Retentionsvermögen unterirdischer Räume für Erdölderivate

Autor(en): **Schiegg, Hans Olivier**

Objekttyp: **Article**

Zeitschrift: **Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria**

Band (Jahr): **71 (1979)**

Heft 11-12

PDF erstellt am: **24.05.2024**

Persistenter Link: https://doi.org/10.5169/seals-941468

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Inhalten der Zeitschriften. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern.
Die auf der Plattform e-periodica veröffentlichten Dokumente stehen für nicht-kommerzielle Zwecke in Lehre und Forschung sowie für die private Nutzung frei zur Verfügung. Einzelne Dateien oder Ausdrucke aus diesem Angebot können zusammen mit diesen Nutzungsbedingungen und den korrekten Herkunftsbezeichnungen weitergegeben werden.
Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Die systematische Speicherung von Teilen des elektronischen Angebots auf anderen Servern bedarf ebenfalls des schriftlichen Einverständnisses der Rechteinhaber.

Haftungsausschluss

Alle Angaben erfolgen ohne Gewähr für Vollständigkeit oder Richtigkeit. Es wird keine Haftung übernommen für Schäden durch die Verwendung von Informationen aus diesem Online-Angebot oder durch das Fehlen von Informationen. Dies gilt auch für Inhalte Dritter, die über dieses Angebot zugänglich sind.

Ein Dienst der *ETH-Bibliothek*
ETH Zürich, Rämistrasse 101, 8092 Zürich, Schweiz, www.library.ethz.ch

http://www.e-periodica.ch

Retentionsvermögen unterirdischer Räume für Erdölderivate

Hans Olivier Schiegg

Zusammenfassung

Stehen Tanks zur Lagerung von Erdölderivaten in unterirdischen Räumen, so interessiert im Zusammenhang mit dem Gewässerschutz das Retentionsvermögen solcher Räume für Erdölderivate. Dies für den Fall, dass infolge einer Leckage der Tanks bzw. eines Unfalls Erdölderivate auslaufen sollten.

Vorerst werden die Grundlagen erörtert, nach denen sich das Retentionsvermögen unterirdischer Räume für Erdölderivate bestimmt. Anschliessend wird anhand eines praktischen Beispiels gezeigt, wie sich das Retentionsvermögen abschätzen lässt. Schliesslich werden nach einem Ölunfall zu ergreifende Sanierungs- und Schutzmassnahmen zur Minimierung der Verunreinigung durch Öl empfohlen.

Résumé: Capacité de rétention des chambres souterraines envers des pétroles

Si des pétroles sont stockés dans des réservoirs placés dans des chambres souterraines, il importe de connaître, en relation avec la protection des eaux, la capacité de rétention de ces chambres envers les pétroles. Et ce pour le cas où suite à une fuite dans le réservoir ou dû à un accident, des pétroles devraient s'écouler.

D'abord sont discutés les principes de base selon lesquels se détermine la capacité de rétention des chambres souterraines envers le pétrole. Ensuite il est montré à l'aide d'un exemple pratique, comment la capacité de rétention se laisse estimer. Et finalement sont recommandées les mesures d'assainissement et de protection qui sont à prendre pour minimiser la pollution par le pétrole.

Grundlagen

Das Retentionsvermögen ist eine inverse Funktion zum Sikkerverlust. Der Sickerverlust ist abhängig vom Normalfluss zur Wandung.

Die für den ungesättigten Fluss verallgemeinerte Gleichung von Darcy lautet

$$q = k^r_{(s)} \frac{K}{\mu} \nabla \Phi \qquad (1)$$

q ist der Filtergeschwindigkeitsvektor, $k^r_{(s)}$ die von der Sättigung, S, abhängige, relative Durchlässigkeit. K ist der Tensor der spezifischen Durchlässigkeit und μ die dynamische Zähigkeit. Φ ist das totale Potential. Zwischen spezifischer und hydraulischer Durchlässigkeit, k, besteht die Relation

$$K_{(cm^2)} = \frac{k_{(cm/s)} \mu_{w\{poise=g/(cm \cdot s)\}}}{\rho_{W\,(g/cm^3)} \cdot g_{(cm/s^2)}} \approx 10^{-5} \cdot k_{(cm/s)} \qquad (2)$$

Bild 1 zeigt den prinzipiellen Verlauf der relativen Durchlässigkeit, k^r, in Funktion der Sättigung, S, für ein den porösen Feststoff benetzendes, *b*, sowie ein nicht benetzendes, *nb*, Fluid. Daraus kann ersehen werden, dass kleine Sättigungen des nicht benetzenden Fluids schon genügen, die relative Durchlässigkeit für das benetzende Fluid massgeblich zu reduzieren.

Nicht organische Böden sind durch Wasser besser benetzbar als durch ein Erdölderivat. Die im folgenden Beispiel erwähnte bituminöse und damit organische Deckschicht ist besser benetzbar durch das Erdölderivat als durch das Wasser. Gegenüber Luft haben sowohl Wasser wie auch ein Erdölderivat unabhängig vom Bodentyp stets benetzenden Charakter. Im folgenden wird das Erdölderivat kurz als Öl bezeichnet.

Ein benetzendes Fluid unterliegt in einer porösen Matrix einer kapillaren Bindung. Aus diesem Grund ist innerhalb einer porösen Matrix der Druck im benetzenden Fluid kleiner als im nicht benetzenden. Diese Druckdifferenz wird als Kapillar-Druck p_c bezeichnet.

$$p_c|_b^{nb} = p_{nb} - p_b \qquad (3)$$

Wird p_c durch die Dichtedifferenz mal Erdbeschleunigung dividiert, so resultiert die Kapillar-Druck-Höhe h_c

$$h_c|_b^{nb} = p_c|_b^{nb} \Big/ \left\{ (\rho_b - \rho_{nb}) \cdot g \right\} \qquad (4)$$

Bei Statik ist die Kapillar-Druck-Höhe gleich der kapillaren Steighöhe. h_c wird auch als Kapillar-Potential bezeichnet.

Zur Verdrängung von Wasser oder Luft aus einer porösen Matrix durch Öl muss das Potential von Öl grösser als dessen Eintrittspotential sein. Verallgemeinert wird das Eintrittspotential von Öl als Transitionspotential bezeichnet. Die formale Beschreibung des minimalen Transitionspotentials wird bei *Schiegg* (1979,89) gegeben. Im folgenden wird das Eintrittspotential von Öl graphisch erklärt. Dies geschieht anhand eines Sättigungsbildes.

Ein Sättigungsbild (Bild 2) zeigt die Verteilung von Wasser, Öl und Luft über die Höhe in einer homogenen und isotropen, porösen Matrix. Konstruiert wird ein Sättigungsbild durch Superposition – Superposition nicht im üblichen Sinn, sondern als Übereinanderpausen der einzelnen Kurven in eine gemeinsame Ebene und mit Bezug auf eine gemeinsame Basis – der drei Kapillar-Druck-Höhen-Kurven sowie einer Einschränkung des Gültigkeitsbereichs der einzelnen Kurven in Abhängigkeit der Schnittpunkte, die sich aus solcher Superposition ergeben.

Eine Kapillar-Druck-Höhen-Kurve beschreibt den Zusammenhang zwischen Kapillar-Druck-Höhe und Sättigung. Eine Kapillar-Druck-Höhen-Kurve wird kurz als HC bezeichnet. Die drei superponierten HC sind jene zwischen Wasser und Luft, HCWL, zwischen Öl und Luft, HCOL, sowie zwischen Wasser und Öl, HCWO. Aufgrund der Hysteresen der

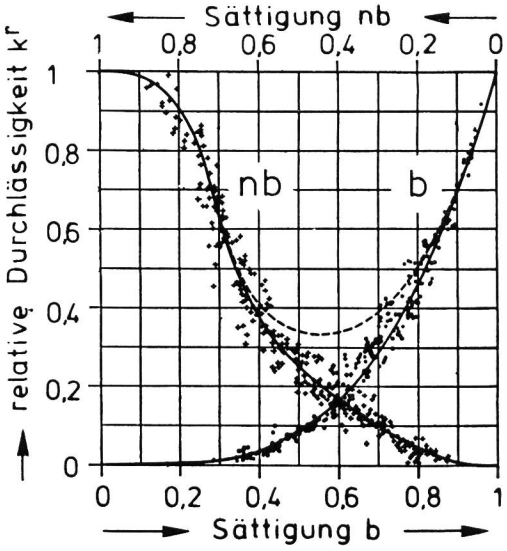

Bild 1. Experimentell bestimmter Verlauf einer $k^r = k^r_{(s)}$ nach *Wyckoff* und *Botset* (1936)

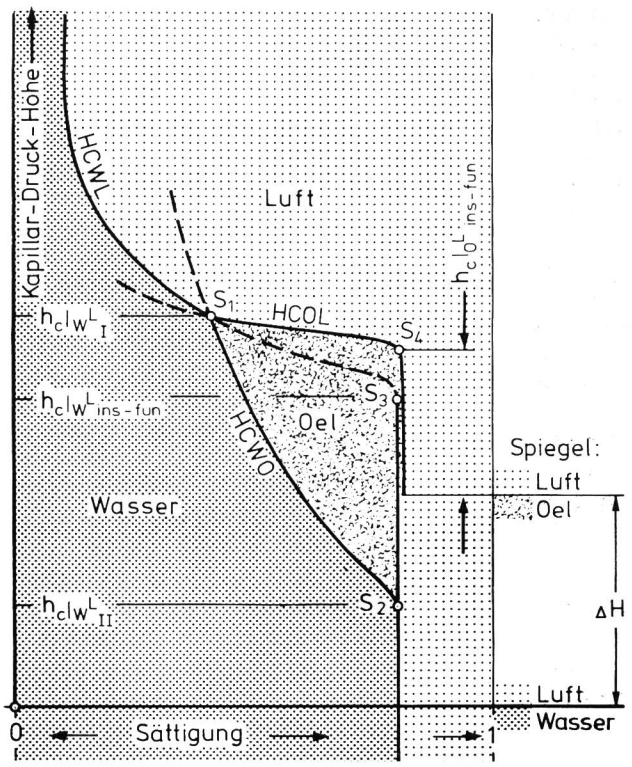

Bild 2. Sättigungsbild für Öleintritt an Orten, wo $h_c|_{W^L} = h_c|_{W^L I}$ oder $h_c|_{W^L II}$.

HC sind diese abhängig vom zeitlichen Verlauf der drei Potentiale, jenem von Wasser, Öl und Luft. Zur Vereinfachung wird auf die Berücksichtigung der Hysteresen verzichtet.

Über die Kapillar-Druck-Höhen-Kurve entspricht eine Kapillar-Druck-Höhe einer bestimmten Sättigung. So kann die Kapillar-Druck-Höhe für den Übergang vom Insular- zum Funikularbereich als $h_c|_{b^{nb}ins-fun}$ bezeichnet werden; betreffend der Begriffe insular und funikular siehe *Schiegg* (1979,20) bzw. *Versluys* (1931). In Bild 2 wird dieser Übergang zwischen Wasser und Luft im Abstand $h_c|_{W^L ins-fun}$ vom Wasser-Luft-Spiegel mit S_3 bezeichnet. Die entsprechenden Übergänge zwischen Öl und Luft im Abstand $h_c|_{O^L ins-fun}$ vom Öl-Luft-Spiegel bzw. zwischen Wasser und Öl im Abstand $h_c|_{W^O ins-fun}$ vom Wasser-Öl-Spiegel sind mit S_4 bzw. S_2 angegeben.

Zur Lagebestimmung der drei für ein Sättigungsbild zu superponierenden HC, d.h. der HCWL, HCOL und HCWO müssen vorerst die geodätischen Höhen der drei Spiegel aufgrund der drei momentanen Potentiale in Wasser, Öl und Luft berechnet werden. Die Bestimmungsgleichung einer Spiegelhöhe, $h_s|_{b^{nb}}$, lautet in Funktion der Potentiale

$$h_s|_{b^{nb}} = (\Phi_{nb}-\Phi_b) \,/\, \left| (\rho_{nb}-\rho_b)\cdot g \right| \qquad (5)$$

Anschliessend wird auf dem Spiegel zwischen Wasser und Luft die HCWL, auf jenem zwischen Öl und Luft die HCOL und auf dem Spiegel zwischen Wasser und Öl die HCWO aufgesetzt.

Das Konzept der Befleckung impliziert, dass sich die drei HC in einem gemeinsamen Schnittpunkt S_1 schneiden, *Schiegg* (1979, 78). Für ein Sättigungsbild beschränkt sich die Gültigkeit der HCWL auf den Bereich links von S_1. Die HCOL und HCWO sind nur rechts von S_1 gültig.

Bei Anstieg des relativen Ölpotentials, d.h. des Ölpotentials bezogen auf den Wasser-Luft-Spiegel, steigt der Öl-Luft- Spiegel und fällt der Wasser-Öl-Spiegel gegenüber dem Wasser-Luft-Spiegel. Damit verschieben sich die HCOL gegen oben und die HCWO gegen unten. Also entfernen sie sich in entgegengesetzten Richtungen von der HCWL. Dadurch wandert der Schnittpunkt S_1 entlang der HCWL gegen links oben. Bei fallendem relativem Ölpotential sind die Verhältnisse umgekehrt. Je kleiner das relative Ölpotential, umsomehr nähern sich die Punkte S_1, S_2 und S_4, bis sie schliesslich gleichzeitig in S_3 zusammenfallen.

Das relative Ölpotential, bei dem alle S_i in S_3 zusammenfallen, ist das minimale Eintrittspotential. Bei minimalem Eintrittspotential beginnt das Öl in eine poröse Matrix einzutreten. Dies geschieht zuerst am Ort des Insular-Funikular-Übergangs zwischen Wasser und Luft und damit dort, wo der kapillare Sog im Wasser gleich $h_c|_{W^L ins-fun}$ ist. Dieser Ort befindet sich um $h_c|_{W^L ins-fun}$ über dem stationären Wasser- Luft-Spiegel.

Für den Eintritt von Öl an jedem andern Ort, wo $h_c|_{W^L} \neq h_c|_{W^L ins-fun}$, d. h. mit anderer Kapillar-Druck-Höhe und in anderem Abstand zum Wasser-Luft-Spiegel muss das relative Ölpotential grösser sein. Jedes grössere relative Ölpotential impliziert einen höher liegenden Öl-Luft-Spiegel und einen tiefer liegenden Wasser-Öl-Spiegel. Jedes im Vergleich zum minimalen Eintrittspotential höhere Potential ist das Eintrittspotential von Öl für je einen Ort, S_1, oberhalb und einen Ort, S_2, unterhalb des Insular-Funikular-Übergangs zwischen Wasser und Luft, bezeichnet durch S_3.

Ausserhalb des Insularbereichs, d.h. für $h_c|_{W^L} > h_c|_{W^L ins-fun}$, ist lediglich ein Teil der Poren mit Wasser besetzt, die poröse Matrix ist mit Wasser nicht maximal erfüllt, sie ist teilgesättigt. Für solche Orte gilt, dass der Öl-Luft-Spiegel bei Eintritt des Öles um mindestens $h_c|_{O^L ins-fun}$ unterhalb dieses Eintrittsorts liegt. Für Orte mit maximaler Wassersättigung dagegen, d.h. im Insularbereich muss der Öl-Luft-Spiegel für einen Öleintritt über dem Eintrittsort liegen. Dies gilt allgemein, ausser für Eintrittsorte gerade unterhalb $h_c|_{W^L ins-fun}$, d.h. abgesehen von Ölpotentialen, die nur ganz wenig grösser als das minimale Eintrittspotential sind.

Obige Überlegungen zeigen, dass das Eintrittspotential eine Funktion der am Ort der Verdrängung aktuellen Wasser- Luft-Sättigung und damit abhängig vom dort aktuellen Kapillar-Druck zwischen Wasser und Luft ist. Das Eintrittspotential ist das für den Öleintritt an einem bestimmten Ort, d.h. bei einer bestimmten Kapillar-Druck-Höhe, erforderliche relative Ölpotential. Graphisch lässt sich dieses durch ΔH_i darstellen. ΔH_i ist die für einen Öleintritt bei $h_c|_{W^L} = h_c|_{W^L i}$ erforderliche Höhendifferenz, ΔH, zwischen dem Öl- Luft- Spiegel und dem Wasser-Luft-Spiegel. ΔH_{min} repräsentiert das minimale Eintrittspotential, d.h. das relative Ölpotential für einen Öleintritt dort, wo $h_c|_{W^L} = h_c|_{W^L ins-fun}$. ΔH_{min} bestimmt sich als

$$\Delta H_{min} = h_c|_{W^L ins-fun} - h_c|_{O^L ins-fun} \qquad (6)$$

Mit $h_c|_{O^L ins-fun} \approx 0{,}5\ h_c|_{W^L ins-fun}$, siehe *Schiegg* (1979, 45) ergibt sich

$$\Delta H_{min} \approx 0{,}5\ h_c|_{W^L ins-fun} \qquad (7)$$

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass nach Gl. (1) der zeitspezifische Sickerverlust umso geringer und damit das Retentionsvermögen umso grösser sind, je grösser die Zähigkeit des infiltrierenden Erdölderivates und je kleiner die relative sowie die spezifische bzw. die hydraulische Durchlässigkeit als auch der Potentialgradient normal zur Wandung sind. Bei grossen Wasser-Luft-Sättigungen ist die relative Durchlässigkeit für Öl klein. Für den Eintritt von Öl in eine poröse Matrix muss der Öl-Luft-Spiegel um mindestens $\Delta H_{min} \approx 0{,}5\ h_c|_{W^L ins-fun}$ über dem Wasser-Luft-

Spiegel liegen. Im Moment der Überwindung dieses Schwellenwertes tritt das Öl im Insular-Funikular-Übergang, d.h. zuerst an den Orten, wo $h_{c|W^L} = h_{c|W^L_{ins-fun}}$ in die poröse Matrix ein. Für den Öleintritt an allen andern Orten muss der Öl-Luft- Spiegel höher als $\triangle H_{min}$ über dem Wasser-Luft-Spiegel liegen. Für $\triangle H$, die unter $\triangle H_{min}$ liegen, ist ein Eintritt des Öles in eine hydrophile, poröse Matrix und damit in die Wandung eines unterirdischen Raumes nicht möglich, der Sickerverlust ist null und das Retentionsvermögen des Raumes hundertprozentig.
Der Bestimmungsaufwand der notwendigen Parameter für eine Beurteilung des Retentionsvermögens eines unterirdischen Raumes aufgrund solcher fundamentaler Überlegungen ist im allgemeinen grösser als der Aufwand für einen Infiltrationsversuch in situ. Anschliessend sind anhand eines Beispiels ein mögliches Vorgehen wie auch die Diskussion der experimentellen Resultate zur Abschätzung des Retentionsvermögens einer Kaverne dargestellt.

Beispiel aus der Praxis

Situation

Die Kaverne befand sich in kompaktem, gesundem Sandstein. Die Wände erwiesen sich aufgrund einer visuellen Inspektion als rissfrei. Riss- und Kluftfreiheit ist eine Voraussetzung für die der Studie zugrunde liegenden Überlegungen. Die Kavernenwandungen waren unverkleidet, feucht und mit einer im Laufe der Zeit natürlich gebildeten, schlammig-schleimigen Schicht überzogen.
Aufgrund von Voruntersuchungen musste auf einen gesättigten Gravitationsfluss entlang den Kavernenwandungen geschlossen werden. Gravitationsfluss impliziert einen über den Ort konstanten Potentialgradienten mit dem Wert 1, also Druck- und damit auch Sättigungskonstanz, womit $h_{c|W^L}$=konst. Gesättigt bedeutet, dass $h_{c|W^L} < h_{c|W^L_{ins-fun}}$. Indem kein Wasseraustritt beobachtet werden konnte, musste $h_{c|W^L} \geqslant 0$ sein. Somit galt entlang den Kavernenwandungen

$$0 \leqslant h_{c|W^L} = \text{konst} < h_{c|W^L_{ins-fun}} \tag{8}$$

Für vollständige Retention muss, wie oben erwähnt,

$$\triangle H < \triangle H_{min} \tag{9}$$

erfüllt sein. Diese Bedingung hat nur dann eine praktische Bedeutung, wenn Orte mit $h_{c|W^L} = h_{c|W^L_{ins-fun}}$ überhaupt existieren. Nach Gl. (8) traf dies im vorliegenden Fall aber nicht zu. Der über die Wandungen konstante Druck im Wasser war überall grösser, als dass das Öl wie bei $h_{c|W^L} = h_{c|W^L_{ins-fun}}$ mit $\triangle H_i = \triangle H_{min}$ in den Sandstein hätte eindringen können. Für Öleintritt bei einem $h_{c|W^L} = h_{c|W^L_{II}}$, welches (8) genügt, muss der Wasser-Öl-Spiegel tiefer liegen als bei minimalem Eintrittspotential und zwar um die Höhendifferenz, $\triangle h_{II}$, zwischen S_2 und S_3 in Bild 2.

$$\triangle h_{II} = (h_{c|W^L_{ins-fun}} - h_{c|W^L_{II}}) \tag{10}$$

Damit muss der Öl-Luft-Spiegel um $\triangle h_{II} \{(\rho_O-\rho_W)/(\rho_L-\rho_O)\}$ über jenem bei $\triangle H_{min}$ liegen. So ergibt sich bei Gültigkeit von Beziehung (8) ein für Öleintritt erforderliches resp. für vollständige Retention maximal zulässiges $\triangle H_i$ von

{(8) gilt}

$$\triangle H_{II} = \triangle H_{min} + (h_{c|W^L_{ins-fun}} - h_{c|W^L_{II}}) \frac{1-\rho_O}{\rho_O} \tag{11}$$

und mit Gl. (7)

{(8) gilt}

$$\triangle H_{II} \approx \tfrac{1}{2} h_{c|W^L_{ins-fun}} + (h_{c|W^L_{ins-fun}} - h \tag{12}$$

Zur Abschätzung des quantitativen Retentionsvermögens interessiert das freie, von Öl erfüllbare Volumen zwischen der für Öleintritt in die Kavernenwandung erforderlichen bzw. für vollständige Retention maximal zulässigen Ölspiegelhöhe, $h_{s|O^L_{zul}}$, und der geodätischen Höhe der Eintrittsstelle, h_E. Dieses Volumen ist eine Funktion der Höhendifferenz, H_O, zwischen diesen beiden Niveaus. H_O stellt die für den Eintritt des Öles minimale bzw. für vollständige Retention maximal zulässige Öleinstauhöhe über die betrachtete Eintrittsstelle dar. So ist H_O definiert als

$$H_O = h_{s|O^L_{zul}} - h_E \tag{13}$$

Der Schwellenwert $h_{s|O^L_{zul}}$ bestimmt sich aus $\triangle H = h_{s|O^L_{zul}} - h_{s|W^L} = \triangle H_{min}$, einer Beziehung aufgrund von Bedingung (9), zu

$$h_{s|O^L_{zul}} = \triangle H_{min} + h_{s|W^L}$$

und falls {(8) gilt} (14)

$$h_{s|O^L_{zul}} = \triangle H_{II} + h_{s|W^L}$$

Die geodätische Höhe der betrachteten Eintrittstelle lässt sich schreiben als Summe der in ihr angetroffenen Kapillar-Druck-Höhe und der Höhe des Wasser-Luft-Spiegels

$$h_E = h_{s|W^L} + h_{c|W^L} \tag{15}$$

Werden die Gl.(14) und (15) in Gl.(13) eingesetzt, ergibt sich

$$H_O = \triangle H_{min} - h_{c|W^L_{ins-fun}}$$

und falls {(8) gilt} (16)

$$H_O = \triangle H_{II} - h_{c|W^L_{II}}$$

Mit Gl. (7) folgt aus der ersten der beiden obigen Beziehungen, dass für vollständige Retention die Ölstauhöhe bezüglich eines Eintritts bei $h_c = h_{c|W^L_{ins-fun}}$ negativ ist, d.h. um mindestens $0{,}5 \cdot h_{c|W^L_{ins-fun}}$ unterhalb dieser Stelle liegen muss. Bei Gültigkeit der Beziehung (8) ergibt sich für H_O aus (16) mit (12)

$$H_O \approx \left(\frac{1}{\rho_O} - \frac{1}{2}\right) h_{c|W^L_{ins-fun}} - \frac{1}{\rho_O} h_{c|W^L_{II}} \tag{17}$$

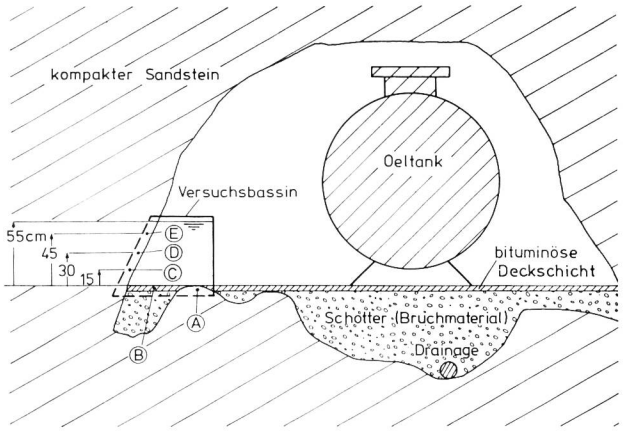

Bild 3. Prinzipskizze der Kaverne.

Infiltrationsversuch

Anstelle der Einzelbestimmung von $\triangle H_{II}$ resp. von $h_{c|W^L ins\text{-}fun}$ und $h_{c|W^L II}$ wurde durch das Experiment in situ direkt H_O bestimmt.

An einem für Boden und Wände repräsentativen Platz wurden zwei Versuchsbassins erstellt. Die Bassinwandungen bestanden aus zu einem U geformten Stahlblechen. Deren eine Stirnseite wurde in eine im Boden eingespitzte Nute einzementiert. Auf die gleiche Art wurden die abgeschrägten Bleche in die nach oben gegen innen geneigte Kavernenwand eingelassen. Die Höhe des grösseren Bassins betrug 60 cm. Die Infiltrationsflächen, die nach Abzug der Zementierungsnuten zur Verfügung standen, betrugen 83 cm auf 50 cm und 45 cm auf 29 cm.

Zuerst wurde im kleinen Bassin ein Bodeninfiltrationsversuch für Wasser durchgeführt. Dabei betrug der Überstau des Wassers 2 cm. Bei Homogenität und Isotropie des Untergrundes nähert sich die Infiltrationsrate bei stationärem Eingabedruck und nicht rückgestautem, eindimensionalem Abfluss asymptotisch dem Wert des Gravitationsflusses, d.h. dem Fluss bei Gradient 1, *Schiegg* (1975). Im vorliegenden Fall war die Infiltrationsrate schon nach kurzer Zeit konstant. Sie betrug 1 Liter pro 2½ Minuten. Damit lag die flächenspezifische Bodeninfiltrationsrate für Wasser bei 2 cm Überstau in der Grössenordnung von 18 cm/h.

Der Bodeninfiltrationsversuch für ein Dieselöl geschah im grösseren Bassin. Bei einem Überstau des Öles von etwa 7 cm zeigte die elektronische Aufzeichnung der Ölspiegelhöhe schon nach wenigen Minuten eine konstante Bodeninfiltrationsrate für Öl von 3 cm/h.

Eine einfach und sofort durchführbare Unterbrechung der Vertikalinfiltration von gestautem Öl kann dadurch erreicht werden, dass Wasser in den Staubereich eingeleitet wird. Das Wasser sinkt infolge seiner höheren Dichte gegenüber Öl auf den Boden und infiltriert anstelle des Öles. Bei einem diesbezüglichen Test stellte sich schon kurze Zeit nach Abschluss der Wassereingabe eine konstante Infiltrationsrate ein. Deren flächenspezifischer Wert betrug bei einem Eingabedruck von etwa 10 cm Wassersäulenhöhe annähernd 9 cm/h.

Zur Abschätzung von H_O, aber auch der Durchlässigkeit der Kavernenwandung wurde der Boden des grösseren Bassins – nachdem das Öl aus dem vorangehend beschriebenen Versuch abgesaugt worden war – mit einer etwa 3 cm mächtigen, thixotropen Schicht (Bentonit) überzogen und diese mit einer Alufolie abgedeckt. Nachdem die Blechwände des grösseren Bassins seitlich abgestützt worden waren, wurde dieses ohne Verletzung der erwähnten Dichtungsschicht mit Öl bis auf eine Höhe von 55 cm aufgefüllt. Nach 15 h betrug die Absenkung des gegen Verdunstung leider nicht abgedeckten Öl-Luft-Spiegels lediglich 2 bis 3 mm. Anschliessend wurde das Öl wieder abgesaugt.

Bei den Bodeninfiltrationen überraschte, dass der Verlauf der Infiltrationsraten schon nach kurzer Zeit auf konstante Werte einschwenkte. Dies bedeutete Inhomogenität, da sonst asymptotisches Verhalten sich hätte ergeben müssen. So wurden zum Aufschluss der vorliegenden Bodenverhältnisse die zwei vertikalen Profile A und B (Bild 3) erstellt. Im weiteren wurden die Horizontalprofile C, D und E erhoben, erstens zur Bestimmung der Grösse des für die vorausgesetzterweise gesättigte Kavernenwandung positiven H_O und damit des für vollständige Retention tolerierten Ölstaus über die betrachtete Stelle sowie zweitens zur Abklärung, ob für grösseren Ölstau eine Durchlässigkeit der Kavernenwandungen sich berechnen lasse, oder die beobachtete Absenkung des Öl-Luft-Spiegels lediglich eine Folge von Verdunstung war. Eine solche Erhebung bestand darin, dass in den drei Tiefen von 1 cm, 3 cm und 5 cm normal zur Oberfläche je eine Materialprobe herausgespitzt wurde. Es musste darauf geachtet werden, dass die Proben beim Ausbau nicht mit Öl infiziert wurden.

In Profil A war der anstehende Sandstein weich und mit einer Kelle schabbar. Alle drei Proben waren geringfügig verölt.

Im Profil B zeigte sich eine Deckschicht aus bituminösem Schotter. Diese war nach etwa zwei Tagen durch das eingegebene Dieselöl weitgehend aufgelöst und in eine klebrige Masse umgewandelt worden. Der Ölgehalt war gross. Der darunter liegende Schotter war stark verölt.

Im Profil C waren die ersten beiden Proben eindeutig verölt. In der Probe mit einem Horizontalabstand von 5 cm von der Oberfläche konnte kein Öl gefunden werden.

In den beiden Profilen D und E wurde innerhalb des ersten Zentimeters unter der Oberfläche eine nur geringfügige Verölung festgestellt. Sie war so schwach, dass daraus nicht auf einen Eintritt des Öles in die poröse Matrix des Sandsteins geschlossen werden konnte. Viel eher musste sie als Folge der Verölung an der Oberfläche interpretiert werden.

Hydraulische Durchlässigkeit des Kavernenbodens:
$k = 3 \cdot 10^{-3}$ cm/s

Die flächenspezifische Infiltrationsrate für Wasser in den noch nicht mit Öl verunreinigten Boden betrug 18 cm/h. Dass die Infiltrationsrate schon nach kurzer Zeit konstant war, zeigte, dass sie hauptsächlich durch die nur wenig mächtige, bituminöse Deckschicht bestimmt wurde und die darunterliegende Schotterschicht wesentlich durchlässiger sein musste. So war in der Schotterschicht ungesättigter, durch die Drainagevorrichtung belüfteter Abfluss zu erwarten. Demzufolge bestimmte sich aus dem vorhandenen Überstau des Wassers, $\triangle h$, von 2 cm bei einer Mächtigkeit m der bituminösen Schotterschicht von im Mittel 2 cm der Potentialgradient in erster Näherung als $(\triangle h + m)/m = 2$.

So ergab sich für die hydraulische Durchlässigkeit mit der gemessenen Infiltrationsrate nach expliziter Darstellung aus dem Gesetz von Darcy, Gl.(1), mit $k^r{}_{(s)} = k^r{}_{(1\text{-}RSL)} = 1$ ein k-Wert von $3 \cdot 10^{-3}$ cm/s. RSL bedeutet Residualsättigung von Luft.

Durchlässigkeit des Kavernenbodens für Dieselöl: $= k/12$

Für das mit 3 Centipoise gegenüber Wasser dreimal zähere Dieselöl musste die Infiltrationsrate bei gleicher relativer Durchlässigkeit und gleichem Potentialgradienten wie für Wasser (18/3) = 6 cm/h sein. Bei dem höheren Potentialgradienten von $\{(7 \cdot 0{,}85) + 2\}\ 0{,}5 = 4$ musste die Infiltrationsrate das Doppelte, also 12 cm/h betragen. 0,85 ist die Dichte des Dieselöls.Dass die Infiltrationsrate nur 3 cm/h war, zeigte, dass die relative Durchlässigkeit für Öl ¼ von jener für Wasser sein musste. Daraus kann entsprechend Bild 1 geschlossen werden, dass der Kavernenboden, und damit die bituminöse Deckschicht im speziellen, einen ansehnlichen Wassergehalt aufwiesen. Damit war die Durchlässigkeit des Kavernenbodens für Dieselöl

$$(\mu_W/\mu_O)\,(k^r{}_O/k^r{}_W) \cdot k = k/12.$$

Durchlässigkeit des mit Öl verunreinigten Kavernenbodens für Wasser: $= k/6$

Die 10 cm Eingabedruck ergaben bei einer Mächtigkeit der bituminösen Schotterschicht von 2 cm einen Potentialgradienten von (10+2)/2=6. Die mit 9 cm/h bei einem Gradienten von 6 gegenüber 18 cm/h bei einem Gradienten von 2 für den nicht mit Dieselöl verunreinigten Boden und damit bei 3fachem Potentialgradienten nur halb so grosse Infiltrationsrate zeigte, dass die relative Durchlässigkeit für Wasser infolge der teilweisen Verstopfung des Porenraumes durch Dieselöl ⅙ betrug.

Ölstauhöhe H_O : 25 cm $< H_O <$ 40 cm

Die Materialproben aus den Profilen D und E, 25 cm bzw. 10 cm unter dem Öl-Luft-Spiegel, erwiesen sich als praktisch nicht ölhaltig. An der untersten Probenentnahmestelle mit 40 cm Ölstauhöhe war das Öl innert 15 h etwa 4 cm horizontal in den Sandstein infiltriert.
Aus diesen Gegebenheiten kann geschlossen werden, dass H_O, die für vollständige Retention maximale bzw. für Öleintritt minimale Ölstauhöhe, zwischen 25 cm und 40 cm liegen musste. Die Existenz eines Eintritts-Schwellenwertes bestätigte, dass der Sandstein der Kavernenwandung mit Wasser gesättigt bzw. die Luftsättigung residual war. Im weiteren folgt für Stauhöhen des Öles unter 25 cm vollständige Retention. Aufgrund des vorhandenen Gravitationsflusses des Wassers und damit Druckkonstanz über den Ort gilt diese Aussage unabhängig vom Ort.

Durchlässigkeit der Kavernenwandung für Öl:

$$\begin{cases} k_O = 0 & \text{(für Ölstauhöhen } < H_O) \\ k_O < 10^{-4}\text{cm/s} & \text{(für Ölstauhöhen } > H_O) \end{cases}$$

Die Weg-Zeit-Funktion der Front einer kolbenförmigen horizontalen Verdrängung bei konstantem Eingabedruck ergibt sich durch analytische Integration als quadratische Beziehung von der Form

$$t_F = (\mu_O \cdot n \cdot \triangle S \cdot x_F^{\kappa}) \,/\, (\kappa \cdot k^r \cdot K \cdot p_\alpha) \qquad (18)$$

n bedeutet die Porosität, $\triangle S$ die Ölsättigung, x_F den Abstand der Front von der Eingabestelle, t_F die Zeit seit Beginn der Infiltration und p_α den Eingabedruck. Bei Verdrängung von Luft durch Öl gilt $\kappa = 2$, wird gleiches Öl verdrängt ist $\kappa = 1$. Für die Verdrängung von Wasser durch gegenüber diesem zäheres Öl resultiert ein t_F, das zwischen jenem für $\kappa = 1$ und $\kappa = 2$ liegt. Im weiteren besteht dann entlang der Front des nicht benetzenden Öles kein kapillarer Sog, so dass dessen Eingabedruck p_α gleich $h_O \cdot \rho_O \cdot g$ gesetzt werden kann. h_O bestimmt sich in Profil C als h_O = 55 cm-15 cm-H_O. Mit $H_O \approx 39$ cm befindet man sich für eine Abschätzung der Durchlässigkeit der Wandungen bezüglich der unerwünschten Ölinfiltration auf der ungünstigen und damit sicheren Seite. So resultiert für h_O = 1 cm. n kann in erster Näherung zu 0,3, $\triangle S$ zu 0,5 und k^r zu 0,3 angenommen werden. Mit den gemessenen x_F = 4 cm und t_F = 15 h ergibt sich aus Gl. (18) eine nach Gl. (2) zur hydraulischen Durchlässigkeit analoge Durchlässigkeit für Öl von

$$k_O = \frac{K \cdot \rho_O \cdot g}{\mu_O} = \frac{n \cdot \triangle S \cdot x_F^{\kappa}}{\kappa \cdot k^r \cdot t_F \cdot h_O} < 10^{-4}\text{cm/s} \qquad (19)$$

Retentionsvermögen

Vollständige Retention ist gewährleistet für Stauhöhen des Öles unter 25 cm. Dieses Aussage gilt für die Kavernenwandungen, nicht aber für den Kavernenboden, da das Öl in die bituminöse Deckschicht und den darunterliegenden Schotter ohne Überdruck und damit lediglich aufgrund der Gravitation infiltrieren konnte. Wird zur quantitativen Abschätzung des vollständigen Retentionsvermögens der Wert H_O als die über dem Kavernenboden zulässige Stauhöhe des Öles angenommen, so setzt dies voraus, dass der unterliegende Schotter über die vorhandene Drainagevorrichtung drainiert wird und so sich in dessen Porenraum kein massgeblicher Ölstau aufbauen kann.
Ist die Stauhöhe des Öles grösser als H_O, so infiltriert das Öl in den Sandstein. Indem aber k_O nach Gl. (19) $< 10^{-4}$cm/s ergibt sich auch dann noch ein massgebliches Retentionsvermögen.

Sanierungs- und Schutzmassnahmen nach einem Ölunfall

1. Unterbinden eines weiteren Auslaufens von Öl aus dem lecken Tank.
2. Wasser in den Kavernenraum einleiten. Dies bewirkt den Unterbruch einer weiteren Vertikal- Infiltration von Öl, indem dann anstelle des leichteren Öles das schwerere Wasser infiltriert. Dadurch wird das Gesamtvolumen infiltrierenden Öles minimiert.
3. Abpumpen des Öles aus dem freien Kavernenraum, aber auch aus dem Schotterbereich, was zweckmässigerweise über die Drainagevorrichtung und einen Ölabscheider geschieht.
4. Solange funikulares Öl innerhalb der Kavernenwandungen vermutet wird, soll die Wassersättigung im Sandstein möglichst hoch gehalten werden. Dies kann durch Berieselung des Bodens über der Kaverne oder durch eine vorübergehende Unterbrechung einer möglicherweise vorhandenen Grundwasserabsenkung zur Trockenlegung der Kaverne usw. geschehen. Durch die demzufolge höhere Wassersättigung und damit geringere relative Durchlässigkeit für Öl wird dessen Ausbreitung gehemmt. Bei genügend hohem Wasserdruck kann funikulares Öl gar aus den Kavernenwandungen wieder rückverdrängt werden.
5. Nach Unterbruch der Ölinfiltration reduziert sich die Ölsättigung infolge Gravitation oder Verdrängung mit der Zeit auf den Residualwert. Der mikrobielle Abbau residualer Ölsättigungen geschieht umso leichter, je besser belüftet ein Porenraum ist. Dies erfordert, dass – nachdem sich die Ölsättigung auf Residualsättigung abgebaut hat – einerseits die Wassersättigung möglichst tief gehalten wird, d.h. eine eventuelle Möglichkeit einer Grundwasserspiegelabsenkung vollständig ausgenützt und andererseits eine oberflächliche Infiltration möglichst unterbunden wird.

Literatur

Schiegg H. O.: Liquid air displacements in a homogeneous, isotropic, porous media; XVIth IAHR-Congress, Sao Paolo, Vol. 3. (1975).

Schiegg H. O.: Verdrängungs-Simulation dreier nicht mischbarer Fluide in poröser Matrix; Mitt. Nr. 40 der VAW/ETH-Z. (1979).

Versluys J.: Edge-water encroachment; Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol., Vol. 15. (1931).

Wyckoff R. D. and Botset H. G.: The flow of gas-liquid mixtures through unconsolidated sands; Physics, Vol. 7. (1936).

Adresse des Verfassers: Dr. *H. O. Schiegg*, Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie; Eidg. Techn. Hochschule, CH - 8092 Zürich, ab 1. 12. 79 Elektrowatt Ingenieurunternhmung AG, Postfach, 8022 Zürich.