Grundlagen der Bewertung des Grundwasser-Gefährdungspotentials

Prof. Dr.-Ing. H.-P. Lühr

Lehrgang Nr. 12623/16.070
Ölverunreinigte Gelände
Technische Akademie Esslingen, 9./10.05.1990

1. Problemstellung

Der Umgang mit wassergefährdenden Stoffen stellt im Hinblick auf den Grundwasserschutz einen bedeutenden Bereich in der Gewässerschutzpolitik dar, auf den konsequent das Vorsorgeprinzip anzuwenden ist. Er befaßt sich nach der 5. Novelle zum Wasserhaushaltsgesetz (§ 19 a und g WHG) von 1986 mit dem Transport in Fernleitungen, dem Lagern, Abfüllen, Umschlagen, Herstellen, Behandeln und Verwenden von wassergefährdenden Stoffen sowie der Beförderungen in werksinternen Rohrleitungsanlagen. Aus diesem Bereich des anlagenbezogenen Umgangs mit wassergefährdenden Stoffen sind zunehmend erhebliche Kontaminationen des Bodens und des Grundwassers bekannt geworden, so daß gerade dem präventiven Grundwasser- und Bodenschutz besondere Aufmerksamkeit zu widmen ist.

Vor dem Hintergrund des Umgangs mit wassergefährdenden Stoffen bedarf es eines vom Gefährdungspotential der Stoffe ausgehenden adäquaten anlagenbezogenen Sicherheitskonzeptes. Dieses Konzept Abb. 1 gliedert sich in zwei Komponenten:

- die Einschätzung des vom Stoff ausgehenden Gefährdungspotentials und
- das adäquate anlagenbezogene Sicherheitskonzept.

Es trägt dem bereits in 34 Abs. 2 WHG verankerten Besorgnisgrundsatz Rechnung und berücksichtigt den Grundsatz der Verhältnismäßigkeit (Lühr/ Staupe 86), denn die Besorgnis einer Boden- oder Gewässerverunreinigung hängt im Einzelfall von der Wahrscheinlichkeit eines Schadens an der Anlage und den möglichen Folgewirkungen ab. Die aus dem Gefährdungspotential abzuleitende Besorgnis ist um so größer, je wahrscheinlicher der Schadenseintritt und je schwerwiegender die Folge ist. Daraus lassen sich differenzierte anlagenbezogene Anforderungen ableiten.

Die Begründung für eine detaillierte Standortcharakterisierung findet sich in den Anforderungskatalogen der Länder zum Lagern sowie zum Abfüllen und Umschlagen wassergefährdender Stoffe. Die danach vorzunehmende Gefahrenanalyse macht eine Untersuchung der hydrogeologischen Beschaffenheit des Aufstellungsortes und seines Untergrundes erforderlich, um daraus besondere Schutzmaßnahmen und Schutzanforderungen ableiten zu können.

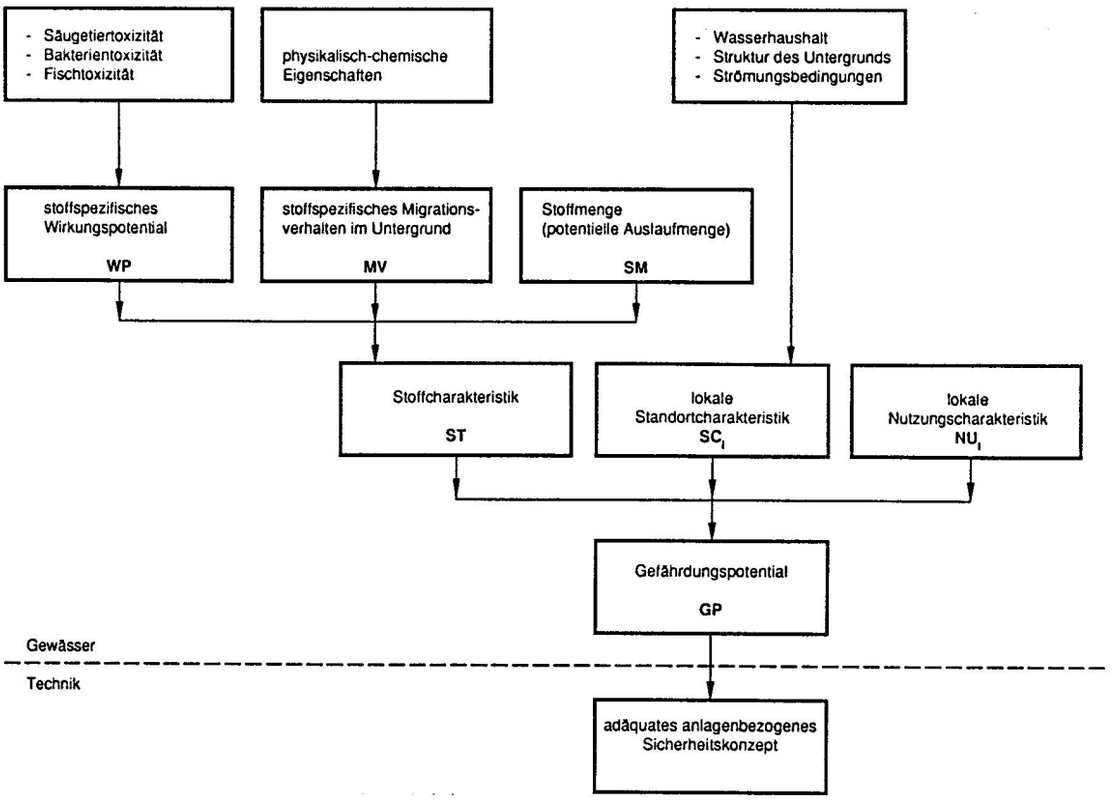


Abb. 1: Fließschema für ein adäquates Sicherheitskonzept

Die nachfolgenden Ausführungen berücksichtigen Situationen, in denen aus punktförmigen Quellen relativ große Frachten an Schadstoffen freigesetzt werden. Flächenhafte Kontaminationen z.B. aus der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln oder infolge der weiträumigen Luftverfrachtung von Schadstoffen werden nicht erfaßt.

Einschätzung des Gefährdungspotentials

Das Gefährdungspotential (GP) wird im wesentlichen durch die drei Kriterien "Stoffcharakteristik (ST)", "Standortcharakteristik (SC)" und "Nutzungscharakteristik (NU)" bestimmt:

$$GP = f(ST, SC, NU)$$

In der Stoffcharakteristik (ST) werden die stoffspezifischen Eigenschaften und die Stoffmenge zusammengefaßt. Die stoffspezifischen Eigenschaften werden durch das Wirkungspotential (WP) und das Migrationsverhalten (MV) erfaßt.

Das stoffspezifische Wirkungspotential (WP) beschreibt die relevanten Eigenschaften eines Stoffes hinsichtlich Toxizität, Persistenz, Akkumulierbarkeit, Cancerogenität etc. Das stoffspezifische Migrationsverhalten (MV) charakterisiert das Verhalten eines Stoffes im aufnehmenden Medium Untergrund bzw. Grundwasser. Unter der zu berücksichtigenden Stoffmenge (SM) sind die in Frage kommenden Auslaufmengen aus der jeweiligen technischen Anlage zu verstehen.

Die Standortcharakteristik (SC) ergibt sich aus der lokalen Situation am Standort. Sie umfaßt u.a. den Wasserhaushalt, die Struktur des Untergrundes sowie die Grundwasserhydraulik.

In dem Kriterium Nutzungscharakteristik (NU) wird die Beziehung einer zu planenden Anlage zu bereits vorhandenen Nutzungen berücksichtigt und deren eventuelle Gefährdung durch die neue Anlage abgeschätzt.

Aus diesen drei Kriterien ist in geeigneter Weise ein Gesamtgefährdungspotential beispielsweise für eine konkrete Anlage an einem konkreten Standort zu bestimmen.

2. Verhalten von Stoffen im Untergrund

In dem gesamten Verfahren zur Abschätzung des Gefährdungspotentials ist das Feld "Ermittlung des stoffspezifischen Wirkungspotentials" (Abb. 1) standardisiert und bereits in die Praxis eingeführt. Das "stoffspezifische Wirkungspotential" wird in Form der Wassergefährdungsklassen (WGK) durch die "Kommission Bewertung wassergefährdender Stoffe" (KBwS) des BMI-Beirates LTwS bestimmt (UBA 1979; Lühr 1981).

Das Schema (Lühr 1990) zur Klassifizierung des "stoffspezifischen Migrationspotentials" (Abb. 1) orientiert sich nur an den physikalischchemischen Eigenschaften eines Stoffes, die für das Verhalten im Untergrund maßgeblich sind. Dem hier dargelegten stoffspezifischen Bewertungsschema für das Migrationsverhalten sind folgende Prämissen vorauszuschicken:

- Unfälle beim Umgang mit wassergefährdenden Stoffen haben in der Regel punktförmige Kontaminationen zur Folge. Das Bewertungssystem beschränkt sich daher auf die Ausbreitung im Untergrund, die von solchen Quellen ausgeht. Die Bewertung orientiert sich in erster Linie an der Migrationsfähigkeit von Chemikalien.

- Das vorliegende Bewertungsschema zielt darauf ab, Entscheidungskriterien für die Festsetzung von anlagenbezogenen, technischen Anforderungen in Abhängigkeit des von Stoffen ausgehenden Gefährdungspotentials zu erzielen. Gleichwohl liefert es auch wertvolle Informationen für den Sanierungsfall.

- Das Migrationsverhalten eines Stoffes im Untergrund ist von einer Vielzahl von Einflußgrößen abhängig. Das Hauptproblem bei der Erstellung eines Bewertungsschemas liegt daher auch in dem Gegensatz zwischen komplexem Verhalten von Stoffen einerseits und der Notwendigkeit eines einfachen, anwendbaren Bewertungsmodells andererseits. Viele Prozesse, die das Verhalten im Untergrund mitbestimmen, aber quantitativ von untergeordneter Bedeutung sind, müssen im Hinblick auf die Anforderungen eines generellen Verhaltensmusters vernachlässigt werden. Die Zielvorstellung eines stoffspezifischen Bewertungsmodells liegt in der Zusammenfassung von Einflußgrößen auf wenige dominante Parameter analog der Bestimmung der Wassergefährdungsklassen. Wegen dieser Vereinfachung muß die Möglichkeit offengehalten werden, im begründeten Einzelfall durch einen zusätzlichen Parameter das Ergebnis des Bewertungsschemas zu modifizieren (z.B. Abbaubarkeit bei Mineralölen oder Oberflächenspannung bei Tensiden).

- Von punktförmigen Verschmutzungsquellen geht in Abhängigkeit von der Menge eine relativ hohe Fracht aus. Wechselwirkungen der zu bewertenden Chemikalien mit der Untergrundmatrix nehmen hier einen anderen Stellenwert ein als bei flächenhaften Kontaminationen. Das Selbstreinigungsvermögen des Untergrundes, insbesondere der biotische und chemische Abbau und die Sorptionswirkungen, werden hier vernachlässigt.

- Die Klassifizierung kann nur einen Rahmen darstellen zur Erfassung des generellen Verhaltensmusters. Deshalb wurde ein pragmatischer Ansatz erarbeitet. Die Ergebnisse stellen eine Informationsquelle unter vielen anderen dar und entheben nicht davon, Ermessensspielräume sowie vertiefte Überlegungen im Einzelfall auszuschöpfen. Im Einzelfall kann deshalb bei Vorliegen konkreter Information durchaus begründet abgewichen werden. Dadurch wird das Bewertungskonzept nicht hinfällig.

Die Darstellung des stoffspezifischen Bewertungsmodells beginnt mit der Betrachtung der möglichen Expositionen, um zu klären, welche Stoffe einer Bewertung unterliegen. Aus der anschließenden generalisierten Migrationsklassifizierung lassen sich wesentliche Ansätze zur Parameterauswahl und Gliederung einer Verhaltensbewertung ableiten und ein aus drei Abschnitten bestehendes Bewertungsmodell entwickeln.

2.1 Vorbetrachtung zur problemangepaßten Exposition

Die Bestimmung der problemangepaßten Exposition ist die Voraussetzung zur Untersuchung des Migrationsverhaltens einer Chemikalie im Untergrund. Wird ein Stoff freigesetzt, so gilt es, zuerst die Frage zu klären, welchen Umweltkompartimenten er sich zuordnen läßt (Abb. 2).

Von besonderer Bedeutung ist der Aggregatzustand einer freigesetzten Chemikalie. **Gasförmige Stoffe** können bei Unfällen unkontrolliert entweichen. Das erste Entscheidungskriterium für die Verhaltensbewertung ist die **Dichte des Gases**. Stoffe, die leichter als Luft sind, entweichen der Kontaminationsstelle, ohne mit dem Boden in länger anhaltenden Kontakt zu geraten. Gase, die spezifisch schwerer als Luft sind, können insbesondere bei ruhigen Windverhältnissen mit dem Boden in Berührung kommen. Sie breiten sich auf der Bodenoberfläche aus. Dabei können sie durch die Vegetation aufgenommen werden, vom Boden adsorbiert werden, aber auch in die lufterfüllten Poren diffundieren und mit dem Bodenwasser eine Lösung bilden (Fränzle et al. 1981).

Das Entscheidungskriterium für **feste Stoffe** ist deren **Wasserlöslichkeit**. Bei gering wasserlöslichen Chemikalien erfolgt lediglich ein der Schwerkraft folgender vertikaler Transport. Die Teilchengröße in Abhängigkeit vom Porenspektrum des Oberbodens entscheidet über die Tiefe des Eintrags. Sind die Partikel kleiner als der Durchmesser der Leitbahnen, so kann ein abwärts gerichteter Transport durch perkulierendes Wasser bis zur Verengung des Porensystems erfolgen (Fränzle 1983). Beispielsweise konnten Kontaminationen von Dioxinen bis zu einer Bodentiefe von 60 cm nachgewiesen werden (Stief und Franzius 1983).

Bei großer Wasserlöslichkeit kann der Feststoff in den Untergrund eingewaschen werden. Da die physikalischchemischen Größen der sich bildenden Lösung etwa denen des Wassers entsprechen, erfolgt eine Migration nach den Regeln des Bodenwasserhaushaltes (Fränzle et al. 1981).

Bei der Freisetzung **flüssiger Stoffe** ist in jedem Fall ein Eindringen in den Boden anzunehmen und eine Bewertung des Migrationsverhaltens vorzunehmen. Selbst bei leicht flüchtigen Flüssigkeiten ist neben der Ausbreitung des Gases auch die Migration der Restflüssigkeit im Untergrund zu bewerten.

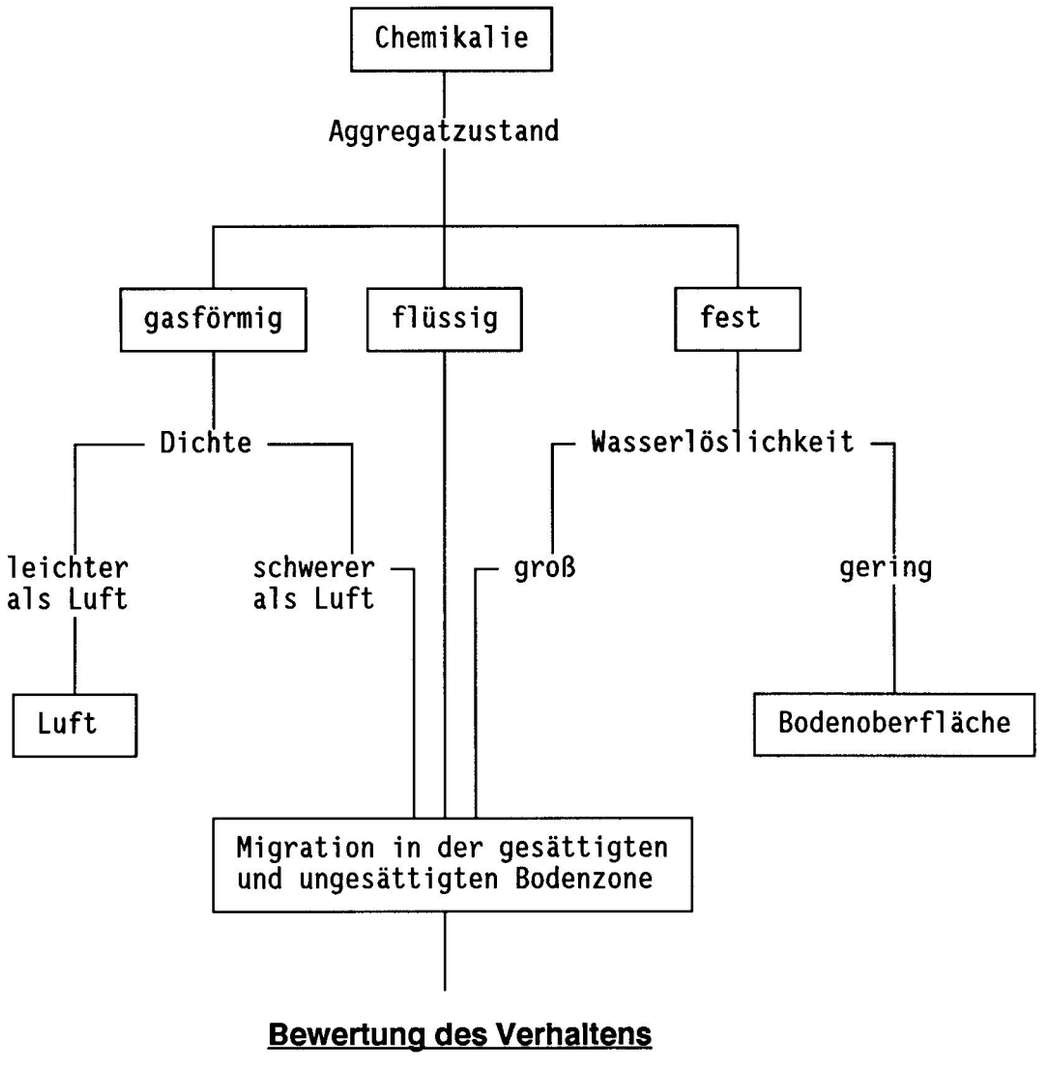


Abb. 2: Bestimmung der problemangepaßten Situation

2.2 Generalisiertes Flußschema zur Migrationsklassifizierung

Grundlage eines stoffspezifischen Bewertungsschemas ist die Klassifizierung der möglichen Migration im Untergrund. Das Migrationsverhalten ist von einer großen Anzahl von Einzelfaktoren abhängig. Der Transport und der Verbleib von Stoffen läßt sich jedoch anhand von bekannten Stoffkonstanten und Verteilungs- bzw. Wechselwirkungsparametern approximieren (Fränzle et al. 1981). Ein generalisiertes Flußschema, dessen Aufbau die für die Migration wesentliche Zonierung des Untergrundes spiegelt, läßt sich in 12 Stufen untergliedern (Abb. 3):

1) Die Unterscheidung von wassergefährdenden Stoffen bezüglich ihrer Wassermischbarkeit stellt einen den Migrationsvorgang entscheidend bestimmenden Schritt dar.

2) In der ungesättigten Bodenzone ist die Zeitdauer des Versickerungsvorgangs von Bedeutung, die von der Viskosität des Stoffes abhängig ist; im Extremfall kann der Stoff festgesetzt werden. In der ungesättigten Zone tritt beim Sickervorgang neben der nicht mischbaren Flüssigkeit auch die Porenluft als Fluid in Erscheinung. Der theoretisch stattfindende Mehrphasenfluß ist für die Grundwasserpraxis nur von geringer Bedeutung, da das Wasser meist in irreduzibler Verteilung vorhanden ist und einsickernde, nicht mischbare Flüssigkeiten die Luft relativ leicht verdrängen können.

3) Ein zurückgehaltener oder versickernder Stoff kann je nach Flüchtigkeit eine Gaszone ausbilden, die je nach Gasdichte zur Bodenoberfläche aufsteigt oder zum Kapillarsaum absinkt.

4) Vor dem Eintritt in die gesättigte Bodenzone müssen Chemikalien, die mit Wasser nicht mischbar sind, im Hinblick auf ihre relative Dichte zu Wasser unterschieden werden.

5) Beide Gruppen von Stoffen bewegen sich in der gesättigten Zone nach dem Mechanismus des Zwei bzw. Mehrphasenflusses. Dabei ist ein gemeinsames Fließen von Wasser und Stoff nur innerhalb bestimmter Sättigungsgrenzen möglich.

6) Der Fluß eines Stoffes, der schwerer als Wasser ist, wird bereits bei Berührung mit dem Kapillarsaum gehemmt. In der Sättigungszone beginnt der Stoff erst beim lokalen Überschreiten der Residualsättigung, in Phase zu sinken.

7) Auf dem Boden des Grundwasserleiters breitet der Stoff sich in Form von Pfützen und Lachen aus. Da das Relief der Sohle meist unbekannt ist, sind auch über die weitere Ausbreitung keine Angaben möglich. Allerdings kann ein abgesunkener Stoff durch Undichtigkeiten der Sohle in tiefere Grundwasserschichten gelangen.

8) Für eine Chemikalie, die leichter als Wasser und in Wasser schwer bzw. unlöslich ist, bildet die Grundwasseroberfläche eine natürliche Stauschicht.

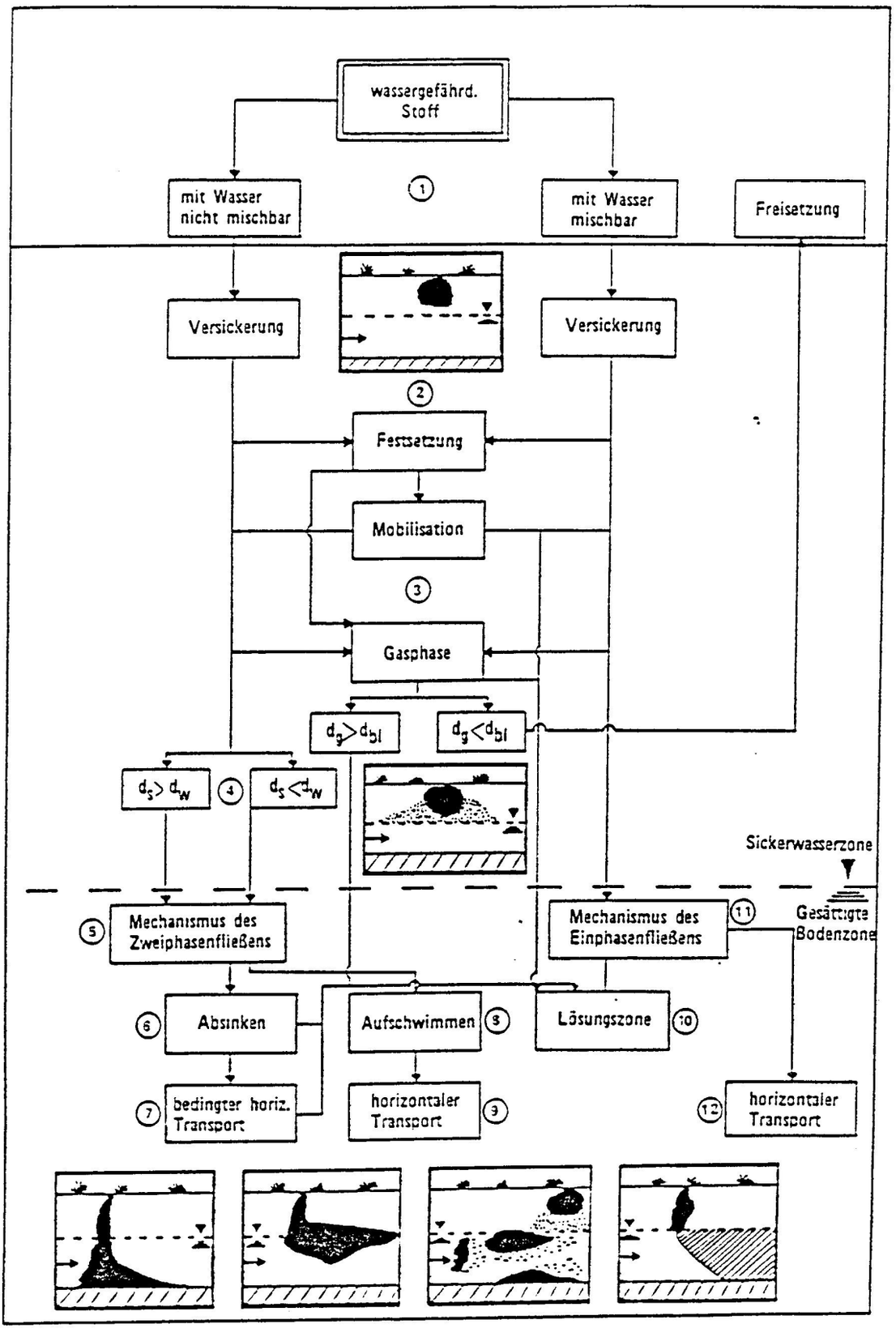
9) Der weitere horizontale Transport wird vor allem von der Grundwasserströmung und der Durchlässigkeit des Bodens in Höhe des Grundwasserspiegels bestimmt.

10) Eine Lösungszone kann sich schon bei der Auswaschung festgesetzter Stoffe und der Lösung absinkender Dämpfe bilden. Aber insbesondere absinkende, abgesunkene und aufschwimmende Substanzen bilden eine relativ große Kontaktfläche zum umströmenden Wasser aus. Dabei gehen sie je nach Löslichkeitsgrad des in Phase befindlichen Stoffes in Lösung.

11) Die Lösungszone breitet sich ebenso wie die mit Wasser mischbaren Stoffe in der gesättigten Bodenzone nach dem Mechanismus des Einphasenfließens aus.

12) Der horizontale Transport gelöster Stoffe stellt eine Überlagerung der Mechanismen Konvektion, Dispersion, Adsorption und Abbau dar.

Abb. 3: Generalisiertes Flußschema zur Migrationsklassifizierung



2.3 Bewertungsschema

Für die drei möglichen Aggregatzustände von Stoffen wurden 3 unterschiedliche Bewertungsansätze entwickelt. Ziel der Bewertung ist es, die Stoffe sog. **Migrationsklassen wassergefährdender Stoffe MK** zuordnen zu können. Diese ermöglichen eine Abschätzung über die Mobilität eines Stoffes. Je höher die Migrationsklasse ist, um so mobiler ist ein Stoff. Er kann somit über den Transportweg Grundwasser in vom Eintragungsstandort entferntere Bereiche gelangen und damit zu Beeinträchtigungen an Schutzgütern wie z. B. Trinkwasser führen. Andererseits ist ein Stoff in der niedrigsten Migrationsklasse quasi "standorttreu".

2.3.1 Flüssigkeiten

Die Migration einer Chemikalie läßt sich in die beiden Bereiche ungesättigte und gesättigte Bodenzone einteilen. Für ein Bewertungsmodell, das sich an dem Postulat des präventiven Gewässerschutzes orientiert, steht das Verhalten in der Sickerwasserzone im Vordergrund. Um eine Kontamination des Grundwassers möglichst auszuschließen, muß der Schwerpunkt der Bewertung auf dem Verhalten des Stoffes vor Erreichen der gesättigten Bodenzone liegen. Die Migrationsbewertung, die zu vorbeugenden Schutzmaßnahmen führen soll, muß aber auch die Auswirkungen eines potentiellen Gewässerschadens in erster Näherung mit einbeziehen.

Anhand des Flußschemas zur Migrationsklassifizierung (Abb. 3) stehen in der ungesättigten Bodenzone die Versickerung und die Volatilität im Vordergrund. Das Verhalten in der gesättigten Zone wird primär durch die in der ersten Phase zu beobachtende Ausbreitung im Grundwasser bestimmt. Danach lassen sich drei Bewertungsabschnitte unterscheiden:

A) Versickerung (ungesättigte Zone)

B) Volatilität (ungesättigte Zone)

C) Ausbreitung (gesättigte Zone)

Zu den drei Bewertungsschritten lassen sich die fünf hervorgehobenen Entscheidungsparameter eindeutig zuordnen (Abb. 4). Die Versickerung wird von der Dichte und der Viskosität, die Verdunstung von der Volatilität und der relativen Gasdichte und die Ausbreitung in der gesättigten Bodenzone von der relativen Stoffdichte und der Wasserlöslichkeit bzw. Wassermischbarkeit bestimmt.

A) Versickerung (ungesättigte Zone)	B) Volatilität (ungesättigte Zone)	C) Ausbreitung (gesättigte Zone)
- Dichte - Viskosität	- Dampfdruck - relative Gas-dichte	- relative Dichte - Wasserlöslichkeit/ Wassermischbarkeit

Abb. 4: Zuordnung der dominanten Entscheidungsparameter zu den Bewertungsschritten

Aus diesen drei Schritten setzt sich das Bewertungsschema (Abb. 5) zusammen:

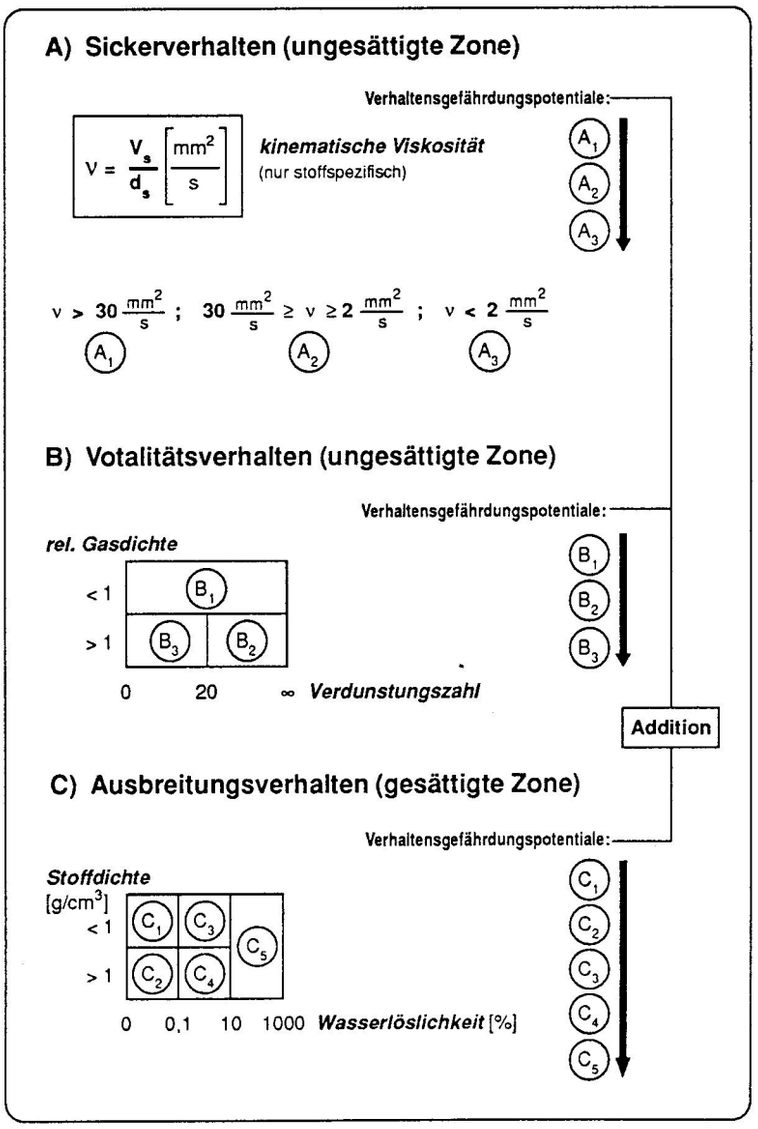


Abb. 5: Skalierung des Migrationspotentials

Verknüpfung

Die Verknüpfung der einzelnen Abschnitte erfolgt analog ihrer Gewichtung durch Addition der Indices der Einzelbewertungen (A_1-A_3; B_1-B_3; C_1-C_5). Die Skala für die Verhaltensbewertung reicht daher von der minimalen Punktzahl 3 (A_1 + B_1 + C_1) bis zur maximalen Punktzahl 11 (A_3 + B_3 + C_5). Die Gesamtbewertung des Migrationspotentials erfolgt durch folgende Zuordnung der jeweiligen Punktzahlen:

Tab. 2: Punktzahl und Migrationsklasse

Punkte aus der Bewertung der 3 Bereiche	Migrationspotential	Migrations-klasse
3-5	geringes Migrationspotential	= MK 0
6-8	mittleres Migrationspotential	= MK 1
9-10	hohes Migrationspotential	= MK 2
11	sehr hohes Migrationspotential	= MK 3

In Tabelle 3 sind Stoffbeispiele zur Anwendung des Bewertungsschemas aufgelistet. Aus den fünf Stoffdaten kinematische Viskosität, Dampfdichte, relative Gasdichte, Stoffdichte und Wasserlöslichkeit ergeben sich analog Abbildung 5 die Punktzahlen für die Bewertung des Migrationsverhaltens. Daraus ergibt sich, daß Trichlorehtylen einem hohen, Isopentan einem mittleren und zähflüssiges Rohöl einem geringen Migrationspotential zugeordnet wird. Die so bewerteten Stoffe zeigen deutlich, daß ihre unterschiedlichen Eigenschaften hinsichtlich ihres Migrationsverhaltens in der relativen Bewertung zueinander sich wiederfinden.

Tabelle 3: Bewertungsbeispiele

	Stoffdaten					Bewertung nach Abb. 5				
	A	B		C		A_{1-3}	B_{1-3}	C_{1-5}	Punktzahl	Migrations-klasse
	Kin. Viskosität [mm^2/s]	Dampf-druck [mmHg]	rel. Gas-dichte	Stoff-dichte [g/cm^3]	Wasser-löslichkeit [mg/l]	Versik-kerung	Volati-lität	Ausbrei-tung	Min.=3 Max.=11	
Trichlorethylen WGK-Nr. 199	0,4	80	4,1	1,5	1100	A_3	B_3	C_4	10	MK2
Isopentan	0,4	573	2,5	0,62	48	A_3	B_3	C_1	7	MK1
zähflüss. Rohöl WGK-Nr. 439	>30	<10	>1	ca. 0,9	ca. 0,025	A_1	B_2	C_1	4	MK0

2.3.2 Gase und Feststoffe

Bei Gasen und Feststoffen hat eine Anwendung des Bewertungsschemas an einem größeren Kollektiv ergeben, daß für ihre Zuordnung zu den vier Migrationspotentialen ein vereinfachtes Verfahren ausreicht (Abb. 6). Danach besitzen Gase mit einer relativen Gasdichte kleiner 1 ein geringes Migrationspotential. Bei Gasen mit einer relativen Gasdichte größer 1 muß dagegen weiter unterschieden werden, ob ihre Wasserlöslichkeit größer oder kleiner 10^4 mg/l beträgt. Gase mit einer Wasserlöslichkeit kleiner 10^4 mg/l werden den Stoffen mit einem mittleren Migrationspotential zugeordnet, während Gase mit einer Wasserlöslichkeit größer 10^4 mg/l ein hohes Migrationspotential besitzen. Bei Feststoffen wird die Einstufung lediglich anhand der Wasserlöslichkeit entschieden. Feststoffe mit einer Wasserlöslichkeit kleiner 10^2 mg/l besitzen ein geringes Migrationspotential, mit einer Wasserlöslichkeit größer 10^2 mg/l ein mittleres Migrationspotential.

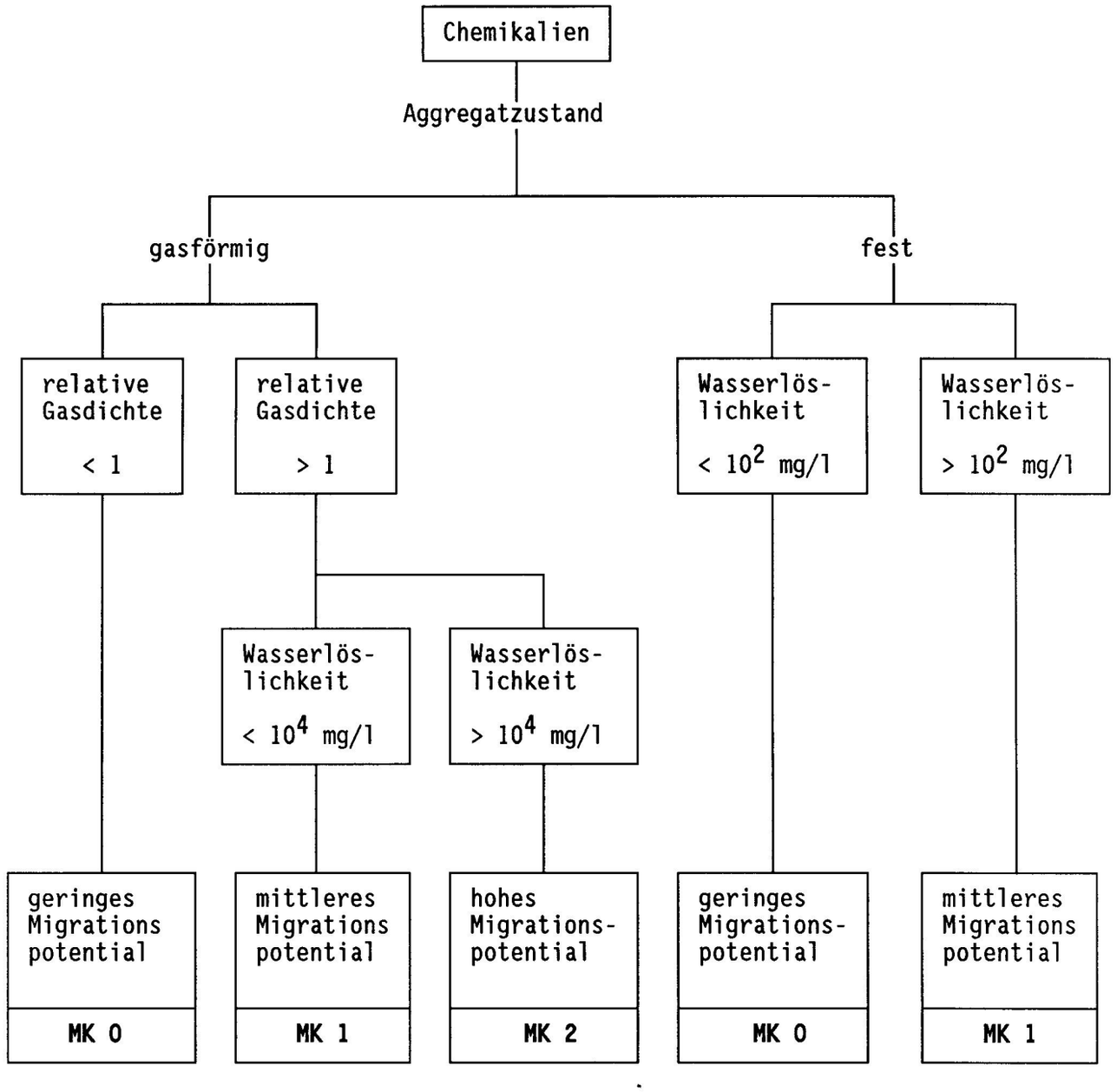


Abb. 6: Vereinfachte Bewertung von Gasen und Feststoffen

3 Ermittlung der Standortcharakteristik

Über das Kriterium "**Standortcharakteristik**" wird, wie das Fließschema (Abb. 7) zeigt, die potentielle Empfindlichkeit des Standortes bewertet. Sie wird durch die vier Größen Hydrologie, Grundwasserüberdeckung, Grundwasserleiter und Grundwasserhydraulik beschrieben.

Mit Erfassung dieser Einflußgrößen soll für den jeweiligen Standort das Eindringen des Schadstoffes in den Untergrund (vertikale Versickerung) und seine Ausbreitung im Grundwasser (horizontaler Transport) gewertet werden. So bringt z.B. eine Anlage auf einem unbedeckten Karstgrundwasserleiter weitaus größere Gefahren mit sich als auf einem durch Deckschichten geschützten Grundwasserleiter mit geringen Fließgeschwindigkeiten.

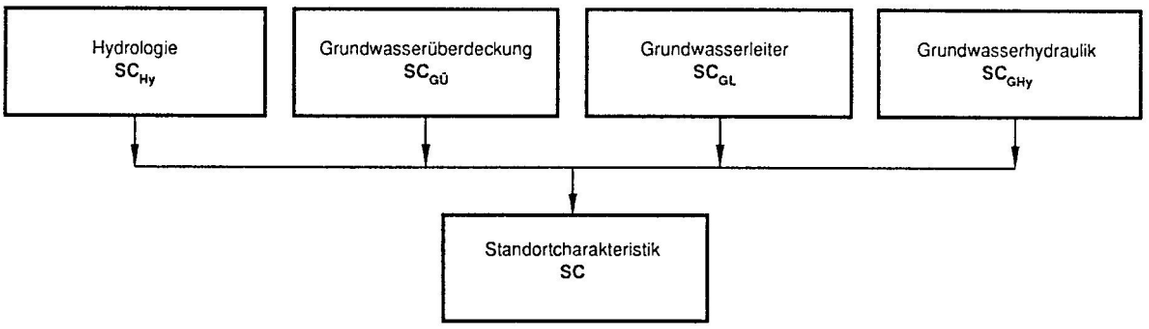


Abb. 7: Kriterien zur Bewertung der Standortcharakteristik

Die nach diesem Leitfaden (Lühr, 1990-1) durchgeführte Standortbewertung berücksichtigt schwerpunktmäßig den Grundwasserschutz. Im Hinblick auf andere Ziele, wie die des Bodenschutzes oder des Biotopenschutzes sind andere Kriterien und Verknüpfungsverfahren zu entwickeln. Eine Gewichtung des Grundwasserschutzes im Verhältnis zu anderen Schutzaspekten hat im konkreten Einzelfall zu erfolgen.

Die Standortcharakteristik (SC) in Bezug auf die Grundwassergefährdung wird durch die Hauptkriterien "Hydrologie, Grundwasserüberdeckung, Grundwasserleiter und Grundwasserhydraulik" bestimmt:

$$SC = f(SC_{Hy}, SC_{GÜ}, SC_{GL}, SC_{GHy})$$

Da die Grundwasserströmung die maßgebliche Komponente für die horizontale Stoffausbreitung darstellt, wird die Grundwasserhydraulik stärker als die drei anderen Kriterien gewichtet.

3.1 Hydrologie

Der effektive Niederschlag, der regional sehr unterschiedlich ist, ist als Lösemittel und somit als Transportmedium die maßgebende Größe. Zusätzlich verstärkt er häufig durch Verdrängung der Flüssigkeiten aus dem Poren- und Kluftraum den Schadstofftransport. Der effektive Niederschlag entspricht der Grundwasserneubildung, für deren Ermittlung einschlägige Verfahren existieren.

Der Einfluß der Hydrologie SC_{Hy} ergibt sich nach der Tabelle 4.

Tab. 4: Bewertung Hydrologie

effektiver Niederschlag/Jahr	**SC_{HY}**
< 200 mm	1
200 - 500 mm	2
> 500 mm	3

3.2 Grundwasserüberdeckung

Als Grundwasserüberdeckung wird nach DIN 4049 der gesamte Gesteinskörper (sowohl Locker- als auch Festgestein) oberhalb der Grundwasseroberfläche definiert. Die Grundwasserüberdeckung gliedert sich in Boden und Deckschichten.

Als Boden wird der oberste Bereich betrachtet, der durch seine speziellen Aktivitäten zur Rückhaltung und zum Abbau von Stoffen gekennzeichnet ist. Die nachfolgende Tabelle 5 bewertet auf der Grundlage der Bodenkarte der Bundesrepublik Deutschland der Bundesanstalt für Bodenforschung von 1963 das Retentionsvermögen der Böden, das von Wertziffer (WZ I) 4 nach 1 abnimmt.

Tab. 5 Bewertung Boden*

vorherrschender Bodentyp	vorherrschende Bodenart	Wertziffer I (WZ I)
Parabraunerde guter bis mittlerer Basenversorgung, örtl. tschermosenartig und Pararendizina	schluffiger Lehm meist mit schwerem Unterboden	4
Parabraunerde guter bis mittlerer Basenversorgung	schluffiger Lehm mit schwerem Unterboden	
Tschernosem	schluffiger Lehm	
degradierter Tschernosem	schluffiger Lehm, meist über schwerem Unterboden	
sonstige Parabraunerden	Lehme und Sande	3
Braunerde guter bis mittlerer Basenversorgung, z.T. podsoliert, örtl. Pseudogley	schluffiger Lehm	
Rendzina	steiniger Lehm bis Ton	
Pararendzina	schluffiger Lehm	
Braunerde, Pseudogley örtl. Podsol u. Rendzina, mittel-, flachgründig in kleinräumigem Wechsel	lehmiger Sand bis lehmiger Ton, z.T. steinig	
Pseudogley	lehmiger Sand bis schluffiger Lehm, oft mit schwerem Unterboden	
Pseudogley	Lehm u. Ton, z.T. steinig	
Terra fusca	steiniger Lehm bis Ton	
Terra rossa	steiniger Lehm bis Ton	
Rendzina, Braunerde u. Parabraunerde, mittel-flachgründig in kleinräumigem Wechsel	Lehm bis schluffiger Lehm, oft steinig	2
sonstige Braunerde	lehmige Sande bis sandige Lehme, oft steinig	
Braunerde, Rendzina u. Podsol, mittel-, flachgründig in kleinräumigem Wechsel	wechselnde Bodenart steinig	
Pararendzina	lehmiger Sand bis sandiger Lehm	
alle Podsole	sandige, evtl. lehmig sandige Böden	
Gleye		
Quellböden		
Tal- u. Niederungsböden		
Marschen		
Felsregionen der Hochgebirge		
Moorböden		
Borowina		
Latosol und Plastosol		
Kein Boden		1

Deckschichten

Die unter den Böden folgenden Deckschichten haben wegen ihrer allgemein geringen Mengen an organischer Substanz nur ein begrenztes physikochemisches Retardationsvermögen für gelöste Schadstoffe.

Die Abschätzung des Rückhaltevermögens für in Phase eindringenden Schadstoffe erfolgt beim Teilkriterium Deckschichten daher auf der Bewertungsgrundlage der Residualsättigung als Folge des Filtervermögens. Eingangsgröße ist die physikalische Beschaffenheit der Deckschichten in Verbindung mit dem Flurabstand des Grundwassers. Liegen Deckschichten mit unterschiedlichen Durchlässigkeiten übereinander, so ist die Deckschicht mit der geringsten Durchlässigkeit zu bewerten, da sie maßgeblich das Filtervermögen der gesamten Deckschicht beeinflußt. In Tabelle 6 sind die entsprechenden Wertziffern (WZ II) enthalten.

Tab. 6: Teilbewertung Deckschichten

Art der Deckschichten	**wasserwirksame Hohlräume**	**Mächtigkeit der Deckschichten ***	**Wertziffer II (WZ II)**
Karstgestein	Lösungshohlräume	< 2 m	3
		2 - 10 m	3
		10 - 20 m	3
		> 20 m	3
Kluftgestein	Klüfte, Spalten, Brüche, Schichtflächen	< 2 m	3
		2 - 10 m	3
		10 - 20 m	3
		> 20 m	2
Kies	schnell dränende Poren	< 2 m	3
		2 - 10 m	2
		10 - 20 m	2
		> 20 m	2
Sand	überwiegend Grobporen	< 2 m	3
		2 - 10 m	2
		10 - 20 m	1
		> 20 m	1
Schluff	Grob-, Mittel- und Feinporen	< 2 m	2
		2 - 10 m	2
		10 - 20 m	1
		> 20 m	1
Ton	überwiegend Feinporen	< 2 m	2
		2 - 10 m	1
		10 - 20 m	1
		> 20 m	1

* Wenn Bauwerke in den Boden hinein gegründet werden, dann ist die Gründungstiefe der Bauwerke abzuziehen.

Bewertung: Grundwasserüberdeckung

Die Bewertung des Kriteriums Grundwasserüberdeckung ergibt sich durch Addition der Wertziffern der Teilkriterien Boden und Deckschicht.

$$SC_{GÜ} = WZ\ I + WZ\ II$$

In Tabelle 7 ist die Bewertung für die Grundwasserüberdeckung dargestellt.

Tab. 7: Bewertung der Standortcharakteristik für die Grundwasserüberdeckung

Summe der Wertziffern WZ I + WZ II	**$SC_{GÜ}$**
2	1
3 - 4	2
5 - 6	3
7	4

3.3 Grundwasserleiter

Die Durchlässigkeit des Grundwasserleiters wird durch seine innere Geometrie (Struktur), d.h. durch die Wasserwegsamkeit der auftretenden Hohlräume bestimmt. Da die Kluft- und Karstgrundwasserleiter stark schwankende Transmissivitäten aufweisen, können auf der Ebene des regionalen Bewertungsrahmens keine verläßlichen Aussagen zur Durchlässigkeit erfolgen. Daher werden sie im Sinne einer konservativen Abschätzung (Vorsorgeprinzip) durchgehend mit einem hohen Gefährdungspotential belegt. Ihre Bewertung erfolgt gemäß Tabelle 8.

Tab. 8: Bewertung der Standortcharakteristik nach Art und Durchlässigkeit des Grundwasserleiters

Art des Grundwasserleiters	Durchlässigkeit K_f	SC_{GI}
Lockergestein	$< 1\ 10^{-4}$ m/s	1
	$1\ 10^{-4}$ - $1\ 10^{-2}$ m/s	2
Kluftgestein/Karstgestein	stark wechselnd	3

3.4 Hydraulik des Grundwasserleiters

Mit der Bewertung der Hydraulik werden diejenigen Aspekte bei der Standortcharakteristik erfaßt, die sich aus den strömungsmechanischen Bedingungen des Stofftransportes im Grundwasserleiter ergeben. Dies sind im einzelnen:

- Strömungen von Wasser mit den darin enthaltenen Inhaltsstoffen,
- Strömungen von Flüssigkeiten und Gasen als Einzelstoffe oder Gemische,
- Strömungen von Wasser und Flüssigkeiten bzw. Gasen miteinander ohne Durchmischung (Mehrphasenströmung).

Gelangt ein Stoff in den Grundwasserleiter, so sind die Ausbreitungsgeschwindigkeit und die räumliche Ausdehnung abhängig von:

- geologischer Aufbau im Standort- und Abstrombereich
- geologische Grenzen des Grundwasserleiters
- hydrologische und anthropogen bedingte Zu- und Abflüsse
- Fließrichtung und Geschwindigkeit des Grundwassers
- Möglichkeit einer tiefreichenden Ausbreitung

Darüber hinaus wird die Ausbreitung im gesättigten Bereich ähnlich wie in der ungesättigten Zone durch Abbau- und Sorptionsvorgänge beeinflußt, die wiederum vom Aufbau und der Struktur des Grundwasserleiters abhängen. Wegen der Vielzahl möglicher Erscheinungsbilder der Stoffausbreitungen im Grundwasserleiter wird im Hinblick auf eine spätere Bewertung zunächst ein Normfall beschrieben, auf den die lokale Situation zu beziehen ist. Abweichungen vom Normfall werden entsprechend Tabelle 9 bewertet. Der Normfall ist durch folgende Eigenschaften charakterisiert:

- durchlässige Deckschicht (d.h. ohne ausgeprägte Schutzfunktion) oberflächennaher GW-Leiter mit mittlerer Durchlässigkeit (h \ bis 5 10^{-3} m/s)

- Porengrundwasserleiter mit Sand/Kiesaufbau über gering durchlässiger Sohlschicht (keine Möglichkeit des Stoffeintrittes in tieferliegende Grundwasserleiter)

- mittlere Abstandsgeschwindigkeit $v_a \leq 500$ m/a

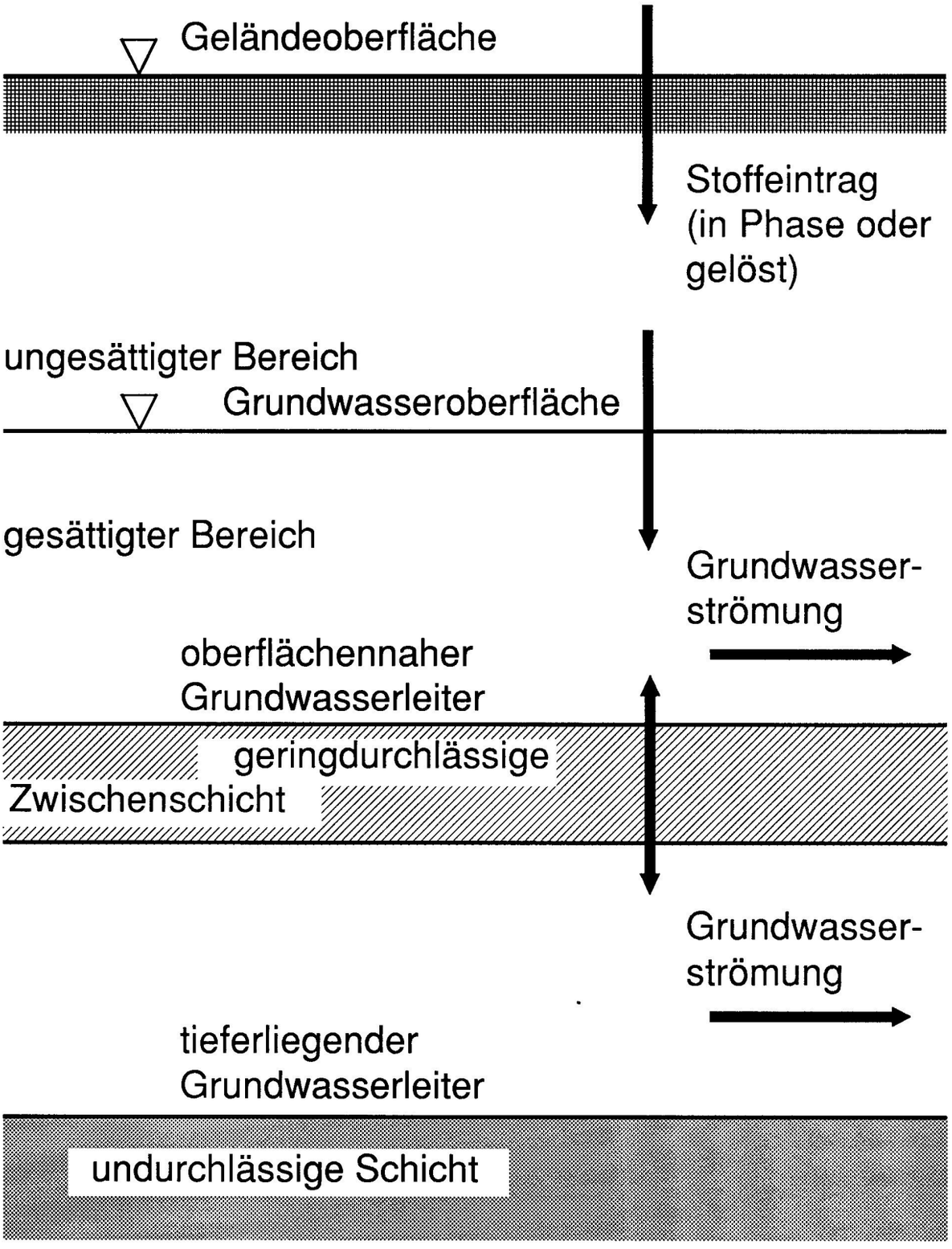
Der in Abb. 8 dargestellte Normfall gibt in schematisierter Form den Bewertungsrahmen für die Hydraulik wieder. Daneben existieren Fälle mit sowohl abweichenden Transport- und Strömungsbedingungen, als auch mit der Möglichkeit einer weiteren Ausbreitung in tiefere Grundwasserbereiche. Dies sind insbesondere:

- Porengrundwasserleiter mit hohen Fließgeschwindigkeiten über gering durchlässigem Gestein

- Geschichtete Grundwasserleiter mit teildurchlässigen Zwischenschichten

- Kluftgrundwasserleiter

- Karstgrundwasserleiter



IWS | **Schematische Darstellung des hydraulischen Systems (Normfall)**

Tab. 9: Bewertung der Hydraulik des Grundwasserleiters

Hydraulische Charakterisierung	Bewertung	SC_{Ghy}
1. **Normfall** Porengrundwasserleiter Stoffeintrag (in Phase oder in Wasser gelöst) in den oberflächennahen Grundwasserleiter mit mittlerer Durchlässigkeit, kein Eindringen in tieferliegenden Grundwasserleiter, mittlere Abstandsgeschwindigkeit (ca. ≤ 500 m/a)		0
2a. **Kies- und Porengrundwasserleiter mit hohen Abstandsgeschwindigkeiten über gering durchlässigem Gestein:** Sehr hohe Durchlässigkeit und hohe Abstandsgeschwindigkeit sorgen für schnelle Ausbreitung mit großer Dispersion. Vordringen des Stoffes in tiefere Bereiche ist ausgeschlossen.	Die Möglichkeit des leichten Stoffeintrags und schnelle Ausbreitung von Stoffen in Lösung bedingt eine ungünstigere Bewertung	1
2b. **Geschichteter Grundwasserleiter mit teildurchlässigen Zwischenschichten:** In einem mehrschichtig aufgebauten Grundwasserleiter kann es zu einer Kontamination tiefer gelegener Grundwasserleiter kommen (fehlende Trennschicht oder Fenster in der Trennschicht), entsprechend des Druckgradients)	Möglichkeiten des Stoffeintrags in tiefere Bereiche macht eine ungünstigere Bewertung als bei 2a erforderlich	2
3. **Kluftgrundwasser über gering durchlässigem Gestein**		
3.a gering geklüftet: Stoffmigration im Kleinklüften und in bevorzugten Großklüften	Die als günstiger anzusehenden Geschwindigkeiten im gering geklüfteten Gestein werden aufgehoben durch die Möglichkeit des schnelleren Transports in wenigen großen Klüften	1
3b. stark geklüftet, zerrüttet: Stoffausbreitung in Großklüften und bevorzugten Störungszonen	Die Situation ist ungünstiger als bei gering geklüftetem Gestein	2
3c. Geschichteter Kluftgrundwasserleiter mit teildurchlässigen Zwischenschichten	Stoffeinträge in tiefere Stockwerke sind möglich	3
4. **Karstgrundwasserleiter** In den unregelmäßig ausgebildeten Karsthohlräumen kann es zu sehr schneller Stoffausbreitung kommen. Aufgrund geringer Adsorptions- und Abbauvorgänge können auch nach längeren Transportzeiten hohe Konzentrationsspitzen auftreten	Die "Unberechenbarkeit" des Karstgrundwasserleiters macht es notwendig, diesen Fall grundsätzlich ungünstig zu bewerten.	3

3.5 Zusammenfassende Bewertung der Standortcharakteristik

Die Ermittlung der Standortcharakteristik ergibt sich durch Addition der Wertziffern

$$SC_{Hy}, SC_{GÜ}, SC_{GL}, SC_{Ghy}$$

wobei die Wertziffer SC_{Ghy} mit dem Faktor 2 gewichtet wird.

Die Wertziffer für die Standortcharakteristik (WZ_{SC}) ist demnach wie folgt zu ermitteln:

$$WZ_{SC} = SC_{Hy} + SC_{GÜ} + SC_{GL} + 2\ SC_{GHy}$$

Daraus ergeben sich nach Tabelle 10 die entsprechenden Klassen für die Standortcharakteristik SC.

Tab. 10: Ermittlung der Standortcharakterisierung

Wertziffer WZ_{SC}	Standort-charakteristik SC	Standort-empfindlichkeit
5	1	gering
6 - 9	2	mittel
11 - 14	3	hoch
≥ 15	4	sehr hoch

4 Ermittlung der Nutzungscharakteristik

Bei der Planung von neuen oder Erweiterung von bestehenden Anlagen für den Umgang mit wassergefährdenden Stoffen sind deren jeweilige Standorte mit den im Umfeld vorhandenen Nutzungen im Hinblick auf mögliche Beeinträchtigungen, die aufgrund von Grundwasserbeeinflussungen entstehen können, näher zu untersuchen. So ist es durchaus möglich, daß durch die Neuerrichtung einer Anlage zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffe Nutzungskonflikte entstehen. Diese können über die Ermittlung des Gefährdungspotentials einer Anlage (siehe Abb. 1) über den Teilaspekt "Nutzungscharakteristik" in die Abwägung integriert und vor allem transparent und nachvollziehbar bewertet werden.

Ob jedoch ein das Grundwasser kontaminierender Schadstoff zu einer Beeinträchtigung der bereits bestehenden Umgebungsnutzungen führt, hängt im wesentlichen von der Strömungsrichtung des Grundwassers ab. Liegt die geplante Anlage im Oberstrombereich einer bereits bestehenden grundwasserempfindlichen Nutzung, können potentielle Schadstoffe, die ins Grundwasser eingetragen werden, zu einer Nutzungseinschränkung führen. Anlagen im Unterstrombereich bleiben dagegen ohne direkte Auswirkungen auf diese bestehenden Nutzungen. Von den in Frage kommenden Nutzungen sind vor allem diejenigen zu berücksichtigen, die gegenüber Grundwasserkontaminationen empfindlich reagieren. So ist ein Feuchtbiotop oder eine Grundwasserentnahme zu Versorgungszwecken im Unterstrom einer Anlage zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen als gefährdeter anzusehen als ein Industriebetrieb. Durch diese potentielle Gefährdung wird es möglich, weitergehende technische Anforderungen an die geplante Anlage zum Umgang mit wassergefährdenden Stoffen zu begründen.

Die folgende Tabelle 11 enthält Nutzungsarten, für die das Grundwasser ein prägender Standortfaktor ist. Entsprechend der Empfindlichkeit der Nutzungen sind sie entsprechend den Wertziffern der Nutzungscharakteristik bewertet worden.

Tab. 11: Grundwasserempfindliche Nutzungen im Unterstrom

	Nutzungen	Nutzungs-charakteristik NU	Nutzungs-empfind-lichkeit
1.	Nutzungen mit Erholungsfunktion, bei denen Grundwasser ein prägender Standortfaktor ist: - Parkanlagen - innerstädtische Grünflächen	2	mittel
2.	Bauwerke, die im Grundwasser gegründet sind	3	hoch
3.	Nutzungen mit Freiraumfunktionen: - Küstengewässer/Küstenvegetation - Fließgewässer (einschl. Verlandungs- und Ufergesellschaften) - Stillgewässer (einschl. Verlandungs- und Ufergesellschaften) - Moore und Sümpfe - Feucht- und Naßwälder	3	hoch
4.	Nutzungen, die aus ökonomischen Gründen (z.B. Brauch oder Trinkwassernutzungen) auf das Grundwasser in besonderer Weise angewiesen sind: - Schrebergartenanlagen - Gartenbaubetriebe - Landwirtschaftsbetriebe - sonstige Versorgungen } die oberflächennahes Grundwasser nutzen	4	hoch
5.	Wasser für Getränke- und Nahrungsmittelindustrie	6	sehr hoch
6.	Trinkwasserversorgungsanlagen incl. Eigenversorgung	6	sehr hoch
7.	alle anderen Nutzungsformen	0	gering

5 Literatur

- Dembeck, H.:
  Chemie-ABC für Feuerwehr- und Sicherheitskräfte.
  Verlag W. Kohlhammer, Stuttgart, 1981

- Fränzle, O.:
  Ökosystemforschung als Beitrag zur Beurteilung der Umweltwirksamkeit von Chemikalien.
  In: DFG (Hrsg.): Ökosystemforschung - Allgemeine Grundlagen und Definition, trophische Strukturen, biozönotische Gesetze und Thermodynamik. 1983, S. 21 - 29

- Fränzle, O., Allnoch, G., Brillat, M., Hoffmann, D., Kuhnt, G., Müller, F. und Rassai, G.:
  Erfassung von Ökosystemparametern zur Vorhersage der Verteilung von neuen Chemikalien in der Umwelt.
  Forschungsbericht 106 02 015 im Auftrage des Umweltbundesamtes, Geographisches Institut der Universität Kiel, 1981

- Lühr, H.-P.:
  Maßnahmen zum Schutz des Grundwassers vor wassergefährdenden Stoffen.
  In: Aurand, K. (Hrsg.): Bewertung chemischer Stoffe im Wasserkreislauf.
  Erich Schmidt Verlag, Berlin, 1981, S. 90 - 96

- Lühr, H.-P., Staupe, J.:
  Der Besorgnisgrundsatz beim Grundwasserschutz
  Wasser und Boden, 12, 1986

- Lühr, H.-P.:
  Stoffspeziefisches Bewertungsschema für das Verhalten von wassergefährdenden Stoffen im Untergrund
  Entwurf eines Papieres des BMU-Beirates "Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe" (LTwS) - Ausschuß "Verhalten von wassergefährdenden Stoffen", 1990

- Lühr, H.-P.:
  Leitfaden zur Ermittlung der Standortcharakteristik und zur Ermittlung der Nutzungscharakteristik
  Entwurf eines Leitfadens des BMU-Beirates + "Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe" (LTwS) - Ausschuß "Verhalten von wassergefährdenden Stoffen", 1990-1

- Schwille, F.:
Migration of Organic Fluids Immiscible with Water in the Unsaturated Zone.
In: Yaron, B., Dagan, G. and Goldshmid, J. (Eds.): Pollutants in Porous Media. The Unsaturated Zone between Soil Surface and Groundwater. Ecological Studies, Springer-Verlag, Berlin, Heidelberg, New York, Tokyo, Vol. 47/1984

- Stief, K. und Franzius, V.:
Gewässergefährdung durch kontaminierte Standorte - Beispiele aus den USA.
Wasser und Boden 11, 503 - 505 (1983)

- UBA, Umweltbundesamt (Hrsg.):
Bewertung wassergefährdender Stoffe.
Beirat beim Bundesminister des Innern, Lagerung und Transport wassergefährdender Stoffe (LTwS), LTwS-Nr. 10/1979