

## Öl im Grundwasser

L. BERNHART

Die Bedeutung und der notwendige Schutz des Grundwassers vor Verunreinigung sind in den Vorträgen dieser Reihe bereits von den verschiedensten Seiten beleuchtet worden. Diesen Ausführungen soll sich nun der folgende Bericht über „Öl im Grundwasser“ anschließen. Dabei handelt es sich nicht um Öl schlechthin, sondern um Mineralöle, also Stoffe, die sich gegenüber anderen Verunreinigungen zunächst dadurch unterscheiden, daß sie wohl organischer Natur, aber biologisch nur sehr schwer abbaubar sind. Aus dieser Ursache ist Mineralöl im Untergrund und im Grundwasser eine besonders schwerwiegende Verunreinigung. Daher ist vor allem im letzten Jahrzehnt auch wegen des sprunghaften Anstiegens seines Verbrauches diesem Stoff in der Wasserwirtschaft vermehrte Aufmerksamkeit geschenkt worden. Dabei zeigte sich, daß allein schon der Vorgang des Eindringens, der Ausbreitung und der Fortbewegung von Öl im Grundwasser weitgehend unerforscht war.

Erste Betrachtungen sind 1953 von RUNGE (1) veröffentlicht worden. In den folgenden Jahren bestanden voneinander beträchtlich abweichende Auffassungen, die alle hier anzuführen sicherlich zu weit gingen.

Den Versuch einer Klärung der offenen Fragen brachte im November 1959 ein Versuchsbericht des Franzius-Institutes der Technischen Hochschule Hannover über die von HENSEN und KROLEWSKI (2) durchgeführten „Untersuchungen über das Aufnahmevermögen von Sandböden für Mineralöle“. Den Versuchen lag die Fragestellung zugrunde, welche Eigenschaften des Bodens nutzbar gemacht werden konnten, um etwa aus einem Behälter auslaufendes Öl festhalten zu können und mit Anzeigeräten das Vorhandensein von Öl außerhalb des Behälters erkennbar zu machen.

Schon RUNGE hatte festgestellt, daß es um so schwieriger ist, Öl aus dem Boden durch Wasser zu verdrängen, je größer das Verhältnis Öl:Wasser ist. Unter einem Ölanteil von 15% des Porenraumes im

Boden sei das Rohöl selbst durch Wassertrieb nicht aus dem Boden zu bringen. Die Versuche am Franziusinstitut brachten darüber hinaus das Ergebnis, daß — wenn auch der Einfluß der Kornzusammensetzung und der Lagerungsdichte noch nicht ausreichend beurteilt werden konnte — die Aufnahmefähigkeit von Sanden größer sein könne und es sich bei den amerikanischen Versuchsergebnissen um Mindestwerte gehandelt habe.

Bereits hier wird auf den Einfluß verwiesen, den das Porenwasser besitzt, wobei allerdings hygroskopisches Wasser, Haft- und Porenwinkelwasser, Kapillarwasser und Sickerwasser gemeinsam als solches zusammengefaßt und dem Grundwasser gegenübergestellt wird. Wird das Aufnahmevermögen von Sanden für Wasser, in Abhängigkeit von der spezifischen Oberfläche, also von der Oberflächensumme der Einzelkörner je  $\text{cm}^3$  Festmasse aufgetragen, ergibt sich Abb. 1. Eine Gegenüberstellung mit dem Aufnahmevermögen für Benzin (Abb. 2) bringt vor allem im mittleren Bereich keine besonderen Abweichungen der Mittelkurven und des Streubereiches; doch ist das Aufnahmevermögen bei größerer spezifischer Oberfläche größer als für Wasser.

Wohl aber zeigt sich bei der Darstellung des Aufnahmevermögens von Sanden für Heizöl (Abb. 3) ein beträchtlicher Unterschied gegenüber dem Aufnahmevermögen für Wasser oder Benzin. Die Versuche wurden mit Heizöl extraleicht durchgeführt. Sie ergaben wesentlich größeres Aufnahmevermögen bei geringer spezifischer Oberfläche, das sich dann bei größerer spezifischer Oberfläche nicht mehr sehr erhöht. Es sei hier noch die Ermittlung der spezifischen Oberfläche an einem Beispiel (Abb. 4) gezeigt, wobei auch der Rechengang dargestellt ist. Auf den Unterschied zwischen trockenem und feuchtem Sand sei hingewiesen, der in der Darstellung (Abb. 5) des Franzius-Institutes zum Ausdruck kommt.

Für die einzelnen Bodenproben ist jeweils in Abszissenrichtung der mit Benzin gefüllte Anteil strichliert, der wassergefüllte Porenanteil hingegen mit vollen Linien dargestellt. Abb. 5 zeigt auch die mittlere Ausgleichskurve für trockenen Sand strichliert sowie jene für feuchten Sand, die innerhalb des ebenfalls dargestellten Streubereiches durch eine volle Linie ersichtlich gemacht ist.

Es zeigt sich, daß zwar ein Zusammenhang zwischen der spezifischen Oberfläche eines Sandes, dem vorhandenen Porenraum und dem Aufnahmevermögen besteht, dieser Zusammenhang aber keineswegs linear ist. Mit der Zunahme der Kapillaren im Boden steigt seine Aufnahmefähigkeit. Das Aufnahmevermögen von feuchtem Sand unterliegt der

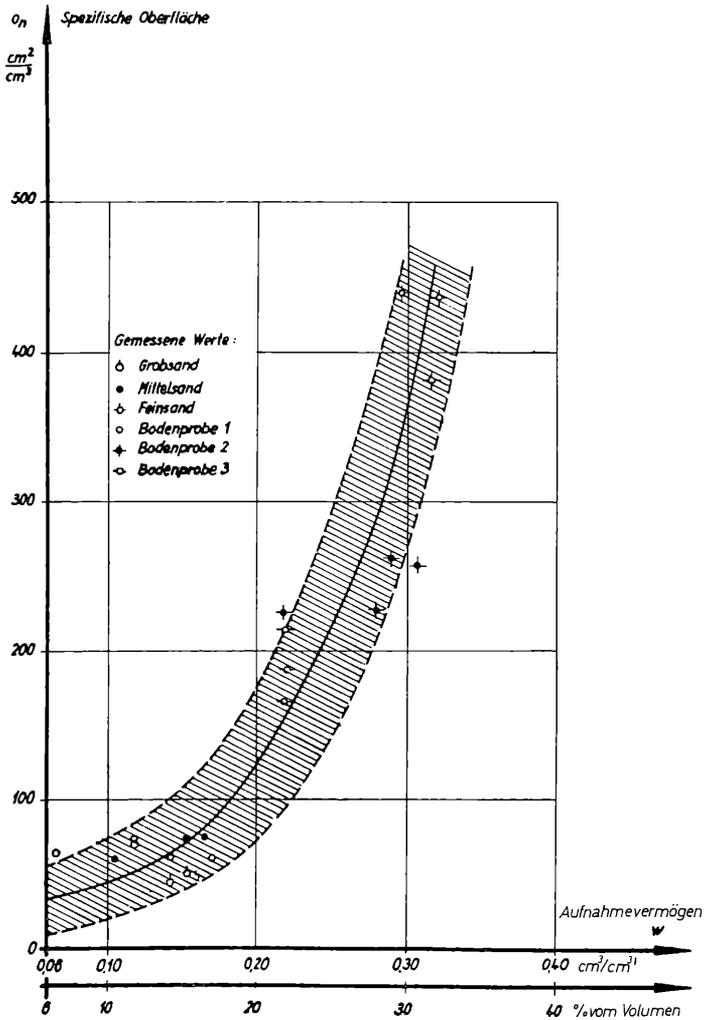


Abbildung 1 (nach Franzius-Institut) (2)  
Aufnahmevermögen von Sanden für Wasser

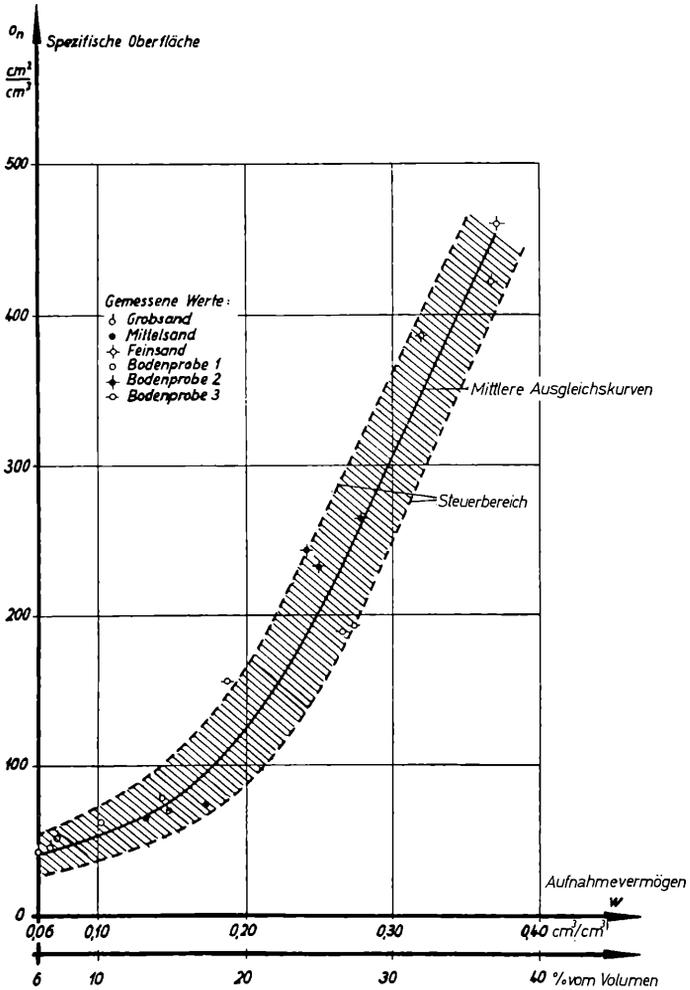


Abbildung 2 (nach Franzius-Institut) (2)  
 Aufnahmevermögen von Sanden für Benzin

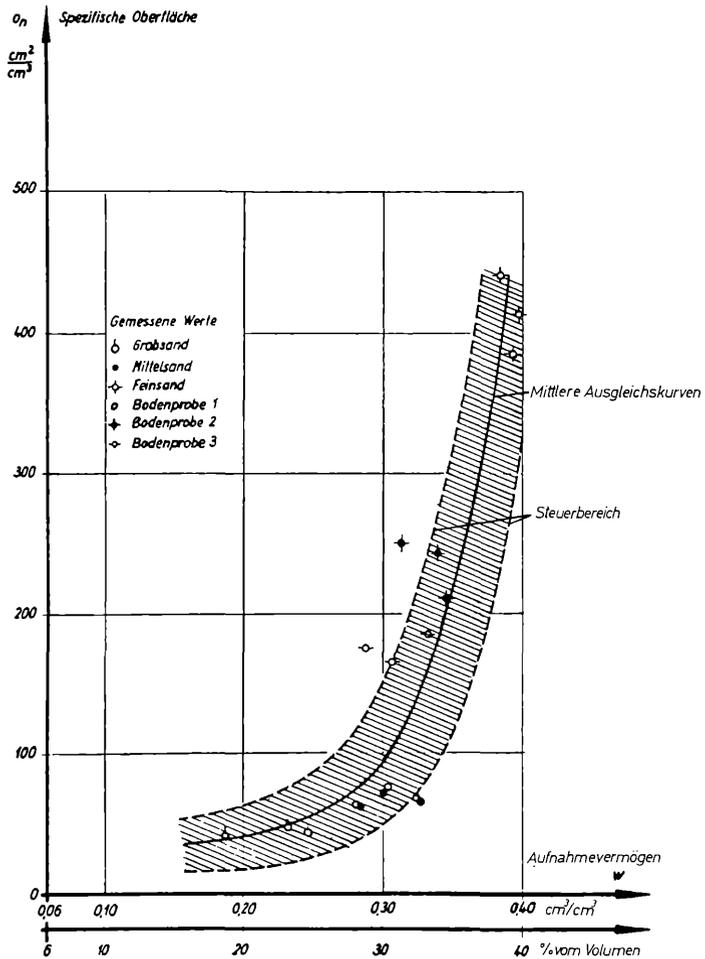
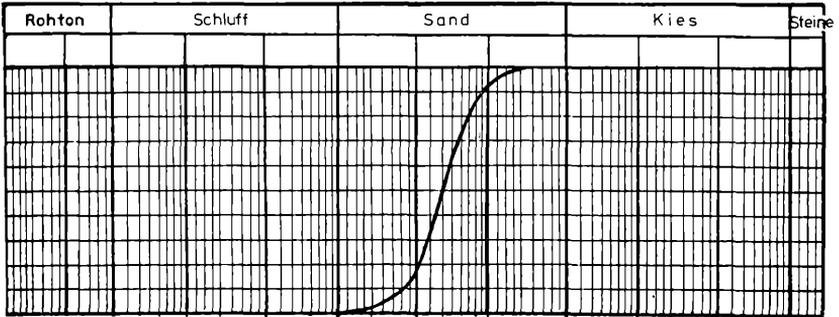


Abbildung 3 (nach Franzius-Institut) (2)  
 Aufnahmevermögen von Sanden für Heizöl

1. Kornverteilung des Sandes:



2. Ausgangsgleichungen:

$$\frac{1}{d_w} = \frac{1}{3} \cdot \left( \frac{2}{d_a} + \frac{2}{d_a + d_b} + \frac{1}{d_b} \right)$$

$$o_s = \sum \Delta o_s = \sum \frac{\delta}{d_w} \cdot \Delta g_x$$

3. Rechenschema:

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
	$d_b$	$d_a$	$\Delta g_x$	$d_a + d_b$	$\frac{1}{d_a}$	$\frac{2}{d_a + d_b}$	$\frac{1}{d_b}$	$\frac{1}{d_a} + \frac{2}{d_a + d_b} + \frac{1}{d_b}$	$\frac{1}{d_w} = \frac{1}{3}(9)$	$\Delta o_s = \frac{\delta}{d_w} \cdot \Delta g_x$
	-	-	-	-	1/(3)	2/(5)	1/(2)	(6)+(7)+(8)	$\frac{1}{3} \cdot (9)$	$\delta \cdot (4) \cdot (10)$
	cm	cm	% 0,01	cm	cm <sup>-1</sup>	cm <sup>-1</sup>	cm <sup>-1</sup>	cm <sup>-1</sup>	cm <sup>-1</sup>	cm <sup>2</sup> /cm <sup>2</sup>
1	0,006	0,010	0,03	0,016	100	120	167	393	131	23,6
2	0,010	0,018	0,07	0,028	63	77	100	240	80	33,6
3	0,018	0,020	0,09	0,038	50	55,8	63	168	56	30,3
4	0,020	0,035	0,45	0,055	28,6	36,4	50	115	38	102,8
5	0,035	0,050	0,22	0,085	20	23,6	28,6	72	24	31,7
6	0,050	0,070	0,10	0,120	14,3	16,8	20	51	17	10,2
7	0,070	0,140	0,04	0,210	7,2	9,6	14,3	31	10	2,4
Kontrolle: 1,00										$o_s = 234,6$

4. Ermittlung der spezifischen Oberfläche für verschiedene Lagerungsdichten:

für n %	$a_n = o_s \cdot (1-n)$	$a_n$ cm <sup>2</sup> /cm <sup>3</sup>
26	235 · 0,74	174
30	235 · 0,70	164
40	235 · 0,60	141
45	235 · 0,55	129

Abbildung 4 (nach Franzius-Institut) (2)  
Ermittlung der spezifischen Oberfläche  
Beispiel für einen beliebigen Sand

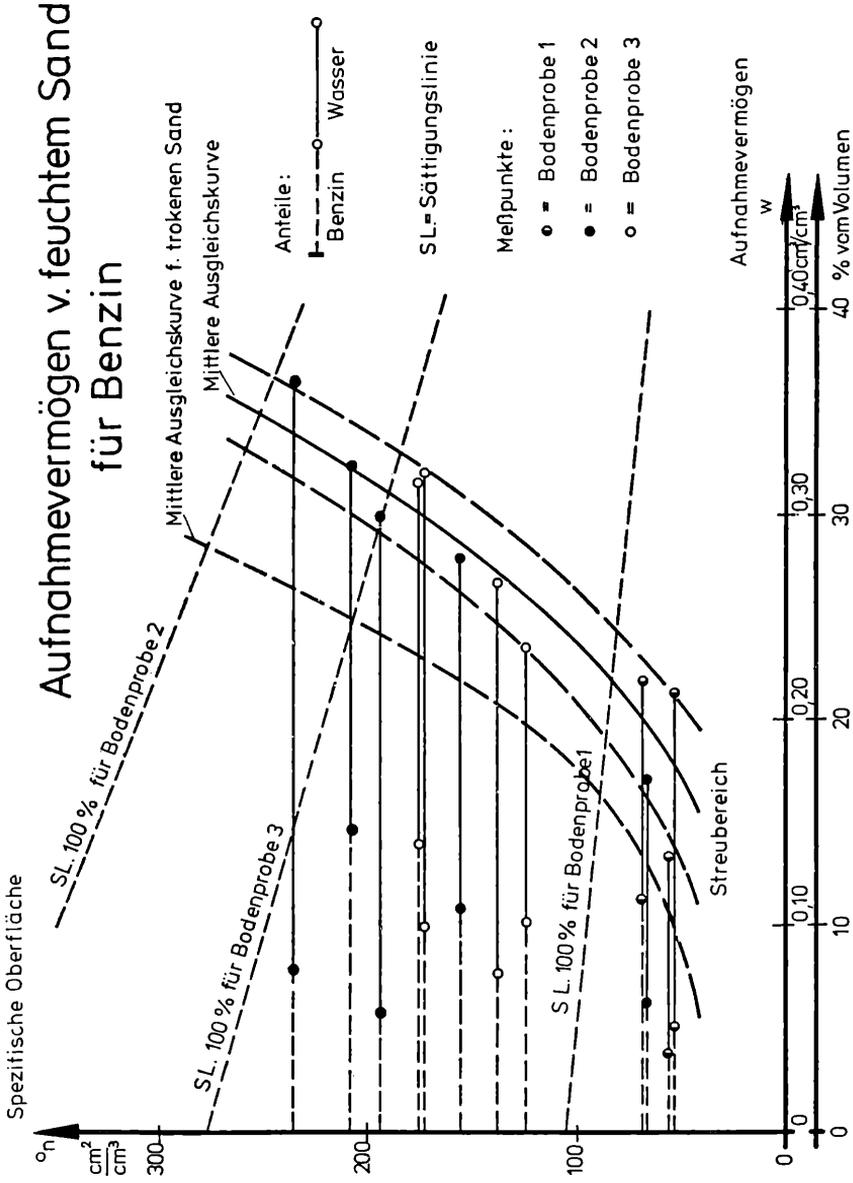


Abbildung 5 (nach Franzius-Institut) (2)

gleichen Gesetzmäßigkeit wie von trockenem Sand. Die Sättigungslinie kann natürlich nicht überschritten werden, aber der gesamte Flüssigkeitsgehalt wird für bereits feuchten Sand größer, so daß nach Abzug der vorhandenen Feuchtigkeit doch ein größeres Aufnahmevermögen für Mineralöl verbleiben kann. Diese Erscheinung ist bei Benzin deutlicher als bei Heizöl.

PRIER (3) befaßt sich unter anderem eingehend mit den Vorgängen im Sickerbereich und gelangt zur Auffassung, daß versickerndes Öl durch Umgehen von Bodenteilchen auch seitlich ausweicht, wodurch kein zylindrischer sondern ein birnen- und kugelförmiger Imprägnationskörper entstehe. In seinem Randbereich besteht eine Benetzungszone; im Inneren — dies macht den größten Teil des Körpers aus — eine Durchleitzone.

In der Folge hat BARTZ (4), (5), (6) Versickerungsversuche in der Oberrheinebene, später gemeinsam mit PRIER bzw. mit KASS und PRIER durchgeführt und darüber 1966, 1967 und 1969 berichtet. Bei den 1966 mit Benzin durchgeführten Versuchen wurde beobachtet, daß Benzin im ungestörten Untergrund nicht bis auf den Grundwasserspiegel einsickerte, sondern auf dem geschlossenen Kapillarsaum aufgestaut wurde. Es bildete sich ein Imprägnationskörper, der keinen direkten Kontakt mit dem Grundwasser hatte.

Wurde jedoch die Grundwasseroberfläche freigelegt, konnte das Benzin auf die freie Grundwasseroberfläche austreten und sich dort anreichern.

Das Ausbreiten des Benzins im Untergrund wird durch Haftwasser im Boden gehemmt. Es erfolgte nicht mit gleicher Geschwindigkeit, sondern zunächst relativ rasch, während die als voll bezeichnete Ausbreitung erst nach Tagen bzw. Monaten erfolgte.

Auffallend dabei ist, daß auch bei Fluten des Imprägnationskörpers keine wesentlichen Mengen freien Benzins mobilisiert werden konnten und der Anstieg des Grundwasserspiegels keinen Einfluß auf seine Größe hatte.

Für die Praxis folgt daraus, daß keine überstürzte Eile mehr nötig ist, wenn das Benzin einmal eingesickert ist, wohl aber solange die Einsickerung zu verhindern ist oder kleingehalten werden kann. Spätere Maßnahmen sind für die Randgebiete eines Sickergebietes am Platze, um das langsamere weitere Vordringen zu stoppen und daher vom Rande gegen das Sickerzentrum hin voranzutreiben.

Der 2. Bericht 1967 beinhaltet die Erkenntnis, daß einsickerndes Heizöl und Rohöl Imprägnationskörper bildet, deren Form und Größe

von der Ausbildung und Lagerung der Schichten und von Menge und Beschaffenheit des Öls abhängig ist. In gut durchlässigen Schichten wandert es im wesentlichen in die Tiefe. Schichten geringerer Durchlässigkeit hemmen die Tiefenwanderung und führen zur seitlichen Ausbreitung über diesen Schichten. Wechselnde Schichten führen zur Auslappung des Imprägnationskörpers; Schrägschichten zu asymmetrischer Form. In den Auslappungen fanden sich geringere Ölgehalte als im Zentralbereich. Die Wanderung kommt zum Stillstand, wenn ein bestimmter Ölgehalt — die Restsättigung — unterschritten wird.

Auffallend ist weiter nach dem 3. Bericht, daß der Imprägnationskörper nach 26 Monaten nach der Versickerung immer noch annähernd die gleiche Gestalt wie nach einem Jahr hatte. Diese war durch Schrägschichtung mitbestimmt. In den Randzonen hat sich der aromatische Bereich — das Ergebnis eines allmählichen oxydativen, bakteriellen Umwandlungsvorganges — vergrößert, wobei der Vorgang schon vor Erreichen der Restsättigung begann.

KOPPE (7) gibt ein Berechnungsverfahren für den Einfluß der Grenzflächenkräfte auf die Fortbewegung unter Verwendung eines Äquivalenzporenradius an, wonach die Ausbreitung von Öl im Untergrund mit und ohne Abdrift ermittelt und jene Druckdifferenz angegeben werden kann, bei der ein Abdriften nicht stattfindet bzw. ab welchem Äquivalenzporenradius bei gegebener Druckdifferenz keine Abdrift erfolgt.

Zur Anwendung bedarf es allerdings der Kenntnis der Bodenstruktur. Das Geschehen wird durch die weitesten Poren an der Stirnseite der Öllinse bestimmt.

BILLIB und HOFFMANN (8) weisen darauf hin, daß bei gleichmäßiger Sättigung ein stationärer Zustand eingetreten ist, wobei für die Sickergeschwindigkeit das Darcy'sche Filtergesetz gilt. Dies gilt für die Durchleitzone, nicht aber für die vorschreitende Versickerungsfront, an der nicht stationäre Verhältnisse unter überwiegendem Schwerkrafteinfluß sondern bis zur Sättigung die Kapillar- und Adsorptionskräfte vorherrschen. Beide Bewegungen können für verschiedene Öle rascher als für Wasser erfolgen.

BECHSMANN (9) hebt hervor, daß ein Problem der heterogenen Strömung vorliege und führt aus, daß die Kapillarströmung die Grenzflächenspannung überwinden müsse. Solche Spannungen bestehen aber nicht nur zwischen Wandung und Flüssigkeit, sondern auch zwischen den Flüssigkeiten Wasser und Öl und ändern sich dabei mit jedem anderen Verhältnis dieser beiden Flüssigkeiten zueinander. Daraus ist der

Begriff der relativen Permeabilität entwickelt worden. Bei einem Wasseranteil bis etwa 30% ist die relative Permeabilität des Wassers kaum meßbar, bei gleichem Mengenanteil von Wasser und Öl beträgt die relative Permeabilität beider hingegen nur etwa 20%, was weit langsamere Bewegung oder Stillstand bedeutet.

Damit schien zunächst soweit Klarheit über den Sickervorgang in sandigen Böden gewonnen worden zu sein, also über den Vorgang, durch den überhaupt Öl bis zum Grundwasser gelangt. Es war bereits dabei zu erkennen, daß die Abgrenzung nicht exakt sein kann, weil als Grundwasser keineswegs nur jener Teil des Grundwassers angesehen werden darf, der tiefer als der freie Grundwasserspiegel gelegen ist. Bei hydrologischen Betrachtungen muß zumindest der Kapillarbereich mit zum Grundwasser gezählt werden.

In Festgesteinen ist naturgemäß die Fortbewegung nur in Spalten und Klüften möglich, wobei die Problematik der Auswirkung der Verkarstung auf das Karstwasser unter Hinzutritt einer weiteren Variablen — die Verschiedenheit der Öle — uns gegenübersteht. Unerforscht ist der Rückhalt durch Haftung an den inneren Oberflächen des Gesteins der unterirdischen Wasserwege. Eine Teilfrage ist dabei, inwieweit diese Haftung durch teilweise Füllung der Karstwasserwege beeinflußt wird, weil die bessere Benetzung durch Wasser eine Verringerung der Adsorption des Öles bedingen kann. Nach örtlichen Gegebenheiten ist es durchaus denkbar, daß das Fließen so schnell erfolgt, daß innerhalb einer Kluft eine Vermengung eintritt und damit Öl mit dem Wasser in Bereiche gelangt, die es allein nicht erreichen würde und dabei in sehr kurzen Zeiten eine überraschend weite Ausbreitung erfolgt.

Es ist aber ebenso möglich, daß das Fließen innerhalb der Klüfte so langsam erfolgt, daß durch die Beruhigung eine Mineralölabscheiderwirkung eintritt, Öl in den Hohlräumen zur Wasseroberfläche aufsteigt und dort durch tauchwandähnliche Gesteinsformen zurückgehalten wird, wonach der erwartete Ausdehnungsumfang nicht erreicht wird.

Sind Klüfte einmal trockengefallen, endet die Abscheiderwirkung. Es bleibt die Haftung an den Wandungen. Einsetzende Regenfälle führen zum Fluten der Klüfte und allmählichem mechanischem Abtransport der zurückgehaltenen Ölteile.

Weil keine darauf abzielenden Untersuchungen bekannt geworden sind, kann doch als erste Näherung angenommen werden, daß die Untersuchung des Franziusinstitutes (2) nicht ausschließlich auf Sande, sondern über die Lockergesteine hinaus auch für klufftreiche Festgesteine

angewendet werden kann. Die dabei vorhandenen spezifischen Oberflächen sind allerdings viel kleiner, als sie bei Sanden in Frage kommen.

Die Wassernachrichten (10), eine Information des Bundesministeriums des Inneren in Bonn, führen in Heft 4/1970 aus, daß die Fragen der Wasserverschmutzung durch Mineralöl ein so bedeutendes, modernes Problem seien, daß man gezwungen sei, dies ohne einseitiges Engagement sachlich und wissenschaftlich zu untersuchen, seien doch vorher von verschiedenen Seiten Berichte verfaßt worden, die die von Mineralölen ausgehenden Gefahren harmloser erscheinen ließen, als sie wirklich sind.

Darin ist auf einen Arbeitsbericht des deutschen Bundesministeriums für Gesundheitswesen, Bad Godesberg, über „Beurteilung und Behandlung von Mineralölungfällen auf dem Lande im Hinblick auf den Gewässerschutz“ (11) als Zusammenfassung des neuesten Standes des Wissens mit dem Datum November 1969 hingewiesen und auch hervorgehoben, daß sich im Dezember 1969 in Genf in einer Sonderveranstaltung der Europäischen Wirtschaftskommission Fachleute aus 23 Ländern der Erde sowie von 13 nationalen und internationalen Organisationen zusammengefunden haben, um ihre Erfahrungen über die Gefahren der Verunreinigung der Gewässer durch Mineralölprodukte auszutauschen. Die Tätigkeit des Bundesfachausschusses „Wasser und Mineralöl“ hat dabei internationale Anerkennung gefunden.

Als wesentliche Feststellungen sind hervorzuheben, daß bei den geringen Konzentrationen keine akute Giftwirkung auf Mensch und Tier zu befürchten ist. Es ist aber dennoch nicht auszuschließen, daß ein über Jahre andauernder Genuß mineralölkontaminierten Wassers selbst unterhalb der Geruchs- oder Geschmacksgrenze auch nachteilige gesundheitliche Folgen zeigen kann. Allerdings darf nicht außer acht bleiben, daß Fertigprodukte in der Regel verschiedene Zusatzstoffe — Adjektive — beinhalten, die z. B. die Klopfestigkeit verbessern, die Oktanzahl erhöhen oder die Korrosionsbeständigkeit günstiger gestalten sollen. Dazu dient eine Vielzahl von Stoffen, deren Art häufig unbekannt ist, die aber sehr wohl toxische Wirkung haben können. Schließlich ist die Bleibeigabe zu erwähnen, deren toxische Wirkung an sich bekannt ist, wengleich die Konzentrationen wohl stets unter einer Schädlichkeitsgrenze liegen, soweit es sich im Trinkwasser um Kontaminierung mit Mineralöl handelt, dem Blei beigegeben ist. Verschiedene, vor allem die schweren Destillationsprodukte des Rohöles, wie z. B. Teer, werden üblicherweise als krebsfördernde Stoffe angesehen, worüber im Rahmen dieser Vorträge auch berichtet wurde.

SCHWILLE und VORREYER (12) verwenden den Begriff „reduziertes“ Grundwasser und dehnen ihn auf Reduktionserscheinungen mikrobieller Art beim Mineralölabbau aus, wenngleich sich die Reduktionszone keineswegs mit jener Zone deckt, in der gelöste Kohlenwasserstoffe nachweisbar sind. Die Folgen einer Reduktion müssen beseitigt werden. Bedeutende Kosten können durch die Behebung der Auswirkungen auftreten.

Die Entwicklungslinie der Menschheit ist an sich nicht voraussehbar. Dennoch ist es nicht von der Hand zu weisen, daß durch an sich unbedeutend erscheinende Veränderungen in den Umweltbedingungen wesentliche Veränderungen bestimmter menschlicher Eigenschaften hervorgerufen werden. Verantwortungsbewußt ist es, alle nachteiligen Eventualitäten auszuschalten. Im Rahmen dieser Vortragsreihe obliegt dem Ingenieur jedoch nur die Darstellung der Bewegungsvorgänge von Mineralöl im Boden und im Grundwasser und sein weiteres Verhalten. Es muß anderen Fakultäten überlassen bleiben, die allfällige Schadwirkung in gesundheitlicher Beziehung zu beleuchten.

Dem Wasserwirtschaftler kommt es darüber hinaus darauf an, zu erfahren, für welche Zwecke und in welchem Maße mineralölkontaminiertes Wasser nur beschränkt verwendbar oder unverwendbar wird.

In den Boden eingedrungenes Öl unterliegt einem Transportvorgang, der im wesentlichen neben der Bodenart, durch die hydrologischen Verhältnisse und die Eigenschaften des Mineralöles bestimmt und durch die Schwerkraft und Grenzkräfte hervorgerufen ist.

Dabei sind die physikalischen Eigenschaften und unter diesen die Viskosität von Mineralöl und Mineralölprodukten von Belang. Rohöle stellen immer und die in praktischer Verwendung stehenden Öle immer in Teilen ein Gemenge mehrerer chemischer Verbindungen dar. Daher ist der Schwankungsbereich der Eigenschaften beträchtlich. Abb. 6 gibt für einige Rohöle und Mineralölprodukte Dichte, Viskosität und Stockpunkt sowie den Siedebeginn an (11). Die Viskosität — die Fließfähigkeit — ändert sich mit steigendem Siedebereich, was zur Folge hat, daß sich die höher siedenden Produkte langsamer ausbreiten, wenn sie dies unbehindert können. Außerdem ist die Viskosität temperaturabhängig; bei sinkender Temperatur wird das Öl schwerflüssiger und erreicht schließlich den Stockpunkt. Die Viskosität ist aber auch vom Paraffin Gehalt abhängig, was sich ebenfalls auf die Höhe des Stockpunktes auswirkt. Das Auskristallisieren der Paraffine erfolgt im Boden früher als im Laborversuch, weshalb das Stocken paraffinreicherer Öle im Boden schon oberhalb des Stockpunktes eintritt.

	Dichte (15° C) ca. g/ml	Viskosität bei 20° C ca. cSt	Stockpunkt ca. °C	Siedebeginn ca. °C
1. Rohöle				
Libyen	0,83—0,85	10— 30	± 0 bis +20	+ 30
Mittelost	0,85—0,87	10— 30	+20	+ 30
Venezuela	0,85—0,98	15— 800	—40 bis ± 0	+ 30 bis + 100
Europa:				
Leichtöl	0,82—0,90	5— 150	—20 bis +45	+ 30
Mittel- u. Schwer-Öl	0,90—0,95	150—4000	—30 bis + 5	+ 75
2. Mineralölprodukte				
Fahr- u. Flug- benzine	0,70—0,80	0,7	unter —50	+ 30
Petroleum u. Düsen- treibstoff	0,70—0,83	2— 4	unter —50	+ 150
Heizöl El u. Diesel- Kraftstoff	0,81—0,86	2— 6	— 5 bis —20	+ 170
Schmieröle	0,80—0,95	über 5	—40 bis ± 0	über + 250
Heizöl schwer	0,90—0,98	gestockt	+ 20 bis + 45	über + 200

Abbildung 6

Eigenschaften verschiedener Rohöle und Mineralölprodukte  
(sämtliche angegebenen Ziffern sind nur Anhaltswerte)  
nach Arbeitskreis „Wasser und Mineralöl“ (11)

Wenn alles Öl in den Boden eingesickert ist, sinkt der Staudruck und es verringert sich die Konzentration. Im sogenannten rückwärtigen Bereich wird schließlich eine Restsättigung erreicht. Daher ist der erreichte Endzustand nur metastabil. Durch die Auflast nachsickernden Wassers bei Regenfällen usw. setzen wieder Bewegungsvorgänge in dem Maße ein, als die Wirkung des hydrostatischen Druckes, der Auflast und des Eigengewichtes des haftenden Ölteilchens gegenüber den Haftungskräften überwiegt.

Dabei haben nach BILLIB und HOFFMANN länger haftende, am Bodenkorn gealterte Teilchen größere Haftkräfte aufzuweisen.

Wenn der Ölkörper auf die wasservollgefüllten Poren der Obergrenze des Kapillarsaumes stößt, breitet er sich auf Grundwasseroberflächen aus, wobei dieses Ausbreiten mit einer charakteristischen Schichtdecke stattfindet, die aus der Tabelle (Abb. 7) zu entnehmen ist. Über das daraus errechenbare Maß hinaus ist eine Ausbreitung des Ölkörpers in seiner Grenzausbreitung an einer ruhenden Grundwasserspiegelfläche nicht zu erwarten. Die Bewegung des Grundwasserspiegels in vertikaler Richtung während der Ausbreitzeit vermag eine wesentliche Verringerung der Ausbreitfläche herbeiführen, weil durch das Heben oder Senken des Grundwasserspiegels während des Ausbreitens eine größere Schichthöhe ölbenetzt wird.

Der Form nach ist die Ausbreitungsfläche unter der Annahme von gleichdurchlässigem Boden nur dann eine Kreisfläche, wenn das Grundwasser keine Strömung aufweist. Beides wird in der Praxis nicht vorkommen. Die Grundwasserströmung wird begrifflicherweise eine bevorzugte Ausdehnung in Strömungsrichtung zur Folge haben, wonach in Querrichtung und grundwasserstromaufwärts eine dementsprechende Verringerung eintritt. Hierbei wird die Ausbreitung in Bereichen größerer Durchlässigkeit weiter reichen als in Zonen kleinerer Durchlässigkeit.

Typische Korngrößen bzw. überwiegende Korngrößen bei Gemischen	Durch- lässigkeit kf (m/s)		äquivalente kapillare Steighöhe hc (mm)		Ölrückhalte- vermögen Uöl (l/m <sup>3</sup> )	Ölschicht- dicke Döl (mm)	Auffächerungs- beiwert z (m)
	von	bis	von	bis			
Block, Geröll, Grobkies		1 10 <sup>-2</sup>		50	5	5	—
Kies, Grobsand	1 · 10 <sup>-2</sup>	1 10 <sup>-3</sup>	50	150	8	8	0,5
Grobsand, Mittelsand	1 10 <sup>-3</sup>	1 10 <sup>-4</sup>	150	300	15	12	0,5
Mittelsand, Feinsand	1 10 <sup>-4</sup>	1 10 <sup>-5</sup>	300	600	25	20	0,3
Feinsand, mehr oder weniger schluffig	1 10 <sup>-5</sup>	1 10 <sup>-7</sup>	600	1000	40	40	—

Abbildung 7  
Richtwerte für Lockergesteinsgruppen  
nach Arbeitskreis „Wasser und Mineralöl“ (11)

Vor allem darf nicht außer acht bleiben, daß diese Überlegungen für horizontale Schichtungen angestellt wurden; schräge Schichtung kann sehr bedeutenden Einfluß haben.

Wenn diese Angaben auch viele Möglichkeiten der Abweichung beinhalten, erscheinen sie doch wertvoll, weil sie ein Abschätzen des möglichen Umfanges der Kontaminierung des Untergrundes gestatten und dabei eher ein Höchstmaß erwarten lassen.

Damit ist der Vorgang des Eindringens von Öl in den Boden an sich beendet. Wenn sich die äußeren Umstände nicht ändern, besteht kein Anlaß, daß sich der Ölkörper als solcher verändern müßte. Als Veränderung der äußeren Umstände kommt insbesondere die Bewegung des Grundwassers in Frage. Hebt sich der Grundwasserspiegel, hebt sich die Ausbreitschichte mit; Senken des Grundwasserspiegels vergrößert sie; Sickerwasser überlagert sie, so daß im Laufe der Zeit der Schwankungsbereich des Grundwasserspiegels von einem Wasser-Ölgemenge anstelle der Ausbreitschichte erfüllt wird. Auch dieses Gemenge lagert an sich stationär an seiner Stelle. Im Schwanken des Grundwasserspiegels liegt möglicherweise der Vorteil, daß damit ein Belüften verbunden ist und die Voraussetzung für bakterielle Abbauvorgänge geschaffen wird. Andererseits bringt das Absinken des Grundwasserspiegels ein Absinken der Ausbreitzzone und dadurch ein Nachrücken in diese aus dem Versickerungskörper, wenn dieser noch nicht sonderlich stabil geworden ist, mit sich.

In weiterer Folge haben wir 4 Vorgänge zu erörtern, die sich anschließen können oder anschließen könnten, nämlich mechanischen Abtransport, Lösung, Übergang in die gasförmige Phase und Abbau. Das von der Oberfläche her in den Boden eindringende Öl bildet also zunächst einen zusammenhängenden Ölkörper, der alle Poren des Bodens ausfüllt, sofern diese nicht mit Porenwasser gefüllt sind. Solange es sich um einen gleichmäßig gekörnten Boden handelt, muß das Absinken in quasi zylindrischer Gestalt erfolgen. Trifft der absinkende Ölkörper auf Zonen geringerer Durchlässigkeit — also kleinerer  $k_f$ -Werte, wird sich der vergleichbare Durchmesser des absinkenden Ölkörpers entsprechend erweitern, hingegen bei größerer Durchlässigkeit nicht oder kaum verringern. Stößt der absinkende Körper auf Böden sehr geringer Durchlässigkeit oder auf Schichten mit wassergesättigten Poren, tritt eine wesentliche Verbreiterung bzw. eine völlige Hemmung des Fortschreitens der Bewegung in vertikaler Richtung ein.

Der Arbeitskreis „Wasser und Mineralöl“ (11) hat auch dafür Werte als Anhalt bekanntgegeben (Abb. 7), wobei die Werte für das Ölrück-

haltevermögen im Sickerbereich natürlich nur Mittelwerte darstellen. Mit ihnen kann die Eindringtiefe ermittelt werden. Reicht diese bis zum Grundwasserspiegel, findet eine Berührung des Ölkörpers mit dem Grundwasser statt. Im anderen Falle wird nur Öl in gelöster Form ins Grundwasser gelangen können.

G. CLAUS (13) unterstreicht die Feststellung, daß nicht das Porengefüge der Gesteine unmittelbar, sondern seine Füllung mit Kapillar- und Haftwasser die Ölverbreitung und Wanderung im Untergrund herabmindern. Damit ergibt sich aber eine nicht unwesentliche, mit der Zeit veränderliche Komplikation bei der Beurteilung der Untergrundverhältnisse. Diese wirkt sich im Sickerbereich über dem Grundwasserspiegel, aber auch in dessen Schwankungsbereich aus, so daß sich das selbe Gestein vor allem je nach dem Sickerwasseranfall verschieden ölwegsam erweist. Voraussetzung für einen mechanischen Abtransport wäre das Auftreten einer Schleppkraft des Sickerwassers oder des Grundwassers, die so groß ist, daß sie in der Lage ist, die Haftungskräfte zu überwinden und Ölteilchen aus ihrem Zusammenhang mit dem Ölkörper zu reißen sowie sie dann weiter zu transportieren. Nun ist es zwar wohl vorstellbar, daß versickerndes Wasser an der äußeren Begrenzung des Ölsickerkörpers Teilchen mitnimmt, die dann allmählich doch zur Ausbreiterschicht gelangen bzw. in kleinsten Schritten den Ölkörper bis zum Grundwasser absinken lassen; ein Vorgang, der, wenn überhaupt, jahrelang währt.

Hingegen ist es kaum vorstellbar, daß die Schleppkraft an der Oberfläche des Kapillarsaumes jemals so groß wird, daß dabei Teilchen mitgerissen werden.

So wird eine weitere Ausbreitung in der Praxis nur durch Lösungsvorgänge bewirkt.

Die Betrachtung kann an der Wasserlöslichkeit von Mineralöl nicht vorbeigehen. Löslichkeit ist überall gegeben, allerdings ist eine Abhängigkeit von der jeweils vorliegenden Verbindungsgruppe als auch in beträchtlichem Maße vom Mol-Volumen gegeben (Abb. 8).

Weil aber jedes in der Praxis vorkommende Rohöl und jeder Treibstoff etc. ein Gemenge darstellen, kann man von einer bestimmten Löslichkeit nicht sprechen, sondern verwendet an deren Stelle die Sättigungskonzentration in Wasser, die für einige Stoffe in Abb. 9 angegeben ist.

Auch die Lösungsgeschwindigkeit ist von Wichtigkeit, die wiederum für die verschiedenen Mineralölkomponten, Temperaturen und Kon-

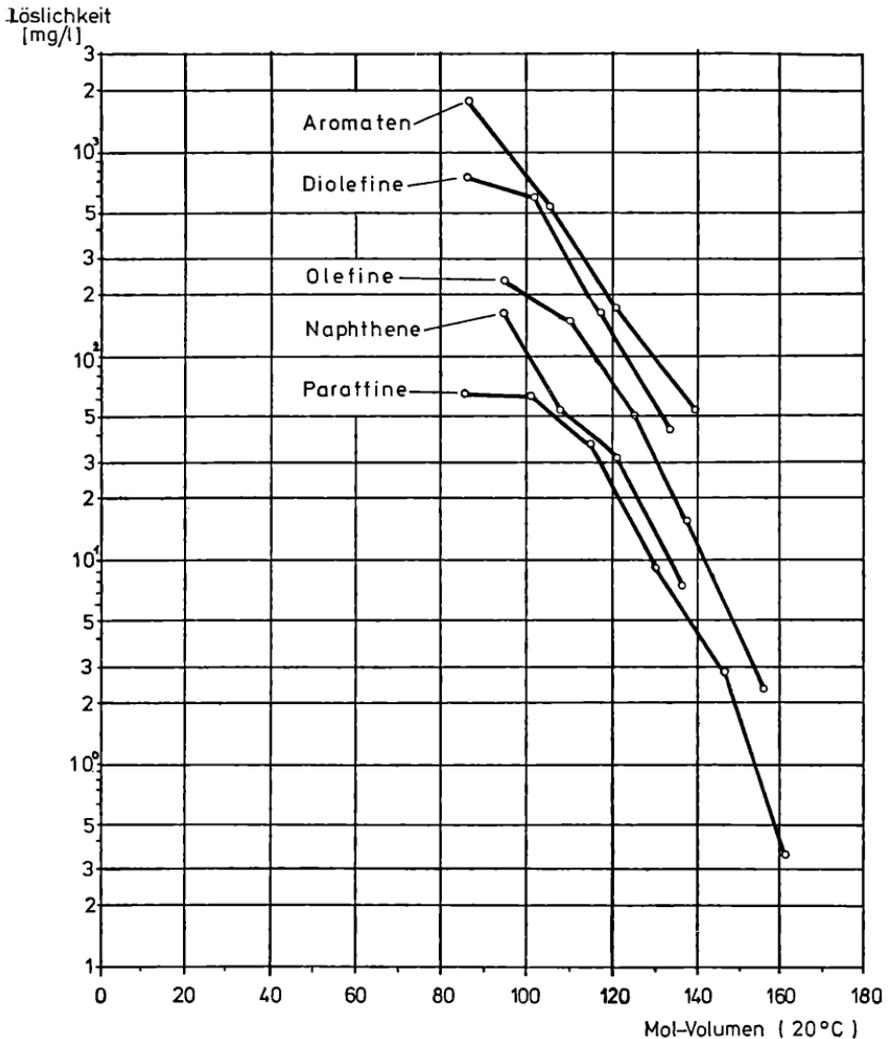


Abbildung 8

Abhängigkeit der Löslichkeit vom Mol-Volumen nach Arbeitskreis „Wasser und Mineralöl“ (11)

zentrationen verschieden ist, so daß man sich auch hier mit einem empirischen Sammelbegriff, der Austauschkonstanten, behelfen kann, also jener Menge von Mineralöl, die von der Oberfläche eines Wasserkörpers in diesen eindringt (Abb. 10).

Art des Mineralölproduktes	Sättigungskonzentration in Wasser (mg/l)
Benzol	1700
Autobenzin	50 bis 500
Diesekraftstoff } Heizöl EL }	10 bis 50
Kerosin } Petroleum }	0,1 bis 5

Abbildung 9  
Sättigungskonzentrationen  
nach Arbeitskreis „Wasser und Mineralöl“ (11)

Gruppe	E (mg/m <sup>2</sup> s)
Benzin, Teeröl	0,1
Heizöl, Diesekraftstoff, Kerosin	0,01
Schmieröle, Heizöl S	0,001

Abbildung 10  
Stoffaustauschkonstanten  
nach Arbeitskreis „Wasser und Mineralöl“ (11)

Wenngleich die Tabelle nur einen Richtwert beinhaltet, zeigt sie doch, daß das Eindringen für Benzine etwa 100mal so schnell erfolgt als für schweres Heizöl.

Die Vielfalt der Variationsmöglichkeit von Einflüssen und Vorgängen erschwert die Betrachtung, wie man sieht, sehr. Auch die sogenannten Austauschkonstanten sind keineswegs als konstant anzusehen, sondern verringern sich mit zunehmender Konzentration des Öls im Wasser.

Grundsätzlich gibt es Lösungsvorgänge solange, als es einen Ölkörper gibt, dessen Oberflächen mit Wasser in Berührung kommen. Das ist an der Unterfläche einer Ausbreitschicht immer der Fall. Das ist weiter an der Oberfläche dieser Schicht, im Falle schwankender Grundwasserspiegel der Fall. Das ist ferner bei jedem Sickerprozess von Wasser entlang der Außenflächen der Ölsickerkörper der Fall.

Der Arbeitskreis „Wasser und Mineralöl“ (11) macht auch dazu Angaben in mathematischer Form und führt aus, daß aus dem gesamten festliegenden Ölkörper laufend und gleichmäßig Bestandteile herausgelöst und weitertransportiert werden, wobei eine Verdünnung, eine seitliche Auffächerung und eine bevorzugte Ausdehnung in der Hauptfließrichtung des Grundwasserstromes eintritt. Wenn eine kritische Grenzkonzentration, für die 0,1 mg/l vorgeschlagen wird, als Grenzlinie gedacht wird, hat die Ausbreitungsfläche eine etwa eiförmige Gestalt, wobei ihre maximale Längsausdehnung in Fließrichtung sich aus dem Produkt aus infiltrierter Ölmenge und Stoffaustauschkonstante, gebrochen durch das Produkt aus Schichtdicke, Grundwassergeschwindigkeit und einem Auffächerungsbeiwert errechnet. Dies ist für die Schulung der Vorstellung sicherlich wertvoll, wird aber nicht in allen Fällen ohne weiteres für die Praxis herangezogen werden können, weil der Faktor Zeit hier mit eine Rolle spielt.

Das gelöste Mineralöl macht alle Bewegungen des Grundwassers mit. Sodann wird noch die Frage der Einschichtung des Wassers, das gelöstes Mineralöl beinhaltet, gegenüber dem übrigen, Auswirkungen haben. Das Gedankenmodell setzt einen Vorgang voraus, der sich auf die geringe hohe rechnerische Ölschichtdicke beschränkt. Hier wird die Praxis häufig der Spiegelschwankungen wegen ein Mehrfaches davon zu bedenken haben. Ebenso wie sich diese auf die Ausbreitungsfläche des Ölkörpers auswirken, geschieht dies auch bei Ausbreitung gelöster Teilchen. Weiters muß bedacht werden, daß dabei die verschiedenen Bestandteile des als Mineralöl bezeichneten Gemenges durchaus verschiedenes Verhalten aufweisen müssen, weil die Lösung in verschiedenem Maße erfolgt. Bekannt ist hier das Herauslösen der Aromaten aus schweren Ölen. So ist eine einheitliche Grenzkonzentration manchmal zu wenig aussagekräftig, weil gerade Aromaten in besonderer Weise zur Geruchs- und Geschmacksbeeinträchtigung des Wassers führen.

Auch im Untergrund verdunsten die niedrig siedenden, leicht flüssigen Vergaserkraftstoffe verhältnismäßig rasch. Die Verdunstung ist von der Durchlässigkeit des Bodens abhängig und findet nur im belüfteten Bereich des Bodens statt. Soweit der Boden nicht durch späteren Regen, Sickervorgänge etc. wieder wassergefüllt wurde, wird daher an den Oberflächen des Ölkörpers und der Ausbreitschicht sowie aus gelösten Mineralölbestandteilchen im Kapillarbereich eine Zone entstehen, in der durch Öl in gasförmigem Zustand ganz oder teilweise gefüllte Poren vorhanden sind. Die Gase sind schwerer als Luft; daher bleibt die Gasfüllung erhalten und beteiligt sich nicht an einem Gasaustausch. Wohl

aber wird auch aus der Gasfüllung durch Sickerwasser wieder Öl gelöst und gelangt mit dem Wasser wieder in den Grundwasserkörper, dessen Strömungsverhältnisse für den weiteren Weg maßgeblich sind.

Weiters soll auf die mehrfach gestellte Behauptung — etwa in der Druckschrift des Mineralölwirtschaftsverbandes Hamburg „Mineralöllagerung und Gewässerschutz“ vom Oktober 1962 (14) — der mikrobielle Abbau der Mineralöle sei eine der bedeutendsten Seiten des Gewässerschutzes, die bisher kaum beachtet worden sei, eingegangen werden.

Zwei Gruppen von Mikroben werden hervorgehoben, deren eine sich auf den Abbau bestimmter Kohlenwasserstoffe spezialisiert habe und deren andere eine erhebliche Bandbreite beim Abbau homologer Reihen besitze. Die Kleinstlebewesen benötigen außer den Nährstoffen Sauerstoff und Wasser. Sie können sich daher nicht im Inneren eines Ölkörpers ansiedeln, sondern nur in einer Wasserphase; nur dort könnte sich ein Abbau vollziehen. Möglichst große Kontaktflächen sind dabei eine Voraussetzung. Eine andere Voraussetzung wäre aber auch das Massenvorkommen der Mikroben. In Grundwasser, das ansonsten intakt ist — sind zunächst nur sehr geringe Keimzahlen vorhanden. Aus diesen müßten sich zunächst bestimmte Stämme auf die neue Aufgabe adaptieren und dann erst intensiv vermehren. Sicherer und schneller Abbau innerhalb des Grundwassers kann daher durchaus nicht berechtigt erwarten werden.

Zum Vergleich mit theoretischen Erwägungen stellt uns in der Praxis der Tankwagenunfall in großem Umfang der Frage des Mineralöls im Boden und im Grundwasser gegenüber. Ereignisse, die fast immer auch mit schwerem persönlichen Schicksal verbunden sind. Durch das Leckwerden der Transportgefäße, durch die Unfallschäden wird eine bestimmte Sickerfläche mit Öl benetzt. Unfälle sind im Winter viel häufiger als im Sommer. Ist der Boden gefroren, kann Öl nur in jenem Maße eindringen, als die Poren nicht wassergefüllt sind, wobei der Anteil des freien Porenvolumens durch die Eisbildung beträchtlich herabgesetzt wird oder die Poren überhaupt völlig verschlossen werden. Durch das Öl kann aber Auftauen bewirkt werden, wonach wegen der Volumensverminderung das Eindringen von Öl wieder möglich wird. Sickerflächen können dadurch ganz unregelmäßige Gestalt erhalten. Weit schwieriger ist die Sickerfläche in anderen Fällen abzuschätzen, wenn die Ausbreitung an der Erdoberfläche unter einer Schneedecke stattfindet oder bei denen die Verfärbung der benetzten Fläche schwer erkennbar ist. Großflächige Verteilung auf der Geländeoberfläche sieht bedeutungsvoller aus. Von der Oberfläche her wird sehr wohl ein Abbau erwartet werden dürfen, jedoch dauert dies sehr lange. Die je Flächeneinheit versickernde Ölmenge

ist dann aber in der Regel nicht sehr groß, so daß der Ölkörper kaum das Grundwasser erreichen wird und sich daher dort auch nicht ausbreitet. Allerdings muß auch die anschließende Sanierung des Geländes als solches mitbedacht werden, die dabei kostspieliger wird, weil es sich um große Flächen handelt.

Alle diese Erwägungen stellen die Voraussetzung für eine Sanierung dar. Will man nicht ganz im Ungewissen handeln, sollte man sich jedenfalls auch über die Art und Menge des auslaufenden Öles ebenso klar sein, wie über die Art des Bodens und die Tiefenlage undurchlässiger Schichten bzw. des Grundwasserspiegels. Als Sanierung kommt einzig und allein das Entfernen des kontaminierten Materiales in Frage. Dabei ist die Frage, ob größere Flächen seicht auszuheben oder tiefere Aushübe auf kleinerer Fläche durchzuführen sind, eigentlich schon eine Vorfrage von der Kostenseite her. Damit liegt die Entscheidung vor, inwieweit die oberflächliche Ausbreitung verhindert werden soll. Das Abbrennen gelingt nur bei Dieselöl im Winter mit allen Vorsichtsmaßnahmen. Heizöl brennt in der Regel nur mit Stützfeuer.

Die negative Entscheidung — Nichtentfernen kontaminierten Erdreichs — ist heute schon die schwierigere geworden, weil die Verantwortung zu sagen „hier wird nichts passieren“ weit schwieriger zu tragen ist, als jene für den Entschluß „Aushub des kontaminierten Materials“ mit Abtransport. Wird die Ausbreitung an der Erdoberfläche — z. B. durch Schnee — behindert, hat man viel eher zu erwarten, daß der Ölkörper den Grundwasserspiegel erreicht und auf ihm eine Ausbreitung stattfindet. In anderen Fällen ist die Ausbreitung auf der Oberfläche durch Unterschreiten des Stockpunktes verhindert. Das Einsickern ist dann nur gering. Es werden nur mehr Lösungsvorgänge zu erwarten sein.

Bei theoretischen Überlegungen kann begreiflicherwise nur von idealisierten Verhältnissen ausgegangen werden, denen die Wirklichkeit oftmals nicht gerecht wird. Besonders kraß werden die Abweichungen, wenn z. B. unterirdische Leitungen — etwa Drainagen — im Sickergebiet vorhanden sind. Ölaustritt weitab von der Sickerstelle kann die Folge sein.

Wengleich nicht alle Zusammenhänge völlig geklärt sind, sind doch viele Abhängigkeiten und Vorgänge auch für die Praxis in hinreichendem Maße erkannt und Möglichkeiten für die Abschätzung des Ausmaßes einer Mineralölverunreinigung des Bodens und des Grundwassers geschaffen worden.

Die Wasservorräte unserer Heimat sind nicht so gewaltig, daß wir es uns erlauben könnten, auch nur auf einen kleinen Teil zu verzichten. Wir müssen sie erhalten.

Dies wird nur möglich sein, wenn der überhandnehmenden Verunreinigung durch Mineralöle wirksam entgegengetreten wird, wozu die Kenntnis der Bewegungsvorgänge von Öl im Boden und Grundwasser unerlässlich ist.

#### Literatur

- (1) RUNGE, H. (1953): Erdöl, Erdgas, Grundwasser. — Das Gas- u. Wasserfach, Jg. 96, S. 486.
- (2) Hannoversche Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau, Franzius-Institut: Untersuchungen über das Aufnahmevermögen von Sandböden für Mineralöle. — November 1959.
- (3) PRIER, H. (1967): Über das Verhalten von versickerten Mineralölprodukten im Untergrund. — Gesundheits-Ingenieur, Jg. 88, H. 5, S. 145.
- (4) BARTZ, J. (1966): Öl- und Benzinversickerungs-Versuche in der Oberrheinebene. — Das Gas- u. Wasserfach, 107. Jg., H. 6, S. 143.
- (5) BARTZ, J., PRIER, H. (1967): Öl- und Benzinversickerungs-Versuche in der Oberrheinebene. — Das Gas- u. Wasserfach, 108. Jg., H. 4, S. 91.
- (6) BARTZ, J., KÄSS, W., PRIER, H. (1959): Öl- und Benzinversickerungs-Versuche in der Oberrheinebene. — Das Gas- u. Wasserfach, 100. Jg., H. 22, S. 592.
- (7) KOPPE, P. (1966): Der Einfluß der Grenzflächenkräfte auf die Fortbewegung von flüssigen Kohlenwasserstoffen mit dem Grundwasser. — Gesundheits-Ingenieur, 87. Jg., H. 2, S. 50.
- (8) BILLIB, H., HOFFMANN, B. (1966): Wie bewegen sich Mineralölprodukte im Boden? — Das Gas- u. Wasserfach, 107. Jg., H. 6, S. 138.
- (9) BECKMANN, E. (1963): Das Verhalten der Erdölderivate im Grundwasser. — Das Gas- u. Wasserfach, 104. Jg., H. 24, S. 690.
- (10) Grundwasserschutz und Mineralölnfälle. Wassernachrichten. — Inform. des Bundesministeriums des Inneren, 1. Jg., H. 4.
- (11) Beurteilung und Behandlung von Mineralölnfällen auf dem Lande im Hinblick auf den Gewässerschutz. — Herausgegeben vom Arbeitskreis „Wasser und Mineralöl“, veröffentlicht vom Bundesministerium für Gesundheitswesen, Bad Godesberg 1969.
- (12) SCHWILLE, F., VORREYER, Ch. (1969): Durch Mineralöle „reduzierte“ Grundwässer. — Das Gas- u. Wasserfach, 110. Jg., H. 44, S. 225.
- (13) CLAUS, G. (1967): Ein Beitrag zur Frage der Gefährdung des Grundwassers durch Mineralölprodukte. — Die Wasserwirtschaft, 57. Jg., H. 3, S. 127.
- (14) Mineralöl und Gewässerschutz. — Mineralölverband e. V., Hamburg 1, Klosterwall 4, VI, Oktober 1962.

Anschrift des Verfassers: W. Hofrat Dipl.-Ing. Dr. techn. Lothar BERNHART, Amt der Steiermärkischen Landesregierung, Landhausgasse 7, A - 8011 Graz.

# ZOBODAT - [www.zobodat.at](http://www.zobodat.at)

Zoologisch-Botanische Datenbank/Zoological-Botanical Database

Digitale Literatur/Digital Literature

Zeitschrift/Journal: [Wasser und Abwasser](#)

Jahr/Year: 1971

Band/Volume: [1971](#)

Autor(en)/Author(s): Bernhart Lothar

Artikel/Article: [Öl im Grundwasser 167-188](#)