

**Zeitschrift:** Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria  
**Herausgeber:** Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband  
**Band:** 69 (1977)  
**Heft:** 10

**Artikel:** Modellvorstellung und Konzepte zur Abschätzung von Verunreinigungen von Grundwasserträgern durch Erdölderivate  
**Autor:** Schiegg, Hans Olivier  
**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-941504>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 22.07.2025

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Modellvorstellung und Konzepte zur Abschätzung von Verunreinigungen von Grundwasserträgern durch Erdölderivate

Hans Olivier Schiegg

DK 551.493

## Einleitung

In der Schweiz sind Talebenen vielfach dadurch entstanden, dass glazial geformte Tröge mit alluvialem Schotter aufgefüllt wurden. Diese geologische Formation ist oft ein wirtschaftlich interessanter Grundwasserträger. Solche Grundwasservorkommen sind im allgemeinen ungespannt und gegen oben meist schlecht geschützt. Deshalb sind sie stark gefährdet durch Erdölderivate, die durch Unachtsamkeit oder Unfall auslaufen und in den Untergrund versickern. Die Orte von Lagerung und Transport von Erdölderivaten sind durch Siedlungsagglomerationen und Infrastruktur gegeben. Diese befinden sich vorzugsweise in den Talebenen und damit oft gerade über wichtigen Grundwasserträgern.

Nach Art. 8 der bundesrätlichen Verordnung vom 19. Juni 1972 zum Schutze der Gewässer gegen Verunreinigung

*Introduction: Modèle et concepts d'une méthode pour estimer la propagation des hydrocarbures dans un sol contenant de l'eau et de l'air*

*En Suisse les fonds des vallées sont souvent des auges formées à l'époque glaciaire remplies de gravier alluvial. Cette formation géologique peut être un aquifer intéressant au point de vue économique. Ces aquifers ont en général une nappe phréatique et sont ainsi mal protégés vers le haut. Pour cette raison ils sont particulièrement exposés à la pollution par des hydrocarbures déversés par inadvertance ou par accident et qui s'infiltrent dans le sous-sol. Les lieux de stockage comme de transport des produits pétroliers sont donnés par la situation des agglomérations et de l'infrastructure qui se trouvent de préférence au fonds des vallées et situées ainsi au dessus des aquifers importants.*

*Selon l'art. 8 de l'ordonnance du Conseil Fédéral datée du 19. 6. 1972 concernant la protection des eaux contre la*

durch wassergefährdende Flüssigkeiten sind die Kantone verpflichtet, ihr Gebiet in Gewässerschutzbereiche einzuteilen. Aus dieser Pflicht, aber auch aus der Erkenntnis der Notwendigkeit von Prophylaxe bzw. Sanierung bezüglich Grundwasserträger-Verunreinigungen durch Erdölderivate ergibt sich ein Interesse an Ablauf und Endform von Ausbreitungsvorgängen von Erdölderivaten.

Die vorliegende Arbeit zeigt die Modellvorstellung sowie die grundlegenden Konzepte der in Mitteilung Nr. 22 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie [1] veröffentlichten Methode zur Abschätzung der Ausbreitung nicht wasserlöslicher Anteile eines Erdölderivates in einem mineralogischen, d. h. nicht organischen, homogenen und isotropen Boden, der mit Wasser und Luft erfüllt ist.

*pollution par des liquides dangereux les cantons sont obligés de délimiter des zones de protection des eaux. Par cette obligation, mais aussi parce qu'on a reconnu la nécessité de prendre des mesures préventives ou d'assainissement concernant la pollution des aquifers l'intérêt s'est porté sur le développement et la forme finale d'une propagation d'hydrocarbure.*

*Le présent travail montre le modèle et les concepts de base d'une méthode pour estimer la propagation des hydrocarbures en phase non soluble dans un sol minéralogique, c'est-à-dire non organique, homogène et isotrope contenant de l'eau et de l'air. Cette méthode est décrite dans la publication no. 22 des Laboratoires de Recherches Hydrauliques, Hydrologiques et Glaciologiques annexés à l'EPF Zurich, [1].*

## Modellvorstellung

Für einen Ausbreitungsvorgang eines Erdölderivates in mit Wasser und Luft erfülltem Boden ergab sich aus experimenteller Erfahrung in Labor und Natur sowie mit der ersten, zweiten und vierten der anschliessend beschriebenen Vereinfachungen die in Bild 1 wiedergegebene Modellvorstellung. Dabei wurde punktförmige Eingabe angenommen. Die letzte Figur von Bild 1 zeigt die endgültige Form der Oelausbreitung. Diese ist abgesehen vom Eingabebereich praktisch unabhängig davon, ob die Eingabe punktförmig oder flächenhaft geschah.

## Vereinfachungen, Grundlagen

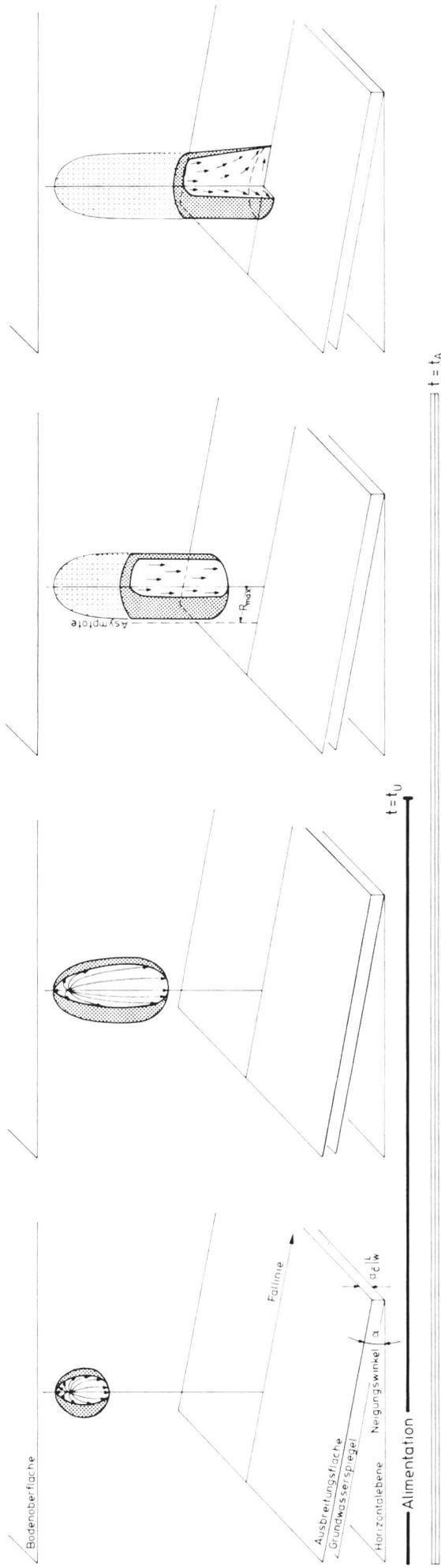
Nicht wasserlösliche Anteile eines Erdölderivates werden im folgenden kurz als Oel bezeichnet. Eine einfache, in der Praxis anwendbare Methode zur Abschätzung von Ausbreitungsvorgängen von Oel in mit Wasser und Luft erfüllten Böden bedingt die Annahme gewisser Vereinfachungen. Die vorgeschlagene Abschätzungsmethode, die auf der in Bild 1 wiedergegebenen Modellvorstellung beruht, setzt die folgenden Vereinfachungen voraus: erstens Unbegrenztheit sowie Homogenität und Isotropie des Bodens, zweitens

sprunghafte Sättigungsübergänge, drittens, dass Oel kein Wasser verdrängen kann und viertens einfache Geometrie und Konstanz bei der Oeleingabe.

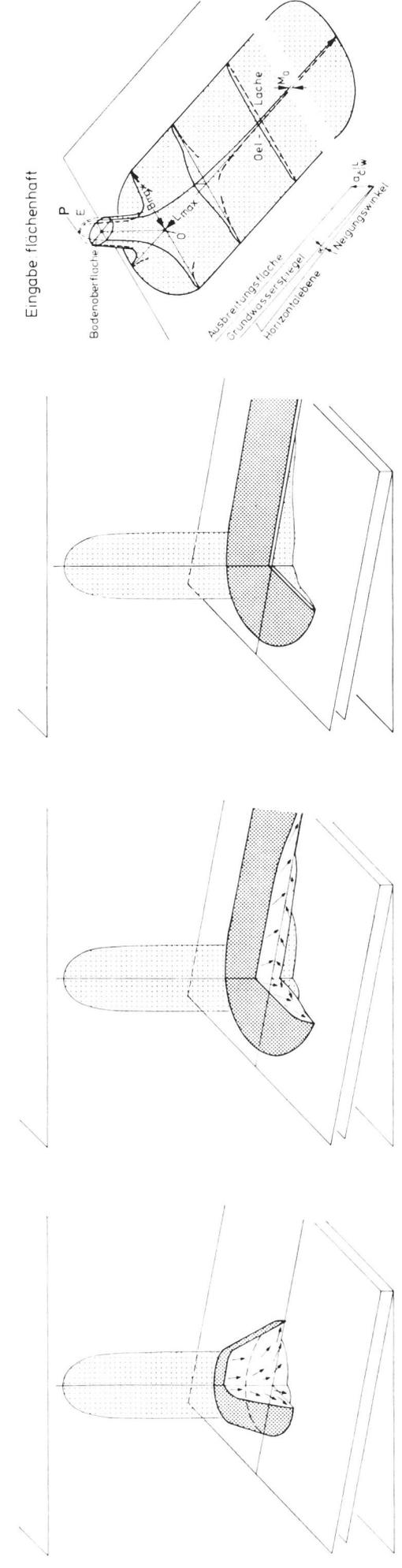
Unbegrenztheit des Bodens bedeutet, dass ein Ausbreitungsvorgang nicht durch eine Begrenzung desselben beeinflusst werden kann. In Kenntnis der in unseren Böden oft vorhandenen Inhomogenität und Anisotropie kann man sich fragen, wie zweckmässig ein Simulationsverfahren zur Lösung praktischer Probleme sein kann, wenn dieses Homogenität und Isotropie voraussetzt. Wohl kann ein solches Simulationsverfahren die sich stellenden Probleme oft nicht vollumfänglich lösen. Es kann aber einen Teil der offenen Fragen beantworten helfen und die jeweils individuell durchzuführende Abschätzung des Einflusses von Inhomogenität und Anisotropie erleichtern.

Sprunghafte Sättigungsübergänge implizieren kolbenförmige Verdrängung sowie ausschliesslich maximal oder minimal mögliche Sättigung als auch gemittelte Berücksichtigung der Kapillarität. Dies bedeutet eine Vereinfachung, da bei nicht gleichen Poren der Sättigungsübergang zwischen zwei nicht mischbaren Fluiden allmählich ist. Der Begriff der Sättigung setzt makroskopische Betrachtungsweise voraus.

Eingabe punktförmig



1. Ausbreitungsphase:  $t < t_A$



2. Ausbreitungsphase:  $t > t_A$



Bild 1. Modellvorstellung

residual

funktular

- $a_c|_b^{nb}$  = Kapillar-Steig-Höhe  
 $a_c|_b^{nb}(S_b)$  = ACSB = Kapillar-Steig-Höhen-Kurve  
 $\overline{ACSB}$  = Kapillar-Steig-Höhen-Kurve bei Annahme sprunghaften Sättigungsüberganges bzw. gemittelter Berücksichtigung der Kapillarität  
 $S_b$  = Sättigung des benetzenden Fluids  
 $a_{\bar{c}}$  = repräsentative Kapillar-Steig-Höhe  
 $b$  = benetzend  
 $nb$  = nicht benetzend  
 $RS$  = Residualsättigung  
 $\underline{\hspace{1cm}}$  = Signatur für Spiegel als geometrischer Ort, wo  $p_c = 0$

$p_c|_b^{nb} = p_{nb} - p_b = \text{Kapillar-Druck}$

Falls  $b = \text{Wasser}$ ,  $nb = \text{Luft}$  und damit ACSB = ACWL gilt:

$a_{\bar{c}}[1-RS_{nb}] = a_c|_{W^L}[1-RSL] = \text{erste Näherung für Abstand der Ausbreitungsfläche für Oel vom Wasser-Luft-Spiegel (vergleiche Bild 3).}$

$a_{\bar{c}} = a_{\bar{c}}|_{W^L} = \text{Abstand der Ausbreitungsfläche für Oel vom Wasser-Luft-Spiegel bei gemittelter Berücksichtigung der Kapillarität.}$

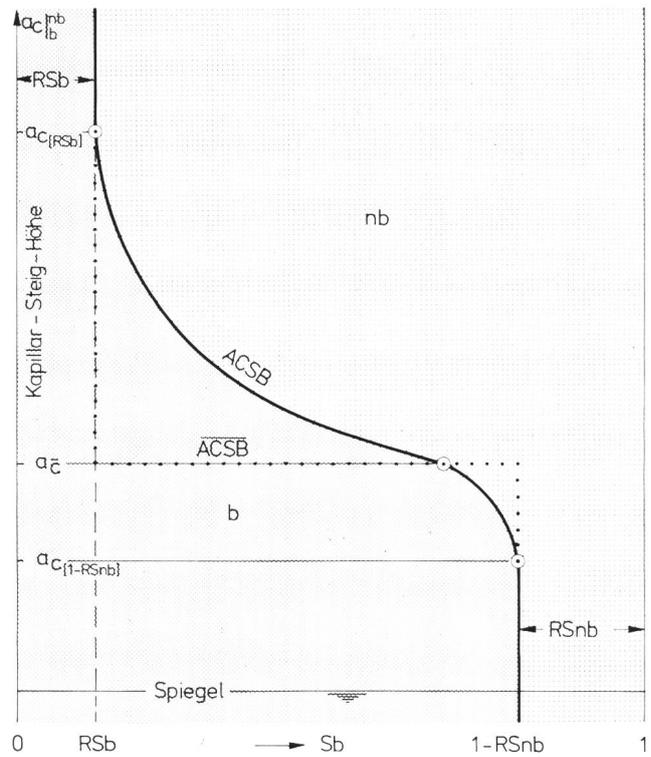


Bild 2. Prinzipische Skizze einer Kapillar-Steig-Höhen-Kurve, ACSB.

Ein Fluid kann ein Gas oder eine Flüssigkeit sein. Makroskopische Betrachtungsweise bedeutet die Voraussetzung eines Kontinuums. Der Uebergang zu einem Kontinuum ergibt sich durch ein gedanklich gleichmässiges Verschmieren der lediglich bei mikroskopischer Betrachtungsweise zu erkennenden Diskontinuitäten. Unter der Sättigung  $S$  wird das Mass der volumetrischen Inanspruchnahme des Porenraumes durch ein Fluid verstanden.  $S$  ist eine dimensionslose Grösse.

$K$  bedeutet die flüssigkeitsunabhängige und damit ausschliesslich bodenspezifische Durchlässigkeit.  $K$  hat die Dimension einer Länge im Quadrat und kann durch Multiplikation der hydraulischen Durchlässigkeit,  $k$ , deren Dimension jene einer Geschwindigkeit ist, mit  $\mu_W/(\rho_W g)$  erhalten werden.  $\mu_W$  ist die Zähigkeit,  $\rho_W$  die Dichte von Wasser.  $g$  ist die Erdbeschleunigung. Im CGS-System kann  $\mu_W/(\rho_W g)$  in erster Näherung gleich  $10^{-5} \text{ cm s}$  gesetzt werden.  $k_r$  beschreibt die relative Durchlässigkeit.  $k_r$  ist ein von den Sättigungen abhängiger, dimensionsloser Multiplikand der Durchlässigkeit.

Ein Sättigungszustand wird dann als funikular bezeichnet, wenn die einzelnen Fluidanteile miteinander verbunden sind, also eine Potentialdifferenz zwischen diesen zu einem Fluss führt und folglich die relative Durchlässigkeit grösser als null ist. Als residual wird ein Sättigungszustand dann bezeichnet, wenn die einzelnen Fluidanteile miteinander nicht verbunden sind, also eine Potentialdifferenz zwischen diesen zu keinem Fluss führen kann und demzufolge die relative Durchlässigkeit gleich null ist. Die residuale Sättigung eines benetzenden Fluids wird im speziellen pendular, jene eines nicht benetzenden Fluids als insular bezeichnet.

Ein benetzendes Fluid ist dadurch definiert, dass dessen Rand- oder Benetzungswinkel spitz ist. Der Rand- oder Benetzungswinkel ist der Winkel der Grenzfläche zwischen zwei nicht mischbaren Fluiden gegenüber einem Feststoff. Da ein Oel in einem mineralogischen, d. h. nicht organischen Boden gegenüber Wasser das nicht benetzende,  $nb$ , gegenüber Luft das benetzende,  $b$ , Fluid ist, muss die Resi-

idualsättigung von Oel,  $RSO$ , bei Verdrängung von Oel durch Wasser als insular,  $RSO^{ins}$ , bei Verdrängung von Oel durch Luft als pendular,  $RSO^{pend}$ , bezeichnet werden. In einem organischen Boden wie Moor, Torf oder Humus ist das Oel theoretisch das stets benetzende Fluid.

Der Sättigungsübergang zwischen zwei nicht mischbaren Fluiden wird durch die Kapillar-Steig-Höhen-Kurve, ACSB, beschrieben. Diese repräsentiert den Funktionsverlauf zwischen der Sättigung des benetzenden Fluids,  $S_b$ , und dem Abstand des Ortes von deren Vorkommen vom Spiegel, der Kapillar-Steig-Höhe  $a_c|_b^{nb}$  (Bild 2). Der Spiegel ist der geometrische Ort entlang dem der Kapillar-Druck null ist. Der Kapillar-Druck,  $p_c|_b^{nb}$ , ist als Druck-Differenz ( $p_{nb} - p_b$ ) definiert, wobei  $p_{nb}$  den Druck im nicht benetzenden,  $p_b$  den Druck im benetzenden Fluid entlang der Grenzfläche bedeuten. Ein Kapillar-Druck impliziert bei mikroskopischer Betrachtungsweise eine gekrümmte Grenzfläche. Diese wird als Meniskus bezeichnet. Ein Meniskus bedeutet, dass das benetzende Fluid in den Bereich des nicht benetzenden Fluids jenseits des Spiegels hineingezogen wird.  $p_c$  hat die Dimension eines Druckes. Die Kapillar-Druck-Höhe,  $h_c$ , ist der Kapillar-Druck in piezometrischer Form.  $h_c$  bestimmt sich als  $p_c/[(\rho_b - \rho_{nb}) g]$ .  $\rho_b$  ist die Dichte des benetzenden,  $\rho_{nb}$  die Dichte des nicht benetzenden Fluids.

Bei Vernachlässigung des Einflusses der Kapillarität fällt die ACSB mit dem Spiegel zusammen. Die vorgeschlagene Vereinfachung sprunghafter Sättigungsübergänge und damit gemittelter Berücksichtigung der Kapillarität bedeutet, dass die ACSB durch eine Sprungfunktion,  $\overline{ACSB}$ , ersetzt wird, siehe Bild 2. Die repräsentative Kapillar-Steig-Höhe  $a_{\bar{c}}|_b^{nb}$  wird durch den Abstand des Wendepunktes der ACSB vom Spiegel definiert.  $a_{\bar{c}}|_b^{nb}$  hat die Dimension einer Länge. Die repräsentative Kapillar-Steig-Höhe zwischen Wasser und Luft,  $a_{\bar{c}}|_{W^L}$ , bestimmt den Abstand der Ausbreitungsfläche vom Wasser-Luft-Spiegel bei Annahme sprunghafter Sättigungsübergänge bzw. gemittelter Berücksichtigung der Kapillarität. Die Ausbreitungsfläche ist die Fläche, in der sich die spiegelparallele Ausbreitung eines

Oeles im Kapillarsaum zwischen Wasser und Luft einstellt, siehe Bild 1.

Die Annahme eines einzigen Mittelwertes für  $a_c$  bzw.  $h_c$  bedeutet die Vernachlässigung von deren Hysterese.  $a_c$  und  $h_c$  werden gleich deren statischen Werten gesetzt, womit  $a_c \equiv h_c$ . Dies bedeutet nur bezüglich  $a_c$  eine Vereinfachung, da die Kapillar-Druck-Höhe im Gegensatz zur Kapillar-Steig-Höhe von der Dynamik unabhängig ist, siehe [2]. Eine dynamische ACSB liegt zwischen der statischen ACSB und dem Spiegel. Sie tendiert nach [2] um so mehr gegen eine Sprungfunktion, je ausgeprägter die Dynamik. So mögen die Annahme kolbenförmiger Verdrängung und gemittelte Berücksichtigung der Kapillarität recht realistisch sein.

Für nur zwei nicht mischbare Fluide in einem Porenraum besteht lediglich eine ACSB. Für drei nicht mischbare Fluide, wie im Falle von Wasser, Oel und Luft, existieren drei ACSB: Eine ACSB zwischen Wasser und Luft, die als ACWL bezeichnet wird, eine solche zwischen Oel und Luft, ACOL, und schliesslich eine zwischen Wasser und Oel, ACWO.

Die Vereinfachung, dass das infiltrierende Oel kein Wasser verdrängen könne, reduziert das Verdrängungsproblem der drei Fluide Wasser, Oel und Luft auf ein solches der lediglich zwei Fluide Oel und Luft. Die Verfälschung, die aus dieser Vereinfachung resultiert, besteht unter Voraussetzung der vorangehend postulierten Annahme sprunghafter Sättigungsübergänge lediglich darin, dass die Ausbreitungsfläche zu einer für das Oel undurchlässigen Berandung wird. Dadurch ist die Berücksichtigung einer eventuellen Einfeldung der Ausbreitungsfläche im Bereich unterhalb der Eingabestelle, siehe Bild 1, ausgeschlossen. Dies impliziert die Vernachlässigung einer vorübergehenden Retention für das Oel.

Die Vereinfachungen bezüglich der Oeleingabe bestehen in den Annahmen, dass die Eingabe-Geometrie in erster Näherung gleich jener einer Punkt-, Linien- oder annähernd kreisförmigen Flächenquelle gesetzt werden kann sowie dass der neben dem total infiltrierten Oelvolumen als bekannt vorausgesetzte Eingabe-Parameter konstant sei. Der Eingabe-Parameter kann entweder der Eingabe-Druck oder die Infiltrationsrate sein, wobei diese sich als Quotient von total infiltriertem Oelvolumen und Infiltrationszeit bestimmt. Bei einer Flächenquelle wird unterschieden zwischen vorgegeben begrenzter Flächenquelle, wie im Falle einer Baugrube, und nicht vorgegeben begrenzter Flächenquelle, wie

im Falle oberflächlicher, vorausgesetzterweise horizontaler, Ausbreitung des anschliessend zur Infiltration gelangenden Oeles. Bei einer Flächenquelle wird der Abfluss als eindimensional angenommen, so lange die Oelfront die Ausbreitungsfläche noch nicht erreicht hat. Bei Punkt- oder Linienquelle, wie im Falle von Leck oder Riss in einem unterirdischen Oelbehältnis, wird vorausgesetzt, dass sich der Stau-punkt P, siehe Bild 1, unterhalb der Bodenoberfläche befindet.

### Konzepte

Eines der Konzepte zur Simulation eines Ausbreitungsvorganges anhand des in Bild 1 dargestellten Modells besteht in der Aufteilung eines Ausbreitungsvorganges in eine erste und eine zweite Ausbreitungsphase. Die erste Ausbreitungsphase erstreckt sich bis zum Zeitpunkt  $t_A$ , in dem die Oelfront die Ausbreitungsfläche erreicht.  $t_U$  ist der Zeitpunkt des Alimentationsunterbruchs. Die zweite Ausbreitungsphase dauert vom Zeitpunkt  $t_A$  bis zum Erreichen der Endausbreitung. Die Endausbreitung ist dann erreicht, wenn die Oelsättigung sich überall bis auf Residualsättigung abgebaut hat.

Ein weiteres Konzept zur Simulation eines Ausbreitungsvorganges besteht in der Art und Weise der Definition der für eine Abschätzung einzuführenden, konzentrierten Mächtigkeit,  $M_{konz}$ , der Oel-Lache. Unter dem Begriff der Oel-Lache wird die zum Wasser-Luft-Spiegel parallele, mit Oel verunreinigte Schicht entlang der Ausbreitungsfläche verstanden. Die Definition von  $M_{konz}$  basiert auf der Aussage, dass die für eine funikuläre Oelausbreitung minimale Mächtigkeit,  $M_o$ , einer mit Oel verunreinigten Schicht anhand einer Superposition der drei Kapillar-Steig-Höhen-Kurven erhalten werden kann (Bild 3). In einer mit Wasser, Oel und Luft erfüllten Kapillare kann durch allmählichen Abbau des Oelpotentials, d. h. durch allmählichen Entzug von Oel aus der zwischen Wasser und Luft liegenden Oelsäule, deren Höhe bis auf null reduziert werden. Die dadurch sich einstellende Vereinigung der beiden Oelmenisken bedeutet die Bildung eines befleckten Wasser-Luft-Meniskus. In einer porösen Matrix dagegen kann sich die Sättigung eines jeden der verschiedenen Fluide nicht unter dessen maximale Residualsättigung abbauen, falls Ausschwemmung und Diffusion ausgeschlossen werden. Dies, da ein Fluss des Oeles, im speziellen eine Oelausbreitung entlang der Ausbreitungsfläche, nur solange möglich ist, als dass die Oelsättigung funikular und damit grösser als die maximale Re-

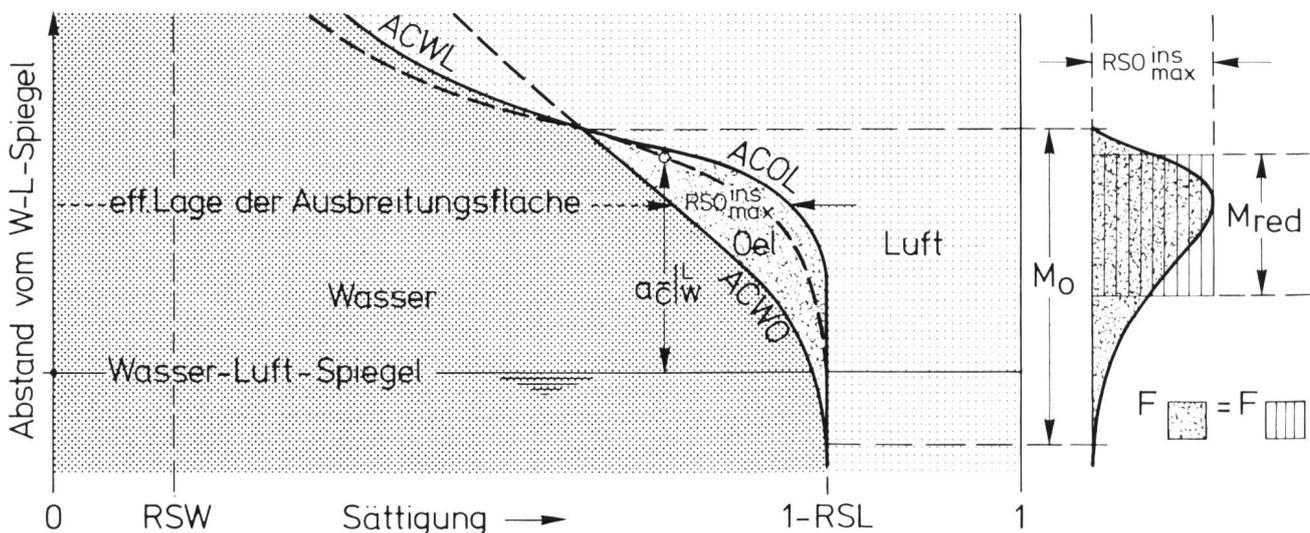


Bild 3. Konzept zur Bestimmung der minimalen Oel-Lachen-Mächtigkeit.

sidualsättigung von Oel,  $RSO_{max}$ , ist. Demzufolge ist eine Reduktion der Oelsättigung, was eine spiegelnormale Annäherung der beiden Oel-Kapillar-Steig-Höhen-Kurven ACOL und ACWO bedeutet, dann nicht mehr möglich, wenn sich diese überall bis auf  $RSO_{ins_{max}}$  genähert haben. So bestimmt sich  $M_o$  als gleich dem spiegelnormalen Abstand der beiden Schnittpunkte der ACOL und ACWO, falls deren maximaler, spiegelparalleler Abstand gleich  $RSO_{ins_{max}}$  ist.

Die Vereinfachung sprunghafter Sättigungsübergänge impliziert die Voraussetzung ausschliesslich maximal und minimal möglicher Sättigung. Minimal mögliche Sättigung bedeutet Residualsättigung. Damit kann ein Oelfluss bei Annahme sprunghafter Sättigungsübergänge nur bei maximal funikulärer Oelsättigung geschehen. Dies bedingt, dass die minimale Mächtigkeit  $M_o$  der Oel-Lache über das fiktive  $M_{red}$  auf das fiktive  $M_{konz}$  konzentriert werden muss.  $M_{red}$  ist die minimale Mächtigkeit einer ölverunreinigten Schicht bei Konzentration derselben auf maximale, insulare Residualsättigung (Bild 3).  $M_{konz}$  ist die minimale Mächtigkeit einer ölverunreinigten Schicht bei Konzentration derselben auf maximale, funikuläre Oelsättigung.

Eine Grundwasserspiegelschwankung während der zweiten Ausbreitungsphase bewirkt, dass das Oel im Bereiche der momentanen Ausdehnung entlang der Ausbreitungsfläche

über die Höhe des Schwankungsbereiches residual verschmiert wird. Demzufolge wird die Endausbreitung entlang der Ausbreitungsfläche bei schwankendem Grundwasserspiegel aufgrund der Massenbilanz entsprechend geringer. Die Berücksichtigung eventueller Schwankungen des Grundwasserspiegels geschieht durch die in [1] erläuterte Definition von  $M_{konz}$  in Abhängigkeit der Schwankungsamplituden des Grundwasserspiegels, die während der voraussichtlichen Dauer der zweiten Ausbreitungsphase erwartet werden müssen.

$$M_{konz} = 0,1 \left\{ (2a_{\tau} |w^L|) / 3 + (+\Delta h_{SWL}) + 0,5 |(-\Delta h_{SWL})| \right\} \quad (1)$$

$(+\Delta h_{SWL})$  ist die grösste, positive Amplitude,  $|(-\Delta h_{SWL})|$  ist der Absolutwert der grössten, negativen Amplitude des Grundwasserspiegels. Falls  $a_{\tau} |w^L|$  auch nicht näherungsweise bekannt, siehe Tabelle 1 in [1]; bei Grundwasserspiegelschwankungen, die grösser als einige wenige Dezimeter sind, kann  $a_{\tau} |w^L|$  vernachlässigt werden.

Ein letztes Konzept besteht in der Annahme, die Oel-Lache sei in erster Näherung rechteckig.

### Erste Ausbreitungsphase

Die erste Ausbreitungsphase dauert bis zum Zeitpunkt  $t_A$ , in welchem die Oelfront die Ausbreitungsfläche erreicht.

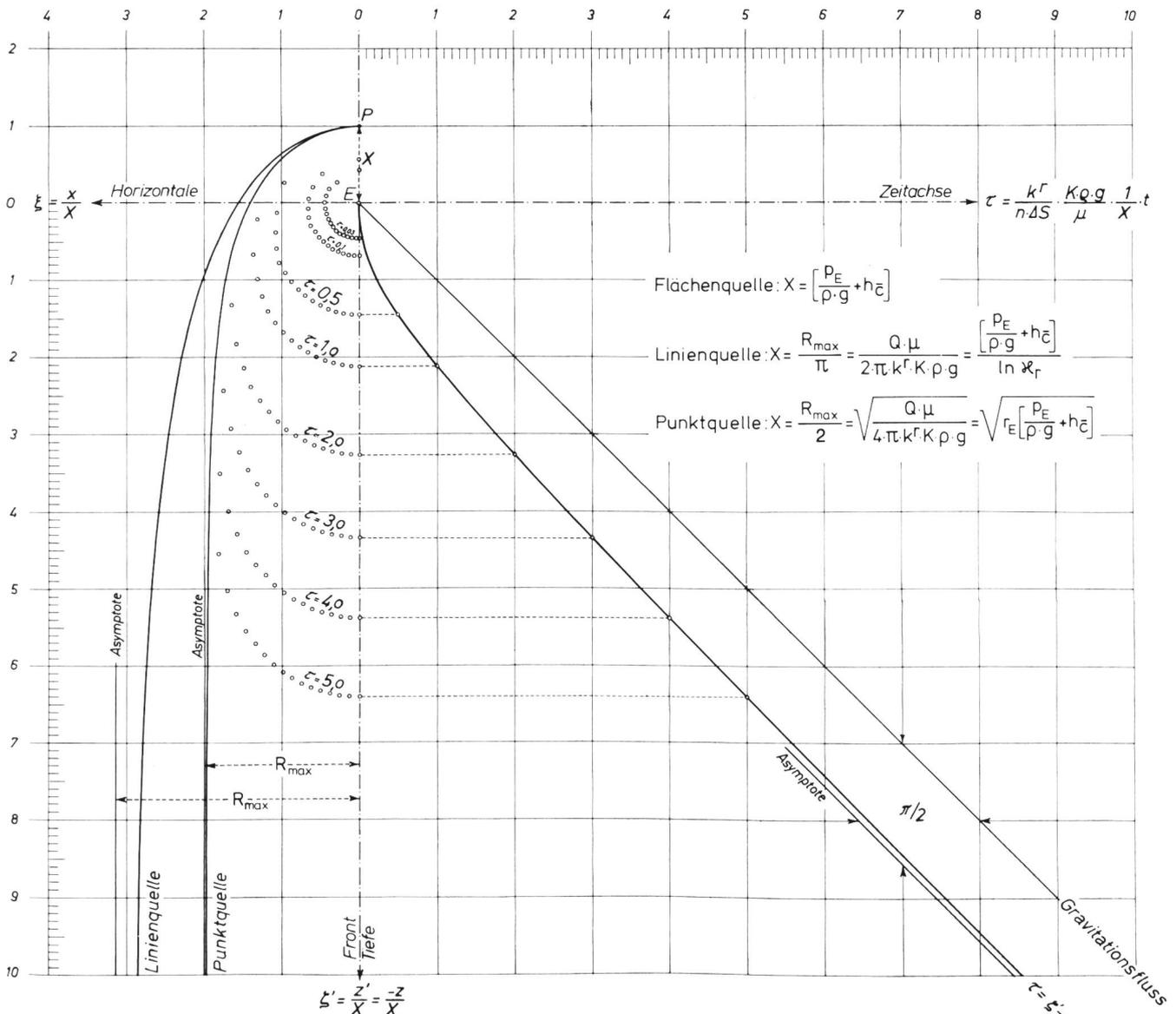


Bild 4. Zeitabhängige Lage der Front während der ersten Ausbreitungsphase.

Die erste Ausbreitungsphase kann analytisch beschrieben werden [3]. Bild 4 zeigt eine dimensionslose Darstellung der zeitabhängigen Lage der Front während der ersten Ausbreitungsphase. Dies sowohl für eine Punkt-, Linien- als auch eine Flächenquelle, da die erforderliche Zeit  $\tau$  für ein Fortschreiten der Oelfront entlang der Vertikalen durch das Zentrum der Eingabestelle um die Strecke  $\zeta'$  nach [3] unabhängig von der Eingabe-Geometrie durch die folgende Funktion beschrieben werden kann:

$$\tau = \zeta' \cdot \arctg \zeta' \quad (2)$$

$\tau$  und  $\zeta'$  sind die dimensionslosen Größen der Zeit  $t$  und der Fronttiefe  $-z=z'$ .

In Bild 4 bedeuten  $X$  eine charakteristische Länge,  $R_{\max}$  die maximal mögliche Ausbreitung während der ersten Ausbreitungsphase,  $Q$  die Infiltrationsrate,  $\mu$  die dynamische Zähigkeit und  $\rho$  die Dichte des Oeles.  $kr$  repräsentiert die relative Durchlässigkeit für Oel, die unter der früheren Annahme sprunghafter Sättigungsübergänge und damit bei Residualsättigung von Wasser und Luft in erster Näherung gleich 0,5 gesetzt werden kann.  $K$  bedeutet die bodenspezifische Durchlässigkeit und  $g$  die Erdbeschleunigung. Die dimensionslose Grösse  $n$  repräsentiert das Porenvolumen.  $\Delta S$  stellt den für das Oel maximal zur Verfügung stehenden Anteil des Porenvolumens dar. Bei erstmaliger Oelinfiltation kann die dimensionslose Grösse  $\Delta S$  gleich  $1 - (RSW + RSL)$  und damit in erster Näherung gleich 0,7 gesetzt werden, indem  $RSW \approx 0,1$  die Residualsättigung von Wasser und  $RSL \approx 0,2$  die Residualsättigung von Luft bedeuten.  $E$  bezeichnet das Eingabe-Zentrum,  $P$  die Stelle des Staupunktes.  $h_c$  ist die repräsentative Kapillar-Druck-Höhe. Bei einer Verdrängung von Luft durch infiltrierendes Oel bedeutet  $h_c = h_c|_{O^L}$ . Aufgrund der Dichten, Oberflächenspannungen und Benetzungswinkel kann  $h_c|_{O^L} \approx (h_c|_{W^L})/2$  gesetzt werden. Bei gemittelter Berücksichtigung der Kapillarität wird, wie erwähnt, ausschliesslich die statische ACSB als massgebend angenommen. Bei Statik sind Kapillar-Druck-Höhe und Kapillar-Steig-Höhe gleich, weshalb im speziellen  $h_c|_{W^L} = a_c|_{W^L}$  gilt. So kann für  $h_c = h_c|_{O^L} \approx (a_c|_{W^L})/2$  gesetzt werden. Falls  $a_c|_{W^L}$  auch nicht näherungsweise bekannt ist, siehe Tabelle 1 in [1].  $\{p_E/(\rho g)\}$  bedeutet den Eingabedruck in Oelsäulen-Höhe. Für  $\ln z_r$  kann 7,6 eingesetzt werden.  $r_E$  ist der Radius des Eingabeorganes. Gravitationsfluss heisst Abfluss lediglich aufgrund der Gravitation, impliziert also Vernachlässigung eines eventuellen Einflusses von Kapillarität und Eingabedruck.

### Zweite Ausbreitungsphase

Die zweite Ausbreitungsphase erstreckt sich vom Zeitpunkt  $t_A$ , in welchem die Oelfront die Ausbreitungsfläche erreicht, bis zum Zeitpunkt, in welchem sich die Endausbreitung eingestellt hat.

Nach der in Bild 1 wiedergegebenen Modellvorstellung steht zu Beginn der zweiten Ausbreitungsphase, d. h. für  $t = t_A$  ein Kreiszyylinder funikularen Oeles auf der Ausbreitungsfläche auf. Die Höhe des Kreiszyinders wird mit  $H_{ZA}$  bezeichnet. Dessen Radius  $R$  bestimmt sich aus der Forderung nach Äquivalenz der in Modell und Realität infiltrierten Oelvolumenta. Für  $t_U \geq t_A$ , d. h. dauert die Oelalimentation zu Beginn der zweiten Ausbreitungsphase noch an oder wird sie im Zeitpunkt  $t = t_A$  gerade unterbrochen, so ist  $H_{ZA}$  gleich dem Abstand  $H_E$  zwischen Eingabestelle und Ausbreitungsfläche.

$$\{t_U \geq t_A\} \quad H_{ZA} = H_E = h_E - h_s - a_c|_{W^L} \quad (3)$$

$h_E$  ist die geodätische Höhe des Zentrums der Eingabe-

stelle,  $h_s$  jene des Grundwasserspiegels vertikal darunter.  $t_U$  ist der als gegeben vorausgesetzte Zeitpunkt des Alimentsationsunterbruchs.  $t_A$  kann als

$$t_A = \frac{n \Delta S}{kr} \frac{\mu}{K \rho g} X \tau_A \quad (4)$$

worin

$$\tau_A = \tau \text{ für } \zeta' = H_E/X$$

anhand von Bild 4 ermittelt werden. Ist dagegen die Oelalimentation im Zeitpunkt, in welchem die Oelfront die Ausbreitungsfläche erreicht, bereits abgeschlossen, d. h. gilt  $t_U < t_A$ , so berechnet sich  $H_{ZA}$  aufgrund des Vertikalabstandes  $H_Z$  der Front vom Zentrum der Eingabestelle im Zeitpunkt des Alimentsationsunterbruchs, wobei im allgemeinen  $H_Z = \zeta'(\tau_U) X$ .  $\zeta'(\tau_U)$  kann für  $\tau_U = \tau(t = t_U)$  Bild 4 entnommen werden. Für  $t_U < t_A$  ist die Höhe  $H_{ZA}$  gegenüber  $H_Z$  um die Höhenreduktion infolge des residual zurückgehaltenen Oeles geringer.

$$\{t_U < t_A\} \quad H_{ZA} = \frac{H_Z \Delta S - H_E RSO_{\max}^{pend}}{\Delta S - RSO_{\max}^{pend}} \quad (5)$$

Nach bisheriger Erfahrung können die maximale, pendulare Residualölsättigung,  $RSO_{\max}^{pend}$ , etwa zwischen 0,03 und 0,06, d. h. zwischen 3 bis 6 %/o, und die maximale, insulare Residualölsättigung,  $RSO_{\max}^{ins}$ , etwa zwischen 0,06 und 0,12, d. h. zwischen 6 bis 12 %/o des Porenvolumens angenommen werden, womit  $RSO_{\max}^{ins} \approx 2 RSO_{\max}^{pend}$ . Wird  $H_{ZA}$  negativ, so bedeutet dies, dass die Oelfront die Ausbreitungsfläche niemals erreicht, da sich das Oel vorher schon überall residual verteilt hat. Die vertikale Eindringtiefe,  $T_E$ , berechnet sich dann als

$$\{H_{ZA} < 0\} \quad T_E = H_Z \Delta S / RSO_{\max}^{pend} \quad (6)$$

Nach der Modellvorstellung in Bild 1 kann der Ausbreitungskörper während der zweiten Ausbreitungsphase dadurch simuliert werden, dass sich der ursprüngliche Kreiszyylinder in einen Kegelestumpf wandelt und ein Kegelestumpf sich stets wiederum in einen Kegelestumpf ausweitet. Der Ausbreitungsvorgang entlang der Horizontalen in der Ausbreitungsfläche ist dann abgeschlossen und die maximale Horizontalausbreitung der Oel-Lache,  $B_{\max}$ , dann erreicht, wenn sich die Höhe des sich ausweitenden Kegelestumpfes auf  $M_{\text{konz}}$  (Gl. 1) abgebaut hat. Dauert die Oelalimentation über diesen Zeitpunkt noch an, so kann das noch einfließende Oel sich nur noch entlang der Fallinie der Ausbreitungsfläche ausbreiten und dies auf einer Breite von  $2 B_{\max}$  und mit einer Höhe von  $M_{\text{konz}}$ . Solchermassen lässt sich  $L_{\max}$ , die maximale Ausbreitung der Oel-Lache entlang der Fallinie der Ausbreitungsfläche, mit dem Konzept der rechteckigen Oel-Lache aufgrund einer Volumenbilanz direkt bestimmen.

Die maximale Fläche der Oel-Lache,  $F_{\max}$ , berechnet sich zu

$$F_{\max} = (V_{\text{tot}} - V_{\text{res}}) / (M_{\text{konz}} n \Delta S) \quad (7)$$

$V_{\text{tot}}$  bedeutet das total infiltrierte Oelvolumen.  $V_{\text{res}}$  beschreibt das im Minimum oberhalb der Oel-Lache zurückgehaltene Residualölvolumen.  $V_{\text{res}}$  berechnet sich für eine Punkt- oder Flächenquelle als

$$V_{\text{res}} = (H_E - M_{\text{konz}}) \cdot \tau (R_{\max})^2 n RSO_{\max}^{pend} \quad (8)$$

$R_{\max}$  bestimmt sich für eine Punkt- oder Flächenquelle als

$$R_{\max} = \sqrt{(Q \mu) / (\tau kr K \rho g)}$$

Bei geringer Infiltrationsrate über lange Zeit und gut durchlässigem Boden ist  $V_{\text{res}}$  gegenüber  $V_{\text{tot}}$  vernachlässigbar.

Sind der Grundwasserspiegel und damit die Ausbreitungs-

fläche horizontal, so ist der Ausbreitungsvorgang bei einer Punkt- oder einer in erster Näherung kreisförmigen Flächenquelle rotationssymmetrisch und die Kegelstümpfe sind Kreis-Kegelstümpfe. Bei solchen Gegebenheiten ist die Oel-Lache horizontal und radialsymmetrisch. Deren maximaler Radius,  $AR_{\max}$ , berechnet sich aus  $F_{\max}$  als

$$AR_{\max} = \sqrt{F_{\max}/\pi} \quad (9)$$

Bei horizontalem Grundwasserspiegel gilt

$$\{\text{horiz. GWsp.}\} B_{\max} = L_{\max} = AR_{\max} \quad (10)$$

Im allgemeinen sind der Grundwasserspiegel und damit die Ausbreitungsfläche nicht horizontal und die Kegelstümpfe sind in Richtung der Falllinie deformiert. Bei geneigter Ausbreitungsfläche ist eine analytische Beschreibung eines Ausbreitungsvorganges nicht möglich und demzufolge eine numerische Berechnung, ein Zeitschrittverfahren erforderlich. Jedoch für  $t_U \leq t_{(\text{Kegelstumpf-Höhe} = M_{\text{konz}})}$ , d. h. falls die Oelalimentation unterbrochen wird, bevor bzw. im Moment, in welchem sich die Kegelstumpf-Höhe auf  $M_{\text{konz}}$  abbaut, kann ein Ausbreitungsvorgang aufgrund der in Praxis im allgemeinen geringen Wasserspiegelneigungen trotz geneigter Ausbreitungsfläche dennoch in erster Näherung rotationssymmetrisch angenommen werden. So kann

$$\left. \begin{array}{l} \{ t_U \leq t_{(\text{Kegelstumpf-Höhe} = M_{\text{konz}})} \} \\ \{ \text{Gwsp.-neigung} = \text{klein} \} \end{array} \right\} B_{\max} \approx L_{\max} \approx AR_{\max} \quad (11)$$

gesetzt werden. Diese Beziehung erlaubt die Bestimmung von  $B_{\max}$  ohne numerische Berechnung. Dennoch ist sie für die Praxis von nur geringem Nutzen, da die Abklärung der Voraussetzung  $t_U \leq t_{(\text{Kegelstumpf-Höhe} = M_{\text{konz}})}$  eine numerische Berechnung erfordert. Für die Praxis interessant dagegen ist die Feststellung, dass  $t_A < t_{(\text{Kegelstumpf-Höhe} = M_{\text{konz}})}$  zwingenderweise gelten muss, und damit Gl. 11 wenigstens für  $t_U < t_A$ , d. h. für den Fall eines Oelunterbruchs bevor die Oelfront die Ausbreitungsfläche erreicht, dienlich sein kann.  $t_U$  muss gegeben sein.  $t_A$  bestimmt sich nach Gl. (4).

$$\left. \begin{array}{l} \{ t_U \leq t_A \text{ und} \\ \{ \text{Gwsp.-neigung} = \text{klein} \} \end{array} \right\} B_{\max} \approx L_{\max} \approx AR_{\max} \quad (12)$$

Für  $t_U > t_A$  ist bei geneigtem Grundwasserspiegel eine numerische Berechnung von  $B_{\max}$  unumgänglich und die Oel-Lache wird zu einem Band, dessen Breite  $2 B_{\max}$  und dessen Mächtigkeit  $M_{\text{konz}}$  ist. Solchermassen können die simulierten Ausbreitungen entlang der Falllinie der Ausbreitungsfläche recht gross werden. Ein solch ungünstiger Fall ist dann gegeben, wenn grosse Oelmengen nur tropfenweise und damit über sehr lange Zeit in gut durchlässigen Böden infiltrieren.  $B_{\max}$  kann dann kaum grösser als  $R$  sein.  $R$  kann theoretisch kleiner  $(a_c |_{O^L})/3$  werden. Indem  $B_{\max} < (a_c |_{O^L})/3$  irreal ist, wird  $(a_c |_{O^L})/3$  als untere Grenze eines möglichen  $B_{\max}$  angenommen.

Nach numerischer Berechnung von  $B_{\max}$  bestimmt sich  $L_{\max}$  als

$$L_{\max} = (F_{\max} / 2 B_{\max}) - B_{\max} / 2 \quad (13)$$

Die Subtraktion von  $B_{\max}/2$  resultiert aus der Berücksichtigung des Oel-Lachen-Anteils oberhalb O, siehe letzte Figur in Bild 1.

Aufgrund der Ueberlegungen in den beiden vorangehenden Absätzen müssen  $B_{\max}$  und  $L_{\max}$  zwischen folgenden Grenzwerten liegen:

$$(a_c |_{W^L})/6 \leq B_{\max} \leq AR_{\max} \quad (14)$$

$$AR_{\max} \leq L_{\max} \leq (F_{\max} / 2 B_{\max}) - B_{\max} / 2$$

Dass bei solcher Abschätzung für geringe Breiten  $B_{\max}$  in der Praxis kaum je beobachtete Längen  $L_{\max}$  resultieren können, liegt darin begründet, dass Inhomogenitäten retentive Wirkung für das Oel haben können sowie dass der mikrobielle Abbau nicht in Betracht gezogen wird.

### Durchführung einer numerischen Simulation

Die numerische Berechnung zur Simulation von Ausbreitungsvorgängen während der zweiten Ausbreitungsphase bei geneigtem Grundwasserspiegel basiert auf einer pro Zeitschritt durchzuführenden Bilanzierung aller in den momentanen, quasi stationären, fiktiven Kreis-Kegelstumpf zu- und abfließenden Flüssigkeitsvolumina einerseits und der Vorgabe der horizontalen Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oelfront andererseits. Die Durchführung der Bilanzierung bezüglich fiktiver Kreis-Kegelstümpfe anstelle der realen Kegelstümpfe, die in Richtung der Falllinie deformiert sind, vereinfacht den Berechnungsgang. Diese Vereinfachung erfordert aber, dass der Einfluss der Neigung der Ausbreitungsfläche in der Bilanz durch ein vom Neigungswinkel abhängiges, pro Zeitschritt aus dem momentanen, fiktiven Kreis-Kegelstumpf abfließendes Flüssigkeitsvolumen berücksichtigt wird. Die Modellvorstellung, wonach ein Kegelstumpf wieder in einen Kegelstumpf übergeht, impliziert Linearität der horizontalen Ausbreitungsgeschwindigkeit über die Höhe. Entlang der Horizontalen in der Ausbreitungsfläche berechnet sich die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Oelfront anhand des Potentialgradienten, der sich aus Höhe und Basisradius des momentanen Kreis-Kegelstumpfes bestimmt. In der Kegelstumpf-Deckfläche ist die horizontale Ausbreitungsgeschwindigkeit null. Aufgrund von Volumenbilanz und vorgegebener Radialausbreitung kann die Kegelstumpf-Höhe für den neuen Zeitschritt bestimmt werden. Befindet sich die Kegelstumpf-Deckfläche für  $t_A < t < t_U$  unterhalb der Eingabestelle, so geschieht die Oelalimentation des Kegelstumpfes über den vertikalen Kreiszyylinder mit Radius  $R$ , dessen Achse durch das Zentrum der Eingabestelle geht.

Das Flussdiagramm zur Durchführung einer auf dem beschriebenen Modell beruhenden, numerischen Simulation ist in Form einer Tabelle zur Berechnung mit einer Handrechenmaschine in [1] dargestellt. Im weiteren ist in [1] ein Computer-Programm in extenso wiedergegeben, das eine eingehendere Behandlung eines vorliegenden Falles erlaubt, indem für die oft nur vage bekannten Parameter — wie Porosität, bodenspezifische Durchlässigkeit, repräsentative Kapillar-Steig-Höhe, Neigung, Amplituden und Höhe des Grundwasserspiegels sowie Eingabewerte usw. — die Möglichkeit besteht, diese durch drei Werte, d. h. einen minimalen, einen maximalen und einen mittleren Wert vorzugeben. Mit dem Programm können alle aus solcher Parameter-Variation sich ergebenden Kombinationen durchgerechnet und die Resultate in übersichtlicher Darstellung erhalten werden. Neben einer Benützungsanleitung für das Computer-Programm und Berechnungsbeispielen sind in [1] eine ausführliche Beschreibung des Flussdiagrammes sowie eine Darstellung der Gedankengänge, die dem Flussdiagramm zugrunde liegen, als auch eine Betrachtung über Genauigkeit der Simulation und allgemein gültige Abhängigkeiten bei Ausbreitungsvorgängen zu finden.

Bei geneigtem Grundwasserspiegel ist für  $t_U > t_A$  zur Bestimmung von  $B_{\max}$  eine numerische Simulation notwendig. Eine numerische Simulation erfordert zweckmässigerweise die Anwendung eines Computers. So kann man sich fragen, ob es dann nicht kaum mehr Aufwand bedeutete, einen Ausbreitungsvorgang durch numerische Integration über

Ort und Zeit der Differentialgleichungen zu simulieren, die den makroskopisch betrachteten Fluss dreier, nicht mischbarer Fluide in einer porösen Matrix allgemein beschreiben. Dies vor allem in Anbetracht, dass dann auf die doch recht einschränkenden, eingangs erwähnten Vereinfachungen verzichtet werden könnte. Auf die diesbezüglichen Probleme und Möglichkeiten einer Simulation wird in [4] eingegangen. Aus dem doch erheblich grösseren Aufwand für eine solche repräsentativere Simulation ergibt sich die Existenzberechtigung einer Abschätzungsmethode wie der hier vorgeschlagenen und in [1] ausführlich beschriebenen.

Adresse des Verfassers: H. O. Schiegg, dipl. Ing. ETH, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidg. Techn. Hochschule Zürich, Gloriastrasse 39, 8092 Zürich.

#### Literatur

- [1] Schiegg, H. O.: Methode zur Abschätzung der Ausbreitung von Erdölderivaten in mit Wasser und Luft erfüllten Böden. Mitteilung Nr. 22 der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der ETH Zürich; 1977.
- [2] Schiegg, H. O.: Experimental contribution to the dynamic capillary fringe. IAHR-Symposium on Hydrodynamic, Diffusion and Dispersion in Porous Media; Pavia, Italy; 1977.
- [3] Schiegg, H. O.: Liquid-air-displacements in a homogeneous, isotropic, unlimited, porous media. XVIth IAHR-Congress, Sao Paulo, Vol. 3; 1975.
- [4] Schiegg, H. O.: Probleme und Möglichkeiten der Simulation der Verunreinigung eines mit Wasser und Luft erfüllten, porösen Mediums durch eine nicht mischbare Flüssigkeit. Réunion internationale sur les nappes souterraines AIRH/SIA, CH-Rapperswil, 1975.

## Limnologie als Aufgabe einer Kantonalen Gewässerschutzfachstelle

Pius Stadelmann<sup>1)</sup>

DK 477.472(28)

### Einleitung

Limnologie lässt sich wörtlich als Seen-Kunde übersetzen. Die Limnologie ist eine Teildisziplin der Oekologie; sie befasst sich mit den Ökosystemen des Süsswassers, also mit Seen, Teichen, Flüssen und Bächen.

In Bild 1 ist die Stellung der Limnologie bei den Umweltwissenschaften aufgezeigt. Im Gegensatz zur Ozeanologie, die sich mit Meerwasser beschäftigt, ist die Limnologie allgemein ausgedrückt, die Lehre von den Binnengewässern. Als interdisziplinäre Wissenschaft erfasst die Limnologie mit Hilfe der Physik, Chemie, Biologie und Geologie die Wechselbeziehungen zwischen den Wasserorganismen und ihrer Umwelt. Zu den physikalischen Umweltfaktoren zählen z. B. Temperatur, Lichtintensität, Fliessgeschwindigkeit. Chemische Umweltfaktoren sind z. B. Sauerstoffgehalt, Phosphorkonzentration und biologische Umweltfaktoren, z. B. Anwesenheit konkurrierender oder räuberischer Arten. Im Gegensatz zum Land — wo sich meist offene Systeme bilden — ist das aquatische System vielfach geschlossen. Die Organismen verlassen das Wasser meist nicht, mit Ausnahme von einigen Insekten. Wasser dient als Lebensraum und Transportmittel.

Eine andere Charakteristik des aquatischen Ökosystems ist, dass es gegenüber dem Landsystem meist komplexere

Nahrungsketten aufweist. Die durch Photosynthese produzierte Substanz wird äusserst wirkungsvoll von Konsumenten und Destruenten verwertet, somit werden wesensfremde und giftige Stoffe in der Futterkette (z. B. Alge — Krebschen — Friedfisch — Raubfisch) stärker angereichert als auf dem Land.

Unsere Süsswassersysteme stellen die lebenswichtigen Trinkwasserreserven dar, die teilweise schon mehrfach genutzt werden. Leider entlässt der Mensch seine Abfälle in die Gewässer, auch hier wird Wasser als billiges Transportmittel benutzt. Auf diese Zivilisationsabfälle reagieren die Gewässer mit hoher Sensibilität wie z. B. erhöhtes Wachstum von Bakterien, Pilzen und Urtierchen beim Einleiten von ungereinigten kommunalen Abwässern in Flüsse, starkes Algenwachstum bei erhöhten Phosphorzufuhren zu Seen, Anreicherung von schwer abbaubaren Stoffen oder Metallen in der Nahrungskette. Aus diesen ersten Hinweisen ist ersichtlich, dass beim Ueberprüfen und der Wahl von gewässerschutztechnischen Massnahmen der Limnologie eine wichtige Rolle zukommt.

### Gesetzliche Hinweise

Der Gesetzgeber hat die Nutzungs- und Qualitätsziele der Gewässer auf naturwissenschaftlichen Grundlagen abzustützen. Die Nutzungsziele sind im Eidg. Gewässerschutzgesetz im Zweckartikel (Art. 2) beschrieben. Dem *Bund* ob-

<sup>1)</sup> Vortrag gehalten an der 33. Hauptmitgliederversammlung des Verbandes Schweizerischer Abwasserfachleute vom 25. März 1977 in Zürich.

