

Ronald Haselsteiner

Die Durchströmung von Hochwasserschutzdeichen mit künstlichen Innendichtungen

Künstliche Innendichtungen werden in letzter Zeit verstärkt bei Deichertüchtigungsmaßnahmen eingesetzt. Hierbei gilt es bei der Bemessung zu bewerten, inwiefern die Dichtung als wirksam angenommen werden kann oder ein Funktionsverlust berücksichtigt werden muss. Im Folgenden wird besonders die stationäre Durchströmung von Deichen mit künstlichen Innendichtungen mit und ohne Fehlstellen betrachtet. Ferner sind geohydraulische Parameter typischer Deichböden und von gebundenen Innendichtungen angegeben. 2-D- und 3-D-Grundwassermodellierungen können hierbei bei der Risikobeurteilung helfen.

1 Einleitung

„Bei dem Entwurf und der Berechnung von Deichen mit und ohne Dichtungen ist mit der Möglichkeit einer völligen Durchströmung bis zur landseitigen Böschung zu rechnen.“ fordert die DIN 19 712 [1] generell für alle Deiche. Auch Schmidbauer und Erb [11] äußern, 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.“ Im Gegensatz zur Norm werden von Schmidbauer und Erb [11] die Möglichkeiten, stationäre oder instationäre Verhältnisse anzusetzen, gegeneinander abgewogen. Auf die Abhängigkeit der Durchfeuchtung des Deiches u. a. von der Materialdurchlässigkeit, vom Deichaufbau, vom Vorsättigungszustand und von der Dauer des Hochwassers sowie von der absoluten Höhe des Wasserstandes vor dem Deich wird in DIN 19 712 hingewiesen, aber wegen Sicherheitsaspekten wird aufgrund der Ermangelung einer exakten Datenbasis die Annahme des stationären Durchströmungszustandes für die Bemessung empfohlen. Dies trifft auch für die Durchströmung von Deichen mit Innendichtungen zu, wobei die Dichtung i. d. R. die Aufgabe übernimmt, den Durchfluss zu verringern und das hydraulische Potenzial lokal abzubauen.

Besonders im Zuge umfangreicher Deichertüchtigungsmaßnahmen wurden in zahlreichen Ausführungsbeispielen künstliche Innendichtungen als günstige und verlässliche Ertüchtigungsmaßnahmen ausgeführt [2], [3]. Bei der Bemessung von Deichen stellt sich im Rahmen der Bildung von Lastfällen die Frage, welche Durchströmungsverhältnisse, ob stationäre oder instationäre Durchströmungsverhältnisse, und welche Tragwerkszustände, wie z. B. der Ausfall von Dichtungen und/oder Dräns, Berücksichtigung finden müssen. In der Praxis wird nicht selten ohne größere Berechnungen und Begründungen ein vollständiger Potenzialabbau in der Dichtung angenommen, wobei dies, wie bekannt sein dürfte, von vielerlei Faktoren bzw. dem gesamten Deichsystem abhängt.

2 Innendichtungen im Deichbau

2.1 Allgemeines

Dichtungen werden in vollkommene und unvollkommene Dichtungen unterteilt [3]. Zentral liegende künstliche Innendichtungen haben gegenüber Oberflächen-dichtungen den Vorteil, dass Deich und Untergrund in einem Arbeitsgang abgedichtet werden können. Dies unterstreicht die Möglichkeit der Anwendung im Rahmen von Deichertüchtigungs- und Deichneubaumaßnahmen, wenn die Untergrundabdichtung und die Innendichtung durch den bestehenden Deich in einem Arbeitsschritt hergestellt werden können. Einfluss auf den Deich- und Dichtungs-entwurf hat das Vorhandensein einer bindigen Deckschicht ebenso wie die unter wirtschaftlichen Aspekten zu beurtei-

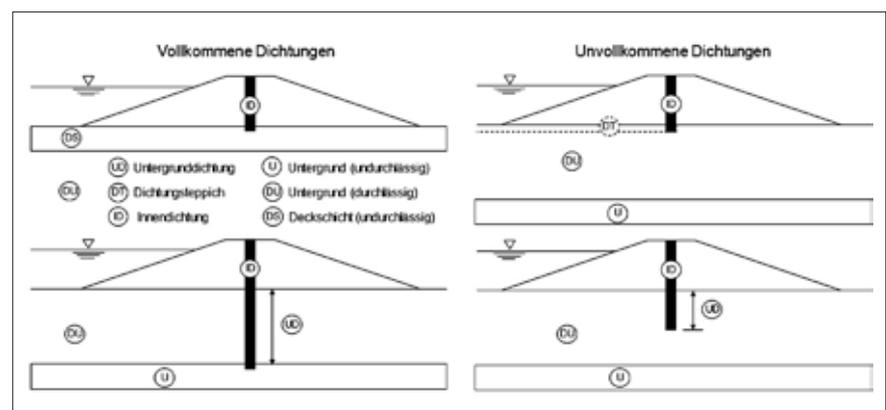


Bild 1: Vollkommene und unvollkommene Innendichtungen in Deichen

lende Erreichbarkeit eines dichten Untergrundhorizonts.

Da der Einfluss auf die Grundwasserhältnisse berücksichtigt werden muss, ist die Ausführung einer vollkommenen Dichtung, die den Untergrund komplett absperrt, oft nicht zweckmäßig. Unvollkommene Dichtungen tragen jedoch je nach Abdichtungstiefe oft nur unwesentlich zum Potenzialabbau im landseitigen Deichkörper bei (siehe Abschnitt 4.2). Um die Belastung auf die landseitige Böschung bei unvollkommenen Dichtungen zu reduzieren, bietet sich die Anordnung eines Dräns an, was die Sickerwassermenge jedoch wiederum erhöht. Die Systeme vollkommener und unvollkommener Innendichtungen in Deichen mit bindiger und ohne bindige Deckschicht sind in **Bild 1** dargestellt.

Bindige Deckschichten sorgen dafür, dass das Deichsystem praktisch in zwei

hydraulisch getrennte Bereiche, den Deich selbst und den Untergrund, unterteilt werden kann, sofern die Durchlässigkeit der bindigen Deckschicht um etwa den Faktor 100 undurchlässiger ist als das Deichkörpermaterial und der Untergrund. Der Potenzialabbau im Deich und im Untergrund hängt wiederum von der Anordnung der Dichtung und im Wesentlichen auch von den Durchlässigkeitsverhältnissen der angrenzenden Bodenschichten und Materialien ab.

Als künstliche Innendichtungen kommen im Deichbau verstärkt Stahlspundwände, Bodenvermörtelungsverfahren, Einphasenschlitz-, Bohrpfahl- und Schmalwände zur Ausführung. Besonders bewehrte Bodenvermörtelungswände wurden in den letzten Jahren zunehmend eingesetzt, wenn es galt, die Standsicherheit auch bei sehr ungünstigen Randbedingungen wirtschaftlich und dauerhaft herzustellen [3].

2.2 Lastfälle bei Deichen mit Innendichtungen

Innerhalb der Bemessung von Deichen muss zum einen die Dauerhaftigkeit und Funktionalität der Innendichtungen und zum anderen die Standsicherheit/Tragsicherheit des Deiches nachgewiesen werden. Hierzu werden durch die Überlagerung von Einwirkungen und Tragwiderstandsbedingungen/Tragwerkszuständen Lastfälle gebildet, welche die Randbedingungen der zu führenden Nachweise und Berechnungen festlegen.

Die Lastfälle können unabhängig vom Nachweiskonzept nach DIN 1 054 [8] gebildet werden [5]. Weitere Hinweise und Anregungen zu Nachweiskonzepten im Zusammenhang mit Dammbauwerken mit Ausführungen zu speziellen, außergewöhnlichen Lastfällen sind in DIN 19 712 [1], DWA [3], DIN 19 700 [6] und BAW MSD [7] zu finden. Im Rahmen der euro-

Tab. 1: Geohydraulische Parameter typischer Deichböden und einer hydraulisch gebundenen Innendichtungen [5]

		Dränkies	Stützkörperkies	Untergrundkies	Sand	Oberflächendichtung	Auelehm	Ton	Innendichtung (hydr. geb.)	
		Kies, eng gestuft	Kies, sandig, schwach schluffig		Sand, kiesig, schluffig	Schluff, sandig, tonig		Ton, schluffig	–	
Bez.		G, st	G, s, u		S, g, u	U, s, t		T, u	–	
Bez.		GE	GI oder GW		SE oder SU	UM		TL / TM / TA	–	
Porenanteil / Porosität	n [-]	0,20 (0,15-0,32)	0,25 (0,15-0,32)	0,30 (0,25-0,35)	0,35 (0,30-0,38)	0,35 (0,28-0,37)	0,45 (0,39-0,56)	0,55 (0,45-0,70)	0,40 (>0,40)	
Restfeuchte / Feldkapazität	$\theta_{r,FK}$ [-]	0,01 (<0,03) ($S_{r,FK} = 0,05$)	0,05 (0,03-0,06) ($S_{r,FK} = 0,20$)	0,08 (0,05-0,15) ($S_{r,FK} = 0,27$)	0,175 (0,15-0,28) ($S_{r,FK} = 0,50$)	0,25 (0,25-0,40) ($S_{r,FK} = 0,71$)	0,30 (0,25-0,40) ($S_{r,FK} = 0,67$)	0,40 (0,40-0,55) ($S_{r,FK} = 0,73$)	0,32 ($S_{r,FK} = 0,80$)	
Residualer Wassergehalt/ Permanenter Welkepunkt	θ_r [-]	0,00 ($S_{r,PWP} = 0,00$)	0,00 ($S_{r,PWP} = 0,00$)	0,00 ($S_{r,PWP} = 0,00$)	0,05 (0,03-0,16) ($S_{r,PWP} = 0,14$)	0,05 (0,03-0,06) ($S_{r,PWP} = 0,20$)	0,05 (0,03-0,06) ($S_{r,PWP} = 0,20$)	0,22 (0,18-0,26) ($S_{r,PWP} = 0,40$)	0,20 (0,18-0,26) ($S_{r,PWP} = 0,50$)	
Luftporenanteil (0,1-0,5 $q_{r,FK}$)	θ_a [-]	0,005	0,025	0,040	0,035	0,025	0,040	0,055	0,04	
Sättigungswassergehalt	θ_s [-]	0,195 ($S_s = 0,975$)	0,225 ($S_s = 0,90$)	0,26 ($S_s = 0,87$)	0,315 ($S_s = 0,90$)	0,325 ($S_s = 0,93$)	0,30 ($S_s = 0,91$)	0,495 ($S_s = 0,90$)	0,36 ($S_s = 0,90$)	
Gesättigte Durchlässigkeit	k_s [m/s]	$2 \cdot 10^{-2}$ ($1 \cdot 10^0 - 1 \cdot 10^{-3}$)	$5 \cdot 10^{-4}$ ($1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-4}$)	10^{-3} ($1 \cdot 10^{-2} - 5 \cdot 10^{-4}$)	$2 \cdot 10^{-5}$ ($1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-7}$)	10^{-7} ($10^{-7} - 10^{-8}$)	10^{-6} ($10^{-5} - 10^{-6}$)	10^{-9} ($1 \cdot 10^{-8} - 10^{-12}$)	10^{-8} ($10^{-8} - 10^{-10}$)	
Anisotropiefaktor	k_h/k_v [-]	1 (2-30)	2 (2-30)	5 (2-30)	2 (2-30)	2 (2-30)	10 (2-30)	2 (2-30)	1	
kapillare Steighöhe	h_k [m]	0,03 (0,03-0,05)	0,05 (<0,20)	0,10 (<0,20)	0,30 (0,20-0,40)	4,00 (1,00-5,00)	2,00 (1,00-5,00)	<10 (≤ 100)	–	
Van-Genuchten-Parameter	Bewässerung	α_w [1/cm]	0,200 (0,005-0,035)	0,050 (0,005-0,035)	0,070 (0,005-0,035)	0,060 (0,005-0,035)	0,050 (0,005-0,035)	0,060 (0,005-0,035)	0,035 (0,005-0,035)	0,01
		n_w [-]	4,0 (1,5-10)	5,0 (1,5-10)	5,0 (1,5-10)	2,5 (1,5-10)	2,0 (1,5-10)	2,0 (1,5-10)	1,5 (1,5-10)	1,4
	Entwässerung	α_d [1/cm]	0,150	0,040	0,060	0,030	0,010	0,020	0,0175	0,005
		n_d [-]	4,0	2,5	2,5	2,5	2,0	2,0	1,5	1,4
Mualem-Parameter	L [-]	0,75 (0,26-1,03)	0,80 (0,26-1,03)	0,80 (0,26-1,03)	0,60 (0,26-1,03)	0,50 (0,26-1,03)	0,50 (0,26-1,03)	0,50 (0,26-1,03)	0,5	

paweiten Harmonisierung der Normung wird seit geraumer Zeit versucht, die DIN 1 054 in den EC 7 zu überführen. Die Neuregelung dieser geotechnischen Norm soll in Kürze mit der Verabschiedung des EC 7 und der Erstellung eines nationalen Anhangs hierzu zum Abschluss kommen. Anstelle von Lastfällen und Tragwiderstandsbedingungen werden zukünftig ähnlich der DIN 19 700 [6] Bemessungssituationen betrachtet, was jedoch im vorliegenden Beitrag noch keine Berücksichtigung findet.

Lastfall 1 (Regelkombination) beschreibt unabhängig von der Literaturstelle einen Dauer- bzw. Regelzustand und ist deshalb für Hochwasserschutzdeiche i. d. R. nicht maßgebend, da kein (Hoch-) Wasserstand angesetzt werden muss. In Lastfall 2 (seltene Kombination) finden der Bemessungshochwasserstand (BHW) und ein „Schnell sinkender Wasserstand“ Berücksichtigung. Unter Lastfall 3 (außergewöhnliche Kombination) wird u. a. Kronenstau betrachtet. Der Lastfall „Kronenstau“ hat hierbei primär die Sicherheit von Einsatzmannschaften im Falle von Deichverteidigungsmaßnahmen im Auge. Falls jedoch der Kronenstau physikalisch nicht möglich oder die Eintretenswahrscheinlichkeit unangemessen klein ist, kann dieses Herangehen zu unwirtschaftlichen Lösungen führen. Hier kann innerhalb von Lastfall 3 ein über dem BHW und unterhalb der Deichkrone liegender Wasserstand für Abflüsse mit einem sachgerechten Wiederkehrintervall basierend auf hydronumerischen Abflussberechnungen festgelegt werden. Bei all den genannten Szenarien wird eine voll wirksame Dichtung angesetzt. Da es sich bei Sinken des Wasserstands i. d. R. um einen natürlichen Zustand handelt, sollte der Belastungszustand „Schnell sinkender Wasserstand“ auch bei anderen (Bemessungs-) Hochwasserständen beachtet werden [5].

Nach BAW MSD [7], DIN 1 054 [8] und sinngemäß auch DIN 19 712 [1] sollte auch der Ausfall oder die Beeinträchtigung einer Dichtung bei Ansatz eines Tragwerkszustands bzw. eines Durchströmungszustands betrachtet werden. Hier kann und sollte jedoch eine Abschätzung vorgenommen werden, ob und bei welcher Art von Fehlstellen unter Beachtung der Dichtungsart welche Durchströmungszustände berücksichtigt werden müssen bzw. auftreten können. Sind zusätzlich zu Innendichtungen Dränkörper vorhanden,

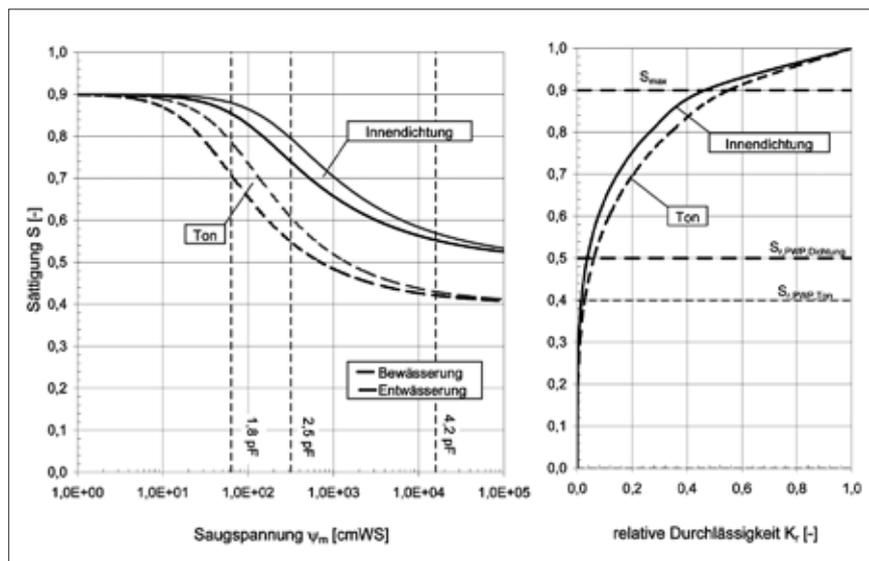


Bild 2: Sättigungs-Saugspannungs-Verhalten einer hydraulisch gebundenen Innendichtung und eines Tonbodens [5]

kann abgeschätzt werden, wie stark der Drän bei Beeinträchtigung oder Ausfall der Dichtung beansprucht wird. Ist die Abführung des dann anfallenden Sickerwassers mit ausreichender Sicherheit gegeben, muss eine Überlagerung der Tragwerkszustände „Ausfall der Dichtung“ und „Ausfall des Dräns“, wie dies mit Lastfall 4 nach BAW MSD [7], mit Lastfall 3 nach DIN 19 712 [1] und in DWA [3] beschrieben ist, nach Meinung des Autors nicht berücksichtigt werden. Kann der Drän das anfallende Sickerwasser nicht mit der entsprechenden Sicherheit abführen, ist auch die Überbeanspruchung oder der gleichzeitige Ausfall des Dräns zu bewerten und ggf. ist der genannte Lastfall anzusetzen.

Nach DIN 19 712 [1] werden in erster Linie stationäre Durchströmungsverhältnisse zur Bemessung von Deichen herangezogen. Instationäre Verhältnisse können jedoch einer Bemessung zugrunde gelegt werden, wenn hierfür Annahmen und Ansätze mit ausreichender Sicherheit zur Verfügung stehen. In der Praxis ist es schwierig, Bemessungswasserstandsganglinien an Gewässern festzulegen. Dies ist i. d. R. sehr aufwändig und mit einer entsprechenden Unsicherheit versehen. Eine Festlegung muss abschnittsweise erfolgen. Außerdem müssen für die unterschiedlichen Nachweise bei schnell fallendem und langsam steigendem Wasserstand auch unterschiedliche Ganglinien definiert werden. Eine weitere, mit Unsicherheit versehene Randbedingung stellen die geohydraulischen, für eine instati-

onäre Berechnung notwendigen Parameter (**Tabelle 1**) des Deiches und des Untergrundes dar. Instationäre Berechnungen sind im Fall von homogenen Deichen unter Berücksichtigung von Hochwasserganglinien mit Dauern von wenigen Stunden bis über vier Wochen nur für Bodendurchlässigkeiten zwischen $k_{\text{Deich}} = 10^{-4}$ bis 10^{-6} m/s praktisch von Interesse [5]. Die instationäre Betrachtung bringt trotz des Mehraufwands und der größeren Unsicherheit bei den Annahmen im Fall von innen gedichteten Deichen keinen großen Informations- und Sicherheitsgewinn gegenüber der Annahme von stationären Verhältnissen infolge z. B. des Bemessungshochwasserstandes, wobei für einfache Deichsysteme analytische Verfahren angewendet werden können. Für einen stark unregelmäßigen Aufbau des gesamten Deichsystems kann dies anders sein. Für Lastfälle, die einen instationären Zustand betrachten, wie der Lastfall „Schnell sinkender Wasserstand“, kann eine numerische Modellierung ein Weg sein, die Durchströmungsverhältnisse zu bestimmen, wenn einfachere, analytische Betrachtungen nicht ausreichen.

Werden statisch wirksame Innendichtungen eingesetzt, werden Lastfälle betrachtet, bei denen die Dichtung einen einseitigen oder zweiseitigen, durch Erosion oder Böschungsruhrschung verursachten Wegfall des Deichkörpers „stützen“ muss. Beispiele hierfür sind Beanspruchungen des Deiches durch „Überströmung“ oder durch den „Windwurf eines Baumes“ [3].

2.3 Fehlstellen bei Innendichtungen

Sind Fehlstellen in einer vollkommenen Innendichtung vorhanden, können dadurch je nach Art, Lage und Größe der Fehlstellen die Durchströmungsverhältnisse wesentlich beeinflusst bzw. verändert werden. Bereits bei kleinen Rissen, Spalten, Hohlräumen oder ähnlichen wasserdurchlässigen Bereichen kann die Wirksamkeit einer Dichtung komplett verloren gehen.

Fehlstellen in künstlichen Innendichtungen können linienhaft, z. B. bei Setzungs- oder Schrumpfrissen in hydraulisch gebundenen Dichtungen, oder lokal röhrenförmig, z. B. in nicht mit Bindemittel gefüllten Bereichen, auftreten. Lokal begrenzte Fehlstellen bewirken eine ausgeprägte 3-D-Durchströmung der landseitigen Böschung, wohingegen bei langgestreckten Fehlstellen theoretisch ein 2-D-Ansatz ausreichend sein kann.

Wie in Kapitel 4 dargelegt, wird durch eine 2-D-Abschätzung der Durchströmung von lokal begrenzten Fehlstellen der Durchströmungszustand überschätzt. Gleichzeitig hängt eine belastbare Abschätzung von vielen Annahmen zur Lage und Größe der Fehlstelle sowie von den übrigen geohydraulischen Randbedingungen ab. Hier ist selbstverständlich eine Abschätzung auf der sicheren Seite, d. h. mit möglichst belastenden Annahmen durchzuführen.

Eine Bewertung der Fehlstellenanfälligkeit ist in Haselsteiner und Strobl [9] im

Rahmen der Beurteilung der Durchwurzelbarkeit von im Deichbau üblichen Dichtungen gegeben. Demnach sind Spundwand-, Einphasenschlitzwand- und Bodenvermörtelungsdichtungen generell weniger anfällig für Fehlstellen und auch praktisch nicht durchwurzelbar. Im Gegensatz hierzu kann dies für Schmalwände nicht in gleicher Weise bestätigt werden.

3 Geohydraulische Parameter von Böden und Dichtungen

Für instationäre grundwasserhydraulische Modellierungen sind die Porosität, die gesättigte Durchlässigkeit, die geometrischen Abmessungen, das Sättigungs-Saugspannungs-Verhalten sowie die ungesättigte Durchlässigkeit der Dichtung, der Böden und angrenzenden Materialien notwendig und in das Deichsystem bzw. das Grundwassermodell mit den entsprechenden hydraulischen Randbedingungen einzubinden. Eine wesentliche Randbedingung für die instationäre Modellierung ist der Ausgangszustand, der durch das hydraulische Potenzial, die Sättigung oder den Wassergehalt beschrieben werden kann. Die Abschätzung und Festlegung dieses Ausgangszustands ist relativ komplex und es bedarf i. d. R. einer Verifikation durch Messungen und/oder der Validierung durch ein Wasserhaushaltsmodell oder einer Annahme auf der si-

cheren Seite, um keine zu optimistisch angesetzten Verhältnisse zu unterstellen. Die mit derzeit erhältlichen Wasserhaushaltsmodellen erreichbare Genauigkeit bzw. Auflösung ist i. d. R. für die Abbildung des Wasserhaushalts von relativ kleinen Erdbauwerken für praktische Belange oft zu ungenau. Zusätzlich sind die Annahmen zu den Randbedingungen, wie z. B. Sonnenschein- und Regendauer, Evapotranspirationsraten und deren Einfluss auf den Deich, wie z. B. das Infiltrationsverhalten auf Böschungen und die Auswirkungen von Bewuchs auf das Saugspannungsverhalten von Böden, schwierig und nicht ohne größeren Aufwand sowie vertiefte bodenkundliche und geohydraulische Kenntnisse sachgerecht festzulegen.

Bei sehr durchlässigen homogenen Verhältnissen jedoch hat das Sättigungs-Saugspannungs-Verhalten nur geringen Einfluss auf den Sättigungsvorgang. Hier sind die Ausgangsparameter zudem relativ genau abschätzbar, weshalb instationäre Betrachtungen relativ belastbare Ergebnisse erzeugen. Komplexere Deichsysteme, z. B. mit natürlichen Dichtungen, einer bindigen Deckschicht und starken Schichtungen sind diesbezüglich schwieriger zu beurteilen und die Ergebnisse aus einer instationären Betrachtung auch entsprechend vorsichtiger zu interpretieren. Hierzu können und sollten Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden, um die

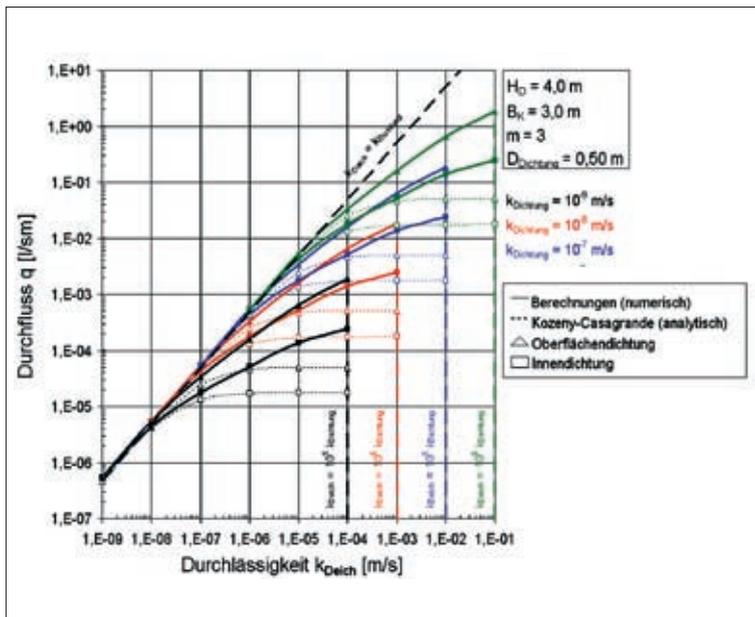


Bild 3: Verhältnis von Deichdurchlässigkeit zu Durchfluss für unterschiedliche Durchlässigkeiten der Dichtung eines Beispieldeiches auf undurchlässigem Untergrund [5]

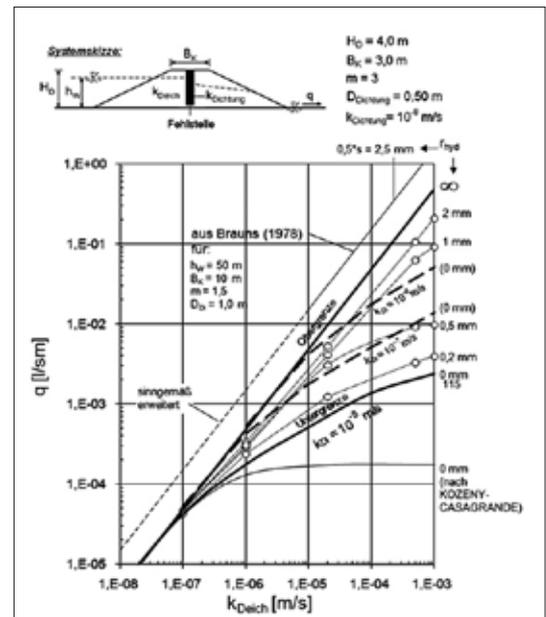


Bild 4: Verhältnis von Deichdurchlässigkeit zu Durchfluss für eine Dichtung mit Fehlstellen mit unterschiedlichen hydraulischen Radien r_{hyd} der Fehlstellen [5]

Schwankungsbereiche aller Parameter und Annahmen abzudecken.

Für stationäre Betrachtungen fallen die Angabe eines Ausgangszustands und die von der Zeit abhängigen anderen Randbedingungen, wie z. B. Wasserstandsganglinien, weg. Eine Abschätzung von geohydraulischen Parametern einer gebundenen Innendichtung – vergleichbar mit einer Betonwand – ist zusammen mit dem Beispiel der entsprechenden Parameter eines Tonbodens in Tabelle 1 und **Bild 2** gegeben. Es wurde hier angenommen, dass die fertig gestellte hydraulisch gebundene Innendichtung kleinere Poren als ein typischer Tonboden aufweist [5].

4 Stationäre Durchströmung von Deichen mit vollkommenen Dichtungen

Für die nachfolgend dargestellten Berechnungsergebnisse wurden die in Tabelle 1 angegebenen Parameter der Böden und Innendichtung verwendet. Im Folgenden werden nur stationäre Verhältnisse an Deichen mit vollkommenen Innendichtungen betrachtet. Unvollkommene Dichtungen sind zusammen mit einigen instationären Betrachtungen in Haselsteiner [5] und der dort angegebenen Literatur behandelt [12].

4.1 Deiche mit vollkommenen Innendichtungen

Bei vollkommenen Dichtungen ist der sich einstellende stationäre Durchströmungszustand vom Verhältnis der Durchlässigkeiten von Dichtung und Deichkörper abhängig. Dies lässt sich anschaulich am Beispiel des Durchflusses bzw. der Sickerwassermenge in Abhängigkeit von der Deichdurchlässigkeit darstellen. In **Bild 3** (und analog in **Bild 4**) ist dieser Zusammenhang für unterschiedliche Durchlässigkeitsbeiwerte von Oberflächen- und Innendichtungen für ein Deichsystem mit undurchlässigem Untergrund dargestellt. Die Ergebniskurven wurden einerseits unter Zuhilfenahme eines numerischen FEM-Grundwassermodells und andererseits nach analytischen Ansätzen von Kozeny-Casagrande ermittelt [5]. Auffallend ist, dass sich numerische und analytische Ergebnisse unterscheiden, obwohl beide Verfahren auf den gleichen geohydraulischen Grundgleichungen basieren. Dies resultiert aus den jeweils notwendigen Vereinfachungen der Randbedingungen

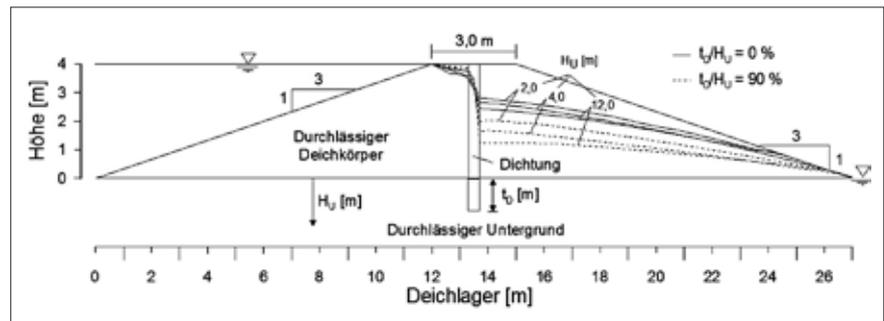


Bild 5: Sickerlinien in einem Deich mit unvollkommener Innendichtung bei unterschiedlichen Untergrundmächtigkeiten H_U und Verhältnissen t_D/H_U [5]

und anderer systemrelevanter Parameter, wie z. B. bei der Berücksichtigung von ungesättigten Bodenzonen.

Der analytische Ansatz nach Kozeny-Casagrande liefert ab einem bestimmten Durchlässigkeitsverhältnis Grenzwerte, die sich auch über die hier angegebenen Betrachtungsgrenzen ($k_{\text{Deich}} = 10^5 k_{\text{Dichtung}}$) fortführen lassen. Für $k_{\text{Deich}} = k_{\text{Dichtung}}$ ergibt sich unter Verwendung eines doppelt logarithmischen Maßstabs eine Grenzgerade. Diese Linie beschreibt nichts anderes als den Durchfluss durch einen homogenen Deich.

Ein praktisch vollständiger Potenzialabbau erfolgt in der Dichtung ab einem Durchlässigkeitsverhältnis von $k_{\text{Deich}}/k_{\text{Dichtung}} = 100$ bis 1 000. Diese alt bekannte Erkenntnis zeigt auch, dass sich die in der Literatur anzutreffenden Empfehlungen für die Durchlässigkeit von Dichtungen $k_{\text{Dichtung}} = 10^{-7}$ bis 10^{-8} m/s auf gemischtkörnige, relativ durchlässige Deichböden beziehen.

4.2 Deiche mit unvollkommenen Innendichtungen

Unvollkommene Innendichtungen (**Bild 5**) tragen je nach Einbindungstiefe t_D nur

eingeschränkt zum Potenzialabbau innerhalb des landseitigen Deichkörpers bzw. der Durchströmung bei. Wie in **Bild 5** gezeigt wird, tritt abhängig von der Mächtigkeit des durchlässigen Untergrundes selbst bei einer relativ großen Einbindungstiefe $t_D/H_U = 90\%$ noch eine bemerkenswerte Durchströmung des landseitigen Deichkörpers auf. Die Erreichbarkeit eines dichten Horizonts oder das Vorhandensein einer bindigen, wenig durchlässigen Deckschicht sind folglich wichtige Voraussetzungen, wenn es gilt, Innendichtungen vollkommen auszuführen und somit eine wesentliche Verbesserung der Standsicherheit durch Reduktion der Durchströmung zu erreichen. Unvollkommene Dichtungen übernehmen aber nicht selten die Aufgabe einer Erosionssperre und tragen so zur Verbesserung der Standsicherheit, Gebrauchstauglichkeit und Dauerhaftigkeit von durchströmten Erdbauwerken bei.

4.3 Deiche mit vollkommenen Innendichtungen mit Fehlstellen

Brauns [10] ermittelte auf analytischem Weg die Durchströmung von Dichtungen in Dammbauwerken mit Rissen mit Öff-

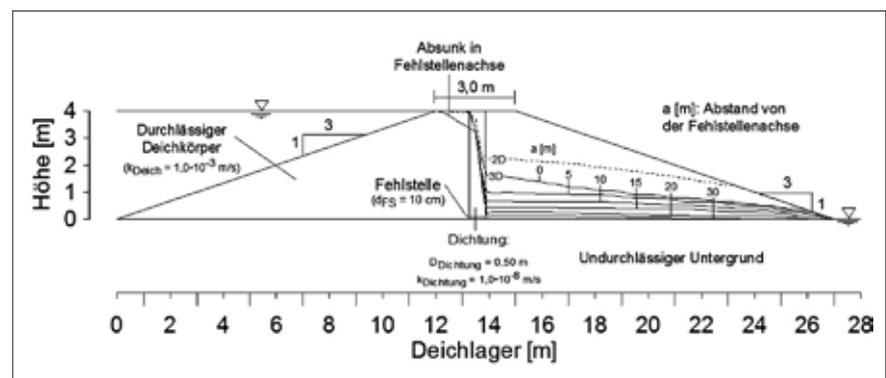


Bild 6: Durchströmung eines Deiches mit Dichtung und Fehlstelle aus 3-D-Berechnungen (durchgezogen) für unterschiedliche Abstände von der Fehlstellenachse und 2-D-Sickerlinie (gestrichelt) [5]

nungsweiten von 0,5 bis 5,0 mm für 2-D-Verhältnisse. Die eigenen Untersuchungen konnten den von Brauns [10] dargestellten 2-D-Sachverhalt bestätigen. Die Fehlstellen wurden unter Zuhilfenahme der Röhrenströmung nach Hagen-Poiseuille modelliert [5]. Vereinfachend wurde auf eine Berücksichtigung möglicher Turbulenzen bei größeren Reynolds-Zahlen in der Röhre oder im Deichboden verzichtet.

In Abhängigkeit unterschiedlicher Deichdurchlässigkeiten sind die Durchflussmengen eines Deiches mit Innendichtung und an der Sohle befindlicher Fehlstelle in Bild 4 dargestellt. Zum Vergleich ist eine von Brauns [10] analytisch ermittelte Gerade hinzugefügt. Die Obergrenze des betrachteten Deichsystems stellt eine unendlich große Fehlstelle dar ($r_{\text{hyd}} \rightarrow \infty$, keine Dichtung vorhanden) und die Untergrenze eine Dichtung ohne Fehlstelle ($r_{\text{hyd}} = 0$, intakte Dichtung). Angefügt wurden auch die Untergrenzen der entsprechenden Kurven für $k_{\text{Dichtung}} = 10^{-7}$ m/s und $k_{\text{Dichtung}} = 10^{-6}$ m/s.

Die Kurve für eine Durchlässigkeit der Dichtung von $k_{\text{Dichtung}} = 10^{-7}$ m/s entspricht etwa der Kurve für $r_{\text{hyd}} = 0,5$ mm, woraus sich in grober Näherung folgern lässt, dass diese Fehlstellengröße ausreicht, um die Durchlässigkeit der betrachteten Innendichtung mit $k_{\text{Dichtung}} = 10^{-8}$ m/s um eine Zehnerpotenz zu erhöhen. Verfährt man auf diese Weise weiter, können Radien $r_{\text{hyd}} > 1$ mm bereits bei einer Stützkörperdurchlässigkeit von $k_{\text{Deich}} > 10^{-4}$ m/s eine Erhöhung um das Hundertfache bewirken, wenn man anstelle einer Dichtung mit Fehlstelle eine Ersatzdurchlässigkeit der gesamte Dichtung ansetzt.

Die 3-D-Durchströmung von Fehlstellen zeigt im Vergleich zu 2-D-Betrachtungen eine reduzierte Höhe der Sickerlinienfläche im landseitigen Deichbereich (Bild 6). Es ist zu erkennen, dass die Sicker-

linie der 2-D-Berechnung in Fehlstellenachse ($a = 0$ m) deutlich über der 3-D-Berechnung liegt. Bereits ab ca. 20 bis 30 m Entfernung liegt die Sickerlinie auf ähnlichem Höhenniveau, wie es sich ohne Fehlstelle einstellen würde. Eine Erhöhung der Sickerlinie im Vergleich zu gedichteten Verhältnissen ist bei dem gewählten Beispiel mit dem Fehlstellendurchmesser $d_{\text{FS}} = 10$ cm praktisch auf einen Deichabschnitt von 40 m bis 60 m begrenzt.

5 Zusammenfassung

Die Anordnung von Innendichtungen im Deichbau im Zuge von Neubau- oder Deichertüchtigungsmaßnahmen bewirkt bei entsprechenden Verhältnissen einen kompletten Potenzialabbau in der Dichtung und eine signifikante Durchflussreduktion. Bereits kleine Fehlstellen können eine Erhöhung der Durchlässigkeit von Dichtungen um das Vielfache verursachen. Die Dichtwirkung kann hierbei derart beeinträchtigt sein, dass kein oder ein relativ kleiner Potenzialabbau auftritt. Dabei verursachen lokal begrenzte Fehlstellen, wie z. B. Röhren, eine lokal begrenzte Durchströmung des hinter der Dichtung liegenden, landseitigen Deichkörpers. 2-D-Durchströmungsberechnungen, deren Durchführung bei größeren, sich weit erstreckenden Fehlstellen gerechtfertigt werden kann, können die Durchströmungsverhältnisse infolge von lokal wirkenden Fehlstellen in Abhängigkeit von den Randbedingungen im Einzelfall erheblich überschätzen. Hier kann die 3-D-Modellierung einen Beitrag zur realitätsnäheren Risikobeurteilung bieten. Aufgrund der Unkenntnis von möglichen Fehlstellengrößen und aufgrund der Sensitivität der maßgebenden Parameter kann die in der Praxis übliche Herange-

hensweise, einfach zu ermittelnde stationäre Verhältnisse unter der Annahme der Unwirksamkeit der Dichtung in Lastfall 3 anzunehmen, jedoch für gutgeheißen werden, da dies i. d. R. nicht zu erheblich teureren Konstruktionen führt. Bei einfachen, günstigen Untergrundverhältnissen und der Anordnung von ausreichend dimensionierten Dichtungen kann hingegen nach Meinung des Autors auf den Lastfall „Ausfall der Dichtung“ verzichtet werden, wenn Planung, Ausführung und Bauüberwachung dies rechtfertigen.

Autor

Dr.-Ing. Ronald Haselsteiner

Fichtner GmbH & Co. KG
Sarweystraße 3, 70191 Stuttgart
HaselsteinerR@fichtner.de

Literatur

- [1] Norm DIN 19 712: Flussdeiche. Berlin: Beuth Verlag, 1997.
- [2] Haselsteiner, R.: Maßnahmen zur Ertüchtigung von Deichen. In: Korrespondenz Wasserwirtschaft (KW) 1 (2008), Heft 3, S. 139-149.
- [3] DWA (Hrsg.): Dichtungssysteme in Deichen. In: DWA-Themen der Deutschen Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef, 2005.
- [4] DVWK (Hrsg.): Dichtungselemente im Wasserbau. In: Merkblätter zur Wasserwirtschaft des Deutschen Verbandes für Wasserwirtschaft und Kulturbau e. V. (DVWK), Heft 215, 1990.
- [5] Haselsteiner, R.: Hochwasserschutzdeiche an Fließgewässern und ihre Durchströmung. In: Berichte des Lehrstuhls und der VA für Wasserbau und Wasserwirtschaft der TU München, Nr. 111, 2007 (Dissertation).
- [6] Norm DIN 19 700: Stauanlagen. Teil 10-15. Berlin: Beuth Verlag, 2004.
- [7] BAW (Hrsg.): Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD). In: Merkblatt der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe, 2005.
- [8] Norm DIN 1054: Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau. Berlin: Beuth Verlag, 2005.
- [9] Haselsteiner, R.; Strobl, Th.: Deichertüchtigung unter besonderer Berücksichtigung des Gehölzbewuchses. In: Hermann, R. A.; Jensen, J. (Hrsg.): Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen – Handbuch für Theorie und Praxis. Siegen: Universitätsverlag universi, 2006.
- [10] Brauns, J.: Wasserverluste und Durchströmung von Leckagen in schmalen Dammdichtungen. In: Wasserwirtschaft 68 (1978), Heft 12, S. 351-356.
- [11] Schmidbauer, J.; Erb, Ch.: Sickerströmung in Deichen. In: Wasserwirtschaft 48 (1958), Heft 9, S. 232-236.
- [12] Scheuermann, A.: Instationäre Durchfeuchtung quasi-homogener Erddeiche. In: Berichte des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 164, 2005.

Ronald Haselsteiner

Seepage Flow through Flood Protection Embankment Dams with Artificial Core Sealings

In recent years artificial core sealings have increasingly been used in the course of flood embankment refurbishment measures. Here, for design issues it has to be evaluated whether full functionality can be presumed or a loss of functionality has to be considered. In the following particularly the steady seepage flow through flood protection embankments with artificial core sealings with and without leakages is presented. Further, geohydraulic parameters of typical dike soils and of cement-based core sealings are enclosed. Here, 2-D and 3-D seepage modelling can support risk assessment.