

SUMMARY

Migration of mineral oil in soils

A survey is given of the migration of mineral oil in soils. Scientific aspects, practical experiences and measures for protection of ground water are being discussed.

# Bescherming van grondwater tegen olieverontreiniging\*)

## I. Das Verhalten von Mineralöl im Untergrund

### 1. Einleitung

Untersuchungen über die Kontamination des Untergrundes durch Mineralöl fallen ohne Zweifel in das Aufgabengebiet des Grundwasserhydrologen. Ueber die wissenschaftlichen Grundlagen der Migration von Kohlenwasserstoffen finden sich jedoch in den Lehrbüchern der Grundwasserkunde oder der Hydrogeologie leider noch keine entsprechende Kapitel; man muss sich die Unterlagen aus den Fachzeitschriften mühsam zusammentragen.

Ich möchte daher versuchen, Ihnen in kurzen Zügen ein Bild über die Ausbreitung von Mineralöl im Untergrund zu entwerfen, das sowohl den wissenschaftlichen Erkenntnissen als auch den praktischen Erfahrungen bei der Untersuchung von Ölschadensfällen gerecht wird.

Wie kompliziert die Vorgänge der Migration von Kohlenwasserstoffen sind, erkennen Sie, wenn ich die wichtigsten Teilprobleme anführe.

- a. Es handelt sich bei der Infiltration von Mineralöl in den Untergrund zunächst um Fliessvorgänge von 2 miteinander nicht mischbaren Flüssigkeiten, nämlich von Wasser und Öl. In einem späteren Stadium sind zusätzlich noch die Dispersions- und Diffusionsvorgänge von gelösten Kohlenwasserstoffen in der wässrigen Phase zu betrachten.
- b. Die Migration erfolgt sowohl im ungesättigten als auch im gesättigten Porenraum; in vielen Fällen spielt sie sich im Grenzbereich zwischen dem ungesättigten und dem gesättigten Porenraum ab.
- c. Bei der Infiltration von Mineralöl haben wir es in der Regel mit nicht stationären Fliessvorgängen zu tun.
- d. Im Anfangsstadium der Ölausbreitung spielt meist die Schwerkraft die entscheidende Rolle; in der Endphase der Ausbreitung gewinnen die Grenzflächenkräfte in zunehmendem Masse an Bedeutung.
- e. Chemisch-biologische Vorgänge beeinflussen auf lange Sicht die Migrationsvorgänge.

Betrachten wir zunächst anhand schematischer Darstellungen die Ölausbreitung in porösen Medien, also in lockeren, unverfestigten Sedimenten wie z.B. Sanden und Kiesen. Als

fluviatile und fluvioglaziale Ablagerungen sind diese für die Wasserversorgung in Mitteleuropa von grösster Bedeutung.

### 2. Schematische Darstellung der Ölausbreitung im porösen Medium

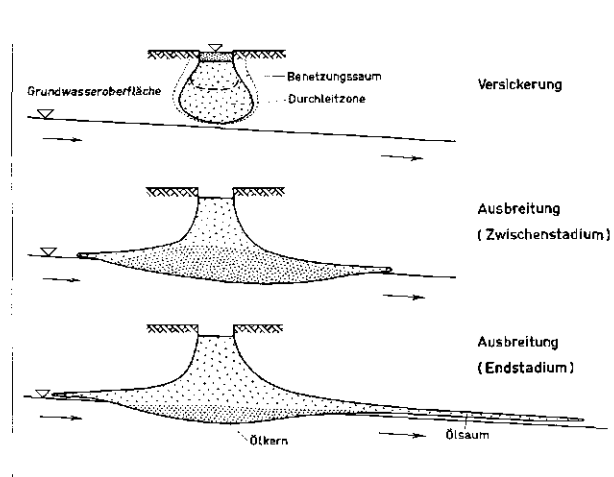
Wir unterscheiden bei der Infiltration von Mineralöl in den Untergrund aus praktischen Gründen 2 Phasen (Abb. 1) und zwar:

- a. die Versickerung, d.h. die überwiegend nach unten gerichtete Bewegung im ungesättigten Porenraum und
- b. die Ausbreitung im eigentlichen Sinne, d.h. das Auseinanderfliessen im Grenzbereich zwischen ungesättigtem Porenraum in vorwiegend horizontaler Richtung.

Da in unserem Klimabereich die Sickerzone fast stets einen gewissen Feuchtigkeitsgehalt aufweist, haben wir es sowohl bei der Versickerung als auch bei der Ausbreitung mit Fliessvorgängen von nicht mischbaren Flüssigkeiten bei den verschiedensten Sättigungsgraden zu tun.

Wie aus der Erdölgewinnungstechnik bekannt ist, wird Öl unterhalb eines gewissen Sättigungsgrades immobil in den Porenräumen als sog. „Residualöl“ festgehalten (Residualsättigung). Wird also der Sättigungsgrad der nicht benetzenden Flüssigkeit (Öl) entsprechend reduziert, so brechen die bisher vorhandenen Fliesskanäle zusammen und es bleiben

Abb. 1 - Die Ölausbreitung im porösen Medium. - Schematisch.



\*) Voordrachten gehouden voor de Afdeling voor Gezondheidstechniek en de Afdeling voor Petroleumtechniek van het Koninklijk Instituut van Ingenieurs en voor de Vereniging voor Waterleidingsbelangen in Nederland op 11 mei 1967 te 's-Gravenhage.

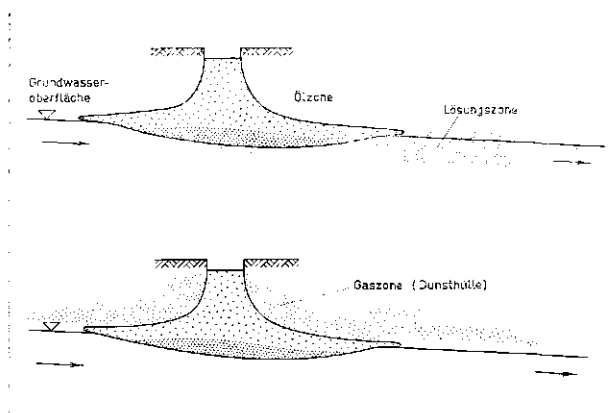


Abb. 2 - Die Verteilung von Öl, gelösten und gasförmigen Kohlenwasserstoffen im porösen Medium. - Schematisch.

isolierte „Inseln“ der nicht benetzenden Flüssigkeit zurück. Diese „Inseln“ sind für alle Druckgradienten, die im Bereich des laminaren Fließens vorkommen, weitgehend stabil. Bei der Versickerung breitet sich das Öl nicht nur durch die Wirkung der Schwerkraft, sondern auch durch die Wirkung der Kapillarkräfte nach allen Richtungen aus. Das einsickernde Öl bildet daher einen dem Kapillarsaum des Grundwasserkörpers vergleichbaren Saum, der als „Öl-Benetzungssaum“ bezeichnet werden soll. In ihm nimmt — wie im Kapillarsaum — der Ölsättigungsgrad nach aussen hin ab. In der „Öldurchleitzone“ ist nur die Wirkung der Schwerkraft ausschlaggebend.

Entscheidend für die Form des Ölkörpers ist, neben der relativen Durchlässigkeit bzw. den Kapillarkräften und dem Feuchtigkeitsgehalt, vor allem die Struktur des Untergrundes. Die im Bild dargestellte Idealform wird daher in der Natur höchst selten beobachtet.

Die Ausbreitung des Öles im Bereich der Grundwasseroberfläche erfolgt meist nicht in dünner, scharf begrenzter Schicht wie auf einer offenen Wasseroberfläche, sondern je nach Kapillarität und Infiltrationsrate in einer mehr oder weniger dicken Zone. Der Vorgang der Ölausbreitung kommt zum Stehen, sobald die den Poren- und Gefällsverhältnissen entsprechende Residualsättigung erreicht ist (Endstadium).

Die Verteilung des Öles in dem Bereich der Grundwasseroberfläche ist meist sehr ungleichmässig. Die Masse des Öles befindet sich im engeren Bereich der Versickerungsstelle in relativ hoher Konzentration („Ölkern“). An den „Kern“ schliesst sich ein Bereich geringerer Ölkonzentration an, den wir hier als „Ölsaum“ bzw. bei einseitiger Ausbreitung als „Ölzunge“ bezeichnen wollen. Diese beiden Bereiche scheinen auch in flüssigkeitsdynamischer Hinsicht eine gewisse Bedeutung zu haben; das Öl im Kern verdankt seine Lage der Wirkung der Schwerkraft; das Öl im Saum hat sich unter wesentlicher Mitwirkung der Grenzflächenkräfte ausgebreitet.

Durch das Sickerwasser und das fließende Grundwasser können gewisse Bestandteile aus dem Öl herausgelöst und weggeführt werden. Um die eigentliche Ölausbreitungszone (kurz „Ölzone“) herum bildet sich daher bei häufig in der Richtung wechselnder Grundwasserflussrichtung ein „Lösungshof“ bzw. bei vorwiegend einseitiger Flussrichtung im Lee des Ölkörpers eine „Lösungsfahne“ (Abb. 2). Die gelösten Stoffe sind nicht an die Grundwasseroberfläche gebunden, sondern können, wie jeder gelöste Tracer, in tiefere Bereiche der grundwasserführenden Schicht migrieren. Ihr Verhalten richtet sich nur noch nach den Gesetzen der Dispersion bzw. der Diffusion gelöster Stoffe. Lösungszonen bilden sich selbstverständlich auch unter den Ölkörpern im Sickerbereich, die den Kapillarsaum nicht erreicht haben.

Die in Mineralölen gewöhnlich enthaltenen oberflächenaktiven Stoffe versuchen zu entweichen und reissen dabei

feinste Öltröpfchen mit. Die „innere“ Grenze zwischen nicht benetzender und benetzender Phase wird daher vermutlich ziemlich verwischt sein, ebenso wie die „äussere“ Grenze zwischen Ölzone und Lösungszone.

Die niedrigsiedenden, leichtflüchtigen Vergaser-Kraftstoffe (Benzine) verdunsten sehr rasch. Der belüftete Porenraum über der Öl- und der Lösungszone ist daher von einer Hülle von Kohlenwasserstoffdämpfen überdeckt (Gaszone, „Dunsthülle“). Da die Benzindämpfe schwerer als Luft sind, wird man sie vor allem in den grobporigen Lagen unmittelbar über dem Kapillarsaum antreffen. Die flächenhafte Ausbreitung gasförmiger Kohlenwasserstoffe kann daher erheblich grösser sein als die von der Ölzone eingenommene Fläche.

Bei der Beschreibung der Migration von Mineralöl muss also auf folgende Unterscheidung streng geachtet werden:

- Die Migration von Mineralöl als der mit Wasser nicht mischbaren Phase (Migration von Öl).
- Die Migration der im Wasser gelösten ursprünglichen Mineralölbestandteile (Migration gelöster Kohlenwasserstoffe).
- Die Migration gasförmiger Kohlenwasserstoffe.

### 3. Ergebnisse der Auswertung von Ölfällen

Welche Ölmengen vermag der Untergrund im Sickerbereich entgegen der Wirkung der Schwerkraft festzuhalten? — Obwohl gerade diese Frage für die Lösung praktischer Aufgaben von entscheidender Bedeutung ist, findet man hierüber in der Literatur nur wenige Angaben. Betrachtet man bei Ölfällen den gesamten kontaminierten Sickerbereich von der Erdoberfläche bis zur Obergrenze des Kapillarsaums, so zeigt sich, dass die Durchschnittswerte der Ölgehalte relativ niedrig sind. Die errechneten Ölgehalte liegen meist in der Grössenordnung von nur wenigen 10 Litern je Kubikmeter der ölhaltigen Medien. Der Wert von 50 l/m<sup>3</sup> wird selten überschritten. Nur bei relativ kleinen Ölkörpern werden z.T. höhere Durchschnittsgehalte ermittelt. Die Verteilung der Ölgehalte schwankt wegen der meist erheblichen Heterogenität des Untergrundes in der Regel sehr stark. Genaue zahlenmässige Beziehungen zwischen den bodenphysikalischen Kennziffern der porösen Medien und ihren Ölgehalten lassen sich aus den bis heute vorliegenden Feldbeobachtungen noch nicht herleiten. Eine Abhängigkeit des Aufnahmevermögens von der Kapillarität ist jedoch deutlich zu erkennen; feinkörnige Medien halten in der Regel mehr Öl fest als grobkörnige. Von nicht zu unterschätzendem Einfluss scheint auch die Struktur zu sein (z.B. höhere Aufnahmefähigkeit bei Wechsellagerung gegenüber homogenen Medien).

Die Ausbreitung des Mineralöls, das die ungesättigte Zone durchdrungen hat, erfolgt vorzugsweise im Uebergangsbereich zwischen ungesättigter und gesättigter Zone. Dies konnte bei allen einwandfrei untersuchten Fällen festgestellt werden. Je nach dem Druck des versickernden Öles dringt dieses im zentralen Bereich auch in den gesättigten Porenraum und „beult“ gewissermassen die Grundwasseroberfläche ein (Abb. 1). Mit zunehmendem Fortschreiten der Ausbreitungsfront steigt das eingedrungene Öl jedoch ziemlich rasch wieder zur Grundwasseroberfläche empor und schiebt sich in den höheren Teil des Kapillarsaums. Offenbar stellt dieser nicht gesättigte Bereich des Kapillarsaumes den Weg des geringsten Widerstandes für das Öl dar. Ein Absinken des Öls unter die Grundwasseroberfläche ohne einen entsprechenden Ölüberdruck wurde nie beobachtet.

Nur in wenigen Fällen wurden Beobachtungen über den zeitlichen Ablauf der Ausbreitung angestellt. Das Ausbreiten des Öles erfolgt in der ersten Phase fast ausschliesslich unter dem Einfluss der Schwerkraft verhältnismässig rasch. Mit abnehmendem Druck wird der Ausbreitungsvorgang immer langsamer. In der letzten Phase verschiebt sich die Front der Ölausbreitung unter dem zunehmenden Einfluss der Grenz-

flächenkräfte nur noch kriechend und nähert sich praktisch einem Endstadium.

Das Verhältnis zwischen der sich im Bereich der Grundwasseroberfläche ausbreitenden Ölmenge und der von ihr eingenommenen Fläche bezeichnen wir als Ölschichtdicke. Die Einführung dieses Begriffes hat sich für den Vergleich von Ölfällen als zweckmässig erwiesen. Er stellt einen rein statistischen Wert dar, als wäre eine gleichmässige Ölverteilung vorhanden. Ein Vergleich der Ölschichtdicken ohne Angabe der Ausbreitungsdauer ist daher nur mit Vorbehalten zulässig. Streng genommen können die Ölschichtdicken nur verglichen werden, wenn ihre Endwerte erreicht sind. Vergleicht man solche Fälle, bei denen die Ausbreitung offensichtlich zum Stillstand gekommen war, so errechnet man Endschichtdicken, deren Werte nie unter 3 bis 5 mm (bzw.  $l/m^2$ ) lagen. Bei der Mehrzahl der Fälle „mittleren“ Alters lag der Wert der Schichtdicken in der Grössenordnung von wenigen zehn Millimetern, während bei „jüngeren“ Fällen z.T. Werte von 50 bis 100 mm errechnet wurden.

Die Zahl der erfassten Fälle und insbesondere ihr Untersuchungsstand ist leider nicht ausreichend, um allgemeingültige Gesetzmässigkeiten hinsichtlich der Ausbreitung abzuleiten. Doch zeichnen sich bereits folgende Erkenntnisse ab.

- Die Ausbreitung erfolgt um so langsamer und um so weniger weit, je geringer die Durchlässigkeit im Kapillarsaum, d.h. je höher der Kapillarsaum ist. Die Ölschichtdicke hängt also von der Kapillarität ab.
- Entscheidend für die Ölausbreitung ist auf keinen Fall die Durchlässigkeit der wasserführenden Schicht in ihrer Gesamtheit, sondern lediglich die Durchlässigkeit im Bereich des Kapillarsaumes bzw. der Grundwasseroberfläche.
- Je höher die Versickerungsrate, desto grösser ist die Ölschichtdicke. Das hängt offenbar damit zusammen, dass bei hohen Versickerungsraten das Öl in grösserem Umfang in den gesättigten Porenraum eindringt, und im „Kern“ der Öllinse in höherer Konzentration festgehalten wird.
- Selbst unter dem Einfluss natürlicher Grundwasserschwankungen und des Grundwassergefälles kann im Kern die z.T. erheblich über der Residualsättigung liegende Konzentration erhalten bleiben. Es sind inzwischen einige Ölfälle bekannt geworden, wo nach über 2 Jahrzehnten im Bereich des Kerns reines Öl abgeschöpft werden konnte.
- Die bisher untersuchten Fälle lassen keinerlei Tendenz der „Öllinsen“ zum Driften erkennen. Vielmehr bleibt das Öl, wenn es einmal seine Endschichtdicke erreicht hat, beharrlich an Ort und Stelle liegen. Ein Driften des Öls darf also höchstens in extrem durchlässigen porösen oder weit klüftigen Medien erwartet werden. Die Beobachtung bestätigt somit die eingangs erwähnte Residualsättigungstheorie.

Die Beobachtungen über das Verhalten der aus dem Öl herausgelösten Kohlenwasserstoffe lassen die Existenz einer sich an die eigentliche Ölzone anschliessenden Lösungszone erkennen. Diese ist um so ausgeprägter entwickelt, in je grösserem Umfang Ölbestandteile sich im Wasser lösen. Bei Benzin-Kontaminationen ist die Lösungszone daher in der Regel wesentlich grösser und ausgeprägter.

Zahlenmässige Angaben über die Menge der im Untergrund aus dem Öl in die wässrige Phase diffundierenden Kohlenwasserstoffe und über das Adsorptionsvermögen der festen Phase für diese Stoffe sind mangels ausreichender Beobachtungen noch nicht möglich. In den meisten Fällen, so auch in den besonders interessierenden Gebieten, in denen sich Ölfälle häufen, breiteten sich die gelösten Stoffe nicht in dem auf Grund der hydrologischen Gegebenheiten zu erwar-

tenden Umfange aus. Der Anteil der in Lösung gehenden Stoffe muss also entweder verhältnismässig gering oder das Adsorptionsvermögen der festen Phase entsprechend hoch sein, oder es findet eine Oxydation bzw. infolge der starken Verdünnung ein relativ rascher biologischer Abbau statt.

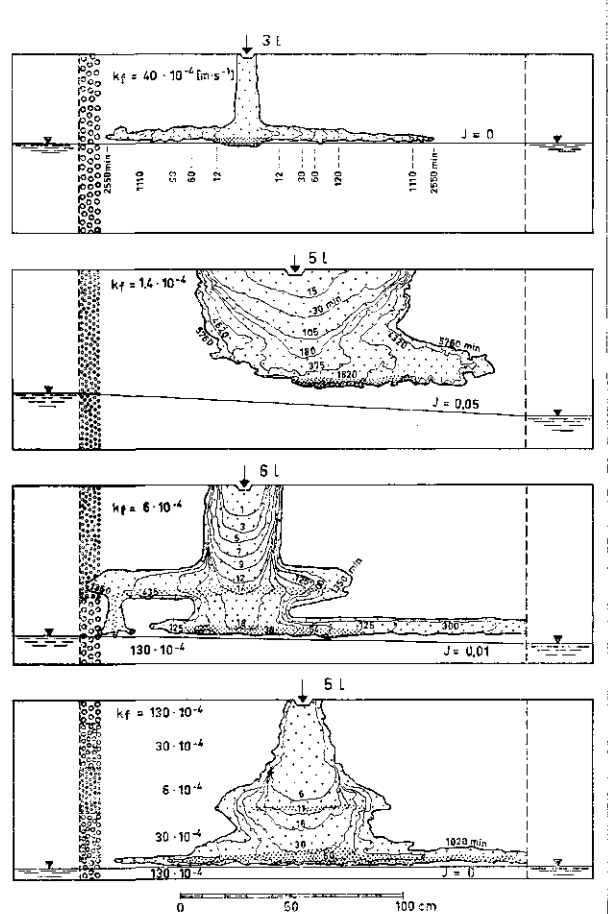
Die Adsorption von gelösten Kohlenwasserstoffen an der festen Phase scheint nach den bisherigen Laborerfahrungen nur von untergeordneter Bedeutung zu sein. Das oft auffällig rasche Verschwinden von Geruchs- und Geschmacksstoffen muss in erster Linie auf chemisch-biologische Oxydationsvorgänge zurückgeführt werden. Ein gut durchlüfteter Untergrund und sauerstoffhaltiges Grundwasser sind also eine wesentliche Voraussetzung für die natürliche Selbstreinigung des Grundwassers.

Im übrigen ist die hydrodynamische Dispersion infolge der Heterogenität der porösen Medien der entscheidende Faktor für die Verdünnung der gelösten Kohlenwasserstoffe.

Das verschiedentlich beobachtete rasche Verschwinden von Vergaserkraftstoffen kann nur durch unterirdische Verdunstung erklärt werden. Die Verdunstung wiederum begünstigt offenbar den chemisch-biologischen Abbau. Mit Hilfe von Bodenluftuntersuchungen lässt sich die Ausbreitung von leichtflüchtigen Kraftstoffen im Untergrund relativ leicht feststellen.

Die meisten Mineralöle sind auch im Untergrund bei Anwesenheit der wässrigen Phase und von Sauerstoff biologisch angreifbar. Das nicht selten beobachtete relativ rasche Verschwinden geringer Ölkonzentrationen im Untergrund kann gar nicht anders gedeutet werden. Doch geht der Abbau bei stärkeren Ölkonzentrationen offenbar äusserst langsam vonstatten. Einige Schadensfälle, die sich in Deutschland wäh-

Abb. 3 - Modellversuche: Versickerung und Ausbreitung von Heizöl EL im porösen Medium.



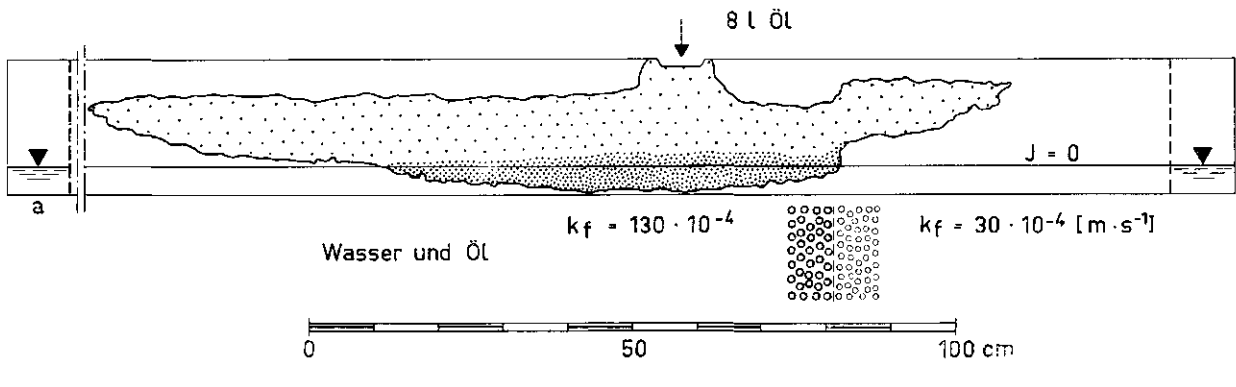


Abb. 4 - Modellversuch: Asymmetrische Ausbreitung von Heizöl EL im Kapillarsaum.

rend des letzten Krieges ereigneten, beweisen jedenfalls, dass der Zeitraum von über 2 Jahrzehnten nicht immer ausreicht, um hohe Mineralölkonzentrationen auf biologischem Wege völlig zu emulgieren oder gar abzubauen. Ölkontaminierte Flächen können also unter Umständen für Jahrzehnte als Grundwasserfassungsgebiete unbrauchbar bleiben.

Unter bestimmten Voraussetzungen wird durch den biologischen Abbau der ölkontaminierte Bereich in ein reduzierendes Milieu verwandelt, wodurch sich der Charakter des Sickerwassers und des durchfließenden Grundwassers verändert. Der vorhandene freie Sauerstoff wird aufgezehrt; die sich bildende Kohlensäure vermag nunmehr — soweit vorhanden — Eisen und Mangan zu lösen. Nitrate werden reduziert, es bildet sich Ammonium. Selbst die Sulfate können der Reduktion anheimfallen.

Dieser biologisch-chemische Vorgang ist grundsätzlich der gleiche wie z.B. bei der Uferfiltration von stark mit organischen Stoffen beladenen Oberflächenwässern oder beim dauernden Einstau von humusreichen Böden durch Anheben der Grundwasseroberfläche. Die Bildung von sogenanntem „reduziertem Grundwasser“ dürfte sich jedoch im wesentlichen auf die Ölzone beschränken; sie ist also in der Regel eine lokale Erscheinung. Auf Wassergewinnungsanlagen wird sie nur dann einen nachteiligen Einfluss ausüben, wenn es sich im Vergleich zu den Einzugsgebieten um großflächige Ölkontaminationen handelt. In einem Fall hat allerdings der durch Reduktion sich gebildete Eisen- und Mangangehalt des Grundwassers die Kühlwasseranlage eines Kraftwerkes fast zum Erliegen gebracht.

#### 4. Modellversuche mit porösen Medien

Anhand von Modellversuchen in Trögen mit verglasten Seitenwänden lässt sich die Migration des Öles in der Sickerzone und im Kapillarsaum leicht demonstrieren. Hier einige Beispiele \*).

Die oberen beiden Figuren der Abb. 3 zeigen die Ausbreitung in 2 homogenen Medien, deren Durchlässigkeiten sich um etwa das 30-fache unterscheiden. Sie erkennen die schmale Durchleitzone im Sickerbereich und den dünnen Ölkapillarsaum „im gut durchlässigen Medium, sowie eine breite Sickerzone und einen dickeren Kapillarsaum im weniger gut durchlässigen Medium.

Die unteren beiden Figuren zeigen den Einfluss der Schichtung auf die Ölausbreitung. Wie zu erwarten, beeinflusst die Struktur des Mediums die Ölausbreitung wesentlich.

In Abb. 4 sind besonders deutlich „Ölkern“ und „Ölsaum“ (oder „Ölzunge“) sowie das Ansteigen der Ölzunge und die

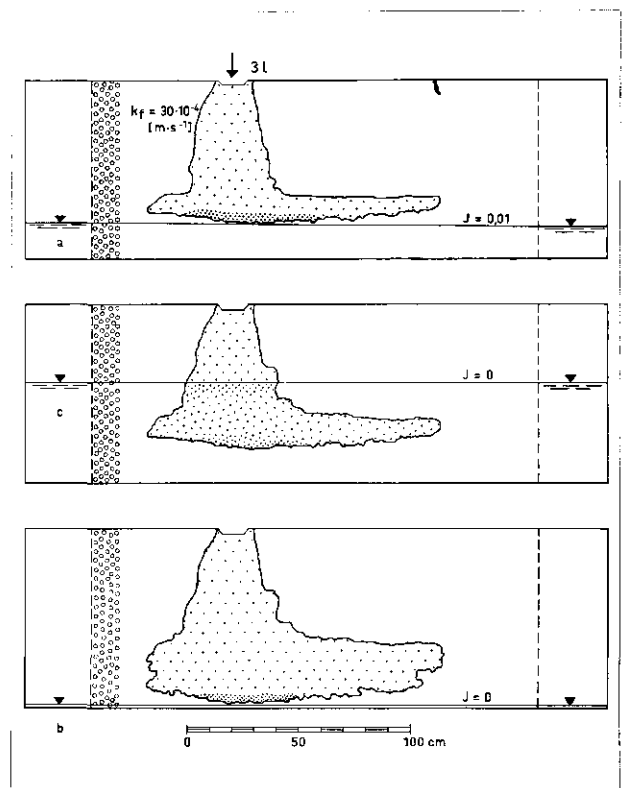
Verzögerung der Ausbreitung beim Uebergang des Öls von einem höher durchlässigen in ein geringer durchlässiges Medium erkennbar.

Den Einfluss der Grundwasserspiegelschwankung gibt Abb. 5 wieder. Durch Anheben des Grundwassers lässt sich das Öl nur in geringem Umfange verdrängen. Das Öl folgt jedoch sofort dem fallenden Grundwasserspiegel. Es ist also wichtig zu wissen, bei welchem Grundwasserstand eine Ölkontamination erfolgte und wie gross der Schwankungsbereich der Grundwasseroberfläche ist.

#### 5. Mineralöl im klüftigen Gestein

Bei Mineralölkontaminationen in klüftigen Gesteinen muss ein vollkommen anderer Massstab angelegt werden als bei porösen Lockergesteinen. Das klüftige Gebirge ist grundsätzlich potentiell stärker gefährdet gegenüber Mineralölkontaminationen als die porösen Lockermassen. Verwitterte

Abb. 5 - Modellversuch: Auswirkung der Wasserstandsänderung auf die Ölverteilung.



\*) Lippok, W.: Modellversuche über das Verhalten von Heizöl EL im porösen Medium — Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen Jg. 10 (1966), H. 5, S. 145 bis 157.

Festgesteine, wie z.B. zersetzte Grauwacken und Tonschiefer, Granitgrus, zermürbte Sandsteine, sind selbstverständlich als poröse Medien zu betrachten. In Mitteleuropa sind in den von den Siedlungen in Anspruch genommenen Bereichen die festen Gesteine vielfach mit einer mehr oder weniger mächtigen Hülle von Verwitterungsmaterial überdeckt. Die gefährdetsten Gebiete sind zweifellos die Karstgebiete mit nur geringer Verwitterungshülle.

Die bis jetzt aus Westdeutschland vorliegenden Angaben über das Verhalten von Mineralöl im klüftigen Medium sind bei weitem nicht ausreichend, um aus ihnen allgemein gültige Schlüsse zu ziehen. Die wenigen eindeutigen Fälle von weitreichender Kluftwasserkontamination, vor allem aus den Kreidegebieten Englands, mahnen zu besonderer Vorsicht, insbesondere im Hinblick auf die erhöhten Schwierigkeiten, die die Wassererschliessung und die Sanierungsmassnahmen in Festgesteinen bereiten.

### 6. Massnahmen zum Schutze des Grundwassers

Die Massnahmen zum Schutze des Grundwassers gegen die Kontamination durch Mineralöl gliedert man zweckmässigerweise in 2 Hauptgruppen: präventive (vorbeugende) und reparative (wiedergutmachende) Massnahmen. Die präventiven sind in erster Linie technischer Art. Zweifellos lassen sich durch technische Massnahmen, wie z.B. durch den Einbau von Dichtungslagen und Dichtungsschürzen oder durch die Imprägnierung des Untergrundes mit olephoben Stoffen und durch betriebstechnische Massnahmen beliebig hohe Sicherheitsgrade erreichen. Es wäre jedoch nicht sinnvoll, grundsätzlich und überall denselben Sicherheitsgrad nur auf technischem Wege erzielen zu wollen. Man wird vielmehr die Massnahmen den örtlichen geologischen und hydrologischen Verhältnissen anpassen müssen. Die Schwierigkeit liegt nun freilich weniger darin, etwa gegen Ölkontaminationen anfällige Gebiete von weniger oder nicht anfälligen Gebieten abzugrenzen. Die Hauptschwierigkeit bereitet es, den Schutz bestehender Wassergewinnungsanlagen bzw. künftiger Fassungsgebiete optimal zu gestalten. Voraussetzung für die richtige Beurteilung des Untergrundes und die zweckmässigste Wahl der Schutzmassnahmen sind — ausser der genauen hydrogeologischen Bestandsaufnahme — zuverlässige Angaben, die das Verhalten von Mineralöl im Untergrund zahlenmässig zu erfassen gestatten. Solche „Richtzahlen“ müssen selbstverständlich stets auf der „sicheren Seite“ liegen. Folgende Fragen sind von grundsätzlicher Bedeutung.

a. Welche Ölmengen werden im Sickerbereich als Residualöl immobil festgehalten? Die Grössenordnung ist bekannt; es werden genauere Werte benötigt.

b. Wie weit breitet sich Mineralöl, das den ungesättigten Porenraum durchsickert hat, auf der Grundwasseroberfläche aus? Auch hierüber liegen bereits gute Anhaltspunkte vor.

Zu beiden Punkten werden in absehbarer Zeit durch die an verschiedenen Orten laufenden Untersuchungen weitere Ergebnisse erwartet.

c. In welchem Umfang werden aus dem im Sickerbereich und auf der Grundwasseroberfläche festgehaltenen Öl durch das Sickerwasser bzw. das durchfliessende Grundwasser hygienisch unerwünschte Stoffe herausgelöst? — Dabei ist es gleichgültig, ob es sich um primär im Öl vorhandene Bestandteile oder um biologisch erzeugte Folgeprodukte handelt.

d. In welchem Umfang werden die aus dem Mineralöl herausgelösten oder verdunsteten Stoffe oxydiert bzw. biologisch abgebaut?

Untersuchungen zu c) und d) sind im Anlaufen. Es wird vermutlich längere Zeit dauern, bis für die Praxis brauchbare „Richtzahlen“ gegeben werden können.

Entscheidend für die präventiven Massnahmen sind aller-

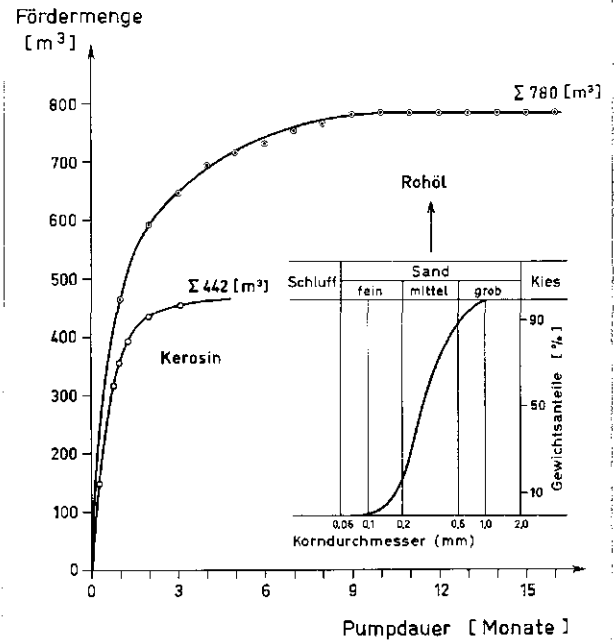


Abb. 6 - Beziehung zwischen zurückgewonnener Oelmenge und Pumpdauer.

dings nicht allein hygienische Gesichtspunkte, also Fragen der Grundwasserqualität. Vielfach spielen bautechnische Belange, wie z.B. die mögliche Gefährdung der Kanalisation und der Kläranlagen oder der Schutz von Kabelleitungen, isolierten Rohren und Bauwerken eine weit grössere Rolle. Hier hat der städtische Tiefbauer ein wichtiges Wort mitzureden.

Die reparativen Schutzmassnahmen befassen sich mit der Sanierung (Dekontaminierung) des Untergrundes. In der Ölnfallpraxis hat sich in Westdeutschland eine Unterscheidung in Sofort- und in Folgemaassnahmen als zweckmässig erwiesen. Die Sofortmassnahmen können nicht rasch genug erfolgen. Jede Massnahme ist gerechtfertigt, um die Versickerung von Öl überhaupt zu unterbinden. Die eigentlichen hydrologischen Fragen werden durch die Folgemaassnahmen ausgeworfen. Muss z.B. das ölhaltige Erdreich ausgeräumt werden? Ist der Bau von Brunnen zur Verhinderung der Ausbreitung und zur Rückgewinnung des Öles erforderlich? Muss eine nahegelegene Trinkwassergewinnungsanlage vorübergehend ausser Betrieb genommen werden? Solche Fragen setzen die genaue Kenntnis der örtlichen geologischen und hydrologischen Verhältnisse und Erfahrungswerte zu den obigen Fragen voraus.

Öl, das sich auf dem Grundwasser ausgebreitet hat, kann man bis zu einem gewissen Umfang mittels Brunnen oder Gräben zurückgewinnen. Je früher mit dem Pumpbetrieb begonnen werden kann, je kleiner also noch die ölbedeckte Grundwasseroberfläche ist, desto günstiger verlaufen die Sanierungsmassnahmen. Die durch den Brunnen erzeugte Absenkung ist nämlich nur wirksam, solange das Öl einen zusammenhängenden Körper bildet und der Ölgehalt über der Residualsättigung liegt. „Abschöpfbrunnen“ sind daher auf keinen Fall (in Grundwasserflussrichtung gesehen) unterhalb der Ölzone, sondern im Bereich des Ölkernes anzusetzen. Beim Pumpbetrieb muss zunächst angestrebt werden, bei möglichst geringer Absenkung des Brunnenspiegels möglichst viel Öl abzuschöpfen. Die zur Rückgewinnung erforderliche Pumpzeit lässt sich zahlenmässig bis jetzt noch nicht angeben. Wie die Erfahrung lehrt (Abb. 6), muss der Pump-

betrieb oft bis zu mehreren Monaten ausgedehnt werden, bis kein abschöpfbares Öl mehr im Brunnen erscheint.

Wie bereits erwähnt, lässt sich durch Erzeugen einer Senke das Öl aus dem Untergrund nicht vollständig zurückgewinnen; eine der Residualsättigung entsprechende Ölmenge wird immer zurückbleiben. Die Gefahr der Kontamination des Grundwassers durch gelöste Stoffe ist somit nicht restlos gebannt.

Durch Infiltrieren von Emulgatoren lässt sich theoretisch der Gehalt an Residualöl reduzieren. Von den im Handel angebotenen Emulgatoren sind jedoch nur wenige geeignet. Emulgatoren müssen nämlich wasserlöslich, ungiftig und möglichst geruchs- und geschmacksfrei sein, wenn man „den Teufel nicht durch Beelzebub austreiben“ will. Die entstehenden Emulsionen müssen sich nach Abpumpen rasch brechen lassen. Weitere Untersuchungen über die zweckmässigste Art von „Sekundärverfahren“ sind daher dringend erwünscht.

### 7. Künftige Aufgaben für die Forschung

Es ist eine selbstverständliche Forderung, dass Grundwasser, das als Trinkwasser Verwendung finden soll, natürlicherweise frei von Geruchs- und Geschmacksstoffen ist. Die Geruchs- und Geschmacksschwellenkonzentrationen für die meisten im Mineralöl enthaltenen Stoffe liegen glücklicherweise ausserordentlich niedrig. Nach der derzeitigen Praktik der Hygieniker ist daher Grundwasser, das diese Konzentrationen nicht erreicht, als Trinkwasser nicht zu beanstanden. Ob man zusätzlich für organoleptisch nicht wahrnehmbare Kohlenwasserstoffe, (gleich welcher Herkunft sie sein mögen), die möglicherweise im Grundwasser enthalten sind, eine maximal zulässige Konzentration festlegen soll, müssen künftige Untersuchungen ergeben.

Will man sich ein Bild über das Ausmass einer möglichen Grundwassergefährdung durch in den Untergrund eingedrungenes Mineralöl machen, so muss man die Menge der aus dem Mineralöl auswaschbaren sowie durch biologische Vorgänge freiwerdenden löslichen Stoffe mit den entsprechenden Schwellenkonzentrationen unter Berücksichtigung der im Untergrund sich abspielenden Dispersions- bzw. Diffusionsvorgänge in Beziehung bringen. Dies ist aber erst dann möglich, wenn die benötigten Richtzahlen genannt werden können. Hier liegt also eine vordringliche Aufgabe für die analytische Chemie vor, die in enger Fühlungnahme mit der Hydrologie gelöst werden muss, denn nur hydrologisch sinnvolle Versuchsanordnungen versprechen für die Praxis brauchbare Ergebnisse. Der chemische Fragenkomplex wird bewusst in den Vordergrund geschoben, weil auf diesem Wege in absehbarer Zeit Zahlen erwartet werden dürfen, die wenigstens eine überschlägige rechnerische Behandlung des Ölproblems erlauben. Selbstverständlich ist z.B. der mikrobiologische Fragenkomplex des Ölabbau keineswegs von untergeordneter Bedeutung. Da jedoch die biologischen Vorgänge im Untergrund in der Regel relativ langsam ablaufen, dürfen diese (nach den jetzigen Kenntnissen) bei der Festlegung von Schutzmassnahmen nur bei sehr langfristigen Planungen in Rechnung gesetzt werden.

Das Schwergewicht der künftigen Untersuchungen muss auf eine umfassende Bearbeitung von geeigneten Ölunfällen gelegt werden. Die Vielfalt der geologischen und hydrologischen Verhältnisse in der Natur und der Einfluss der Ölmengen und der Zeit lässt sich durch Modellversuche im Laboratorium nicht erfassen. Dies gilt insbesondere für

Untersuchungen im klüftigen Medium, das sich in räumlich beschränkten Modellen nicht naturgetreu darstellen lässt.

Eine relativ kleine Zahl von „Wasserspezialisten“ kann das Problem Öl und Grundwasser in absehbarer Zeit nicht allein und deren praktische Erfahrung der Wissenschaft zugute kommen muss.

lösen. Es bedarf der Zusammenarbeit der verschiedensten beteiligten Disziplinen über die Landesgrenzen hinweg.

Wir brauchen daher die Mitarbeit der Wasserwirtschaftler, zu deren Arbeitsgebiet der Schutz des Grundwassers gehört,

### Diskussionsfragen

#### Ir. K. W. H. Leeftang an Dr. Schwille:

Sie haben mit Recht behauptet, dass auch die gelösten Kohlenwasserstoffe eine grosse Gefahr der Grundwasserverunreinigung darstellen. Eine solche Verunreinigung wird im Pumpwerk praktisch nicht zu beseitigen sein. Welche Massnahmen sind bei Ölunfällen — auch in Holland sind einige vorgekommen — zu treffen? Welche Erfahrungen hat man in Deutschland gemacht? Kann man durch Pumpen im Ölkern die Ausbreitung gelöster Kohlenwasserstoffe vollständig verhindern?

#### Antwort:

Die Beseitigung gelöster Kohlenwasserstoffe aus Grundwasser, das als Trinkwasser Verwendung finden soll, erfordert einen erheblichen technischen Aufwand. In Kreisen der deutschen Wasserfachleute vertritt man daher die Auffassung, dass solche kostspieligen Massnahmen keine tragbare Alternativlösung zu den bisher üblichen präventiven und reparativen Massnahmen zum Schutze des Grundwassers gegen Mineralölverunreinigungen darstellen. Bei kleineren Wasserwerken, die über keine Fachkräfte verfügen, wäre eine zuverlässige Ueberwachung der Aufbereitungsanlagen nicht gewährleistet.

Durch im Bereich des Ölkerns angesetzte Brunnen lässt sich selbstverständlich auch die Ausbreitung gelöster Kohlenwasserstoffe verhindern. Da es jedoch nicht möglich ist, ohne Anwendung von Emulgatoren das Öl auf diese Weise vollständig aus dem Untergrund zu entfernen, bildet das irreduzibel festgehaltene Öl stets eine gewisse Gefahr für das Grundwasser, die man noch nicht richtig abzuschätzen vermag. Aus diesem Grunde neigt man in Deutschland bei Sanierungsmassnahmen weiterhin zu „radikalen“ Lösungen, nämlich dem Ausräumen des ölverunreinigten Bodens. Welcher Gutachter wäre schon bereit, beim jetzigen Stand der Forschung die volle Verantwortung dafür zu übernehmen, dass durch das irreduzible Öl keine weitere Verunreinigung des Grundwassers geschieht.

#### Herr G. P. Liedmeier an Dr. Schwille:

Besteht die Gefahr, dass beim Ausräumen des ölhaltigen Bodens der Kapillarsaum zerstört und dadurch die Ausbreitung des Öls gefördert wird?

#### Antwort:

Diese Gefahr besteht meines Erachtens nicht. Es ist vielmehr zu erwarten, dass sich auf dem freigelegten Grundwasserspiegel ein Teil des Öls sammelt und dort abgeschöpft werden kann.