Zeitschrift: Schweizer Ingenieur und Architekt
Herausgeber: Verlags-AG der akademischen technischen Vereine
Band: 106 (1988)
Heft: 6

Artikel: Tiefensickerung aus Böden über einer Schotterunterlage
Autor: Flühler, Hannes
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-85634

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: 08.08.2025

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

Die Erwähnung der Untergrundspeicherung im Gesetz ist deshalb von Bedeutung, weil es ausserordentlich lange dauerte, bis die Grundwasserwirtschaft von der Untergrundspeicherung von Trinkwasser Gebrauch machte. Obwohl Koehne [27] bereits 1941 auf die Wasserspeicherung im Untergrund aufmerksam machte, gelang es erst 1965, den Fachleuten die Wirkung der Untergrundspeicherung von Trinkwasser am Beispiel des Eulachgrundwasserstromes in Winterthur zu demonstrieren. Zwischenzeitlich hat die Untergrundspeicherung auch bei der Gelsenwasser Einzug gehalten [28] und eine Anlage für die Gruppenwasserversorgung Lattenbuck im Kanton Zürich ist zurzeit im Bau.

Damit sind Ansätze zur planmässigen und gezielten Bewirtschaftung des Grundwassers in der Schweiz sichtbar geworden. Sie werden mit der vermehrten Anwendung von Grundwassermodellen im praktischen Wasserwerksbetrieb ohne Zweifel an Bedeutung gewinnen.

Beispiele dafür sind die «Modellstudie zur Bestimmung des Grundwasserdargebotes im Testgebiet Emmental» [29], die vom Schweiz. Nationalfonds zur Förderung der wissenschaftlichen Forschung (NF) mit finanziert wurde, und die Bewirtschaftung des Grundwasserwerkes Hardhof der Wasserversorgung Zürich [30], bei dem Uferfiltrat aus der Limmat mittels Schluckbrunnen und Anreicherungsbecken derart in den Untergrund eingespeist wird, dass das autochthone «Stadtwasser» abgedrängt und somit nicht mit den Horizontalfilterbrunnen mit gefördert wird.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. e.h. *E. Trüeb*, ETH Zürich, 8093 Zürich-Hönggerberg.

Tiefensickerung aus Böden über einer Schotterunterlage

Die Tiefensickerung aus zweischichtigen Böden mit einem feinkörnigen, verwitterten Oberboden (Wurzelraum) und einer unverwitterten grobkörnigen Schotterunterlage fällt nur während weniger Tage im Jahr ins Gewicht. Die im wassergesättigten Zustand gut durchlässige Grenzschicht zwischen der unverwitterten Schotterunterlage und dem darüberliegenden Boden wirkt infolge ihrer kapillaren Diskontinuität als schlecht durchlässige Barriere. Solange die Vegetation dem Wurzelraum Wasser entzieht, werden das Wasser und die darin enthaltenen Nährstoffe - unter anderem auch das Nitrat - über längere Zeiträume zu einem guten Teil im Wurzelraum zurückgehalten. Die Tiefensickerung und Stoffauswaschung sind in solchen Böden pulsartig rasch, von kurzer Dauer und räumlich heterogen.

Bedeutung und Verbreitung von zweischichtigen Bodenprofilen

VON HANNES FLÜHLER, ZÜRICH

Zweischichtprofile spielen für den Schutz des Grundwassers eine besondere Rolle. Sie weisen einige hydrologische Besonderheiten auf. Der abrupte Wechsel in der Körnung am unteren Rand des Wurzelraumes, also die kapillare Diskontinuität, bewirkt, dass die Tiefensickerung vom Frühjahr bis in den Herbst nahezu unterbunden ist und das Wasser zum grössten Teil im Wurzelraum gespeichert und somit pflanzenverfügbar bleibt.

Alluviale Aufschwemmungen auf kiesig-sandigen Schottern waren beziehungsweise sind in ebenen Lagen des schweizerischen Mittellandes auf grossen Flächen das Ausgangsmaterial für die Bodenbildung. In rezenten Alluvionen (Auenstandorte) beginnt die Bodenbildung nach jeder grösseren Überschwemmung wieder von vorne. Die gebänderten Profile mit Schichten variabler Mächtigkeit, mit variabler Textur (Ton-Silt-Sand-Anteile) und mit variablem Gehalt an organischem Material sind eine Aufzeichnung der Ablagerungsgeschichte (Bild 1). Späteiszeitliche Alluvionen anderseits wurden seit einigen Jahrtausenden nicht mehr überschichtet. Die Verwitterung dieser Ablagerungen von Kiesen, Sanden und feineren Komponenten verschiedener Herkunft, also eines mineralogisch heterogenen Materials, führte in vielen Fällen zur Bildung von Parabraunerden (Bild 2).

Dieser Bodentyp ist in unseren Regionen über grösseren Grundwasserträgern stark verbreitet. Das in der Regel gut durchlässige, vorwiegend silikatische und höchstens mässig karbonathaltige Material des Oberbodens wurde gut durchwaschen und entkarbonatet. Die Verwitterungsprodukte wurden in partikulärer und gelöster Form, das heisst als Tonteilchen und Ionen, innerhalb oder aus dem Profil in die kiesige Unterlage verfrachtet.

Das Ausgangsmaterial (Muttergestein) des von den Bodenbildungsprozessen geprägten Bodenraumes und dasjenige der unverwitterten Unterlage war bei skeletthaltigen Parabraunerden ursprünglich profilumfassend dasselbe. Feintexturierte, skelettfreie Parabraunerden mit einer deutlichen Tonverlagerung im Profil sind das Ergebnis einer Übersandung der Schotterfelder, welche die Ausprägung des Zweischichtprofils verstärkte (Bild 3). In beiden Fällen ist der verwitterte Bodenraum feinkörnig und die Unterlage grobkörnig. Die Tonanreicherung am unteren Rand des verwitterten Bodenraumes verstärkt zudem die Diskontinuität der Körnung und Kapillarität.

In diesem Beitrag soll auf einige Besonderheiten solcher Böden hingewiesen werden. Diese sind nicht nur im oben erwähnten Zusammenhang wichtig, sondern auch im Falle der Bemessung und Ausformung von Deponieabdeckungen, bei welchen man die Eigenschaften einer kapillaren Diskontinuität ausnützen kann.

Luft-Wasser-Grenzflächen und Sickerung an Schichtgrenzen

Im ersten Fall betrachten wir die Phasengrenze Wasser-Luft an der Grenze zwischen einem feinsandigen Oberboden und einer Unterlage aus Kies ohne Feinanteil. Die Schichtgrenze sei horizontal. Die Differenz zwischen dem Druck im Bodenwasser und in der Bodenluft, also $\Delta P = P_W - P_L$, bestimmt die Form der Menisken (Wasser-Luft-Grenzflächen in Poren oder Spalten). Im wasserungesättigten Boden ist die Druckdifferenz negativ und wird je nach Anwendungsgebiet Saugspannung, Kapillarspannung oder Matrix-

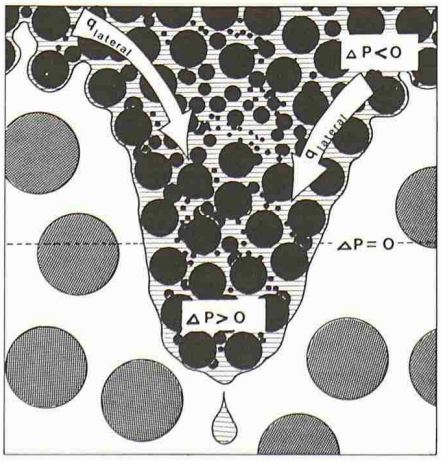
Bild 1. Auenwaldboden «Flutinsel» (Richard + Lüscher, Bd. 2, 1981)

Bild 2. Parabraunerde «Hard» (Richard + Lüscher, Bd. 5, im Druck)

potential genannt und in Druckdimensionen (identisch mit der Dimension Energie pro Volumen) ausgedrückt (1 h Pa ≈ 1 cm Wassersäule).

Aus Bild 4 ist ersichtlich, dass im hypothetischen Fall einer «kapillar unwirksamen» Kiesunterlage mit einem minimalen Porendurchmesser von $\varnothing_{min} \approx$ 0,8 cm nur dann eine Tiefensickerung möglich ist, wenn das Bodenwasser an der Schichtgrenze unter einem (positiven) hydrostatischen Druck ($\Delta P > 0$) steht. Der Mittelpunkt des Krümmungsradius liegt dabei im Wasser. Der hier angegebene Grenzdurchmesser von 0,8 cm, welcher «kapillar wirksame» von «kapillar unwirksamen» Poren abgrenzt, entspricht einer kapillaren Steighöhe, die gerade dem Porenradius entspricht. Den oben beschriebenen «Abtropfeffekt» kennt jeder aus eigener Anschauung: Ein Schwamm tropft nur, wenn er wassergesättigt ist oder wenn man ihn durch Drücken zur «Sättigung» bringt.

Bild 5. Idealisierte Form der Phasengrenze an geneigten Schichtgrenzen



Ist die Druckdifferenz ΔP durch die Phasengrenze null oder negativ, die Saugspannung $\psi < 0$, (der Mittelpunkt des Krümmungsradius liegt dabei in der Luft), dann ist die Schichtgrenze «undurchlässig». Schwach gebundenes Wasser ($0 > \psi > -100$ hPa), also das sogenannte Gravitationswasser, wird an einer solchen Grenzschicht «gestaut».

Im Boden sind Schichtgrenzen nie horizontal. Das Auskeilen abgelagerter Schichten, das Relief der Bodenoberfläche vor und nach der Ablagerung waren selbst in grossräumig ebenen Lagen unregelmässig. Niveauunterschiede der Bodenoberfläche oder der Grenzschicht modifizieren die bodenbildenden Prozesse. An gut durchwurzelten Stellen am unteren, tonreicheren, feuchteren Rand des feintexturierten Bodenraumes ist die Verwitterung besonders wirksam. Schon eine geringe Abtiefung der Verwitterungsfront verursacht eine laterale Wasserbewegung in Richtung der «stalaktitenförmigen Abtropfstellen». An einer geneigten Schichtgrenze ist der Druck im Bodenwasser lageabhängig, der Druck in der profilumfassend zusammenhängenden Bodenluft aber konstant. Im praktisch wassergesättigten Zustand kann an tiefer liegenden Ausbuchtungen somit ein Druck ($\Delta P > 0$) und an höher liegenden Stellen eine Saugspannung ($\Delta P < 0$) herrschen (Bild 5).

Dieser erhöhte Durchfluss an den tiefsten Stellen wiederum beschleunigt die Verwitterung. Bei kleinen Sickerraten ist die Schichtgrenze an wenigen tief gelegenen Stellen «durchlässig». Die Stromlinien konvergieren in Richtung der relativen Lageminima der Schichtgrenze. Bei höheren Sickerraten hingegen nimmt diese «Abtropffläche» zu. Dieses Fliessmuster verursacht namentlich beim Transport von im Bodenwasser gelösten Stoffen eine beträchtliche räumliche Variabilität der Stoffkonzentrationen.

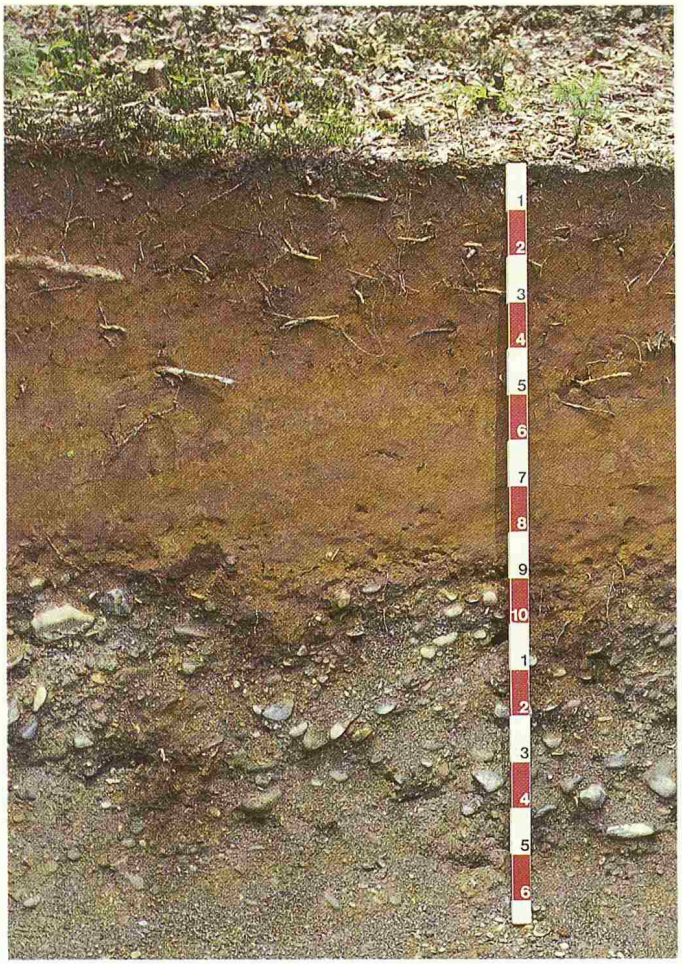


Bild 3. Parabraunerde «Winzelerboden» (Richard + Lüscher, Bd. 3, 1983)

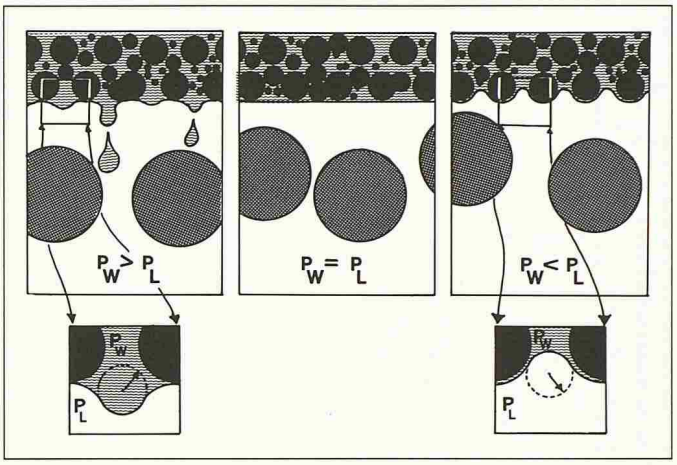


Bild 4. Idealisierte Form der Phasengrenze am unteren Rand eines feintexturierten Materials über einer kapillar nicht wirksamen Unterlage

Sickervorgänge durch die Grenzschicht in einer Parabraunerde

Künstliche Schüttungen aus Sickermaterialien sollen kapillar unwirksam sein. Natürliche Schotterunterlagen weisen jedoch – besonders unmittelbar unter dem verwitterten Oberboden – einen gewissen Feinerdeanteil (∅ < 2 mm) auf und sind deshalb, wenn auch beschränkt, kapillar wirksam. Die unverwitterten Feinanteile sind aber grobkörniger als jene im überliegenden, verwitterten Material. Die hydraulischen Eigenschaften der beiden Horizonte über und unter der Grenzschicht sind deshalb sehr verschieden (Bilder 3 und 4, Daten nach Vogelsanger 1986 und Hurst 1987)[1]. Die Desorptionskurven ψ (θ), Bild 6, also die Beziehung zwischen Wassergehalt und Saugspannung, wurden sowohl im Labor an 31 grossen, gut aufgesättigten Bodenproben (dünne Linien) und anderseits im Felde durch Messungen mit Tensiometern (Saugspannungsmessung) und Neutronensonde (Wassergehaltsmessung) (dicke Linien) bestimmt. Die punktierten Linien sind eine Extrapolation der im Felde ermittelten Beziehung ψ (θ). Die ungesättigten Wasserleitfähigkeiten $k(\psi)$, dargestellt in Bild 7, wurden ausschliesslich im Felde durch wiederholte Aufsättigung des Bodenprofils und anschliessender Drainage ermittelt (Hurst 1987). Bei konstanter Saugspannung durch die Grenzschicht hindurch (hydraulischer Gradient = −1,0) ist die Leitfähigkeit der unverwitterten Schotterunterlage etwa 100mal kleiner als jene des verwitterten Materials. In Bild 8 sind die Saugspannungsverteilungen dargestellt, die sich aufgrund der beiden Leitfähigkeitsfunktionen (Bild 7) bei stationärer Sikkerung ergäben. Der Saugspannungsbereich, bei welchem die Tiefensickerung eine Rolle spielt, liegt in der Schotterunterlage zwischen $\psi > -30$ hPa. Während der insgesamt 300 Ablesungen (1978–1980) an den 36 in die Schotterunterlage gesetzten Tensiometern (Vogelsanger 1986) lag die mittlere Saug-

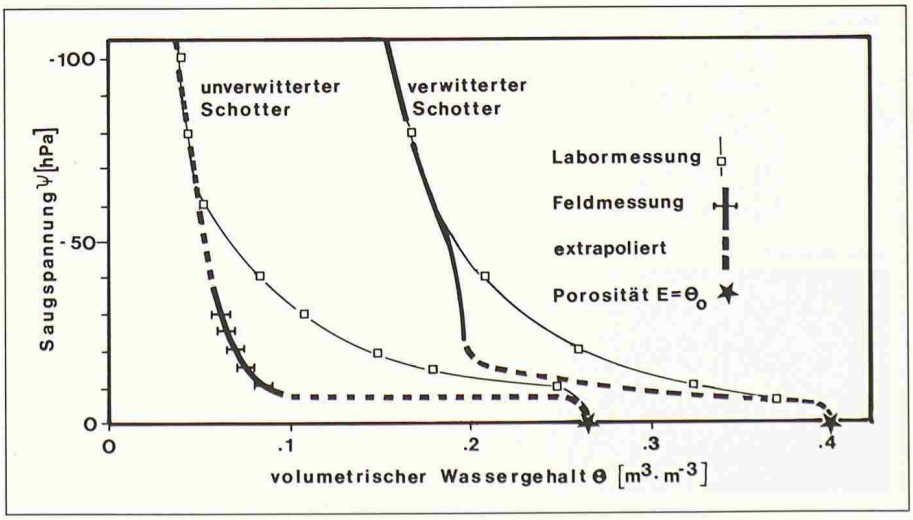


Bild 6. Desorptionskurven: Beziehungen zwischen Wassergehalt und Saugspannung. Die dünn ausgezogene Linie entspricht den im Labor an 3 Liter grossen Bodenproben bestimmten Werten. Die Steigung der im Felde bestimmten Beziehung $\psi(\theta)$ (dick ausgezogene Linie) ist deshalb viel grösser, weil unter Feldbedingungen die anfängliche Wassersättigung sehr viel geringer ist als bei den im Labor durch Aufstauen gesättigten Proben

[1] Die beiden hier zitierten Dissertationen von *Vogelsanger* (1986) und *Hurst* (1987) sind ein Ergebnis der Zusammenarbeit zwischen Prof. Dr. *F. Richard* (†1984) und Prof. Dr. *Th. Dracos*.

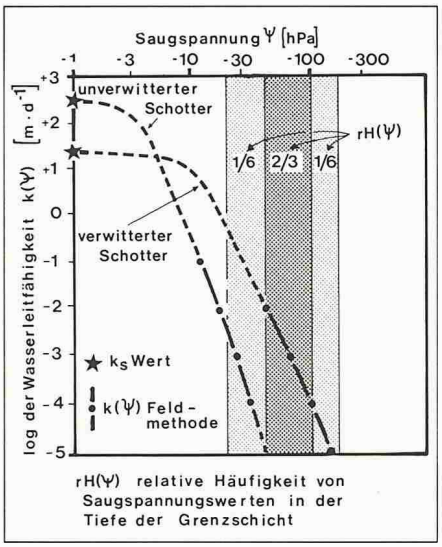
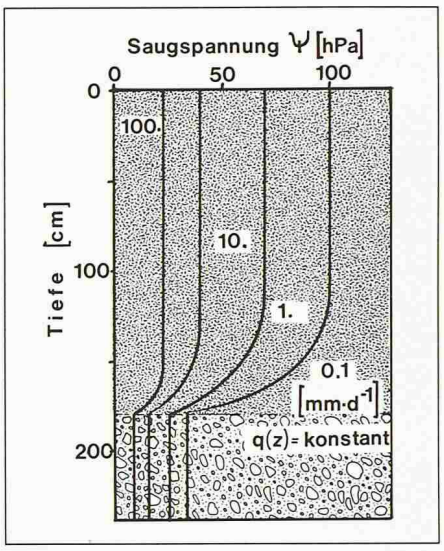


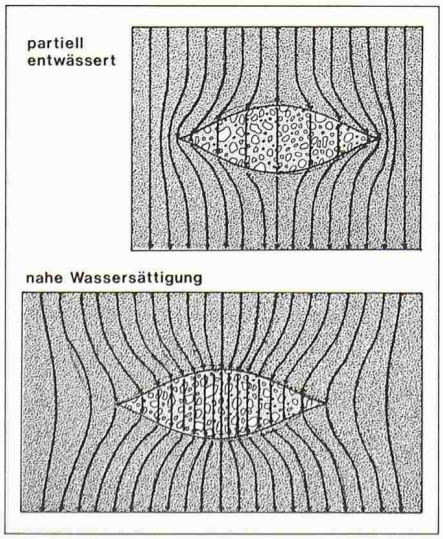
Bild 7 (links). Ungesättigte Wasserdurchlässigkeit k(ψ). Die dick ausgezogene Linie wurde im Feld bestimmt. Die punktierte Linie ist eine Inter- und Extrapolation. Das Sternsymbol bezeichnet den k_s-Wert (Leitfähigkeit bei vollständiger Sättigung). Die gerasterten Bänder illustrieren die Häufigkeit (als Anteil aller 300 Ablesungen) der im unverwitterten Schotter gemessenen Saugspannungen

Bild 8 (rechts). Saugspannungsverteilung durch zwei Schichten bei stationären Sickervorgängen (Zahlen bedeuten den Wert des konstanten Flusses)



spannung an 250 von 300 Ablesetagen bei < −40 hPa (−40 cm Wassersäule). Unter solchen Bedingungen betrug die Leitfähigkeit nach Bild 7 etwa 0,01 mm · d^{-1}. An lediglich 6 von 300 Ablesungsdaten lag die Saugspannung in der Schotterunterlage zwischen −20 und −25 hPa (und nur einmal noch tiefer, nämlich bei −9 hPa). Diesen Werten entsprechen feldgemessene Leitfähigkeiten von etwa 1–10 mm · d^{-1} (bzw. 20 cm · d^{-1}). Die Tiefensickerung wäre also nur während kurzen Zeitspannen unterhalb der tiefsten Stellen der Grenzschicht festzustellen. Diese zeitliche und räumliche Variabilität von möglichen Messvariablen, wie beispielsweise der Stoffkonzentration, stellt erhebliche Probleme im Hinblick auf die Erfassung des flächenbezogenen Stoffaustrages.

Bild 9. Schematische Darstellung des Strömungsfeldes im Bereich einer «Kiestasche». Bei hoher Wassersättigung konvergieren die Stromlinien in die Kiestasche, bei stärkerer Entwässerung divergieren sie



Da der untere Rand des an sich gut durchlässigen, verwitterten Bodenraumes infolge der kapillaren Diskontinuität der Porenstruktur während 95% des Jahres nur schlecht Wasser leitet, ist die im Wurzelraum, namentlich in diesem unteren Randbereich gespeicherte leicht pflanzenverfügbare Wassermenge beträchtlich.

Schlussfolgerungen

In der wasserungesättigten Zone können kapillare Diskontinuitäten den Wasser- und damit auch den Stofftransport drastisch beeinflussen. Dies gilt selbstverständlich auch für andere strukturelle Diskontinuitäten wie zum Beispiel die im verwitterten Oberboden beobachtbare Horizontierung. Unregelmässige Schichtgrenzen und kiesige Sandlinsen können je nach Saugspannungsbereich und Leitfähigkeitsfunktionen zu erheblichen lateralen Umverteilungen von Wasser und gelösten Stoffen führen. Je nachdem wie stark eine Kiestasche (oder auch eine Sandlinse) entwässert ist, kann sie als eine durchlässige Passage oder als stauende Zone wirken. Dies ist in Bild 9 schematisch dargestellt. Um diese beiden Fälle zu unterscheiden, bezeichnen wir die Saugspannung beim Schnittpunkt der Leitfähigkeitsfunktionen zweier angrenzender poröser Medien als ψ_k. Liegt die Saugspannung in und um eine Kiestasche im Bereich von $\psi > \psi_k$, dann konvergieren die Stromlinien in den in diesem Zustand durchlässigeren Bereich. Liegt die Saugspannung im stärker entwässerten Bereich von $\psi < \psi_k$, dann wirkt diese als Stauschicht. Die gleichen Überlegungen liessen sich für geneigte Schichten, also beispielsweise für Deponieabdeckungen durchführen. Oberhalb eines kritischen Saugspannungsbereiches wäre in einem solchen Fall das feintexturierte, überliegende Material die wasserleitende Schicht.

Die räumliche Heterogenität der Bodenstruktur, und dies ist letztlich die Konsequenz dieser Analyse, führt auch im wasserungesättigten Boden zu lateralen Wasserflüssen. Diese Heterogenitäten in bezug auf Wasser- und Stofftransport zu quantifizieren ist ein noch zu lösendes Problem.

Adresse des Verfassers: Prof. Dr. *Hannes Flühler*, Professor für Bodenphysik, ETHZ, 8093 Zürich.

Referenzen

Hurst, A., 1987: Diss. ETH Nr. 8239. Wirkung von Bodenabkühlungen auf die Wasserbilanz und das Wachstum von Bäumen. 201 S.

Vogelsanger, W. 1986: Der Wasserhaushalt eines zweischichtigen Bodenprofiles unter Waldbestockung, dargestellt an einer sandigen Parabraunerde über Schotter. Mittlg. EAFV, Vol. 62 (2), 103–327

Richard, F. und *P. Lüscher*, 1983: Physikalische Eigenschaften von Böden der Schweiz. Bd. 2 und 3, Eidg. Anst. forstl. Vers'wesen, Birmensdorf, Schweiz.