



Geohydraulische Grundlagen typischer Deichsysteme in Bayern

Ronald Haselsteiner

Kurzfassung

Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern bilden durch ihren spezifischen Aufbau und dem darunter liegenden Untergrund Deichsysteme. Die stationäre und ggf. auch instationäre Durchsickerung müssen für die Bemessung dieser Erdbauwerke abgeschätzt werden. Im folgenden Beitrag werden die Grundlagen, die zur Abschätzung bzw. Berechnung der Durchfeuchtung notwendig sind, beschrieben und praktische Hinweise zur Festlegung von Kenngrößen wie z. B. der gesättigten Durchlässigkeit am Beispiel charakteristischer, im Deichbau verwendeter Böden gegeben.

Abstract

Flood protection dikes (levees) at rivers are structures that consist of both embankment with a special design and subsoil. For the determination of design loads steady and where necessary unsteady seepage flows have to be estimated. The following paper contains basic considerations for seepage calculation and estimations as well as practical advices for the choice of soil parameters such as the saturated conductivity. Therefore examples are given, relying on characteristic soil materials that occur in dikes in Bavaria.

1 Einleitung

Bei der Bemessung von Hochwasserschutzdeichen werden häufig stationäre Durchsickerungszustände herangezogen, um den hydraulischen Belastungszustand entsprechend der jeweiligen Lastfälle zu bilden. DIN 19712/1997 gibt hierzu den Hinweis: *„Bei dem Entwurf und der Berechnung von Deichen mit und ohne Dichtungen ist mit der Möglichkeit einer völligen Durchsickerung bis zur landseitigen Böschung zu rechnen.“* Weiter führt diese Norm aus: *„Von Verlauf und Dauer des Hochwassers sowie von der Durchlässigkeit des Deichmaterials hängt es ab, ob die Deiche einer teilweisen oder einer völligen Durchsickerung ausgesetzt sind.“* Da selten charakteristische Hochwasserganglinien vorhanden sind und bei bestehenden Deichen der Aufbau des Deiches unklar ist, wird meistens auf die Betrachtung der instationären Durchsickerungsverhältnisse verzichtet. DIN 19712/1997 räumt jedoch ein, dass eine instationäre Betrachtung möglich ist: *„In Einzelfällen können genauere Nachweise erforderlich werden, bei denen die Wechselwirkung zwischen Absinkgeschwindigkeit des Flußwasserspiegels, der Lage der Sickerlinie im Deichkörper bei HW_B und der Durchlässigkeit berücksichtigt wird.“* Auch SCHMIDBAUER & ERB (1958) bemerken bereits, dass *„genau geprüft werden [muss], ob die Bemessung eines kurzzeitig*

eingestauten Deiches nach der Durchfeuchtungsgrenze erfolgen kann oder ob vorsorglich die stationäre Sickerströmung und Sickerlinie zugrunde gelegt werden müssen.“

Selbe Grundsätze gelten bei steigendem wie fallenden Wasserstand. In DIN 19712/1997 wird eigens auf Folgendes hingewiesen: *„Für die Standsicherheit der wasserseitigen Böschung kann der fallende Wasserspiegel kritisch sein.“* Hiezu kann laut DIN 19712/1997 die Sickerlinie nach Erreichen der stationären Verhältnisse für ein Absinken des Wasserstandes auf ein Drittel des Einstauwasserstandes angesetzt werden. Dies ist zwar eine ungünstige Annahme, sie kann jedoch trotzdem auf der unsicheren Seite liegen. In den meisten Fällen würde dieser Ansatz aber eine Überdimensionierung der wasserseitigen Böschungsstandsicherheit nach sich ziehen. Da jedoch genügend Ansätze existieren, um die Durchsickerungszustände innerhalb von Böschungen von Erdbauwerken bei fallendem Wasserstand abzuschätzen (siehe z. B. UHLIG 1962, HASELSTEINER 2007), kann von einer pauschalen Anwendung dieses Ansatzes i. d. R. abgesehen werden. Voraussetzung ist natürlich, dass Anhaltswerte der möglichen Abstiegsgeschwindigkeiten des Wasserstandes vorhanden sind. Können ganze Bemessungsganglinien herangezogen werden, ist es auch möglich und im Einzelfall sicherlich notwendig, die Durchsickerungsverhältnisse und somit die maßgebenden hydraulischen Durchfeuchtungszustände unter Zuhilfenahme einer instationären Berechnung abzuschätzen.

Ganz abgesehen von den Einwirkungen und zugrunde zu legenden Lastfällen (DIN 1054/2005) liegt eine Streuung der geohydraulischen Kennwerte und der bodenphysikalischen Zusammenhänge vor, die auf die Durchsickerung entsprechende Auswirkungen hat. Sowohl bei der Festlegung der Bodenkennwerte und des Saugspannungsverhaltens als auch bei der Interpretation der Berechnungsergebnisse sollte deshalb die Streuung und ihre Auswirkungen berücksichtigt werden, nicht zuletzt um die Bemessung mit entsprechender Sicherheit durchführen zu können.

2 Geohydraulische Systeme typischer Hochwasserschutzdeiche

Obwohl eine pauschale Betrachtung von Deichsystemen nicht möglich ist, können dennoch einige, häufig vorkommende Deichsysteme unterschieden werden. Dabei kommt dem Vorkommen einer bindigen Deck- bzw. Auelehmschicht entscheidende Bedeutung zu, da diese aufgrund ihrer geringen Durchlässigkeit die Vorgänge der Durchsickerung von Deich und Untergrund trennen kann.

2.1 Systemaufbau

Der Untergrund von Talauen wird in Bayern häufig aus durchlässigen Kiesen in wenigen Gebieten aus Sanden gebildet. Darauf kann eine u. U. sehr gering mächtige, bindige Deckschicht abgelagert sein. Zur Errichtungen der Deiche werden i. d. R. anstehende Böden verwendet. Der ggf. anstehende Auelehm und der Untergrund- bzw. Flusskies werden häufig für den Einbau der Dichtungen und des Deichstützkörper verwendet. Je nach Lage am Gewässer (Unter-, Mittel-, Oberlauf) stellen die Talquerschnitte unterschiedliche geohydraulische Systeme dar. Während an Oberläufen aufgrund des hohen Gefälles die Ablagerungen wahrscheinlich aus groben Substraten bestehen, kommen in den Mittel- und Unterläufen verstärkt Feinsedimentablagerungen vor. Als

Beispiel einer typischen Talquerschnittsform ist eine eingedeichte Strecke mit bindiger Deckschicht in Abb. 1 dargestellt (vgl. KUNTZE ET AL. 1994). In seltenen Fällen wurde auch mit anstehenden Sanden gebaut. Unter dem Deich steht je nach geologischen Verhältnissen und Lage des Vorfluters in einer bestimmten Tiefe der Grundwasserspiegel an. Bei vorhandener bindiger Deckschicht kann sich im Hochwasserfall Druck darunter aufbauen.

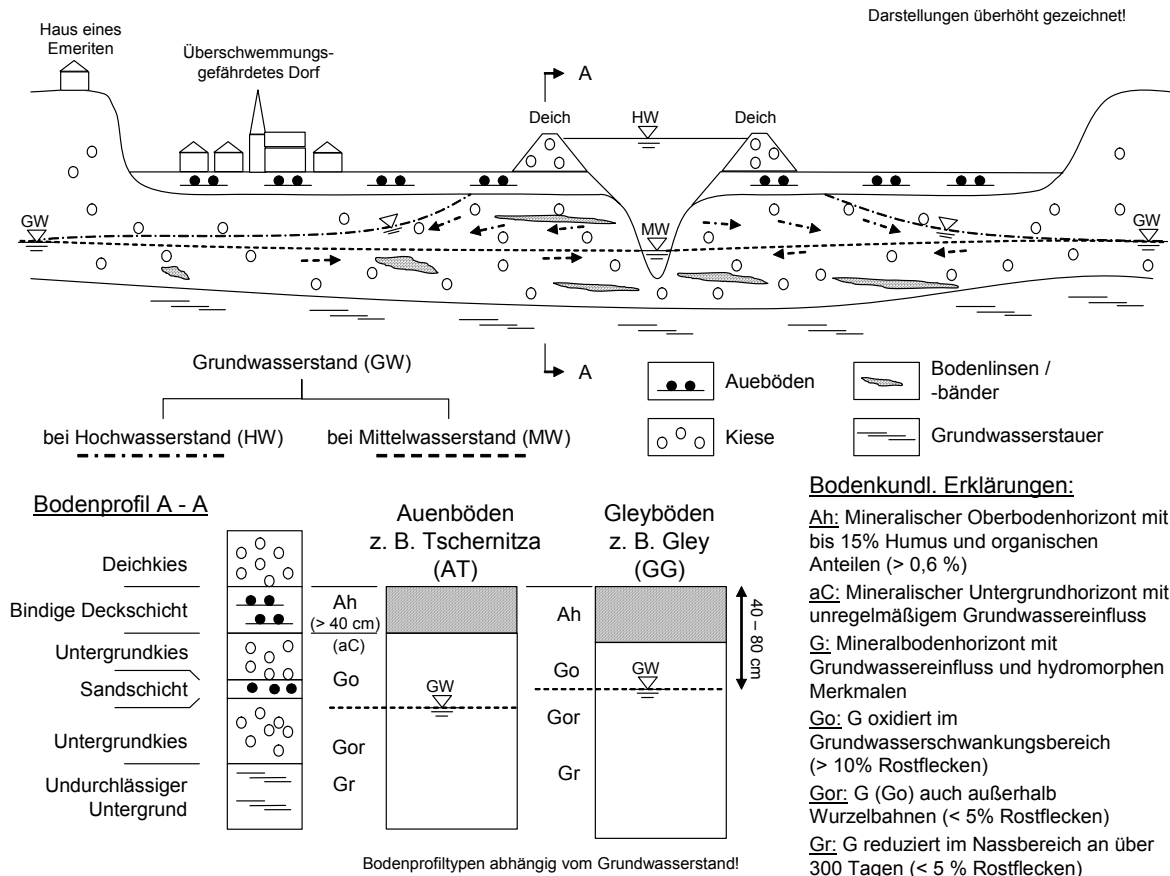


Abb. 1: Korngrößenverteilungen typischer Auenlehm Böden in Bayern (aus HASELSTEINER 2007)

Der Grundwasserfluss kann sich im Hochwasserfall umkehren. Nicht nur deshalb wird im Zuge von Deichertüchtigungen die Forderung nach ungestörten Grundwasserverhältnissen gestellt, was der kompletten Abdichtung des Grundwasserleiters entgegen sprechen kann.

Der Aufbau von Deichen kann, wie dies bei Talsperren mit Dauerstau der Regelfall ist, Dichtungen und Drainagekörper enthalten. Daraus können zahlreiche Systeme abgeleitet werden (siehe Tab. 1), die eine Vielzahl von Variationsparameter aufweisen. Diese Parameter sind auch nach Gesichtspunkten der Durchsickerung festzulegen und unterliegen natürlichen Schwankungen. Dabei weisen geometrische Größen, wie z. B. die Kronenbreite, relativ betrachtet kleinere Schwankungen mit kleineren Auswirkungen auf die Durchsickerung und Standsicherheit auf als Bodenparameter, wie z. B. die gesättigte Durchlässigkeit k_s [m/s], die bei ein und demselben Boden um den Faktor 100 streuen kann.

Tab. 1: Übersicht unterschiedlicher Deichsysteme (aus Haselsteiner 2007)

	I Homogener Untergrund	II Untergrund mit Deckschicht
A Homogener Deich	I A 08 Parameter: $H_D, B_K, d_U, k_D, k_U, k_{UD}, m, (t_{UD})$	II A 10 Parameter: $H_D, B_K, d_{DS}, d_U, k_D, k_{DS}, k_U, k_{UD}, m, (t_{UD})$ <i>Hydraulische Trennung!</i>
B Deich mit Drän	I B 10 Parameter: $H_D, a_{Dr}, B_K, k_D, d_{DS}, d_U, k_{Dr}, k_U, k_{UD}, (t_{UD})$	II B 12 Parameter: $H_D, a_{Dr}, B_K, d_{DS}, d_U, k_D, k_{DS}, k_{Dr}, k_U, k_{UD}, m, (t_{UD})$ <i>Hydraulische Trennung!</i>
C Deich mit Dichtung	I C 09 Parameter: $H_D, B_K, d_U, k_D, k_{DD}, k_U, k_{UD}, m, t_{UD}$	II C 11 Parameter: $H_D, B_K, d_{DS}, d_U, k_D, k_{DD}, k_{DS}, k_U, k_{UD}, m, t_{UD}$ <i>Hydraulische Trennung!</i>
D Deich mit Dichtung und Drän	I D 11 Parameter: $H_D, a_{Dr}, B_K, d_U, k_D, k_{DD}, k_{Dr}, k_U, k_{UD}, m, t_{UD}$	II D 13 Parameter: $H_D, a_{Dr}, B_K, d_{DS}, d_U, k_D, k_{DD}, k_{DS}, k_{Dr}, k_U, k_{UD}, m, t_{UD}$ <i>Hydraulische Trennung!</i>

Abkürzungen:

1:m: Neigung der Böschungen

 a_{Dr} : Abstand des Dräns vom wasserseitigen Deichfuß [m] H_D : Deichhöhe [m] B_K : Breite der Deichkrone [m] d_{DS} : Dicke der Deckschicht [m] d_U : Mächtigkeit der durchlässigen Untergrundschicht [m] k_D : Durchlässigkeit des Deichschüttkörpers [m/s] k_{Dr} : Durchlässigkeit des Dränkörpers [m/s] k_{DD} : Durchlässigkeit der Dichtung im Deich [m/s] k_{DS} : Durchlässigkeit der Deckschicht [m/s] k_U : Durchlässigkeit des Untergrundes [m/s] k_{UD} : Durchlässigkeit der Untergrundabdichtung [m/s] t_{UD} : Einbindetiefe der Untergrundabdichtung [m]**2.2 Randbedingungen**

Ein typisches Deichsystem mit den anzusetzenden Randbedingungen ist in Abb. 2 angeführt. Je nach Aufgabenstellung und Modellgröße muss darauf geachtet werden, dass die Randbedingungen, wie z. B. Grundwasserstände, durch Messdaten verifiziert und/oder auf Basis einer ungünstigen Abschätzung festgelegt werden. Einen einfachen Weg, eine Verfälschung der Deichdurchsickerung durch die Festlegung einer Unterwasserrandbedingung zu vermeiden, stellt die Möglichkeit dar, den Modellbereich zu erweitern und somit die Unterwasserrandbedingung in ausreichender Entfernung vom Deich anzusetzen.

Der Deich wird bei Hochwasser eingestaut. Bemessen wird er i. d. R. auf einen Bemessungshochwasserstand (BHW) bei Lastfall 2 und auf Kronenstau (BHW + Freibord) bei Lastfall 3 (vgl. z. B. DIN 19712/1997). Somit wird wasserseitig ein erhöhtes Potential angesetzt. Landseitig ist der Wasserstand bzw. das Potential i. d. R. mit der Annahme, dass er bzw. es auf der Geländeoberkante zum Liegen kommt, als ausreichend ungünstig angenommen. Bei Hinterströmung des Deiches, großen Durchsickerungsmengen, aber auch für den Fall, dass der Deich ein Trennbauwerk eines (Flut-)Polders darstellt, kann der Deich auch landseitig einen erhöhten Wasserstand aufweisen. Die Strömungskräfte, die als Belastung auf die örtliche wie globale Standsicherheit wirken, werden bei erhöhtem Unterwasserstand ebenso verringert wie die Durchsickerungsmenge. Dieser Effekt wird z. B. bei der Deichverteidigung eingesetzt (LFW BY 2003). Tritt die Sickerlinie an der wasserseitigen Böschung aus, kann dort als Randbedingung Atmosphärendruck angesetzt werden. Das bedeutet praktisch, dass das dort als Randbedingungen das hydraulische Potential als Ortshöhe $\psi_H = z$ angesetzt wird. Dadurch wird u. U., die Durchsickerung unterschätzt, wenn sich z. B. ein Röhrensystem im Deich befindet und kein druckloser Abfluss mehr stattfindet.

Falls eine bindige Deckschicht vorhanden ist, kann i. Allg. auf eine Modellierung des Untergrundes verzichtet werden. Dies ist überschlägig dann der Fall, wenn der Deich eine Durchlässigkeit aufweist, die 100mal größer ist, als die des Untergrundes (vgl. z. B. SCHMIDBAUER & ERB 1958). Beim Vorhandensein von Dichtungen, die in den Untergrund hineinreichen (vollkommene oder unvollkommene Dichtungen), ist diese Vereinfachung natürlich nicht zulässig. Dichtungen können dabei im Einzelfall als undurchlässige Ränder simuliert werden. Sollten z. B. die Verformung und/oder das Austrocknungsverhalten von Oberflächendichtungen berechnet werden, müssen neben dem Saugspannungsverhalten auch die entsprechenden Stoffgesetze für ungesättigte Verhältnisse modelliert werden.

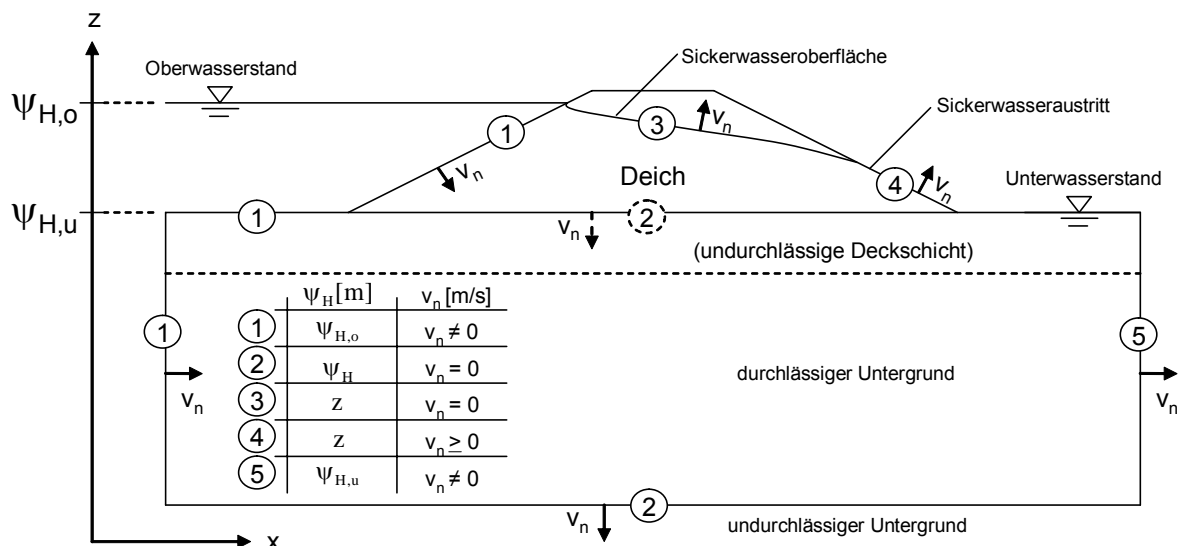


Abb. 2: Randbedingungen eines typischen Deichsystems bei Einstau (aus HASELSTEINER 2007, vgl. DAVID 1998)

Für instationäre Berechnungen müssen neben die für die stationären Berechnungen notwendigen Eingangsgrößen auch die Ganglinien der Randbedingungen, für

Deichbauwerke sind das u. a. die Wasserstandsganglinie im Gewässer und ggf. Ganglinie des Unterwasserstandes, und der Ausgangszustand, beschrieben durch eine Potential-, Sättigungs- oder Druckverteilung im Deich und Untergrund, bekannt sein. Wie SCHEUERMANN (2005) empfiehlt, ist als Ausgangssättigung für einfache Betrachtungen der Ansatz der Sättigung bei Feldkapazität¹ möglich. In oberflächigen Bodenschichten, vor allem in durchwurzelten Oberböden (Vegetationsdecken), können jedoch kleinere Sättigungen bis hin zum permanenten Welkepunkt² auftreten. Die Auswirkungen von Infiltration von Regenwasser während Hochwasserereignissen werden z. B. in SCHEUERMANN (2005) und HASELSTEINER (2007) besprochen. Weitere Randbedingungen, wie z. B. die allgemeinen Größen von Wasserhaushaltsmodellen (Evapotranspiration) spielen i. Allg. für den Hochwasserfall eine untergeordnete Rolle. Für langfristige Betrachtungen und auch zur Ermittlung eines exakten Ausgangszustands für Erdbauwerke ist die Betrachtung des gesamten Wasserhaushalts unverzichtbar. Ggf. können jedoch, wie oben erwähnt, Abschätzungen auf der sicheren Seite vorgenommen werden.

3 Bodenkennwerte typischer Deichböden

3.1 Typische Deichböden

Die Bandbreite der beim Deichbau anzutreffenden Böden ist natürlich sehr viel größer als die im Folgenden gezeigten Beispiele. Im Rahmen des F+E-Vorhabens „Deichsanierung“ (HASELSTEINER & STROBL 2005), das von der Bayerischen Wasserwirtschaftsverwaltung finanziert und gefördert worden ist, wurden ca. 20 Beispiele von Deichertüchtigungsmaßnahmen erhoben und die Sieblinien der angetroffenen Böden mittels der in Abb. 3 gezeigten Körnungsbänder zusammengestellt.

Besonders interessant ist die auftretende Bandbreite der einzelnen Böden. Beispielhaft sind in Abb. 4 die Sieblinien unterschiedlicher Deckschichten dargestellt. Die Klassifizierung reicht vom lehmigen Schluff bis hin zum lehmigen Sand.

¹ Als Feldkapazität wird der Wassergehalt bezeichnet, den ein natürlich gelagerter Boden gegen die Schwerkraft halten kann. Sie liegt zwischen Saugspannungen von $pF = 1,5 - 2,5$. (KUNTZE ET AL. 1994, SCHEFFER ET AL. 1984)

² Als permanenter Welkepunkt wird der Wassergehalt bezeichnet, bei dem Pflanzen irreversibel welken, da die Pflanzensaugspannung das im Boden vorhandene Wasser nicht mehr aufnehmen können (DVWK 238/1999).

Sättigung entsprechender Bodenschichten notwendig werden kann. Der Steifemodul wird vor allem bei der Abschätzung der Verformung bzw. dem Setzungsverhalten herangezogen. Die Ungleichförmigkeitszahl U und der Abstufungsgrad C werden zur Beurteilung der Verdichtbarkeit des Bodens, aber auch zur Abschätzung der Durchlässigkeit und zum Nachweis der hydrodynamischen Bodendeformation verwendet. Die Scherparameter spielen vor allem bei Standsicherheitsnachweisen eine Rolle.

Tab. 2: Geotechnische Kenngrößen von Untergrundkies und Auelehm (gekürzt aus HASELSTEINER 2007)

	Bez.		Untergrund- kies	Auelehm ^{A)}
			Kies, sandig, schwach schluffig	Schluff, sandig, schwach tonig
			G, s, u	U, s, t
	Bez.		GI oder GW	UM
Wichte	γ	[kN/m ³]	20.0	20.5
Wichte unter Auftrieb	γ'	[kN/m ³]	12.0	10.5
dräniertes Scherparameter	φ'	[°]	35.0	22.5
Kohäsion	c	[kN/m ²]	0.0	5.0
Fließgrenze	w_L	[-]	-	0.35
Ausrollgrenze	w_P	[-]	-	0.25
Plastizitätszahl	I_P	[-]	-	0.1
wirksamer Korndurchmesser	d_w		0.39	0.006
Korndurchmesser bei x% Massendurchgang	d_{10}	[mm]	0.2	0.001
	d_{15}		0.6	0.002
	d_{30}		2	0.006
	d_{50}		6	0.02
	d_{60}		9	0.035
	d_{85}		19.5	0.15
	d_{90}		20	0.2
	d_{100}		63	0.6
Ungleichförmigkeitszahl	U	[-]	45	35
Abstufungsgrad	C	[-]	2.2	1.0
Lagerungsdichte	D	[-]	0,50 ^{dicht}	-
Steifemodul	E_s	[MN/m ²]	200	100

^{A)} leicht- bis
mittelplastisch

3.3 Geohydraulische Bodenkennwerte typischer Deichböden

3.3.1 Gesättigte Durchlässigkeit

Maßgebende Kenngröße in der Geohydraulik ist die gesättigte Durchlässigkeit k_s [m/s] ($S \approx 1,0$). Im Gegensatz zur ungesättigten Durchlässigkeiten k_u [m/s] (Abschnitt 3.4.2) herrscht hier das maximale Wassertransportvermögen. Mögliche Abminderungseinflüsse der Wasserleitfähigkeit sind z. B. auftretende Strömungsturbulenzen bei sehr grobkörnigen Materialien oder der Einschluss von Luftporen, was beides durch eine

Korrektur der Sättigung oder Durchlässigkeit berücksichtigt werden kann ($S < 1,0$) (siehe HASELSTEINER 2007).

Für die rechnerische Abschätzung der gesättigten Durchlässigkeit wird häufig der wirksame Korndurchmesser d_w [mm] oder d_{10} [mm] herangezogen. Einige Ansätze verwenden zusätzlich den Porenanteil n [-], die Ungleichförmigkeit U [-] oder den Abstufungsgrad C [-] (siehe HASELSTEINER 2007). Stellvertretend ist in Glg. 1 der Ansatz zur Abschätzung der Durchlässigkeit nach KOZENY-CARMAN angegeben:

$$k_s = \frac{g}{\nu} \cdot C_K \cdot \frac{n^3}{(1-n)^2} \cdot d_w^2 \quad (1)$$

k_s	gesättigte Durchlässigkeit [m/s]
g	Erdbeschleunigung [m/s ²] ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$)
ν	kinematische Zähigkeit [m ² /s] ($\nu = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$, $T = 10^\circ\text{C}$)
C_K	dimensionsloser Beiwert [-]
n	Porengehalt bzw. Porenanteil [-]
d_w	wirksamer Korndurchmesser (siehe Glg. 2) [m]

Der wirksame Korndurchmesser d_w [m] wird folgendermaßen ermittelt:

$$d_w = \frac{\sum_{i=1}^m \Delta p_{m,i}}{\sum_{i=1}^m \Delta p_{m,i} / d_i} \quad (2)$$

$\Delta p_{m,i}$	Massenprozent der jew. Kornklasse i [%]
$1/d_i$	Harmonisches Mittel der jew. Kornklasse i [1/m]

Unter Zuhilfenahme von Glg. 1 und Glg. 2 kann anhand der Korngrößenverteilung eine relativ gute Abschätzung von der mittleren gesättigten Durchlässigkeit k_s erfolgen. Die Streuung der mittleren Durchlässigkeit kann jedoch aufgrund der natürlich auftretenden Inhomogenität von Böden den Faktor 100 und größer erreichen. Lagerung, Dichte bzw. Porengehalt und Schichtung spielen bei der Beurteilung der Durchlässigkeit, besonders wenn sie auf mathematischem Wege unter Zuhilfenahme einiger weniger Korngrößenparameter erfolgt ist, eine wesentliche Rolle.

Weitere Ansätze zur Abschätzung der gesättigten Durchlässigkeit und ein Vergleich dieser sind in HASELSTEINER (2007) enthalten.

3.3.2 Geohydraulische Bodenkennwerte ausgewählter Böden

Für die bereits in Abschnitt 3.2 betrachteten zwei Böden sind in Tab. 3 die geohydraulischen Parameter angegeben. Die Streuungen der gesättigten Durchlässigkeit weisen auch in den Literaturangaben Faktoren über 100 auf, so dass eine Abschätzung von mittleren Werten, wie dies der Ansatz in Abschnitt 3.3.1 ermöglicht, in vielen Fällen ausreichend ist. Bei besonderen Böden, wie z. B. Böden mit quellfähigen Bestandteilen,

Ausfallkörnungen oder einem überproportionalem Anteil an Feinteilen kann darüber hinaus eine versuchstechnische Ermittlung der Durchlässigkeit zur Verifizierung der mathematisch abgeschätzten Werte notwendig werden. Werden natürliche Böden maschinell eingebaut und ggf. zuvor noch entsprechend aufbereitet, können für die Anisotropie kleinere Werte angenommen werden. Anisotropiefaktoren von $A = k_h/k_v = 1$ kommen in der Praxis höchstens bei sehr eng gestuften oder einkörnigen Böden vor, die u. U. nicht lagenweise eingebaut oder verdichtet werden.

Tab. 3: Geohydraulische Kenngrößen von Untergrundkies und Auelehm (gekürzt aus HASELSTEINER 2007)

			Untergrund-	Auelehm
			kies	Schluff, sandig, tonig
			Kies, sandig, schwach schluffig	
			Bez.	G, s, u
		Bez.	GI oder GW	UM
Porenanteil / Porosität	n	[-]	0,30 (0,25 - 0,35)	0,45 (0,39 - 0,56)
Restfeuchte / Feldkapazität	$\theta_{r,FK}$	[-]	0,08 (0,05 - 0,15) ($S_{r,FK} = 0,27$)	0,30 (0,25 - 0,40) ($S_{r,FK} = 0,67$)
Residualer Wassergehalt / Permanenter Welkepunkt	θ_r	[-]	0,00 ($S_{r,PWP} = 0,00$)	0,05 (0,03 - 0,06) ($S_{r,PWP} = 0,20$)
Luftporenanteil (0,1 - 0,5 $\theta_{r,FK}$)	θ_a	[-]	0,040	0,040
Sättigungswassergehalt	θ_s	[-]	0,26 ($S_s = 0,87$)	0,30 ($S_s = 0,91$)
Gesättigte Durchlässigkeit	k_s	[m/s]	10^{-3} ($1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-4}$)	10^{-6} ($10^{-5} - 10^{-6}$)
Anisotropiefaktor	k_h/k_v	[-]	5 (2 - 30)	10 (2 - 30)
kapillare Steighöhe	h_k	[m]	0,10 (< 0,20)	2,00 (1,00 - 5,00)

3.4 Saugspannungsverhalten und ungesättigte Durchlässigkeit

3.4.1 Saugspannungsverhalten

Aufgrund von physikalischen Kräften in den Poren und um die einzelnen mit Wasser benetzten Körner wird Wasser aus dem gesättigten Bereich gegen die Schwerkraft nach oben gesogen. Die Stärke dieses Effekts wird durch die Saugspannung [mWS] (Abb. 5) und auch durch die kapillare Steighöhe [m] ausgedrückt. Böden mit einem großen Anteil an Grobporen, wie z. B. Kiese, besitzen deshalb ein gering ausgebildetes Saugspannungsverhalten bzw. eine geringe kapillare Steighöhe von wenigen Zentimetern. Feinkörnige Böden hingegen, wie dies Tone sind, können große Saugspannungen aufbringen und große kapillare Steighöhen von mehreren Metern aufweisen. Typische Verläufe von Saugspannungskurven unterschiedlicher Bodenarten sind in Abb. 5 beigelegt.

Die Abweichungen ähnlicher Böden vom hier gezeigten in den Lehrbüchern angegebenen Verhalten können erheblich sein. Neben chemischen Einflüssen spielen die Boden- bzw. Wassertemperatur, die Verdichtung, die Lagerung, u. v. m. eine Rolle. Auch bei der versuchstechnischen Ermittlung können erhebliche Streuungen bei den Ergebnissen auftreten. Der Aufwand starke Saugspannungen zu messen, ist sehr groß. Die auftretende Streuung bei der Abschätzung und der Aufwand sind Gründe dafür, das Saugspannungsverhalten unter Berücksichtigung einfach zu ermittelnder Bodenkenngrößen unter Zuhilfenahme mathematischer Funktionen abzuschätzen.

Bei Be- und Entwässerung tritt eine Hysterese der Saugspannungskurven auf. Dieser Effekt, auch auf den Flaschenhalseffekt (engl.: Ink-Bottle-Effect) zurückzuführen, hat zur Folge, dass bei der Entwässerung höhere Saugspannungen auftreten und somit der Boden stärker Wasser zurückhält, als dass er bei der Bewässerung „saugt“ (vgl. Abb. 7).

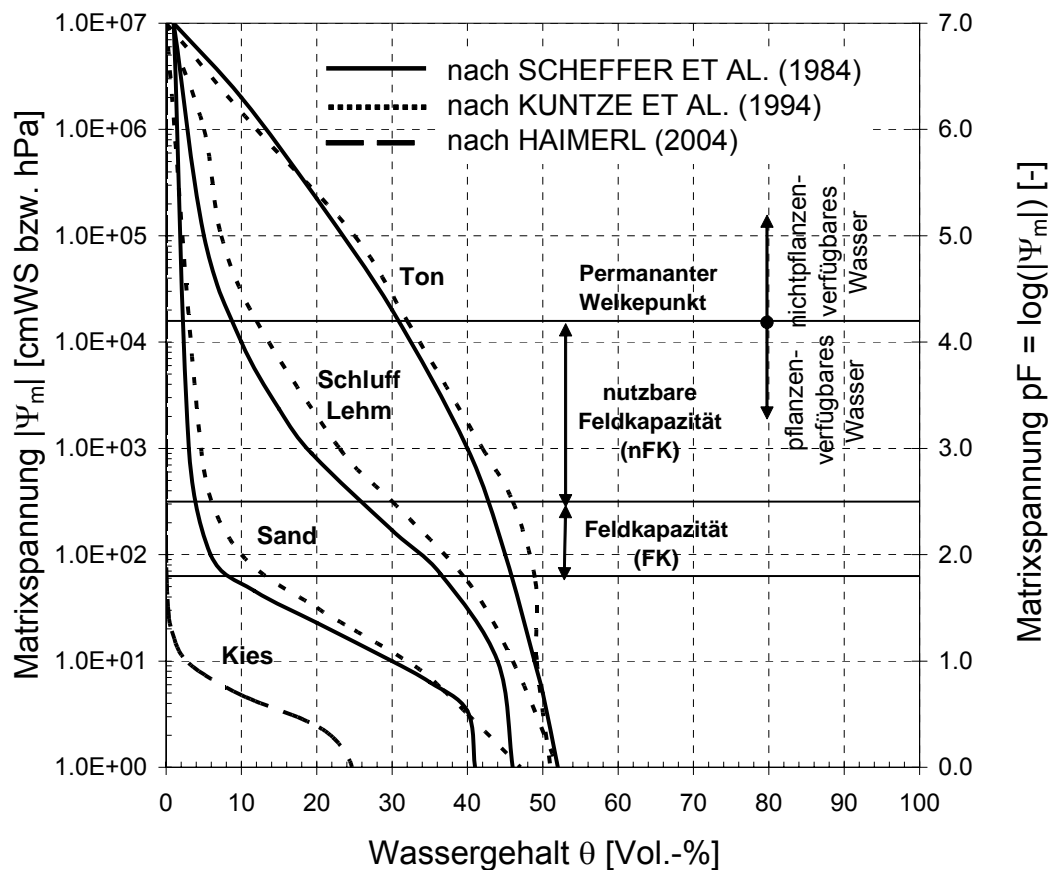


Abb. 5: Saugspannungsverhalten unterschiedlicher Bodenarten (vereinfacht aus HASELSTEINER 2007)

3.4.2 Ungesättigte Durchlässigkeit

Die ungesättigte Durchlässigkeit k_U [m/s] bezeichnet die Durchlässigkeit bei Bodensättigungen $S < S_{max}$. Das Verhältnis von ungesättigter zu gesättigter Durchlässigkeit wird als relative Durchlässigkeit K_R [-] bezeichnet. K_R nimmt theoretisch Werte zwischen $K_R = 0 \div 1$ ein. Bei geringer Abnahme der Sättigung wird die Durchlässigkeit überproportional abgemindert, und es stellen sich die in Abb. 6 typischen Beziehungen zwischen der

relativen Durchlässigkeit K_R und der Matrixspannung ψ_m [mWS] bzw. der Sättigung S [-] oder dem Wassergehalt θ [-] ein (vgl. BUSCH ET AL. 1993).

Für teilgesättigte Böden gilt immer $k_u < k_s$. Mit abnehmender Sättigung nimmt auch die Durchlässigkeit ab, theoretisch bei $S = 0$ bis zu $K_R = 0$ oder $k_u = 0$ m/s. Aufgrund eingeschlossener Luftporen im Boden und einer sich praktisch einstellenden Bodenrestfeuchte bewegen sich die Durchlässigkeiten zwischen $k_u(S_R)$ und $k_u(1-S_L)$. S_L [-] bezeichnet den mit Luft gefüllten Sättigungsanteil.

3.4.3 Mathematische Beschreibung des Saugspannungsverhaltens und der ungesättigten Durchlässigkeit

Für die Abschätzung des Saugspannungsverhaltens von Böden können einige geohydraulische Kenngrößen, wie z. B. die Sättigung beim Permanenten Welkepunkt und bei Feldkapazität, hilfreich sein. Die bei niedrigen Sättigungen auftretenden großen Saugspannungen spielen bei praktischen Verhältnissen i. Allg. keine wesentliche Rolle. Diese Verhältnisse treten lediglich bei extremen Randbedingungen (Wüstenstandorte!) oder aufgrund von menschlichem Zutun (Trocknung im Ofen) auf. Deshalb ist der Verlauf dort i. d. R. auch nicht von Interesse und es kann vereinfachend angesetzt werden, dass die residuale Sättigung S_R bei $pF^1 = 7$ eintritt. Einflussreicher auf Durchsickerungsprozesse ist der Verlauf unter dem Permanenten Welkepunkt ($pF = 4,2$).

Die Beziehung zwischen Saugspannung ψ_m und Sättigung S kann z. B. durch den Ansatz von van Genuchten (1980) beschrieben werden (Glg. 3):

$$S = S_R + \frac{S_s - S_R}{\left[1 + (\alpha \cdot \psi_m)^n\right]^{(1-1/n)}} \quad (3)$$

S	Sättigung [-]
S_R	S_R residuale Sättigung [-]
S_s	S_s Vollsättigung [-]
α	van-Genuchten-Parameter [1/cm]
ψ_m	Matrixpotential [mWS]
n	van-Genuchten-Parameter [-]

Häufig wird in Verbindung mit dem Ansatz von van Genuchten die Beziehung von MUALEM (1976) zur Beschreibung der ungesättigten Durchlässigkeit verwendet (Glg. 4), woraus das van-Genuchten-Mualem-Modell resultiert.

¹ pF [-] steht in der Praxis für den negative Logarithmus der Wasserspannung [cmWS]. Der Ausdruck „pF“ ist dabei auf SCHOFIELD (1935) zurückzuführen, wobei F für freie Energie steht und p für Logarithmus verwendet wurde (aus SCHEFFER ET AL. 1984).

$$K_R = S^L \cdot \left[1 - \left[1 - S^{\frac{1}{m}} \right]^m \right]^2 \quad (4)$$

- K_R relative Durchlässigkeit [-]
- L Mualem-Parameter [-] (vereinfachend: $L = 0,50$)
- m van-Genuchten-Parameter [-]

In Abb. 6 sind die Gleichungen 3 und 4 für unterschiedliche Böden angewandt. Zum Vergleich ist der Ansatz von HAVERKAMP angegeben.

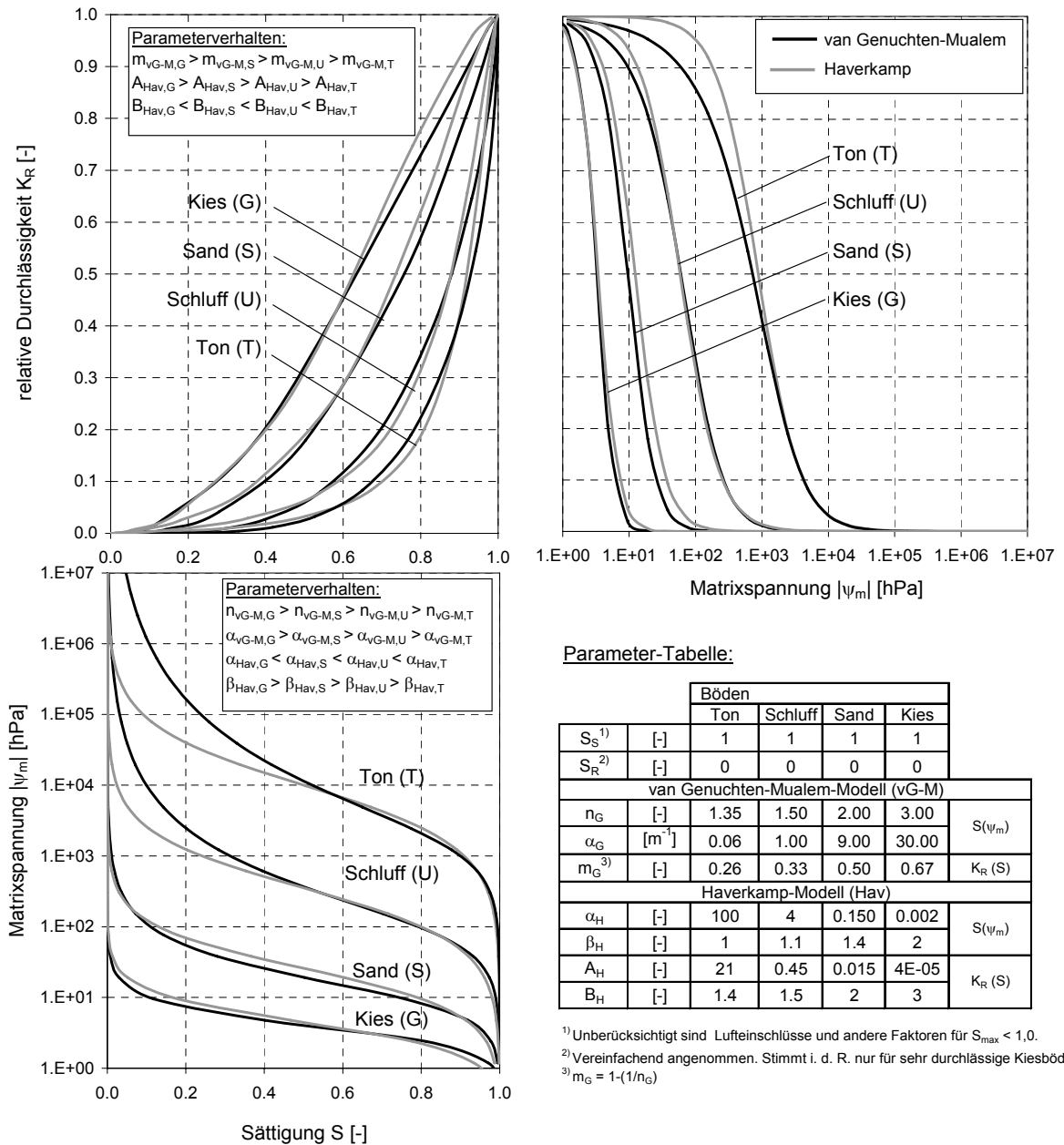


Abb. 6: Saugspannungsverhalten und ungesättigte Durchlässigkeit unterschiedlicher Bodenarten nach van-Genuchten-Mualem und Haverkamp (aus HASELSTEINER 2007)

Es ist zu erkennen, dass beide Modelle durch Veränderung ihrer jeweiligen Stellparameter so angepasst werden können, dass es eigentlich nicht wichtig ist, welches Modell angewandt wird, sondern nur, dass eine möglichst realitätsnahe Wiedergabe des tatsächlichen Saugspannungsverhaltens nachempfunden wird. Da dies jedoch nur äußerst selten versuchstechnisch ermittelt wird und auch die bodenphysikalische Untersuchung Ungenauigkeiten aufweist, kann es im Einzelfall durchaus gerechtfertigt sein, das Saugspannungsverhalten anhand weniger Stellgrößen, wie z. B. θ_R , θ_{FK} , θ_S , abzuschätzen und ggf. auch auf in der Literatur vorhandene Kurven zurückzugreifen.

Anzumerken ist an dieser Stelle, dass in numerisch-mathematischen Modellen auch die Ermittlung von Übergangsfunktionen von Be- zum Entwässerungsast für die richtige Prozessmodellierung wichtig ist.

3.4.4 Beispiele von Saugspannungskurven typischer Deichböden

Die bereits in den Abschnitten 3.2 und 3.3 betrachteten zwei Bodenbeispiele werden auch hier beispielhaft für die Betrachtung des Saugspannungsverhaltens und der relativen Durchlässigkeit herangezogen. Der betrachtete Kies hat eine steil verlaufende Saugspannungskurve, d. h. der Kies ent- und bewässert bei Wasserzutritt relativ leicht und schnell von $S_R \approx 0$ bis zu $S_{max} \approx 0,90$. Hingegen treten bei der Austrocknung des Auelehms hohe Saugspannungen auf. Die Residualsättigung des Auelehms wurde mit $S_R = 0,3$ angenommen. Beide Böden erreichen aufgrund von Lufteinschlüssen nicht $S_{max} = 1,0$, sondern $S_{max} \approx 0,90$.

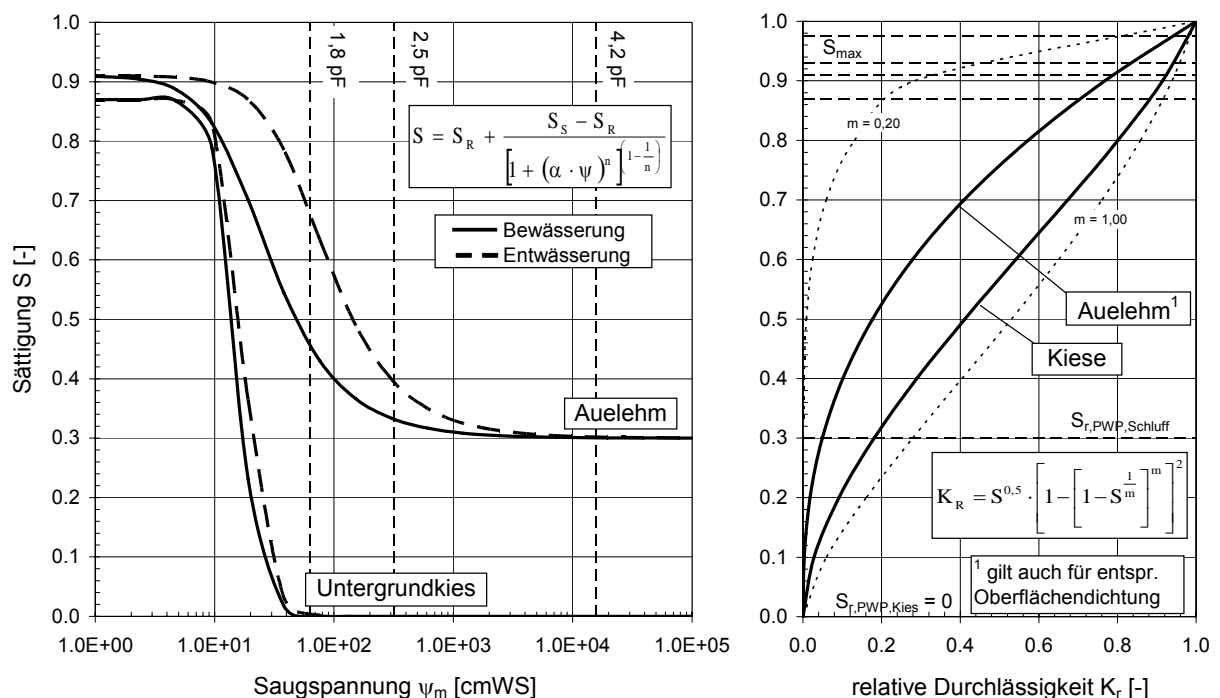


Abb. 7: Saugspannungsverhalten und relative Durchlässigkeit mit Hysterese zweier ausgewählter Böden (gekürzt aus HASELSTEINER 2007)

Weitere an die Praxis angelehnte theoretisch abgeschätzte Saugspannungskurven für Sand, Ton, mineralische Dichtungen und durchwurzelter Oberbodenschichten (Vegetationsdecken) sind in HASELSTEINER (2007) zu finden. MANGELS (2000) und

SCHEUERMANN (2005) geben weitere Beispiele zu Saugspannungskurven und zahlreiche Literaturstellen zur physikalischen Bestimmung und mathematischen Beschreibung des Saugspannungsverhaltens von Böden an.

4 Zusammenfassung und weiterführende Hinweise

Der für die Durchsickerung von Hochwasserschutzdeichen wichtigste geohydraulische Parameter ist die gesättigte Durchlässigkeit k_s [m/s]. Sie kann unter Zuhilfenahme unterschiedlicher physikalisch oder empirisch begründeter Formeln abgeschätzt werden. In diesem Beitrag wurde stellvertretend die Formel nach KOZENY-CARMAN angegeben, die im Großen und Ganzen mittlere Werte erzeugt und somit für Abschätzungen der Durchlässigkeit als geeignet angesehen werden kann. Sie ersetzt jedoch nicht die genaue Kenntnis über den vorhandenen Boden und kann auch nicht vor Fehleinschätzungen bewahren. Deshalb sollten die auf diese Art und Weise abgeschätzten Durchlässigkeiten stets mit anderen Ansätzen verglichen oder versuchstechnisch verifiziert werden.

Ähnliches gilt für das Saugspannungsverhalten und die damit abschätzbare Beziehung zwischen Sättigung und ungesättigter Durchlässigkeit k_u [m/s]. Bei sehr durchlässigen Kiesen und deren relativ schwach ausgeprägtes Saugspannungsverhalten ist dieses für praktische Belange meist von untergeordnetem Interesse. Während bei relativ undurchlässigen Böden, die auch als Dichtungen im Deich-, Damm- und Deponiebau Verwendung finden, das Saugspannungsverhalten und ggf. die mechanischen Auswirkungen bei Sättigungsänderung (Quellen, Schwinden ...) wesentlichen Einfluss auf die Dichtwirkung und die Dauerhaftigkeit haben (siehe z. B. SCHICK 2003). Eine Abschätzung mit den vorgestellten mathematischen Formeln ist jedoch für praktische Belange im Deichbau meist ausreichend. Es spielt dabei weniger eine Rolle, welches mathematische Modell verwendet wird, sondern dass der Kurvenverlauf des Be- und Entwässerungsastes das reale Saugspannungsverhalten des Bodens ausreichend exakt wiedergibt. Auf eine Verifikation, besonders bei Böden oder Materialien mit ausgeprägtem Saugspannungsverhalten, und auf die Berücksichtigung der maßgebenden Bodenparameter (θ_R , θ_{FK} , θ_S) sollte nicht verzichtet werden. Bei stark durchlässigen Kiesen kann u. U. auf die Berücksichtigung der Hysterese verzichtet werden.

Bei der Interpretation von Berechnungen sollte jedoch immer in Betracht gezogen werden, dass die mathematisch abgeschätzten Saugspannungskurven erheblich vom realen Saugspannungsverhalten des Bodens abweichen können und dies u. U. auch durch die versuchstechnische Verifikation nicht korrigiert werden kann. Die Unsicherheiten im Boden und bei instationären Betrachtungen sollten deshalb stets mit ausreichend großen Sicherheitsbeiwerten beantwortet werden.

Literatur

BUSCH, K.-F.; LUCKNER, L.; TIEMER, K. (1993): Geohydraulik, Gebrüder Borntraeger, Berlin – Stuttgart

DAVID, I. (1998): Grundwasserhydraulik – Strömungs- und Transportvorgänge. Verlag Vieweg, Braunschweig – Wiesbaden

DIN 1054 (2005): Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN)

DIN 19712 (1997): Flussdeiche. Deutsches Institut für Normung e.V. (DIN)

DVWK 238 (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Heft 238, Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau, Verlag Paul Parey, Hamburg und Berlin

HAIMERL, G. (2004): Groundwater Recharge in Wadi Channels Downstream of Dams - Efficiency and Management Strategies. Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Bericht Nr. 99, Technische Universität München

HASELSTEINER, R.; STROBL, TH. (2005): Deichsanierung. Forschungs- und Entwicklungsvorhaben, Endbericht, im Auftrag vom Bayerischen Landesamt für Wasserwirtschaft (LfW), erhältlich beim Bayerischen Landesamt für Umwelt (www.bayern.de/lfu), Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München

HASELSTEINER, R. (2007): Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchsickerung. Dissertation, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Mitteilungsheft Nr. 111, Technische Universität München (noch nicht veröffentlicht)

KUNTZE, H.; ROESCHMANN, G.; SCHWERDTFEGER, G. (1994): Bodenkunde. 5., neu bearbeitete und erweiterte Auflage, Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart

LFW BY (2003): Hinweise zur Deichverteidigung und Deichsicherung. Bayerisches Landesamt für Wasserwirtschaft, München

MANGELS, J. (2000): Beschreibung von Strömungen im ungesättigten Bodeninneren. Dissertation, Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Heft 26, Universität Essen

MUALEM, Y. (1976): Hysterical models for prediction of the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour. Res.*, 12, 6, pp. 1248 – 1254

SCHEFFER, F.; SCHACHTSCHNABEL, P., BLUME, H.-P., HARTGE, K.-H., SCHWERTMANN, U. (1984): Lehrbuch der Bodenkunde, 12. Auflage, Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1984

SCHEUERMANN, A. (2005): Instationäre Durchfeuchtung quasi-homogener Erddeiche. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 164

SCHICK, P. (2003): Ein quantitatives Zwei-Komponenten-Modell der Porenwasser-Bindekräfte in teilgesättigten Böden. Habilitationsschrift, Mitteilungen des Instituts für Bodenmechanik und Grundbau, Universität der Bundeswehr, München

SCHMIDBAUER, J.; ERB, CH. (1958): Sickerströmung in Deichen. *Die Wasserwirtschaft* 48, Heft 9, S. 232 – 236

SCHOFIELD, R. K. (1935): The pF of the water in soil. *Transactions of 3rd International Congress of Soil Science*, Volume 2, Plenary Session Papers, pp. 37 – 48, Oxford

UHLIG, D. (1962): Die Sickerlinie im wasserseitigen Stützkörper von Staudämmen bei Stauspiegelsenkung. wwt, 12. Jahrgang, Heft 5, S. 216 – 222

VAN GENUCHTEN, M. TH. (1980): A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. Soil Sci. Soc. Am. J., Vol. 44, pp. 892 – 898

Verfasser

Dipl.-Ing. Ronald Haselsteiner

Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Technische Universität München

Arcisstraße 21

80290 München

r.haselsteiner@bv.tum.de