIDIS et al. 1993,1995; SCHMIDT & BOHNE 1995). MELCHIOR et al. (1994a,b), deren Felduntersuchungen an einer bindigen mineralischen Oberflächenabdichtung gut auf die Verhältnisse im Bereich von Straßen übertragen werden können, stellten im Verlauf von fünf Jahren eine zunehmende erhebliche Durchsickerung der Dichtung aufgrund von austrocknungsbedingten Schrumpfungen fest. Auch die Laboruntersuchungen von HORN & BAUMGARTL (1995) ergaben nach drei Be- und Entwässerungsvorgängen Zunahmen des Durchlässigkeitsbeiwertes um bis zu eine Zehnerpotenz. Die Untersuchungen von SAVIDIS et al. (1995) ergaben, daß das Selbstheilungsvermögen austrocknungsbedingter Risse (vgl. BRAUNS et al. 1993) in mineralischen Abdichtungen schwierig zu bewerten ist, da es sowohl von materialgesteuerten Faktoren (Tonmineralart und -gehalt) bestimmt wird, als auch von der Reißgeometrie selbst sowie auflastbedingten Faktoren, so daß die Schädigung durch Trockenrisse einen besonders kritischen Fall darstellt.

- Die austrocknungsbedingte Schrumpfrißbildung ist für den Lastfall außergewöhnliche Einwirkungen besonders kritisch, da eine mögliche Selbstheilung der Risse bei Wasserzutritt durch Quellung mit Mineralölprodukten, die in durchschnittlich 76 % der Unfälle austreten, nicht stattfindet und Schrumpfungsprozesse ggf. sogar verstärkt werden, so daß dann eine beschleunigte vertikale Verlagerung zu befürchten ist. Es wird angeraten, bei der Eignungsprüfung von Dichtungsmaterialien unter Berücksichtigung der standortspezifischen Randbedingungen besonderes Augenmerk auf das Schrumpfverhalten in Zusammenhang mit dem Verdichtungszustand und dem Wassergehalt zu legen.
- Als weitere Schutzmaßnahmen kommen eine Vergrößerung der Überschüttungshöhe, eine gute Verdichtung der mineralischen Abdichtung und erforderlichenfalls eine künstliche Bewässerung während anhaltender Trockenperioden in Frage.

Zusammenfassend kann eine gewisse Verringerung der Wirksamkeit der mineralischen Abdichtung durch austrocknungsbedingte Schrumpfrisse (Lastfall K2) nach derzeitigem Kenntnisstand nicht ausgeschlossen werden. Aufgrund der Untersuchungen von BRAUNS et al. (1993) an bis zu 10 Jahre alten ungestörten oder weitgehend ungestörten Proben, in denen auch die teilweise erhöhten Anfangsdurchlässigkeiten stets unter dem in den RiStWag (1982) geforderten Durchlässigkeitsbeiwert von $k \leq 1 \cdot 10^{-7}$ m/s lagen, kann die resultierende Gefährdung der Wirksamkeit der mineralischen Abdichtung als gering bewertet werden.

3.3 Kunststoffdichtungsbahnen (KDB)

Beim Einbau (**Lastfall M1**: Überschüttung und Verdichtung) ist eine Gefährdung der KDB durch Dellen, Kerben, im Extremfall Verlust der Wirksamkeit durch Perforationen möglich. Die genannten Beschädigungen der KDB sind in Abb. A-1 veranschaulicht.

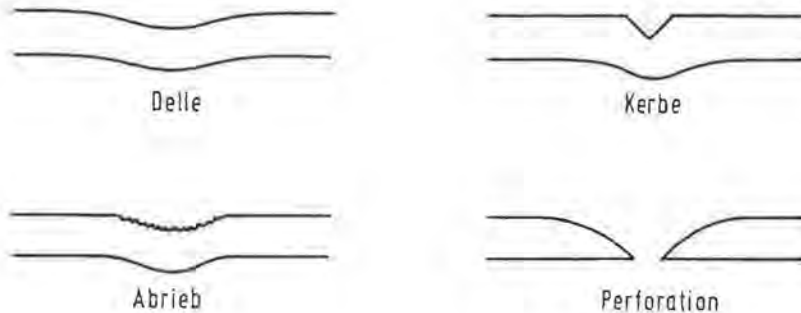


Abb. A-1: Mögliche Verformungen von Kunststoffdichtungsbahnen - aus FILLIBECK (1994)

Die genannten Einbaubeschädigungen können verhindert werden, wenn bei der Planung und Ausführung des Dichtungssystems folgendes beachtet wird:

- ausreichende Dimensionierung geotextiler oder mineralischer Schutzschichten für die KDB im Zusammenhang zu den vorgesehenen Auflager- und Überschüttmaterialien bei Eignungsprüfungen - Anlage von Probefeldern oder ggf. Laboruntersuchungen
- glatte, ausreichend verdichtete und tragfähige Auflagerfläche ohne sprunghafte Höhenunterschiede vorbereitet
- die Überschüttung der verlegten und verschweißten KDB sollte entweder mit einer Raupe oder einem Bagger vor Kopf erfolgen, wobei das Dichtungssystem (KDB und Schutzschichten) nicht direkt befahren werden darf.

Bei dynamischen Belastungen aus der Befahrung unbefestigter Baufahrstraßen (**Lastfall M2**) sind Beschädigungen der KDB durch tiefe Dellen (ggf. mit Abrieb), Kerben, im Extremfall Verlust der Wirksamkeit durch Perforationen möglich. Die genannten Beschädigungen der KDB sind in Abb. A-1 veranschaulicht. Zum Schutz der KDB sollte diesbezüglich bei der Planung und Ausführung des Dichtungssystems folgendes beachtet werden*:

- glatte, ausreichend verdichtete und tragfähige Auflagerfläche ohne sprunghafte Höhenunterschiede

* FILLIBECK (1994) hat aus diesbezüglichen umfangreichen Labor- und Felduntersuchungen Hinweise zur Dimensionierung geotextiler Schutzschichten abgeleitet.

- Mineralische oder geotextile Schutzschichten, die in Abhängigkeit von den standortspezifischen Randbedingungen im Rahmen von Eignungsprüfungen (Probefelder und/oder Laboruntersuchungen) zu dimensionieren sind. Nach FILLIBECK (1994) sollten bei diesem Lastfall im Sinne von Bemessungsgrößen die resultierenden Dehnungen der KDB auf maximal 3 % begrenzt und Perforationen, Kerben mit Dickenänderung und Abriebstellen (s. Abb. A-1) nicht zugelassen werden.

Bei statischen Belastungen aus dem Eigengewicht des Straßenoberbaus, der Überschüttung und parkenden Fahrzeugen (**Lastfall M3**) ist eine mögliche Gefährdung der KDB durch tiefe Dellen, Kerben, im Extremfall Verlust der Wirksamkeit durch Perforationen (s. Abb. A-1) zu beachten. Die Untersuchungen von FILLIBECK (1994) ergaben, daß die statische Belastung im Vergleich zur Befahrung unbefestigter Baufahrstraßen und durch abkommende Fahrzeuge als nicht maßgebend zu bewerten ist, so daß eine Gefährdung bei hinreichender Bemessung des Dichtungssystems für den Lastfall M2 vermieden werden kann. Zum Schutz der KDB eignen sich die beim Lastfall M2 genannten Maßnahmen.

Bei dynamischen Belastungen aus der Befahrung der befestigten Fahrbahn im Endzustand (**Lastfall M4**) sind Beschädigungen der KDB durch tiefe Dellen (ggf. mit Abrieb), Kerben, im Extremfall Verlust der Wirksamkeit durch Perforationen möglich. Die genannten Beschädigungen der KDB sind in Abb. A-1 veranschaulicht. Zum Schutz der KDB sollte diesbezüglich bei der Planung und Ausführung des Dichtungssystems folgendes beachtet werden*:

- glatte, ausreichend verdichtete und tragfähige Auflagerfläche ohne sprunghafte Höhenunterschiede
- Mineralische oder geotextile Schutzschichten... für M2 zu bemessen
- Um mögliche dynamische Verformungen innerhalb der Überdeckung der KDB, die ihrerseits das schädigende Ausmaß der dynamischen Belastungen bestimmen, zu minimieren, sollte der über der KDB liegende Straßenaufbau (Deckschicht, Tragschichten, Überschüttung) möglichst steif ausgebildet werden.
- Eine Vergrößerung der Überdeckung der KDB wirkt zusätzlich schützend.

Im Hinblick auf die möglichen Beschädigungen von KDB - vor allem Kerben und Dellen mit Abrieb (s. Abb. A-1) - erscheint die dynamische Belastung aus der Befahrung unbefestigter, gering überschütteter KDB unter Baufahrstraßen gegenüber der großflächigen Spannungsausbreitung unter den steifen Trag- und Deckschichten maßgebend, so daß eine Gefährdung bei hinreichender Bemessung des Dichtungssystems für den Lastfall M2 vermieden werden kann.

• **M5 Befahrung durch abkommende Fahrzeuge**

Bei der Befahrung durch abkommende Fahrzeuge (**Lastfall M5**) sind Beschädigungen der KDB durch tiefe Dellen (ggf. mit Abrieb), Kerben, im Extremfall ein Verlust der Wirksamkeit durch Perforationen möglich. Die genannten Beschädigungen der KDB sind in Abb. A-1 veranschaulicht. Zum Schutz der KDB sollte diesbezüglich bei der Planung und Ausführung des Dichtungssystems folgendes beachtet werden*:

- Vergrößerung der Überschüttungshöhe und ausreichende Verdichtung der Überschüttung
- Anordnung passiver Schutzeinrichtungen, die ein Abkommen von der Fahrbahn verhindern

Die Erhöhung und ausreichende Verdichtung der Überschüttung ist grundsätzlich vorteilhaft, da diese eine zusätzliche schützende Wirkung gegenüber mechanischen Einwirkungen bietet, und zudem die Verankerung passiver Schutzeinrichtungen erleichtert. Wegen der Kippgefahr für abkommende Tankfahrzeuge und damit im Hinblick auf außergewöhnliche Einwirkungen sollte das Abkommen von der Fahrbahn durch ausreichend dimensionierte passive Schutzeinrichtungen prinzipiell verhindert werden, so daß dann auch dieser Lastfall vermieden würde.

Durch ein Abgleiten der Überschüttung oder des gesamten Dichtungssystems im Böschungsbereich (**Lastfall M6: Standsicherheit von Böschungen**) ist die Wirksamkeit der Abdichtungsmaßnahme gefährdet. Zum Schutz des Dichtungssystems sollte diesbezüglich bei der Planung und Ausführung folgendes beachtet werden:

- Ermittlung der Scherparameter und der maßgebenden Scherfugen unter in-situ-Randbedingungen in Laboruntersuchungen und rechnerischer Nachweis der Standsicherheit.
- Erforderlichenfalls Erhöhung der Standsicherheit durch Profilierung der KDB und/oder Bewehrungselemente*.

Hinsichtlich der ständigen chemischen Einwirkungen (**Lastfall C1**) ist bei unzureichender Beständigkeit gegenüber den im Sickerwasser enthaltenen Mineralölkohlenwasserstoffen (Leitparameter der Stoffe aus ständigen Einwirkungen) ein Verlust der Dichtungswirksamkeit denkbar. Aufgrund der starken Verringerung der bereits im Fahrbahnabfluß (im Hinblick auf

* Für weiterführende Fragestellungen wird auf FILLIBECK (1994) verwiesen, der die Standsicherheit von Dichtungssystemen mit KDB für die Anwendung als Abdichtungsmaterial bei Straßen in Wassergewinnungsgebieten ausführlich untersucht hat.

Beständigkeitsanforderungen) geringen Mineralölkohlenwasserstoff-Konzentrationen während der Durchsickerung der obersten Bodenschicht erscheint die Gefährdung sehr gering. Durch den Nachweis der Beständigkeit gegenüber Mineralölkohlenwasserstoffen, das heißt den Prüflüssigkeiten I-3 gemäß BPG Kunststoffbahnen (1984), kann eine diesbezügliche Gefährdung der Dichtungswirksamkeit ausgeschlossen werden.

Bei unzureichender Beständigkeit gegenüber der im Sickerwasser enthaltenen Salzlösung infolge Tausalztrennung (**Lastfall C2**) ist ein Verlust der Dichtungswirksamkeit möglich. Durch den Nachweis der Beständigkeit gegenüber einer wäßrigen Natriumchloridlösung (20 %) mit pH = 6-8 gemäß BPG Kunststoffbahnen (1984) kann diese mögliche Gefährdung der Dichtungswirksamkeit ausgeschlossen werden.

Bei unzureichender Beständigkeit gegenüber den bei Unfällen emittierten konzentrierten wassergefährdenden Stoffen oder Gefahrgütern (**Lastfall C3**) ist ein Verlust der Dichtungswirksamkeit möglich. Durch den Nachweis der Beständigkeit gegenüber Mineralölkohlenwasserstoffen, das heißt den Prüflüssigkeiten I-3 gemäß BPG Kunststoffbahnen (1984) kann diese Gefährdung der Dichtungswirksamkeit vermieden werden.

Bei einer Durchwurzelung bzw. Perforation der KDB oder von Fügenähten (**Lastfall B1**) ist die Wirksamkeit des Dichtungssystems in den betroffenen Bereichen gefährdet. Dies kann durch die Prüfung der Wurzelfestigkeit des Grundmaterials und der Fügenähte in Anlehnung an DIN 4062 (1978) vermieden werden.

Bei einer Perforation der KDB oder von Fügenähten infolge Kleintieraktivität (**Lastfall B2**) ist die Wirksamkeit des Dichtungssystems in den betroffenen Bereichen gefährdet. Dies kann durch den Nachweis der Nagetierbeständigkeit gemäß BPG Kunststoffbahnen (1984) vermieden werden.

Bei unzureichender Beständigkeit gegenüber Mikroorganismen (**Lastfall B3**) ist die Dichtungswirksamkeit der KDB gefährdet. Die diesbezügliche Beständigkeit kann durch Erdeingrabeversuche in mikrobiell aktivierter Erde bei 1 Jahr Versuchsdauer gemäß DIN 53739 (1984), Verfahren D nachgewiesen werden.

Bei unzureichender Frostbeständigkeit (**Lastfall K1**) ist eine Gefährdung der Dichtungswirksamkeit der KDB infolge Versprödung möglich. Die diesbezügliche Beständigkeit der KDB kann durch den Falzversuch nach DIN 53361 (1982) bei -20°C (in Anlehnung an BAM 1992) geprüft werden.

Eine Gefährdung der KDB durch Schwankungen des Bodenwasserhaushaltes (**Lastfall K2**) ist unter den natürlichen Milieubedingungen im Boden nicht gegeben.

3.4 Bentonitdichtungsmatten (GTD)

Bei der Überschüttung und Verdichtung der GTD (**Lastfall M1**: Einbaubeanspruchung) ist eine Beschädigung der dichtungswirksamen Bentonitschicht - vor allem wenn diese bereits teilweise gequollen ist - und/oder der Geotextilien möglich. Dies kann verhindert werden, wenn folgende Punkte bei der Planung und Ausführung des Dichtungssystems mit GTD, sowie bei der Qualitätssicherung auf der Baustelle beachtet werden (HEYER et al. 1995):

- Eignung der vorgesehenen Auflager- und Überschüttmaterialien durch Erfahrungen oder Eignungsprüfungen gewährleistet
- sorgfältige, vor allem trockene Lagerung der Bentonitmatten auf der Baustelle
- glatte, ausreichend verdichtete und tragfähige Auflagerfläche vorbereiten, die bei der Verlegung der GTD nicht vernäßt sein darf und im Hinblick auf die Ableitung von Oberflächenwasser (später Sickerwasser) ein ausreichendes Gefälle aufweisen sollte
- nur trockene GTD dürfen bei zugleich trockener Witterung verlegt werden
- ein vorzeitiges Quellen der GTD ohne Auflast ist nicht zulässig, so daß die Überschüttung möglichst arbeitstäglich, in jedem Fall aber vor Niederschlägen erfolgen sollte
- die Überschüttung der verlegten GTD sollte entweder mit einer Raupe oder mit einem Bagger vor Kopf erfolgen, wobei die Matten von Baumaschinen nicht direkt befahren werden dürfen

Aufgrund der Dünnlagigkeit des Verbund-Dichtungselements "Bentonitmatte" (GTD) sowie der im Gebrauchszustand nur ca. 1 cm mächtigen dichtungswirksamen Bentonitschicht ist die Wirksamkeit der GTD durch eventuelle Einbaubeschädigungen (**Lastfall M1**) stark gefährdet, so daß hohe Anforderungen an die Qualitätssicherung auf der Baustelle zu stellen sind. Bei sorgfältiger Beachtung der oben genannten Kriterien können Einbaubeschädigungen vermieden werden.

Durch dynamische Belastung aus der Befahrung unbefestigter Baufahrstraßen (**Lastfall M2**) sind GTD folgendermaßen gefährdet: Es besteht die Gefahr von Eindrückungen größerer Einzelkörner der Überschüttung in das im gequollenen Zustand plastische Bentonit, die sich im Extremfall soweit fortsetzen, bis Träger- und Abdeckgeotextil unmittelbar aufeinander liegen (Fehlstellen). Weiterhin kann auch Bentonit durch das Abdeckgeotextil hindurchtreten, das dann mit dem Sickerwasser über der GTD abtransportiert wird. Die Gefährdung besteht in einer signifikanten Erhöhung der Durchlässigkeit in Bereichen mit Fehlstellen (dichtungswirksames Bentonit ist nicht mehr vorhanden), so daß dort die Durchlässigkeitsanforderung nicht mehr eingehalten ist. Bei der Anlage unbefestigter Baufahrstraßen können folgende Maßnahmen zum Schutz der GTD vor dynamischen Belastungen ergriffen werden, die im Rahmen der Eignungsuntersuchungen zu prüfen wären:

- "schützendes" weitgestuftes Überschüttmaterial mit möglichst geringem Porenvolumen
- Überschüttungshöhe vergrößern
- Schutzschicht aus Sand mit möglichst geringem Porenvolumen*
- frühzeitiger Einbau einer gebundenen Tragschicht

Die Anforderungen an ein "schützendes" Überschüttmaterial widersprechen einer ausreichenden Entwässerungsleistung, gefährden die Frostsicherheit und ggf. auch die Standsicherheit von Böschungen, so daß im Einzelfall eine Optimierung unter Berücksichtigung aller Kriterien erforderlich wird. Die Vergrößerung der Überschüttungshöhe ist wegen der größeren Erdbewegungen aus wirtschaftlicher Sicht eher nachteilig zu sehen - weist jedoch durch eine zusätzliche schützende Wirkung gegenüber den Einwirkungen Durchwurzelung, Kleintier-tätigkeit, Frost und Trockenheit erhebliche Vorteile auf. Zur Schutzwirkung einer Sandschicht mit möglichst geringem Porenvolumen gegenüber dynamischen Lasten liegen noch keine Erkenntnisse vor, so daß zur Bewertung der Wirksamkeit dieser Maßnahme Untersuchungsbedarf besteht. Der frühzeitige Einbau einer gebundenen Tragschicht kann, sofern dies baubetrieblich möglich ist, vorteilhaft sein.

Da die genannten Schutzmaßnahmen den bautechnischen Aufwand erhöhen und deren Wirksamkeit unter den standortspezifischen Randbedingungen im Einfall zu prüfen wäre, wird

* HEYER et al. (1995) haben im Rahmen von Felduntersuchungen eine nachteilige Wirkung von Schutzvliesen festgestellt, die sie auf das große Porenvolumen und die offene Porenraumstruktur zurückführten, so daß Vliese zum Schutz vor dynamischen Beanspruchungen nicht geeignet sind.

angeraten, dynamische Beanspruchungen der eingebauten bereits gequollenen GTD (Lastfall M2) grundsätzlich zu vermeiden. Dies kann beispielsweise durch eine nachträgliche ("rückbauende") Abdichtung befahrener Bereiche erfolgen.

Statische Belastungen aus dem Eigengewicht des Straßenoberbaus, der Überschüttung und parkenden Fahrzeugen (**Lastfall M3**) können zu Eindrückungen größerer Einzelkörner der Überschüttung in das im gequollenen Zustand plastische Bentonit führen. Zum Schutz der GTD kann Überschüttungshöhe vergrößert werden oder in unbefestigten Randbereichen das Parken - vor allem des Schwerverkehrs - verboten/verhindert (passive Schutzeinrichtungen) werden. Die statischen Belastungen im Fahrbahnbereich sind wegen der lastverteilenden Wirkung der befestigten Fahrbahn und der Tragschichten als wenig kritisch zu bewerten, so daß diesbezüglich auch kein zusätzlicher Schutz erforderlich ist. Die für diesen Lastfall schützende Wirkung einer Vergrößerung der Überschüttungshöhe ist wegen der Kippgefahr für abkommende Tankfahrzeuge und damit im Hinblick auf außergewöhnliche Einwirkungen als alleinige Schutzmaßnahme kritisch zu bewerten. In unbefestigten Randbereichen sollte daher das Parken durch die Anordnung passiver Schutzeinrichtungen verhindert werden oder zumindest verboten werden.

Durch dynamische Lasten aus der Straßenbefahrung (**Lastfall M4**) ist prinzipiell eine ähnliche Gefährdung wie beim Lastfall M2 gegeben, das Ausmaß ist jedoch anders zu bewerten: Einerseits ist die Intensität der dynamischen Belastungen wegen der lastverteilenden Wirkung der befestigten Fahrbahn und der Tragschichten deutlich geringer, andererseits ist die Auftretenshäufigkeit wegen der langen Nutzungsdauer von Straßen erheblich größer. Um mögliche dynamische Verformungen innerhalb der Überdeckung der GTD, die ihrerseits das schädigende Ausmaß der dynamischen Belastungen bestimmen, langfristig zu minimieren, sollte der über der GTD liegende Straßenaufbau (Deckschicht, Tragschichten, Überschüttung) möglichst steif ausgebildet werden. Eine Vergrößerung der Überdeckung der GTD wirkt ebenfalls schützend. Da für diesen Lastfall keine abgesicherten baupraktischen Erfahrungen vorliegen, werden diesbezügliche in-situ-Untersuchungen, wie z.B. Aufgrabungen an bestehenden Dichtungssystemen, angeraten. Aufgrund des unzureichenden Kenntnisstandes kann eine Gefährdung der Wirksamkeit nicht ausgeschlossen werden.

Bei einer Befahrung durch abkommende Fahrzeuge (**Lastfall M5**) sind bei geringer Überschüttungshöhe und/oder wenig tragfähiger Überschüttung Perforationen der GTD möglich. Zum Schutz der GTD kann die Überschüttung erhöht und gezielt verdichtet werden. Durch die Anordnung passiver Schutzeinrichtungen kann bereits das Abkommen von der Fahrbahn verhindert werden. Die Erhöhung und ausreichende Verdichtung der Überschüttung ist grundsätzlich vorteilhaft, da diese eine zusätzliche schützende Wirkung gegenüber den Einwirkungen Durchwurzelung, Kleintieraktivität, Frost und Trockenheit bietet. Wegen der Kippgefahr für abkommende Tankfahrzeuge und damit im Hinblick auf außergewöhnliche Einwirkungen sollte das Abkommen von der Fahrbahn durch ausreichend dimensionierte passive Schutzeinrichtungen prinzipiell verhindert werden, so daß dann auch dieser Lastfall vermieden würde.

Durch ein Abgleiten der Überschüttung oder des gesamten Dichtungssystems im Böschungsbereich (**Lastfall M6**: Standsicherheit von Böschungen) ist die Wirksamkeit des Dichtungssystems gefährdet. Zum Schutz des Dichtungssystems sollte diesbezüglich bei der Planung und Ausführung folgendes beachtet werden: Ermittlung der Scherparameter und der maßgebenden Scherfugen unter in-situ-Randbedingungen mit den vorgesehenen Materialien im Rahmen von Eignungsprüfungen und rechnerischer Nachweis der Standsicherheit. Erforderlichenfalls Erhöhung der Standsicherheit durch Bewehrungselemente.

Wegen der möglichen Eindringung von Stoffen aus ständigen Einwirkungen (**Lastfall C1**) in die Bentonitschicht ist eine mögliche Beeinträchtigung der dichtungswirksamen Eigenschaften des Bentonits (v.a. Quellvermögen) zu beurteilen. Nach EGLOFFSTEIN (1994) treten unpolare bzw. gering polare organische Verbindungen, wie Mineralölkohlenwasserstoffe aufgrund ihrer geringen Wasserlöslichkeit und Polarität und den fehlenden elektrostatischen Wechselwirkungen mit den Tonen kaum in Interaktion, so daß ein Einfluß dieser Verbindungen in wäßriger Lösung kaum zu befürchten ist. Zudem ergaben die Untersuchungen von GOLWER & SCHNEIDER (1983b) an unfiltriertem Fahrbahnabfluß im Vergleich zu filtriertem Fahrbahnabfluß, daß die Mineralölemissionen überwiegend an Feststoffpartikel sorbiert sind, so daß ein Großteil der straßenspezifischen Mineralölkohlenwasserstoffe bereits in den obersten Bodenschichten in folge Filtration zurückgehalten wird. Eine erhebliche Beeinträchtigung der dichtungswirksamen Eigenschaften des Bentonits ist somit zwar nicht zu befürchten. Um jedoch auch langfristige nachteilige Veränderungen der Eigenschaften des Bentonits

ausschließen zu können, wird die Untersuchung der Durchlässigkeitseigenschaften von GTD-Proben aus bestehenden Straßen-Abdichtungsmaßnahmen im Labor sowie Langzeit-Durchlässigkeitsuntersuchungen der gesättigten GTD mit Wasser, das wie straßen-nahes Sickerwasser zusammengesetzt ist, angeraten.

Bei der Versickerung von Tausalzlösungen (**Lastfall C2**) ist zu prüfen, ob die eindringenden Na- und Cl-Ionen (Ionenaustauschvorgänge) zu einer Verringerung des Quellvermögens und/oder zu Schrumpfungsvorgängen in der Bentonitschicht und damit zu einer Beeinträchtigung der dichtungswirksamen Eigenschaften des Bentonits führen. Es können folgende Schutzmaßnahmen ergriffen werden:

- Minimierung der Tausalzstreuung
- Minimierung der Versickerung tausalzbelasteten Fahrbahnabflusses durch eine dichte Fahrbahntwässerung.
- Nachweis der Beständigkeit des Bentonits im Rahmen von langfristigen Durchlässigkeitsversuchen mit Tausalzlösungen.
- Optimierung des Bentonits im Hinblick auf eine langfristige Beibehaltung der dichtungswirksamen Eigenschaften in Kontakt mit tausalzbelastetem Sickerwasser.

Sofern eine Beeinträchtigung der dichtungswirksamen Eigenschaften im Rahmen von Durchlässigkeitsuntersuchungen ausgeschlossen werden kann, ist die Schutzwirkung der Minimierung der Tausalzstreuung oder einer dichten Fahrbahntwässerung im Hinblick auf die große Nutzungsdauer von Straßen (≥ 30 Jahre) als ausreichend anzusehen. Um eine langfristige Gefährdung der Wirksamkeit ausschließen zu können, ist der derzeitige Kenntnisstand jedoch unzureichend, so daß hierzu weiterer Untersuchungsbedarf besteht.

Im Hinblick auf Unfälle (**Lastfall C3**) ist zu prüfen, ob die emittierten konzentrierten wasser-gefährdenden Stoffe oder Gefahrgüter zu einem Verlust der Dichtungswirksamkeit des Bentonits vor Abschluß der für Sofort- und Folgemaßnahmen führen können. Für die Dichtungswirksamkeit gegenüber konzentrierten Stoffen bei Unfällen dürfte der langfristige Wassergehalt der Bentonitschicht der GTD bestimmend sein. Daher wird angeraten, die Spannweite des langfristigen Wassergehaltes der GTD durch die Untersuchung von Proben bestehender Dichtungen, die in der trockenen Jahreszeit entnommen werden sollten, zu ermitteln. Mit diesen Wassergehalten können dann Laborversuche zur Durchlässigkeit der GTD gegenüber den Prüfflüssigkeiten 1-3 gemäß BPG Kunststoffbahnen (1984) durchgeführt werden. Aufgrund des hierzu derzeit unzureichenden Kenntnisstandes kann eine unzureichende

Dichtungswirksamkeit der GTD gegenüber konzentrierten Stoffen bei Unfällen nicht ausgeschlossen werden.

Durchwurzelungen (**Lastfall B1**) gefährden die Dichtungswirksamkeit der Bentonitschicht. Folgende Schutzmaßnahmen kommen in Betracht:

- Ausschließlich flachwurzelnde Bepflanzung und intensive Pflegemaßnahmen, wie häufiges Mähen und ggf. wachstumshemmende Behandlungsmittel, die jedoch auf eine wassergefährdende Wirkung zu prüfen wären.
- Gut verdichtetes grobkörniges Auflager- und Überschüttmaterial ohne organische Beimengungen.
- Anordnung der GTD in "Tiefelage", das heißt mit einer großen Überschüttungshöhe von mindestens 1 m und intensive Verdichtung der Überschüttung

Wegen der erheblichen Durchwurzelungsgefahr für die dünnlagige GTD ist eine Verknüpfung der Schutzmaßnahmen anzuraten, wobei nochmals auf die zusätzliche Schutzwirkung einer größeren Überschüttungshöhe (dynamische Belastung, Frost, Austrocknung, Perforation durch abkommende Fahrzeuge) hingewiesen wird. Aufgrund derzeit unzureichender diesbezüglicher Praxiserfahrungen und der Schürfe an bestehenden mineralischen Abdichtungen gemäß RiStWag (1982) von BRAUNS et al. (1993), die stets Durchwurzelungen bis zur maximalen Untersuchungstiefe von ca. 1 m ergaben, kann eine Gefährdung der Wirksamkeit der dünnlagigen GTD nicht ausgeschlossen werden.

Kleintiertätigkeit (**Lastfall B2**) kann infolge Perforation der Bentonitschicht (Mausgänge und/oder Wurmrohren) die Dichtungswirksamkeit gefährden. Als Schutzmaßnahme eignet sich gut verdichtetes grobkörniges Auflager- und Überschüttmaterial ohne organische Beimengungen sowie eine Anordnung der GTD in "Tiefelage", das heißt mit einer großen Überschüttungshöhe von mindestens 1 m und intensive Verdichtung der Überschüttung. Da Mauslöcher in den Untersuchungen von BRAUNS et al. (1993) lediglich bis in eine Tiefe von ca. 20 cm reichten kann bei ausreichender Mutterbodenüberdeckung diesbezüglich keine Gefährdung festgestellt werden. Jedoch reichten Regenwurmrohren bei bis zu ca. 1 cm Durchmesser bis zu 3 m tief in den Untergrund, so daß längs dieser "Kanäle" eine bevorzugte Wasserwegigkeit und somit insgesamt eine verminderte Dichtungswirksamkeit gegeben ist. Deshalb und wegen der Verletzungsempfindlichkeit des dünnlagigen, flexiblen

Dichtungselementes GTD ist eine Gefährdung der Wirksamkeit durch Perforation der dichtungswirksamen Bentonitschicht zu befürchten, die auch mit den genannten Schutzmaßnahmen wegen unzureichender langfristiger Praxiserfahrungen derzeit nicht ausgeschlossen werden kann. Es werden hierzu Aufgrabungen an bestehenden Dichtungen - möglichst bei unterschiedlichen standortspezifischen Verhältnissen - angeraten.

Bei unzureichender Beständigkeit des Bentonits gegenüber Mikroorganismen (**Lastfall B3**) ist ein möglicher Verlust der Dichtungswirksamkeit zu prüfen. Bei unzureichender Beständigkeit der Geotextilien (Stütz- und Tragschicht) gegenüber Mikroorganismen kann das Bentonit nicht mehr fixiert werden, so daß Durchbrüche und Ausspülungen zu befürchten wären. Durch den Nachweis der Beständigkeit des Dichtungssystems (GTD) oder der Einzelkomponenten durch Erdeingrabeversuche in mikrobiell aktivierter Erde bei 1 Jahr Versuchsdauer gemäß DIN 53739 (1984), Verfahren D, kann eine mögliche Gefährdung durch mikrobiellen Abbau untersucht werden. Aufgrund des hierzu derzeit unzureichenden Kenntnisstandes kann eine Gefährdung der Wirksamkeit nicht ausgeschlossen werden.

Frosteinwirkungen (**Lastfall K1: Frost- / Tauwechsel**) können zu räumlichen Zergliederungen und Aggregationen der teilweise wassergesättigten Bentonitschicht führen, die je nach Art und Umfang der eingetretenen Gefügestörungen wiederum zu einer Verminderung der Dichtungswirksamkeit führen können. HEYER (1994) stellte bei Reihenuntersuchungen eines veränderten Produkts mit natrium-aktiviertem Calcium-Bentonit nach Frost-Tauwechseln vereinzelt stark erhöhte Anfangsdurchlässigkeiten bei der Durchströmung fest, die nur teilweise auf die Variation der Versuchsparameter zurückzuführen waren, so daß hierzu weiterer Untersuchungsbedarf besteht. Eine erhöhte Anfangsdurchlässigkeit der GTD nach der Durchfrostung ist im Hinblick auf die Versickerung von Ottokraftstoffen, dem Leitparameter der außergewöhnlichen Einwirkungen, kritisch zu bewerten, da mit dieser unpolaren organischen Flüssigkeit eine Wiederherstellung der Dichtungswirksamkeit durch Quellung nicht gegeben ist. Durch die Ausführung einer gegenüber der standortspezifischen Frosteinwirkung mächtigeren Überdeckung können mögliche schädigende Auswirkungen von Frost-Tauwechseln verhindert werden, wobei nochmals auf die zusätzliche Schutzwirkung einer größeren Überschüttungshöhe (dynamische Belastung, Durchwurzelung, Austrocknung, Perforation durch abkommende Fahrzeuge) hingewiesen wird. Sofern die Einwirkung von Frost-Tauwechseln auf

die GTD nicht vermieden werden kann, werden Untersuchungen der Durchlässigkeitseigenschaften nach alternierenden Frost-Tauwechseln unter in-situ-Randbedingungen (im Hinblick auf die Abdichtung im Bereich von Straßen) angeraten.

Witterungsbedingte Schwankungen im Wasserhaushalt des umgebenden Bodens (**Lastfall K2**: Trockenheit/Feuchte) können die Dichtungswirksamkeit der GTD folgendermaßen gefährden:

- Alternierende Quell- und Schrumpfvorgänge können zu einer langfristigen - ggf. irreversiblen - Störung der Struktur und damit der Dichtungswirksamkeit der Bentonitschicht führen.
- Langfristige - ggf. irreversible - Störung des Quellvermögens und damit der Dichtungswirksamkeit durch Eindringung und die Einlagerung (z.B. Ionenaustausch) straßenspezifischer Stoffe, wie beispielsweise Frostschutzmittel oder Auftausalze, in die Bentonitschicht.
- Vorübergehend eingeschränkte Dichtungswirksamkeit während Trockenperioden in den Sommermonaten durch eine verminderte Wassersättigung der Bentonitschicht.

Eine irreversible Störung der Dichtungswirksamkeit der GTD infolge "Trocken-Naß-Zyklen" kann nicht akzeptiert werden, so daß hierzu Eignungsprüfungen unter in-situ-Randbedingungen (im Hinblick auf die Abdichtung im Bereich von Straßen) angeraten werden. Die versuchstechnische Durchführung derartiger Untersuchungen ist in HEYER (1994) erläutert. Weiterhin kommen folgende Schutzmaßnahmen in Betracht:

- Eine künstliche Bewässerung der mit GTD abgedichteten Bereiche während Trockenperioden ist zwar grundsätzlich möglich, erscheint jedoch im Hinblick auf die praktische Durchführung wenig zweckmäßig.
- Bei kapillarer Verbindung zum Grundwasserleiter ist eine Austrocknung der GTD kaum zu befürchten; jedoch dürfte nur in Einzelfällen die kapillare Verbindung des gesamten Dichtungssystems, das heißt auch von Böschungsbereichen, mit dem Grundwasserleiter möglich sein.
- Gut wasserspeichernde Auflager- und Überschüttmaterialien in Verbindung mit einer entsprechenden Bepflanzung sind im Hinblick auf die im folgenden genannten Kriterien als nicht zweckmäßig zu bewerten:
- ausreichende Planumsentwässerung im Fahrbahnbereich
- Standsicherheit des Dichtungssystems in Böschungen gefährdet

- Durchwurzelungsgefahr für die GTD erhöht
- In den Durchlässigkeitsuntersuchungen eines mit ca. 50 % Wassergehalt teilgesättigten Natriumbentonits von DANIEL et al. (1993) erhöhten sich die Durchlässigkeitsbeiwerte bei der Durchströmung mit verschiedenen Kohlenwasserstoffen im Vergleich zur Durchströmung mit Wasser jeweils um etwa vier Zehnerpotenzen (10000-fach). Daher wird der Nachweis einer ausreichenden Dichtungswirksamkeit teilgesättigter GTD während des für Sofort- und Folgemaßnahmen erforderlichen Zeitraumes (z.B. 48 h) gegenüber den Prüfflüssigkeiten 1-3 gemäß BPG Kunststoffbahnen (1984) im Hinblick auf Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe (außergewöhnliche Einwirkungen), die auch in den Sommermonaten stattfinden, dringend angeraten. Hierzu werden Durchlässigkeitsuntersuchungen teilgesättigter GTD mit den oben genannten Prüfflüssigkeiten bei variierenden Wassergehalten zwischen 20 % und 100 % empfohlen.

3.5 Asphaltbetondichtungen

Eine Gefährdung der Asphaltbetondichtung infolge Einbaubeanspruchungen (**Lastfall M1**), wie Überschüttung und Verdichtung, ist aufgrund ihrer diesbezüglich ausreichenden Robustheit nicht gegeben.

Dynamische Belastungen aus der Befahrung unbefestigter Baufahrstraßen (**Lastfall M2**) können zu Deformationen oder Perforationen der Asphaltbetondichtung führen. Zum Schutz können entweder eine direkte Befahrung vermieden werden oder mineralische Schutzschichten oder gebundene Tragschichten auf der Asphaltbetondichtung angeordnet werden.

Bei im Hinblick auf die Herstellbarkeit der Asphaltbetondichtung ausreichender Tragfähigkeit des Untergrundes bzw. des Auflagers der Asphaltbetondichtung ist eine Gefährdung durch statische Belastungen aus dem Eigengewicht des Straßenoberbaus, der Überschüttung und parkenden Fahrzeugen (**Lastfall M3**) nicht gegeben.

Bei im Hinblick auf die Herstellbarkeit ausreichender Tragfähigkeit des Untergrundes bzw. des Auflagers der Asphaltbetondichtung und ausreichend bemessenen Trag- und Deckschichten über der Asphaltbetondichtung ist eine Gefährdung durch dynamische Belastungen aus der Straßenbefahrung (**Lastfall M4**) nicht gegeben.

Bei einer Befahrung durch abkommende Fahrzeuge (**Lastfall M5**) sind Deformationen oder Perforationen der Asphaltbetondichtung denkbar. Zum Schutz können entweder passive Schutzeinrichtungen, die ein Abkommen von der Fahrbahn verhindern, angeordnet werden oder eine möglichst gebundene mineralische Schutzschicht über der Asphaltbetondichtung eingebaut werden. Aufgrund der im Hinblick auf die Herstellbarkeit erforderlichen hohen Tragfähigkeit des Untergrundes bzw. des Auflagers der Asphaltbetondichtung wird nur eine sehr geringe Gefährdung der Asphaltbetondichtung gesehen, die mit den genannten Schutzmaßnahmen erforderlichenfalls vermieden werden kann.

Durch ein Abgleiten der Überschüttung oder des gesamten Dichtungssystems im Böschungsbereich (**Lastfall M6: Standsicherheit von Böschungen**) ist die Wirksamkeit des Dichtungssystems gefährdet. Zum Schutz des Dichtungssystems sollte diesbezüglich bei der Planung und Ausführung folgendes beachtet werden: Nachweis einer ausreichenden Scherfestigkeit innerhalb der Asphaltbetondichtung, wie z.B. in KLUGE (1994) erläutert. Ermittlung der Scherparameter und der maßgebenden Scherfugen unter in-situ-Randbedingungen mit den vorgesehenen Materialien im Rahmen von Eignungsprüfungen und rechnerischer Nachweis der Standsicherheit, wie in DVWK (1995) erläutert. Erforderlichenfalls Erhöhung der Standsicherheit durch Bewehrungselemente.

Da gemäß DVWK (1995) das Bindemittel Bitumen sowie Asphaltbeton mit entsprechender Gemischzusammensetzung gegenüber Säuren und Laugen bei Temperaturen und Konzentrationen, die in Deponien möglich sind, praktisch inert sind, ist eine Gefährdung durch die geringen Konzentrationen der aus ständigen und vorübergehenden Einwirkungen stammenden Stoffe im straßennahen Sickerwasser (**Lastfälle C1 & C2**) nicht gegeben. Auch SCHELLENBERG (1995) berichtet von einer nach zehn Jahren aufgegrabenen Deponiebasisabdichtung aus Asphaltbeton, in die leicht löslichen Salze des diesbezüglich stark belasteten Sickerwassers (durchschnittlich 1104 mg Cl/l und eine Leitfähigkeit von 8206 $\mu\text{S}/\text{cm}$) nicht eingedrungen waren.

Die bereits erläuterten Untersuchungen (vgl. Abschnitt 5.4.3.7, Tab. 5-7) von SPRINGER et al. (1991) ergeben keine Gefährdung der Asphaltbetondichtung durch konzentrierte Stoffe bei Unfällen (**Lastfall C3**) für den Zeitraum von Sofort- und Folgemaßnahmen (48 h).

Perforation und damit Verlust der Dichtungswirksamkeit der Asphaltbetondichtung. Gemäß DVWK (1995) sollen Asphaltbetondichtungen im Deponiebau durch einen geeigneten Aufbau der mindestens 2 m mächtigen Überdeckung sowie eine sorgfältige Auswahl der Pflanzen und deren Pflege gegen Durchwurzelung (**Lastfall B1**) geschützt werden. Diese große Überdeckungshöhe erscheint jedoch wenig zweckmäßig, da sie die Anwendung der Asphaltbetondichtung an Straßen in Wassergewinnungsgebieten stark einschränken würde, indem nur ein Einbau in Tieflage in Frage käme, wobei dennoch am Böschungsfuß unzureichend überdeckte Bereiche verblieben. Es werden diesbezüglich weitere Untersuchungen - z.B. an bestehenden Asphaltbetondichtungen im Wasserbau - angeraten. Nach derzeitigem Kenntnisstand kann eine diesbezüglich Gefährdung nicht ausgeschlossen werden.

Gemäß DVWK (1995) ist eine Schädigung von Asphaltbetondichtungen als Außen- und Kerndichtungen von Talsperren, Speicherbecken und künstlichen Seen durch Nagetiere nicht festgestellt worden (**Lastfall B2**), so daß auch bei der Anwendung an Straßen keine Gefährdung gegeben sein dürfte.

Nach DVWK (1995) wurde in Langzeitversuchen mit dichten Asphaltbetonmischungen in städtischen und industriellen Klärwerken kein Einfluß durch Mikroorganismen (**Lastfall B3**) auf das Bindemittel Bitumen festgestellt. Nach ARAND et al. (1992) ist zwar ein bakterieller Angriff des Bitumen unter aeroben Bedingungen feststellbar, es liegen jedoch keine Fakten vor, die auf eine mangelnde Resistenz von Asphaltbetondichtungen gegen biologische Angriffe schließen lassen, zudem sind auch keine Schädigungen von Asphaltbeton im Wasserbau durch biologische Einwirkungen bekannt. Aufgrund der in der Literatur zitierten Erfahrungen erscheint die Gefährdung durch mikrobiellen Abbau vernachlässigbar gering - im Hinblick auf die lange Nutzungsdauer und im Vergleich zu den anderen Dichtungselementen werden dennoch der Nachweis einer ausreichenden Beständigkeit durch Erdeingrabeversuche in mikrobiell aktivierter Erde bei 1 Jahr Versuchsdauer gemäß DIN 53739 (1984), Verfahren D, angeraten.

Gemäß DVWK (1995) können witterungs-, tages- und jahreszeitliche Temperaturschwankungen und daraus resultierende Spannungen (**Lastfall K1**) durch das viskoelastische Verhalten von Asphalt gefahrlos abgebaut werden. Um auch eine schädigende Wirkung gefrierenden

Porenwassers ausschließen zu können, wird nochmals auf die erforderliche Einhaltung des maximalen Hohlraumgehaltes von 3 Vol.-% bei der Herstellung hingewiesen.

Eine Gefährdung durch Trockenheit oder Feuchte (**Lastfall K2**) ist im gemäßigten Klima Deutschlands nicht gegeben.

4 Literatur zu Anlage 1

- ARAND, W.; HAAS, H.; STEINHOFF, G. (1992): Zur Herstellbarkeit, Beständigkeit und Wirksamkeit von Deponiebasisabdichtungen aus Asphalt. In: Bitumen 4/92, S. 152-162
- BAM (1992): Richtlinie für die Zulassung von Kunststoffdichtungsbahnen als Bestandteil einer Kombinationsabdichtung für Siedlungs- und Sonderabfalldeponien sowie für Abdichtungen von Altlasten. Bundesanstalt für Materialforschung- und Prüfung (BAM), Berlin
- BEHR, H. (1984): Über klimatische Grundlagen für Frostschutzmaßnahmen im Straßenbau. Straße und Autobahn, 35. Jg., H. 4/1984, S. 135-140
- BÖHRINGER, A.; ROSCHMANN, R.; DOMHAN, M. (1970): Anfahrversuche an Leitplanken. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 98, Bonn, 156 S.
- BÖHRINGER, A.; ROSCHMANN, R.; DOMHAN, M. (1965): Durchführung von Anfahrversuchen an Leitplanken zur Erzielung einer möglichst hohen Verkehrssicherheit an Bundesfernstraßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 42, Bonn, 91 S.
- BPG Kunststoffbahnen (1984): Bau- und Prüfgrundsätze für Kunststoffbahnen als Abdichtungsmittel von Auffangwannen und Auffangräumen für die Lagerung wassergefährdender Flüssigkeiten. Bau- und Prüfgrundsätze für den Gewässerschutz, Teil 1, Schriften des Instituts für Bautechnik - IfBt - (Hrsg.), Reihe B, H. 1, Berlin, S. 28-60
- BRAUNS, J.; KAST, K.; REITH, H. (1993): Langzeitverhalten von oberflächennahen Bodenabdichtungen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten. Forschungsvorhaben FE 05.097 G91G im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Schlußbericht. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe

- DANIEL, D.E.; SHAN, H.-Y.; ANDERSON, J.D. (1993): Effects of Partial Wetting on the Performance of the Bentonite Component of a Geosynthetic Clay Liner. Conf.-Proc. "GEOSYNTHETICS' 93", Volume 3, Vancouver, British Columbia, S. 1483-1496
- DIN 53739 (1984): Prüfung von Kunststoffen - Einfluß von Pilzen und Bakterien, visuelle Beurteilung, Änderung der Massen oder der physikalischen Eigenschaften. Deutsches Institut für Normung, Berlin
- DVWK (1995): Deponieabdichtungen in Asphaltbauweise - Entwurf Januar 1995 -. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V., Bonn.
- EGLOFFSTEIN, T. (1994): Einsatz von Bentonitmatten im Kontakt zu schadstoffbelasteten Böden und Wässern. In: Fachtagung "Geokunststoff-Ton-Dichtungen GTD", 14./15.04.1994; Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 71, Nürnberg. S. 85-110
- FILLIBECK, J. (1994): Untersuchungen zur Eignung von Kunststoff-Dichtungsbahnen für die Anwendung als Abdichtungsmaterial bei Straßen in Wassergewinnungsgebieten. Schlußbericht zum Forschungsvorhaben FE 05.095 G89G im Auftrag des Bundesministers für Verkehr, Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik der Technischen Universität München
- GOLWER, A., SCHNEIDER, W. (1983b): Untersuchungen über die Belastung des Grundwassers mit organischen Stoffen im Bereich von Straßen. Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 391, Bonn, S. 25-47
- GOTTHEIL, K.-M.; BRAUNS, J. (1993): Thermische Einflüsse auf die Dichtwirkung von Kombinationsabdichtungen. In: 2. Arbeitstagung "Deponieabdichtungssysteme", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin. S. 149-154
- GOTTHEIL, K.-M.; BRAUNS, J. (1995): Thermische Einflüsse auf die Dichtwirkung von Kombinationsabdichtungen - Messungen an einem Testfeld -. In: 3. Arbeitstagung "Deponieabdichtungssysteme", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin. S. 175-184
- GRÄSLE, W.; RICHARDS, B.; BAUMGARTL, T.; HORN, R. (1995): Entwicklung eines mathematischen Simulationsmodells zur Charakterisierung und Prognose des

- Wassertransports in zeitlich quellenden und schrumpfenden Mülldeponiebasisabdichtungssystemen. In: 3. Arbeitstagung "Deponieabdichtungssysteme", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin. S. 209-219
- GRUNAU, E.B. (1995): Abdichtung gegen Öle, Treibstoffe und Chemikalien. Tiefbau, Ingenieurbau, Straßenbau, Heft 1, S. 14-19
- HEYER, D. (1994): Grundsatzuntersuchungen zur Wirksamkeit von Bentonitdichtungsmatten. In: Fachtagung "Geokunststoff-Ton-Dichtungen GTD", 14./15.04.1994; Veröffentlichungen des LGA-Grundbauinstituts, Heft 71, Nürnberg. S. 111-124
- HEYER, D.; SCHEUEFELE, G. (1989): Auswertung und Beurteilung bisher in der Praxis angewandter bautechnischer Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten. Forschungsbericht 102 02 207 im Auftrag des Umweltbundesamtes, in: Forschungsarbeiten aus dem Straßenwesen, Heft 104, Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e.V. (FGSV) (Hrsg.), Köln, S. 1-54
- HEYER, D.; BEER, N.; ASCHERL, R. (1995): Bedeutung der Fremdüberwachung bei Abdichtungsmaßnahmen mit Bentonitmatten. 4. Informations- und Vortragsveranstaltung "Kunststoffe in der Geotechnik", GEOTECHNIK, Sonderheft 1995, S. 129-135
- HOLZLÖHNER, U. (1993): Transportvorgänge und Bodendeformation unter Einwirkung von Austrocknung und äußeren Spannungen. In: 2. Arbeitstagung "Deponieabdichtungssysteme", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin. S. 139-148
- HOLZLÖHNER, U.; ZIEGLER, F. (1995): Wassertransportvorgänge und Rißgefährdung von Erdstoff-Abdichtungsschichten im Hinblick auf die Langzeitfunktionsfähigkeit. In: 3. Arbeitstagung "Deponieabdichtungssysteme", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin. S. 161-174
- HORN, R.; BAUMGARTL, T. (1995): Bedeutung von Auflast und Entwässerung für die Bodenwassercharakteristik von mineralischen Abdichtungen. In: 3. Arbeitstagung "Deponieabdichtungssysteme", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin. S. 197-208
- KLUGE, H.-J. (1994): Besonderheiten bei Eignungsprüfungen, Herstellung und Einbau von Asphalt im Wasserbau und im Deponiebau. Bitumen 4/94, S. 166-173

- MELCHIOR, S.; VIELHABER, B.; BERGER, K.; MIEHLICH, G. (1994a): In-situ-Untersuchungen zur Austrocknung bindiger, mineralischer Oberflächenabdichtungen. In: "Geotechnische Probleme beim Bau von Abfalldeponien - 1994 -", 10. Nürnberger Deponieseminar, Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Landesgewerbeanstalt Bayern (LGA), H. 72, Nürnberg, S. 265-277
- MELCHIOR, S.; VIELHABER, B.; BERGER, K.; MIEHLICH, G. (1994b): Das Austrocknungsverhalten von mineralischen Oberflächenabdichtungen. Seminar "Oberflächenabdichtungssysteme für Deponien und Altlasten" des VDI-Bildungswerkes, Schriftenreihe des Lehrstuhles für Angewandte Geologie der Universität Karlsruhe, H. 34, S. 223-241
- RiStWag (1982): Richtlinien für bautechnische Maßnahmen an Straßen in Wassergewinnungsgebieten. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen (FGSV), Arbeitsgruppe "Erd- und Grundbau", Köln
- SAVIDIS, S.; MALLWITZ, K. (1993): Selbstheilungsvermögen mineralischer Dichtmassen hinsichtlich Durchlässigkeit in gestörten Dichtschichten / Dichtungssystemen an Deponien. In: 2. Arbeitstagung "Deponieabdichtungssysteme", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin. S. 95-108
- SAVIDIS, S.; MALLWITZ, K.; FRANKE, J. (1995): Selbstheilungsvermögen mineralischer Dichtmassen hinsichtlich Durchlässigkeit in gestörten Dichtschichten / Dichtungssystemen an Deponien. In: 3. Arbeitstagung "Deponieabdichtungssysteme", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin. S. 149-159
- SCHELLENBERG, K. (1995): Neuere Untersuchungen zum Einsatz von Asphalt im Deponiebau. In: 3. Arbeitstagung "Deponieabdichtungssysteme", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin. S. 61-70
- SCHMIDT, M.; BOHNE, K. (1995): Simulation von Wasser- und Dampftransport in Deponiebasisabdichtungssystemen unter Berücksichtigung von Auflast und Temperaturgradienten. In: 3. Arbeitstagung "Deponieabdichtungssysteme", Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Berlin. S. 221-233
- SPRINGER, E.; BEIER, A.; KLUGE, H.-J. (1991): Beständigkeit und Dichtigkeit von Asphalt gegen Mineralölprodukte. Bitumen 2/91, S. 84-88

- VOIGT, TH. (1994): Frosteinwirkung auf mineralische Deponieabdichtungen. Diss., Mitteilungen des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Braunschweig, Heft 47
- ZTVE-StB 94 (1994): Zusätzliche Technische Vorschriften und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau. Der Bundesminister für Verkehr (Hrsg.), Abteilung Straßenbau, Bonn. 107 S.



ERHEBUNG ÜBER UNFÄLLE BEIM TRANSPORT WASSERGEFÄHRDENDER STOFFE 1992

Erhebungsstelle

Meldende Stelle : _____

Für Rückfragen steht Herr/Frau : _____

unter Telefonnummer : _____ zur Verfügung.

Rechtsgrundlagen

1. Erhebung nach Umweltstatistikgesetz

Gesetz über Umweltstatistiken in der Fassung der Bekanntmachung vom 14. März 1980 (BGBl. I S. 311), Artikel 1 der Verordnung zur Änderung statistischer Rechtsvorschriften (Statistikbereinigungsverordnung) vom 14. September 1984 (BGBl. I S. 1247) in Verbindung mit dem Gesetz über die Statistik für Bundeszwecke (Bundesstatistikgesetz - BStatG) vom 22. Januar 1987 (BGBl. I S. 462, 565). Erhoben werden die Tatbestände zu § 10 Abs. 1 des Gesetzes über Umweltstatistiken.

Die Auskunftspflicht ergibt sich aus § 10 Abs. 2 des Gesetzes über Umweltstatistiken in Verbindung mit §§ 15, 26 Abs. 4 Satz 1 BStatG. Hiernach sind die nach Landesrecht zuständigen Dienststellen zur Auskunftserteilung verpflichtet. Gem. § 15 Abs. 6 BStatG haben Widerspruch und Anfechtungsklage gegen die Aufforderung zur Auskunftserteilung keine aufschiebende Wirkung.

Geheimhaltung

Die erhobenen Einzelangaben werden nach § 16 BStatG grundsätzlich geheimgehalten. Nur in ausdrücklich gesetzlich geregelten Ausnahmefällen dürfen Einzelangaben übermittelt werden.

Eine Übermittlung der erhobenen Einzelangaben ist nach § 13 des Gesetzes über Umweltstatistiken in Verbindung mit § 16 Abs. 4 BStatG an die für Umweltschutz und fachlich zuständigen obersten Bundes- und Landesbehörden in Form von Tabellen mit statistischen Ergebnissen zulässig, auch soweit Tabellenfelder nur einen einzigen Fall ausweisen. Eine Übermittlung von Einzelangaben mit Name und Anschrift ist ausgeschlossen.

Nach § 16 Abs. 6 BStatG ist es möglich, den Hochschulen oder sonstigen Einrichtungen mit der Aufgabe unabhängiger wissenschaftlicher Forschung für die Durchführung wissenschaftlicher Vorhaben, Einzelangaben dann zur Verfügung zu stellen, wenn diese so anonymisiert sind, daß sie nur mit einem unverhältnismäßig großen Aufwand an Zeit, Kosten und Arbeitskraft dem Befragten oder Betroffenen wieder zugeordnet werden könnten.

Die Pflicht zur Geheimhaltung besteht auch für Personen, die Empfänger von Einzelangaben sind.

Hilfsmerkmale, Trennen und Löschen

Name und Anschrift der Auskunftspflichtigen bzw. Unternehmen, Name und Telefonnummer der für eventuelle Rückfragen zur Verfügung stehenden Person sind Hilfsmerkmale, die lediglich der technischen Durchführung der Erhebung dienen. Die vollständigen Erhebungsdrucke einschließlich der Hilfsmerkmale werden nach Abschluß der Prüfung der Angaben vernichtet.

Anlage 2

ERHEBUNG ÜBER UNFÄLLE BEIM TRANSPORT 1) WASSERGEFÄHRDENDER STOFFE 1992

Hinweise zum Ausfüllen:

- ☐ Für jede Behälteranlage 2) ist ein eigener Erhebungsbogen auszufüllen.
☒ Zutreffendes bitte ankreuzen (X) bzw. ausfüllen.
☐ Bitte beachten Sie die Fußnoten auf der Rückseite.

I. Erhebung nach Umweltstatistikgesetz

Ort, Zeit, Art des Verkehrs

Ort des Unfalls

PLZ

Gemeinde/Kreis

Tag des Unfalls

1 8

unbekannt

☐ Nahverkehr (nur Straßenverkehr)

☐ Fernverkehr (nur Straßenverkehr)

☐ Inländisches Fahrzeug

☐ Ausländisches Fahrzeug

Beförderungsmittel, Menge

Beförderungsmittel

☐ Tankfahrzeuge einschl. Silofahrzeuge

☐ Fahrzeuge mit Aufsetztank

☐ Andere Lkw

☐ Eisenbahnkessel-Silowagen

☐ Andere Eisenbahnwagen

☐ Rohrleitung

☐ Luftfahrzeug

☐ Binnenschiff

☐ Seeschiff, und zwar:

☐ Tankerschiff

Andere Schiff,
und zwar:

Behältervolumen

m3

Stoffmenge 3)

Beförderte Menge

m3

Ausgelaufene Menge

m3

Wiedergewonnene Menge 4)

m3

Nicht wiedergewonnene Menge

m3

Gefährliches Gut im Sinne der
Verkehrsvorschriften 5)

ja ☐
nein ☐

Wenn ja:

Klasse

Ziffer

☐ unbekannt

Stoffart, Unfallursache

Stoffart

☐ Anorganischer Stoff, und zwar:

☐ Mineralölprodukte, und zwar:

☐ leichtes Heizöl und Dieselmotortreibstoff

☐ Vargewerkstoff (Ottomotoren)

☐ schweres Heizöl

☐ Althöl

☐ Rohöl

☐ Flugkraftstoff (Düsenantriebswerke)

☐ Andere Mineralölprodukte,

und zwar:

☐ Sonstige organische Stoffe,

und zwar:

Unfall beim

☐ Fahren, Rangieren

Mängel

☐ an Behälteranlage

☐ an Armaturen des Fahrzeuges

☐ an nicht zum Fahrzeug gehörende Anlagen

☐ und Sicherheitseinrichtungen

☐ Menschliches Verhalten

☐ Sonstige Ursache,

und zwar:

Unfallfolgen, Sekundärfolgen

Unfallfolgen

☐ Keine

Verunreinigung

☐ des Bodens
☐ eines Kanalsystems

☐ einer Kläranlage, und zwar:

☐ mechanisch ☐ biologisch

☐ eines Gewässers (einschl. Grundwasser),

und zwar:

☐ einer Wasserversorgung

Gefährdung

☐ einer Wasserversorgung

Sekundärfolgen

☐ Keine

☐ Beeinträchtigung bei Mensch und Tier

☐ Ausfall einer Wasserversorgung

☐ Beeinträchtigung von Wasserbauwerken

☐ Sonstige Folgeschäden,

und zwar:

☐ Unfall- und Sekundärfolgen ungeklärt

Anlage 2

II. Erhebung nach landesinternen Regelungen

Maßnahmen

Getroffene Sofortmaßnahmen

- ☐ Verhinderung weiteren Auslaufens
- ☐ Verhinderung weiteren Ausbreitens
- ☐ Umpumpen in andere Behälter
- ☐ Aufbringen von Blindmitteln
- ☐ Ausheben verunreinigten Materials
- ☐ Einbringen von Sperren in Gewässern
- ☐ Weitere Sofortmaßnahmen,
und zwar: _____
- ☐ Keine Sofortmaßnahmen

Folgemaßnahmen

- ☐ Ausheben verunreinigten Materials
- ☐ Abfuhr verunreinigten Materials zur
Deponie

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

 m3
- Verbrennung

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

 m3
- sonstigen Beseitigung

--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

 m3
- ☐ Niederbringen von Grundwasserbeobach-
tungsrohren
- ☐ Anlegen von Schürfgruben
- ☐ Errichten von Brunnen zum Abpumpen
des Schadstoffes
- ☐ Weitere Folgemaßnahmen,
und zwar: _____
- ☐ Keine Folgemaßnahmen

Kosten

☐ für Sofortmaßnahmen
_____ DM

☐ zur Beseitigung von Sekundärfolgen
und zwar: _____
_____ DM

Bemerkungen

.....

.....

.....

.....

.....

.....

Hinweise und Fußnoten

- 1) Zu den Transportunfällen zählen nicht das Auslaufen von Betriebsstofftanks und das Ablassen von Althöl.
- 2) Angabe der Bündelung unter "Bemerkungen" erforderlich, wenn bei einem Unfall mehrere Behälter oder deren Zubehör beschädigt wurden.
- 3) Angaben sind hier in jedem Fall erforderlich, selbst wenn nur grobe Schätzungen möglich.
- 4) Jede Form der Wiedergewinnung ist zu berücksichtigen, z.B. abgeschöpft, verbrannt, im Aushub beseitigt. Verdunstete Mengen sind ebenfalls zu berücksichtigen.
- 5) GGVs, GGVE, GGVSee, GGVBinsch, IATA.

Anlage 3: Formblatt "Unfall mit gefährlichen Gütern in Tanks oder Tankfahrzeugen"

Dienststelle	Datum
Unfall mit gefährlichen Gütern in Tanks oder Tankfahrzeugen	
Unfallort, Straße	
Unfalldatum	Unfallzeit
Wasserschutzgebiet I, II oder III ☐	Gefällstrecke ☐
Naturschutzgebiet ☐	Kurvenreiche Strecke ☐

1. Fahrzeug ☐ Kraftfahrzeug ☐ Anhänger ¹⁾ ☐ Sattelanhänger	Tankbauart ☐ festverbundener Tank ☐ Aufsetztank ☐ Gefäßbatterie ☐ Tankcontainer ☐ Tankcontainer (KTC)	Tankform ☐ zylindrischer Tank  ☐ kofferförmiger Tank  ☐ elliptischer Tank 
--	--	--

Prüfbescheinigung
 Nachstehende Angaben können weitgehend der Prüfbescheinigung nach Anhang B.3a GGVS bzw. der ADR-Bescheinigung entnommen werden.

- Tankwerkstoff Tankwanddicke mm

- seitlicher Schutz (sog. Bauchbinde) vorhanden ☐ ja ☐ nein

- Wärmeisolierung vorhanden ☐ ja ☐ nein

- Baujahr Hersteller (Tank)

- Rauminhalt (insgesamt): Liter, unterteilt in ... Abt.

- letzte Tankprüfung nach § 6 GGVS (ADR) ☐ HP ☐ ZP am

Herstellerschild
 Nachstehende Angaben sind dem Herstellerschild des Tanks zu entnehmen.

- Prüfüberdruck des Tanks: bar

- zulässiger Betriebsüberdruck des Tanks: bar

- Baumusterzulassungs-Nr.:

- besondere fahrzeugtechnische Ausrüstung
☐ ABV/ABS ☐ Retarder ☐ Sonstiges:

2. Ladegut
 Bezeichnung der gefährlichen Güter lt. Beförderungspapier (bei Mehrkammertankfahrzeugen mit Angabe der Kammer)

	Stoffname	Klasse	Ziffer	Volumen/Gewicht	Wertsteigernde Zusätze
1.					/
2.					/
3.					/
4.					/
5.					/
6.					/

3. Unfallablauf, Schadensfeststellungen

☐ Alleinunfall

☐ seitlich angefahren

☐ von hinten angefahren
 durch anderes Fahrzeug mit Gesamtgewicht ca. kg
 und Geschwindigkeit ca. km/h

☐ Auffahren auf festes Hindernis mit ca. km/h

1) Bei Beförderungseinheiten mit Anhängern sind für das Kraftfahrzeug und für den Anhänger getrennte Berichte auszufüllen.

Anlage 3: Formblatt "Unfall mit gefährlichen Gütern in Tanks oder Tankfahrzeugen"

- ☐ Zusammenstoß mit ca. km/h
- ☐ seitlich ☐ rückwärtig ☐ frontal ☐ aufgefahren
- ☐ Umkippen mit ☐ Seitenlage ☐ Rückenlage ☐ Überachlagen
- ☐ Tank blieb dicht
- ☐ Tank wurde undicht
- ☐ Tankwand ☐ aufgeplatzt ☐ aufgerissen ☐ durchstoßen
- ☐ Armaturen auf Tank/Dom ☐ beschädigt ☐ undicht
- ☐ Armaturen Untenentleerung ☐ beschädigt ☐ undicht
- ☐ Ladegutaustritt (ca. t)

Ausgetretenes Gefahrgut wurde aufgefangen ☐ ja ☐ nein ☐

..... wurde teilweise aufgefangen ☐ ja ☐ nein ☐ und zwar Liter/tg

Brand/Explosion ☐ ja ☐ nein ☐

Gasentwicklung
Ätzend/giftig ☐ ja ☐ nein ☐

Erdrück oder
Grundwasserverschmutzung ☐ ja ☐ nein ☐

Konnte der Schaden, den das
Gefahrgut anrichtete, beseitigt
werden? ☐ ja ☐ nein ☐ teilweise ☐

sonstige Schäden ☐ ja ☐ nein ☐

ggf. welche?

.....

.....

.....

ggf. durch welche Maßnahmen:

.....

.....

Kosten: DM

Sind Maßnahmen zur Beobachtung und Erfassung von Langzeitschäden getroffen worden (z. B. Anlegen von Untersuchungsbrunnen, Grundwasserüberwachung u. a.)? ☐ ja ☐ nein

Nach Möglichkeit Lichtbilder beifügen!

Festgestellte oder behauptete Mängel und ihre vermutliche Auswirkung auf den Schadensverlauf (ggf. auf Beiblatt erläutern):

.....

.....

4. Sonstige Angaben

4.1 Hinzugezogene Behörden und Experten

Feuerwehr: ☐ TUIS: ☐ Wasserbehörde: ☐ Sonstige:

4.2 Sonstige Bemerkungen (ggf. auf Beiblatt erläutern):

.....

.....

Name:

Allgemeine Hinweise

Aus den Angaben über Unfälle mit gefährlichen Gütern, die in Tanks oder Tankfahrzeugen befördert werden, sollen Hinweise für die Fortentwicklung der Gefahrgutvorschriften gesammelt werden.

Es sind alle Unfälle zu melden, bei denen Personen verletzt, Gefahrgut frei wurde und/oder die Armaturen/der Tank erheblich beschädigt wurden.

Bitte leiten Sie die Meldung zusammen mit der Verkehrsunfallanzeige und möglichst auch mit Lichtbildern (Originale) auf dem Dienstweg an das

Bundesverkehrsministerium

Referat A 13

Postfach 20 01 00

5300 Bonn 2.

Bitte entfernen Sie aus den Unterlagen alle personenbezogenen Daten (Datenschutz).

Sollten Sie Rückfragen haben, bitte rufen Sie den zuständigen Bearbeiter im Bundesverkehrsministerium direkt an (CAR Ridder - 0228/3 00 - 24 96).

Anlage 3: Formblatt "Unfall mit gefährlichen Gütern in Tanks oder Tankfahrzeugen"

- 0 Welche Maßnahmen zur Beseitigung der durch das Gefahrgut entstandenen Schäden waren nötig und wie hoch waren die Kosten?

z.B. für: - Gutachter

- Absaugen / Ausbaggern (Falls ausgebaggert wurde, wieviele Kubikmeter.)
- Abtransport
- Entsorgung
- Langfristige Beobachtungsmaßnahmen
- Rekultivierung

(bitte mit Schreibmaschine oder per Hand ausfüllen)

[illegible]

Anlage 4: Grenz- und Richtwerte für Stoffe und Parameter im Wasser

1. Von SCHLEYER & KERNDORFF (1992) als Obergrenze des geogenen Normalbereiches definierte Parameter im Grundwasser westdeutscher Trinkwasserressourcen (84,1 %-Perzentilwerte aus insgesamt 2793 Einzelanalysen)

		Obergrenze geogener Normalbereich (84,1%-Perzentilwert)			
		Lockersedimente	Kalk/Dolomit	Buntsandstein	sonst. Festgesteine
pH-Wert (minimal)	-	6,6	7,1	6,1	6,2
pH-Wert (maximal)	-	7,4	7,6	7,3	7,5
Eisen	mg/l	3	0,1	0,5	0,4
Mangan	mg/l	0,3	0,01	0,05	0,1
Aluminium	mg/l	0,04	0,02	0,02	0,06
Chrom	µg/l	1	1,5	1,5	1
Nickel	µg/l	5,5	2	4,5	5,5
Kupfer	µg/l	12	-	-	-
Zink	µg/l	150	50	85	230
Blei	µg/l	2	2	2,5	0,9
Cadmium	µg/l	0,1	0,2	0,2	<0,1
Arsen	µg/l	1,5	<0,5	4,5	2
CSB	mg/l	2,7	1,2	0,9	1,1

2. Von SCHLEYER & KERNDORFF (1992) als Beginn einer anthropogenen Beeinflussung definierte Stoffgehalte im Grundwasser westdeutscher Trinkwasserressourcen (95 %-Perzentilwerte aus insgesamt 2793 Einzelanalysen)

		Beginn anthropogener Beeinflussung (95%-Perzentilwert)			
		Lockersedimente	Kalk/Dolomit	Buntsandstein	sonst. Festgesteine
pH-Wert (minimal)	-	6,2	6,9	5,6	5,5
pH-Wert (maximal)	-	7,6	7,9	7,6	7,7
Eisen	mg/l	8	0,3	0,6	3
Mangan	mg/l	0,8	0,1	0,1	0,7
Aluminium	mg/l	0,1	0,1	0,05	0,1
Chrom	µg/l	3,5	2	2,5	1,5
Nickel	µg/l	14	3	6	11
Kupfer	µg/l	20	-	-	-
Zink	µg/l	310	140	160	350
Blei	µg/l	6	6	5	5
Cadmium	µg/l	0,4	1	0,9	1
Arsen	µg/l	8	0,7	9	4
CSB	mg/l	5	2	2	3

Anlage 4: Grenz- und Richtwerte für Stoffe und Parameter im Wasser

3. Organische Parameter im Grundwasser westdeutscher Trinkwasserressourcen (95 %-Perzentilwerte aus insgesamt 2793 Einzelanalysen) aus SCHLEYER & KERNDORFF (1992) im Vergleich zu den A-Werten der Niederländischen Liste (Referenzwert für die Obergrenze der als "normal" zu bezeichnenden Stoffgehalte) und den Grenzwerten der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990)

		95%-Perzentilwert	A-Wert Niederländische Liste	Grenzwert TrinkwV
DOC	mg/l	4,3	-	-
AOX	µg/l	13,1	-	-
Summe PAK	µg/l	<0,1	-	0,2
Summe PCB	µg/l	<0,1	0,01	0,5
Summe Tenside				
anionische	mg/l	<0,1	-	0,2
nichtionische	mg/l	<0,1	-	0,2
Dichlormethan*	µg/l	<0,1	0,01	10**
Trichlormethan	µg/l	0,6	0,01	-
Tetrachlormethan	µg/l	<0,1	0,01	3
1,1,1-Trichlormethan*	µg/l	0,2	0,01	10**
Trichlorethen*	µg/l	1,1	0,01	10**
Tertrachlorethen*	µg/l	1,2	0,01	10**
Bromoform	µg/l	<0,1	-	-
Bromdichlormethan	µg/l	0,4	-	-
Dibromchlormethan	µg/l	<0,1	-	-
Benzol	µg/l	<0,1	0,2	-
Toluol	µg/l	<0,1	0,2	-
Xylol	µg/l	<0,1	0,2	-
Ethylbenzol	µg/l	<0,1	0,2	-
Summe PBSM	µg/l	0,11	-	0,5
Atrazin	µg/l	0,08	-	0,1
Simazin	µg/l	<0,05	-	0,1

** Summe der mit * markierten Stoffe

Anlage 4: Grenz- und Richtwerte für Stoffe und Parameter im Wasser

4. Grenzwerte der Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990)

Parameter	Einheit	Trinkwasserverordnung (TrinkwV 1990)	
		Grenzwert	Richtwert
Leitfähigkeit	$\mu\text{S/cm}$	2000	
pH-Wert (minimal)	-	6,5	
pH-Wert (maximal)	-	9,5	
Sulfat	mg/l	240	
Chlorid	mg/l	250	
Ammonium-N	mg/l	0,5	
Nitrat	mg/l	50	
Gesamtphosphor	mg/l	6,7	
Eisen	mg/l	0,2	
Chrom	mg/l	0,05	
Nickel	mg/l	0,05	
Kupfer	mg/l	-	
Zink	mg/l	-	
Blei	mg/l	0,04	
Cadmium	mg/l	0,005	
Arsen	mg/l	0,01	
CSB	mg/l	5	
Mineralöle	mg/l	0,01	

5. Na- und Cl-Gehalte in Grundwässern in der Bundesrepublik Deutschland - aus HÖLTING (1991)

Gesteinsart des Grundwasserleiters	mg Na/l im Grundwasser		mg Cl/l im Grundwasser	
	Wertebereich	Mittelwert	Wertebereich	Mittelwert
Magmatisches / metamorphes Gestein (kristallin), Quarzit	0,6-10	8,1	2,5-15	9
Vulkanit (Diabas, Basalt), Tuffit	3,9-95	49,5	3,0-4,0	3,5
Sandstein, Konglomerat	1,3-23	8,2	1,8-71	14,8
Grauwacken-, Ton- Kieselchiefer	3,4-33	12,1	6,8-35	12,3
Carbonatgestein (Kalk- / Mergelstein)	3,0-30,5	9,5	7,1-47	21,7
Tertiärer und pleistozäner Sand, Mergel	3,9-30	14,9	0-25	16,8
Ton- / Schluffstein	3-10,2	6,5	7-20,6	13,4
Sand, Meerwassereinfluß	3675		6026	

Anlage 4: Grenz- und Richtwerte für Stoffe und Parameter im Wasser

6. Von SCHLEYER & KERNDORFF (1992) als Obergrenze des geogenen Normalbereiches definierte Gehalte tausalzspezifischer Stoffe in westdeutschen Grundwasservorkommen (84,1 %-Perzentilwerte aus insgesamt 2793 Einzelanalysen)

		Obergrenze geogener Normalbereich (84,1%-Perzentilwert)			
		Lockersedimente	Kalk/Dolomit	Buntsandstein	sonst. Festgesteine
Leitfähigk.	µs/cm	660	900	640	600
Chlorid	mg/l	55	70	35	35
Natrium	mg/l	30	35	10	40
Calcium	mg/l	120	130	75	75
Kalium	mg/l	4	4	5	8
Magnesium	mg/l	25	40	20	35
Sulfat	mg/l	105	125	60	75

7. Von SCHLEYER & KERNDORFF (1992) als Beginn einer anthropogenen Beeinflussung definierte Gehalte tausalzspezifischer Stoffe in westdeutschen Grundwasservorkommen (95 %-Perzentilwerte aus insgesamt 2793 Einzelanalysen)

		Beginn anthropogener Beeinflussung (95%-Perzentilwert)			
		Lockersedimente	Kalk/Dolomit	Buntsandstein	sonst. Festgesteine
Leitfähigk.	µs/cm	840	1000	810	820
Chlorid	mg/l	50	50	15	55
Natrium	mg/l	80	80	40	55
Calcium	mg/l	150	160	100	120
Kalium	mg/l	9	7	7	15
Magnesium	mg/l	30	45	30	40
Sulfat	mg/l	150	210	85	190

8. Grenz- und Richtwerte für Natrium und Chlorid im Trinkwasser

Quelle	Erläuterung	Parameter	Betrag/Einheit
WHO*	anzustrebender Grenzwert	Cl	200 mg/l
	oberer zulässiger Grenzwert	Cl	600 mg/l
US Public Health Service*	Grenzwert	Cl	250 mg/l
EG-Richtlinie*	Richtzahl	Cl	25 mg/l
	Wirkungsschwelle	Cl	200 mg/l
DIN 2000*	Sollwert	Cl	250 mg/l
Trinkwasserverordnung	Grenzwert für chemische Stoffe	Cl	250 mg/l
Trinkwasserverordnung	Grenzwert für chemische Stoffe	Na	150 mg/l
Trinkwasserverordnung	Grenzwert für physikalisch-chemische Kenngrößen	Leitfähigkeit	2000 µS/cm

(*) entnommen aus BROD (1993)

Anlage 4: Grenz- und Richtwerte für Stoffe und Parameter im Wasser

9. Cl- und NaCl-Grenzwerte für Brauchwasser; entnommen aus DAUSCHECK & BISCHOFBERGER (1986)

Industrie-Brauchwasser (Cl)		Pflanzen-Bewässerung (NaCl)	
Konserven- und Gefrierprodukte	- 760 mg/l	Sandiger Boden	1600-5100 mg/l
Getränkeindustrie	200-250 mg/l	Lehmiger Boden	1000-2500 mg/l
Brauereien	60-100 mg/l	Lehm	650-2000 mg/l
Milchprodukte	20-30 mg/l	Toniger Lehm	500-1300 mg/l
Stahl-Fabrikation	60-100 mg/l	Toniger Boden	250-600 mg/l
Papier-Fabrikation	60-100 mg/l		
Photoindustrie	20-30 mg/l		

Literatur zu Anlage 4:

- BROD, H.G. (1993): Langzeitwirkung von Streusalz auf die Umwelt. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt) (Hrsg.), Reihe Verkehrstechnik, Heft V2. Bergisch Gladbach. 165 S.
- DAUSCHECK, H.; BISCHOFBERGER, W. (1986): Beeinträchtigung von Grund- und Oberflächenwasser durch Auftausalze in Schutzzonen. Berichte aus Wassergütwirtschaft und Gesundheitsingenieurwesen, Nr. 30, Lehrstuhl für Wassergüte und Gesundheitsingenieurwesen, Technische Universität München, 135 S.
- HÖLTING, B. (1991): Geogene Grundwasserbeschaffenheit und ihre regionale Verbreitung in der Bundesrepublik Deutschland. In: ROSENKRANZ, EINSELE & HARRES (Hrsg.): Bodenschutz - Ergänzbare Handbuch der Maßnahmen ..., Band 1. 1300, S. 1-36, Erich Schmidt Verl. Berlin
- LÖHR, H.-P.; JORNS, A.; STAUPE, J. (1992): Einleitewerte für kontaminierte Wässer. Institut für wassergefährdende Stoffe an der Technischen Universität Berlin; IWS-Schriftenreihe, Band 14. Berlin. 82 S.
- SCHLEYER, R.; KERNDORFF, H. (1992): Die Grundwasserqualität westdeutscher Trinkwasserresourcen - Eine Bestandsaufnahme für den vorbeugenden Grundwasserschutz sowie zur Erkennung von Grundwasserverunreinigungen. VCH Verl. Weinheim
- TrinkwV (Trinkwasserverordnung) (1990): Verordnung über Trinkwasser und über Wasser für Lebensmittelbetriebe. BGBl. I, S. 2613

Abkürzungen

Abb.	Abbildung
Abschn.	Abschnitt
Anm. d. Verf.	Anmerkung des Verfassers
ATV	Abwassertechnische Vereinigung
BAB	Bundesautobahn
B	Bundesstraße
BAM	Bundesanstalt für Materialforschung- und prüfung
BAST	Bundesanstalt für Straßenwesen
bzw.	beziehungsweise
ca.	cirka
CSB	chemischer Sauerstoffbedarf (organischer Summenparameter)
d.h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DIW	Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung
DVGW	Deutscher Verein von Gas- und Wasserfachmännern e.V.
DTV	durchschnittliche tägliche Verkehrsstärke in Kfz./24 h
DVWK	Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau
et al.	und weitere - wird bei mehr als zwei Autoren verwendet
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen
gem.	gemäß
GGVS	Gefahrgutverordnung Straße
GTD	Geokunststoff-Ton-Dichtung
i.d.R.	in der Regel
K	Kreisstraße
KDB	Kunststoffdichtungsbahn
Kfz	Kraftfahrzeug
LAWA	Länderarbeitsgemeinschaft Wasser
L	Landesstraße
lt.	laut
LTwS	Beirat "Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe" beim Bundesminister für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit
MK	Migrationsklasse
PEHD	Polyäthylen hoher Dichte (thermoplastischer Kunststoff)
s.	siehe
StVO	Straßenverkehrsordnung
Tab.	Tabelle
TrinkwV	Trinkwasserverordnung
UBA	Umweltbundesamt
UStatG	Umweltstatistikgesetz
UTwSSt	Unfälle beim Transport wassergefährdender Stoffe auf Straßen
v.a.	vor allem
WGK	Wassergefährdungsklasse
z.B.	zum Beispiel



Schriftenreihe

Lehrstuhl und Prüfamnt für Grundbau, Bodenmechanik und Felsmechanik
der Technischen Universität München

Herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. Rudolf Floss
Ordinarius für Grundbau, Bodenmechanik
und Felsmechanik

Heft 1	Tragfähigkeit von Verpreßankern in nichtbindigem Boden	1982	(vergriffen)
Heft 2	Beiträge zur Anwendung der Stochastik und Zuverlässigkeitstheorie in der Bodenmechanik	1983	(vergriffen)
Heft 3	In-situ Versuche zur Ermittlung der Unterbausteifigkeit an zwei Pfeilern der Sinntalbrücke Schaippach	1984	(vergriffen)
Heft 4	Ein Beitrag zum Spannungs-Verformungsverhalten silikatgel-injizierter Sande	1985	(vergriffen)
Heft 5	Beiträge zum Tragverhalten axial zyklisch belasteter Pfähle	1985	
Heft 6	Forschungsbeiträge zum mechanischen Verhalten von Geotextilien	1986	(vergriffen)
Heft 7	Beschreibung der räumlichen Streuungen von Bodenkennwerten mit Hilfe der Zeitreihenanalyse	1986	(vergriffen)
Heft 8	Ein stochastisches Bodenmodell für geotechnische Aufgaben	1986	
Heft 9	Testing of bentonit suspensions	1987	
Heft 10	Beiträge zur Felsmechanik	1987	
Heft 11	Untersuchung der dynamischen Vorgänge bei der Vibrationsverdichtung von Böden	1988	(vergriffen)
Heft 12	Bruchvorgänge infolge der Isareintiefung südlich Münchens und die kritischen Höhen der Talhänge	1988	
Heft 13	Quantifizierung von Setzungsdifferenzen mit Hilfe einer stochastischen Betrachtungsweise	1989	
Heft 14	Ein Beitrag zur Vorhersage von Verformungen und Spannungen des Baugrundes und des Ausbaues bei Hohlraumbauten	1989	
Heft 15	Beitrag zur Analyse des Tragverhaltens von einfach bewehrten Zweischichtensystemen	1989	
Heft 16	Beitrag zur statistischen Qualitätskontrolle im Erdbau	1990	

Heft	17	Vergleichsuntersuchungen über die Wirkung von vibrierend und oszillierend arbeitender Verdichtungswalze	1990	
Heft	18	Probabilistische Standsicherheitsanalyse für tetraedrische Felskeile	1993	
Heft	19	Untersuchungen zur Wirksamkeit einer Bewehrung im Zweischichtensystem	1993	
Heft	20	Zur Strategie der Gestaltung großer Krafthauskavernen	1994	(vergriffen)
Heft	21	Beiträge aus der Geotechnik (Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Univ.-Prof. Dr.-Ing. R. Floss)	1995	
Heft	22	Ein Verfahren zur Bestimmung der Durchlässigkeit mit Infiltrationsversuchen	1995	
Heft	23	Untersuchungen zur Materialdämpfung in der Bodendynamik	1996	
Heft	24	Beitrag zum zeit- und temperaturabhängigen Materialverhalten von Asphaltbeton für Kerndichtungen in Schüttdämmen unter besonderer Berücksichtigung des ebenen Verzerrungszustandes	1996	
Heft	25	Risikobetrachtungen zur Planung von Maßnahmen zum Grundwasserschutz im Einflußbereich von Straßen	1997	