

Der Systemansatz zur Beurteilung der Gefahr der hydrodynamischen Bodendeformation in Deichen – Praktische Beispiele

Ronald Haselsteiner

Sebastian Perzlmaier

Kurzfassung

Folgender Beitrag bezieht sich auf die Ausführungen „Der Systemansatz zur Beurteilung der Gefahr der hydrodynamischen Bodendeformation“ von PERZLMAIER u. HASELSTEINER (2006). Es werden spezielle Aspekte an Deichen erläutert und anschließend an drei praktischen Beispielen Hinweise zur Handhabung des Systemansatzes gegeben. Abschließend wird durch eine unscharfe probabilistische Abschätzung gezeigt, wie der Systemansatz dazu dienen kann, Versagenswahrscheinlichkeiten für den durch innere Erosion verursachten Beginn eines Deichbruches abzuschätzen.

1 Einleitung

Die Beurteilung der Gefahr der hydrodynamischen Bodendeformation stellt sich bei Deichen aufgrund variierender Untergrundverhältnisse, inhomogenen Aufbaus oder auch veränderlicher Bodenparameter sehr schwierig dar. Eine Beurteilung, welche Auswirkungen die vielen verschiedenen Einflussfaktoren auf die geohydraulische Stabilität des Gesamtsystems haben und inwieweit die Anwendung der zahlreichen Filter-, Suffosions- und Erosionskriterien zur Beurteilung herangezogen werden können, ist nur anhand eines prozess- und risikobasierten Systemansatzes möglich (PERZLMAIER u. HASELSTEINER 2006; FELL et al. 2005). Ein allgemeingültiges Bemessungskonzept kann, wie aufgrund der Ausführungen in BAW MAK (1989) bzw. BAW MSD (2005) vermutet werden könnte, nicht angegeben werden, was in DIN 19712/1997 richtig gestellt wird.

Kritische Versagensmechanismen können in Teilprozesse, z. B. durch Aufstellen von Ereignisbäumen, untergliedert werden und diese Teilprozesse mit Eintretenswahrscheinlichkeiten belegt werden. Durch die Betrachtung unterschiedlicher Versagensmechanismen oder eines maßgebenden Ereignispfades kann anschließend einem Deichsystem eine Versagenswahrscheinlichkeit infolge hydrodynamischer Bodendeformation zugewiesen werden. Dazu bedarf es expliziter Nachweise und Kriterien ebenso wie ein fundiertes Fachwissen auf dem Deich- und Dammsektor. Zusätzlich kann durch den Systemansatz vorhandene Erfahrung transparent und sicher an richtiger Stelle eingesetzt werden.

Da es, zumindest zurzeit, noch nicht möglich ist, einzelnen Prozessen der Bodenumlagerung exakte Eintretenswahrscheinlichkeiten p zuzuordnen, muss man sich mit einer groben probabilistischen Beschreibung weiterhelfen. Probabilistischen Angaben können nur bedingt Eintretenswahrscheinlichkeiten bzw. Nichteintretenswahrscheinlichkeiten $(1 - p)$ zugeordnet werden. Folgende Zuordnung wurde im Folgenden verwendet (Tab. 1).

Tab. 1: Verwendete Bezeichnungen und ihre Zuordnung zu Eintrittswahrscheinlichkeiten (nach HUBER et al. 2003 und IDEL 1988)

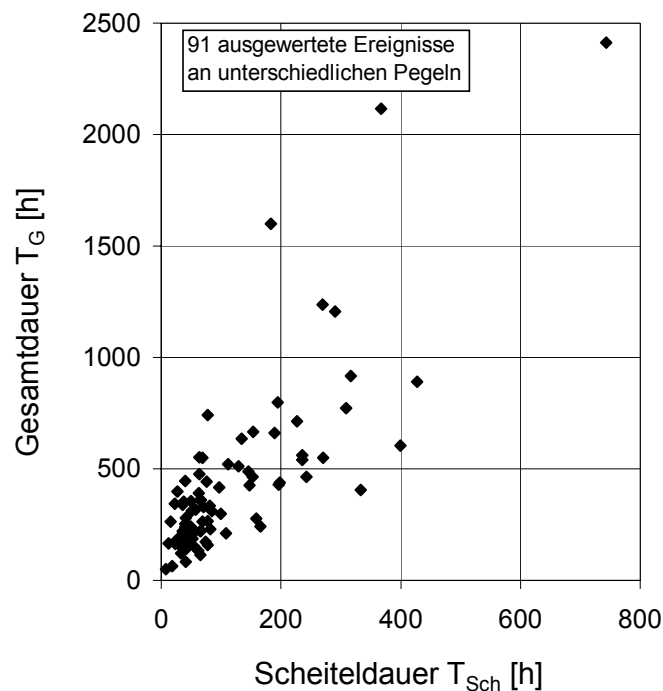
Bezeichnung	Wahrscheinlichkeit
Sicher	$\leq p = 10^0 = 1,0$ ($q = 1 - 10^0$)
Wahrscheinlich	$\leq p = 10^{-1} = 0,1$
Möglich	$\leq p = 10^{-2} = 0,01$
Nicht auszuschließen	$\leq p = 10^{-3} = 0,001$
Unwahrscheinlich	$\leq p = 10^{-4} = 0,0001$
Auszuschließen	$\leq p = 10^{-5} = 0,00001$

2 Besondere Randbedingungen bei Deichen

2.1 Einstaudauern von Deichen an bayrischen Flüssen

Deiche sind, anders als Talsperren und Stauhaltungsdämme, nur im Hochwasserfall eingestaut. An bayerischen Flüssen dauern Hochwasserereignisse von wenigen Tagen bis zu mehreren Wochen an (Gesamtdauer: T_G). Entsprechende Scheiteldauern T_{Sch} können sechs Stunden bis zu etwa vier Wochen (Donauhochwasser 1988) betragen (vgl. Abb. 1).

Abb. 1: Scheiteldauern und Gesamtdauern von Hochwasserganglinien an bayerischen Flüssen



Die größten geohydraulischen Belastungen für den Deich, nimmt man die Rücksickerung an der wasserseitigen Böschung bei fallendem Wasserstand außer Betracht, ergeben sich bei hohen Wasserständen (Kronenstau).

Zur Beurteilung der hydrodynamischen Bodendeformation ist es grundlegend über die Durchsickerungsverhältnisse im Deich und dessen Untergrund genau Bescheid zu wissen. Eine Annahme von stationären Durchsickerungsverhältnissen liegt i. d. R. auf der sicheren Seite, auch wenn analytische Verfahren bei hohen Wasserständen die tatsächlich mögliche

Durchsickerung unterschätzen können. Für gering durchlässige homogene Deiche an kleineren bayrischen Flüssen, wie z. B. der Mangfall, führt diese Annahme sowohl erdstatisch als auch geohydraulisch zu einer Überdimensionierung der Deiche, wenn man in grober Abschätzung die Zeit als maßgebend ansieht, die die Durchsickerungsfront benötigt, um an der luftseitigen Böschung auszutreten (vgl. HASLSTEINER U. STROBL 2005).

Eine einfache Möglichkeit, die instationären Verhältnisse in einem Deich abzuschätzen, bietet folgende Gleichung:

$$\text{Glg. 1} \quad t_b = \frac{n_a}{2 \cdot h_D \cdot k} \cdot b^2$$

- t_b Durchsickerungsdauer [s]
 n_a luftgefüllte Porosität [-]
 b Breite des Deichlagers [m]
 h_D Höhe des Deiches [m]
 k Durchlässigkeit des Deiches [m/s]

Für den Fall eines plötzlichen Einstaus bis zur Krone kann somit die Dauer t_b abgeschätzt werden, die besagt, wie lange es dauert, bis die Durchsickerungsfront den landseitigen Deichfuß erreicht (vgl. SCHNEIDER et al. 1997). Für einen Beispieldeich mit der Breite der Deichkrone von $b_{DK} = 3,0$ m und einem Porenanteil von $n_a = 0,25$ sind vereinfachend entsprechende Durchströmungsdauern in Abb. 2 angegeben. Die maximale Strömungsbelastung oder die Ausbildung einer stationären Sickerlinie muss auf anderem Wege – analytisch oder numerisch – ermittelt werden.

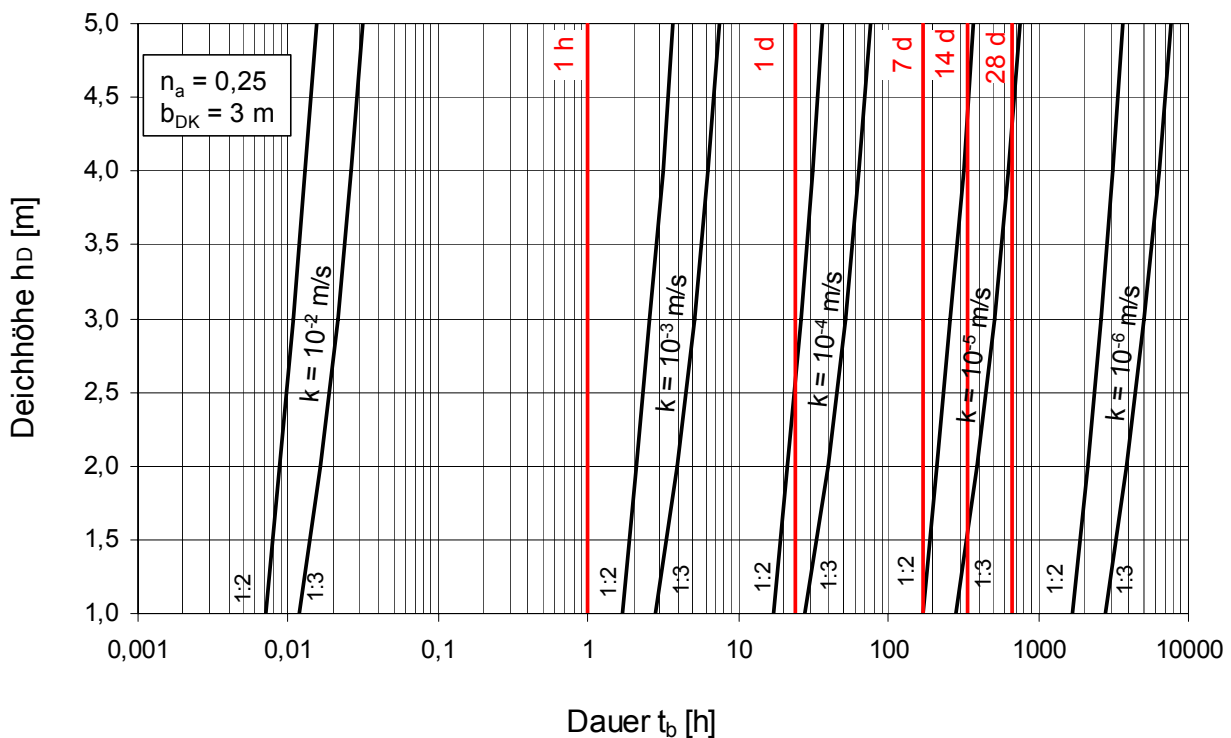


Abb. 2: Abschätzung der Durchsickerungsdauer t_b für plötzlichen Einstau

2.2 Deichaufbau und Bodenbeschaffenheit

Der historischen Entwicklung im Hochwasserschutz und im Erdbau haben wir zu verdanken, dass neu gebaute und ertüchtigte Deiche heutzutage einheitlich hohen Sicherheitsansprüchen genügen. Allerdings wurden schon vor hunderten Jahren Maßnahmen ergriffen, um Siedlungen, Ackerflächen und Menschen vor Überflutungen zu schützen, während geotechnisches Wissen sowie hydrologische Bemessungshilfen noch weitgehend unbekannt waren. Daraus resultieren Deichbauwerke, die mit den heutigen technischen Standards in Bauweise, Ausführung und Instandhaltung nicht zu vergleichen sind (vgl. z. B. SCHMIDT 2000). Aufgrund immer wieder auftretender größerer Hochwasserereignisse in der Vergangenheit wurden unterdimensionierte Deiche zum Teil mehrere Male den neuen Bemessungskriterien angepasst. Das geschah i. d. R. auf dem Weg, dass überströmte, zerstörte Bereiche entsprechend dem gerade aufgetretenen Hochwasserstand zzgl. einer Freibordhöhe erhöht und/oder verstärkt wurden. Auf Anordnung und Wahl unterschiedlicher Deichbaumaterialien wurden im Einzelfall keine Anforderungen gestellt.

Die meistens nur lückenhaft mögliche Erkundung des Aufbaus und der Zusammensetzung solch inhomogener Bereiche stellt einen weiteren Unsicherheitsfaktor dar. Die herkömmlichen geotechnischen direkten oder indirekten Aufschlussverfahren sind mit Unsicherheiten behaftet und werden nur punktuell eingesetzt. Wird flächig mittels geophysikalischer Verfahren wie z. B. das Georadar oder die Widerstandsgеоelektrik erkundet, bergen die Ergebnisse aufgrund des inhomogenen Aufbaus verhältnismäßig hohe Unsicherheiten. Eine kombinierte Anwendung mit geotechnischen Aufschlüssen zur Eichung kann im Vorfeld jedoch eine Unterscheidung in homogene und inhomogene Bereiche zulassen und die Erkundungstätigkeit in die maßgebenden Bereiche lenken (vgl. HASELSTEINER U. STROBL 2005).

Ähnliches gilt natürlich auch für den Deichuntergrund. Der ist natürlich gewachsen, kann von einer mehr oder minder bindigen Deckschicht überlagert werden und feine Sandbänder sowie Schlufflinsen aufweisen. Daraus resultiert ein geschichteter Aufbau, der eine hohe Anisotropie aufweisen kann. Eine bindige Deckschicht nimmt bei der Beurteilung der hydrodynamischen Bodendeformation einen besonderen Stellenwert ein, da sie zum einen Deich und Untergrund weitgehend hydraulisch trennt und zum anderen direkte Auswirkungen von Umlagerungen im Untergrund auf den Deich unterbindet. Diese sichernde Wirkung steht in Konkurrenz mit der höheren hydraulischen Belastung des Deiches selbst, da kein Druckabbau in den Untergrund erfolgen kann.

Werden die bodenkundlichen Verhältnisse durch Deichneubau oder durch Grundwasserabsenkung gestört, können sich die Böden auf natürlichem Wege ändern. Auenböden können sich bei Trockenfallen zu Gleyböden entwickeln. An der unteren Grenzfläche zum durchlässigen Untergrundkies kann der vormals regelmäßig befeuchtete und überflutete Auenboden durch Aggregatbildung Pseudosande ausbilden, welche u. U. ursprünglich nicht vorhanden waren und erosionsanfällig sind (KUNTZE et al. 1994).

Die auf den Deichböschungen üblichen Vegetationsdecken bzw. Grasnarben wirken als biologische Bewehrung, Schutz und natürlicher Filter. Trotz der schützenden Vegetationsdecke können durch Gehölzwurzeln und Wühltieraktivität Fehlstellen entstehen. Für den Nachweis der lokalen Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen kann nach BAW MSD (2005) Wurzelkohäsion angesetzt werden. Dadurch sind i. d. R. bei körnigen Erdbaustoffen steilere Böschungen möglich. Dies hat allerdings zur Folge, dass die lokalen Strömungskräfte bzw. hydraulischen Gradienten ansteigen. Solange diese „wurzelkohäsive“ Vegetationsdecke flächig funktionstüchtig und entsprechend höhere Durchlässigkeit aufweist, kann davon ausgegangen werden, dass kein Material austritt. Intensiv gepflegter Rasen auf einer mehr oder minder bindigen, bis zu 25 cm dicken Oberbodenschicht kann zu ungewünschtem Aufstau führen, wenn der Deichkörper durchlässiger ist als die Vegetationsdecke. Die Gradienten bei einer Störstelle vergrößern sich ebenfalls drastisch (vgl. PERZLMAIER u. HASELSTEINER 2006). Dass dies sogar zu Ausspülung grober Kieskörner führen kann, zeigt das Beispiel in Abb. 3, in dem eine abgestorbene Baumwurzel eine Austrittsstelle durch die schützende Vegetationsdecken stellt. Günstiger wirkt ein wurzelintensiver Magerrasen, der im Einzelfall auch direkt auf das kiesige Deichbaumaterial angesät werden kann (HASELSTEINER U. STROBL 2004, 2005).



Abb. 3: An abgestorbener Baumwurzel ausgetragene Kieskörner (Quelle: WWA Deggendorf)

2.3 Bauwerke und Dichtungen

Bauwerke, wie z. B. Siele, Tore aber auch Schöpfwerke, Brücken und private Nutzbauten bedürfen stets eines Anschlusses von Massiv- an Erdbauwerk. Im Gegensatz zur Talsperrenpraxis wird an Deichen trotz besseren Wissens im Einzelfall die notwendige Sorgfalt diesbezüglich vernachlässigt, so dass Schäden an Deichen durch hydrodynamische Bodendeformation oft an Bauwerken auftreten.

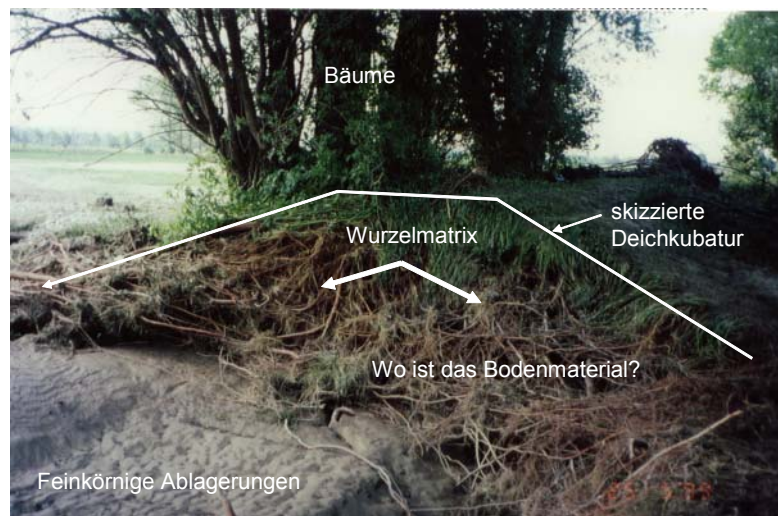
Oberflächendichtungen und Innendichtungen in Deichen haben die Aufgabe, die Durchsickerung des Deiches zu reduzieren. Während hydraulisch gebundene Innendichtungen durch das Einhalten eines maximal auftretenden Gradienten und der Forderung einer Mindestfestigkeit q_u [kN/m²] und eines adäquaten E-Moduls erosionsstabil und setzungsunempfindlich sind, kann bei natürlichen Dichtungen, insbesondere bei oberflächennahen, geneigten Dichtungen aus bindigen Materialien, Umlagerung nicht nur aufgrund ungeeigneter Bodeneigenschaften stattfinden, sondern auch durch auftretende Risse durch Austrocknung, Frost oder Setzungen. Eine größere Sicherheit wird durch die Anordnung eines Filters erreicht. Idealerweise kann das Deichstützkörpermaterial die Aufgabe eines Filters übernehmen. Spundwände sind diesbezüglich unkritisch, da sie erosionsstabil und setzungsunempfindlich sind (DWA 2005).

2.4 Einwirkungen der Umwelt

Abhängig von Deichstandort und Deichaufbau spielen bei den zu Trockenzeiten brach liegenden Deichen die Umwelteinflüsse eine gewichtige Rolle. So können, wie bereits erwähnt, durch Austrocknung, Frosteinwirkungen aber auch durch Setzungen durch z. B. Grundwasserabsenkung Risse in bindigen Dammbaumaterialien oder Dichtungen auftreten, was zur hydrodynamischen Bodendeformation, wenn im Einzelfall auch nur begrenzt, führen kann.

Weitaus wahrscheinlicher und offenkundiger sind Umlagerungen an Wühltiergängen oder –bauten sowie lebenden oder verrottenden Wurzeln. Die Röhren oder Höhlen von Wühltieren können die Durchsickerung verstärken und anfängliche Hohlräume zur Bodenumlagerung (Erosionsbeginn) bieten. Im Bereich von Wurzel oder Wühltieren sind Filterschichten entweder erst gar nicht vorhanden oder durchörtert, so dass die Erosionsentwicklung beim Prozessablauf meist übersprungen wird. Ob eine bestehende Röhre bei hydraulischer Beanspruchung zusammenbricht oder aufgrund der Kohäsion des Materials stehen bleibt, kann zu einer Beurteilung des weiteren Ablaufs herangezogen werden (Erosionsfortschritt). Falls sich noch eine Wurzel in der Röhre befindet, kann sich zwar die Röhre nicht selbst schließen, aber der freie Ausfluss und der damit verbundene Transport durch Schleppkräfte an der Röhrenwandung wird zumindest behindert (vgl. HASELSTEINER U. STROBL 2004, 2005). Die Auswüchse von durchwurzelt Deichen sind in Abb. 4 dargestellt. Egal ob über- oder durchströmt, der zwischen den Wurzeln liegende Boden ist komplett erodiert.

Abb. 4: Erodierter, mit Wurzeln durchzogener Deichkörper (Quelle: WWA Weilheim)



3 Risikobewertung der hydrodynamischen Bodendeformation in Deichen

Die Bewertung sowohl eines in seinem Aufbau und seiner Beschaffenheit ausreichend bekannten Deiches als auch von relativ unbekanntem Bestandsdeichen, die jahrzehntlang den Umwelteinflüssen ausgesetzt waren und ggf. Gehölzbewuchs aufweisen, kann anhand des in PERZLMAIER U. HASELSTEINER (2006) beschriebenen Systemansatzes durchgeführt werden.

Bei der Beurteilung von bestehenden Deichen können die teilweise jahrzehntelangen Erfahrungen bei Hochwasser, sozusagen als Naturversuch, Aussagen ermöglichen, ob Umlagerungs- oder Ausspülungsprozesse aufgetreten sind oder nicht. Diese meist visuelle Begutachtung schließt zwar nicht aus, dass ein Bauwerk geohydraulisch nicht stabil ist und innerhalb kurzer Zeit versagen könnte, aber besagt immerhin, dass die Summe der bisher

aufgetretenen Belastungen noch zu keiner oder einer geringen Umlagerung geführt hat. Sind Ausspülungen, z. B. in Form von Erosionstrichter vorhanden, sollten Ertüchtigungsmaßnahmen in Erwägung gezogen werden. Für den Fall, dass ein Austrag aus dem Untergrund allein auf Suffosion geringer Bodenanteile erfolgt, sind nicht zwingend Maßnahmen erforderlich, wenn deren Unbedenklichkeit nachgewiesen wurde.

3.1 Typische Deichsysteme

Als Deichsystem wird das Deichbauwerk samt Untergrund mit seinen geotechnischen und geohydraulischen Eigenschaften bezeichnet.

Folgende, in Abb. 4 gezeigte Deichsysteme sind für den überwiegenden Großteil von Deichen repräsentativ. Neben homogenen Deichen auf durchlässigen Untergrund weisen große Deichstrecken in Bayern einen Auenboden auf. Hauptsächlich an größeren Flüssen wie z. B. der Donau, an denen längere Hochwasser zu erwarten sind, sind bereichsweise Dichtungen angebracht. Bei Vorhandensein einer Deckschicht bietet sich es sich an, eine natürliche Oberflächendichtung an die Deckschicht anzubinden (Abb. 4).

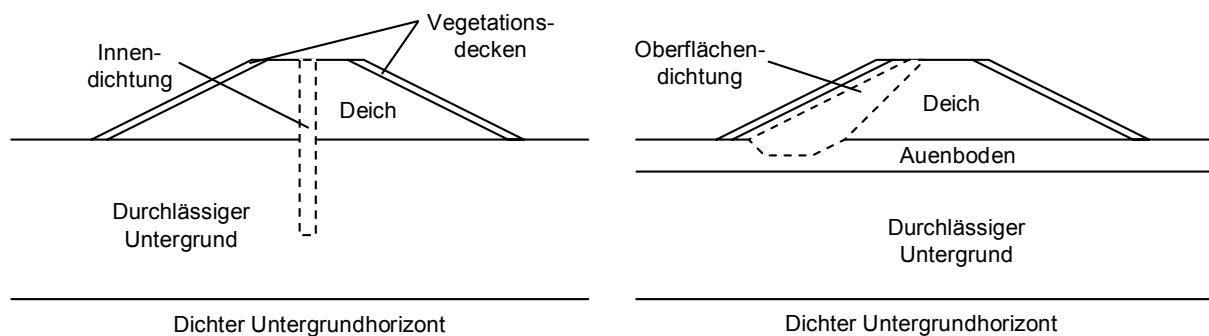


Abb. 4: Betrachtete Deichsysteme jeweils mit und ohne Dichtung

Da Innendichtungen einen Sonderfall darstellen und selbst i. d. R. erosionsfest sind, werden diese nicht näher betrachtet. Inwiefern Lastfall 3 „Ausfall der Dichtung“ nach DIN 19712/1997 berücksichtigt werden muss, kann im Einzelfall unter Erwägung z. B. der Versagenswahrscheinlichkeit von Dichtungen festgelegt werden.

3.2 Deichsysteme aus der Praxis

Für drei typische Versagensprozesse bis hin zum Deichbruch durch Erosion werden Ereignisbäume vorgestellt und entwickelt. Als repräsentative Bodenmaterialien wurden Kiese für Untergrund und Deich und Schluffe für Dichtung und Auenboden angenommen. Die Körnungsbänder zeigen die variierende Zusammensetzung der Böden und die Schwankungsbreiten seiner Eigenschaften u. A. die Filterwirksamkeit (Abb. 5).

Deichsystem A stellt einen homogenen Deich auf durchlässigem Untergrund dar. Die landseitige Böschung ist durch eine 12 cm mächtige Vegetationsschicht bedeckt. Der Deich ist 3,0 m hoch, hat eine Kronenbreite von 3,0 m und Böschungsneigungen von 1:3. Aquifer hat eine Mächtigkeit von 10 m. Als Versagensfall wird die rückschreitende Erosion durch den Deichkörper untersucht. Als Erosionsbeginn wird eine Fehlstelle mit dem Durchmesser 10 cm in der Vegetationsdecke am unteren Ende des landseitigen Deichfußes angenommen (Abb. 6).

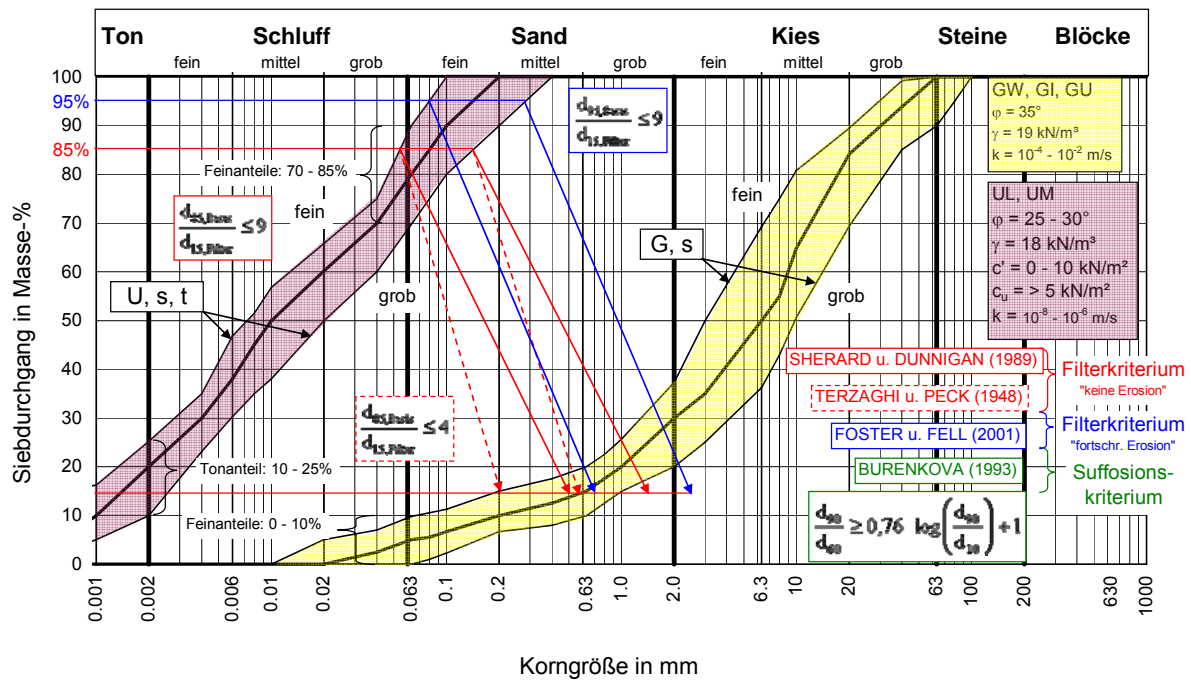


Abb. 5: Körnungsbänder der betrachteten Böden mit Filterkriterien

In Deichsystem B ist ein Deich auf einer Auenbodenschicht gelagert. Der Deich weist Böschungsneigungen von 1:2 auf und entspricht ansonsten dem Deich von System A. Die Auenbodenschicht ist 1,0 m mächtig und von 9,0 m mächtigem Kies unterlagert. Die rückschreitende Erosion im Untergrund bei bindiger Deckschicht wird untersucht. Der Beginn der Erosion wird an einer Fehlstelle im Auenboden reichende Fehlstelle ($\varnothing = 10$ cm) direkt am Deichfuß angenommen (Abb. 7).

Das Deichsystem C zeigt einen Deich mit Oberflächendichtung auf Auenboden. Aufgrund der hydraulischen Trennung zwischen Untergrund und Deich interessieren hier die Untergrundverhältnisse nicht weiter. Die Oberflächendichtung weist eine Dicke von etwa 50 cm auf und ist von einer 20 cm Deckschicht inklusive Vegetationsschicht geschützt. Als Ursache für den Beginn der Erosion wird einer der vorher genannten Gründe angenommen.

Die vorgestellten Deichsysteme entsprechen teilweise nicht den a.a.R.d.T. und repräsentativ eher Bestandsdeichen, deren Standsicherheit mehr oder minder gefährdet ist.

Für die drei Systeme wurden drei Ereignisbäume aufgestellt und anschließend der markierte Pfad bzgl. seiner Eintretenswahrscheinlichkeit beurteilt (Abschnitt 3.3). Bei diesen drei Ereignispfaden handelt es sich um typische bei Deichen mögliche Erosionsabläufe. Bei Austritt der Sickerlinie an der landseitigen Hangböschung kann rückschreitende Erosion im Deichkörper auftreten (System A). Rückschreitende Erosion kann auch Boden unter einer bindigen Deckschicht mit Folge von Auswurftrichtern fördern (System B). Als letztes werden Erosionsvorgänge in Oberflächendichtungen betrachtet (System C), die den Nachteil haben, dass u. U. die Erosion der Dichtung nicht erkannt werden kann.

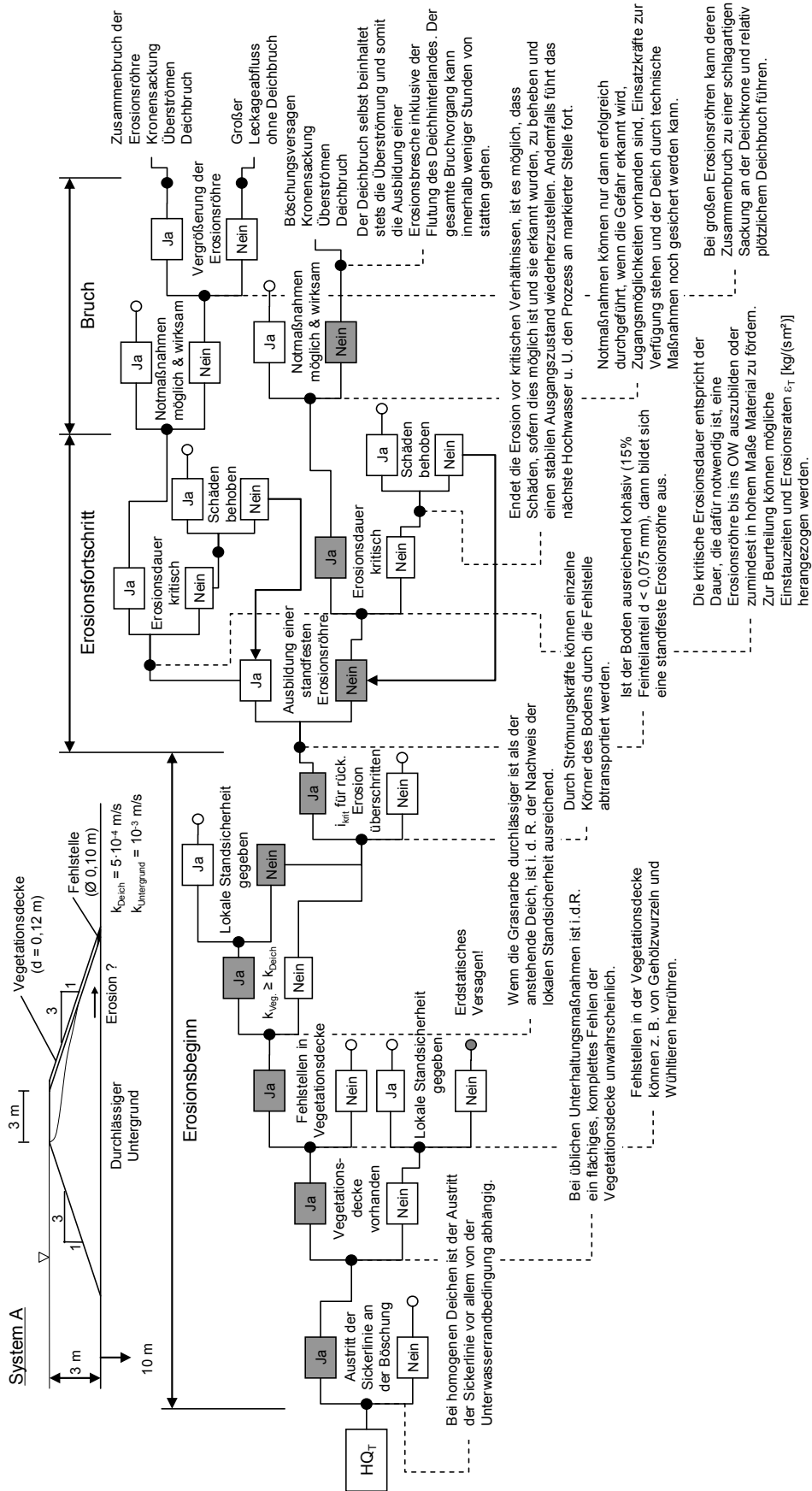


Abb. 6: System A - Rückschreitende Erosion durch einen homogenen Deichkörper beginnend an der landseitigen Böschung

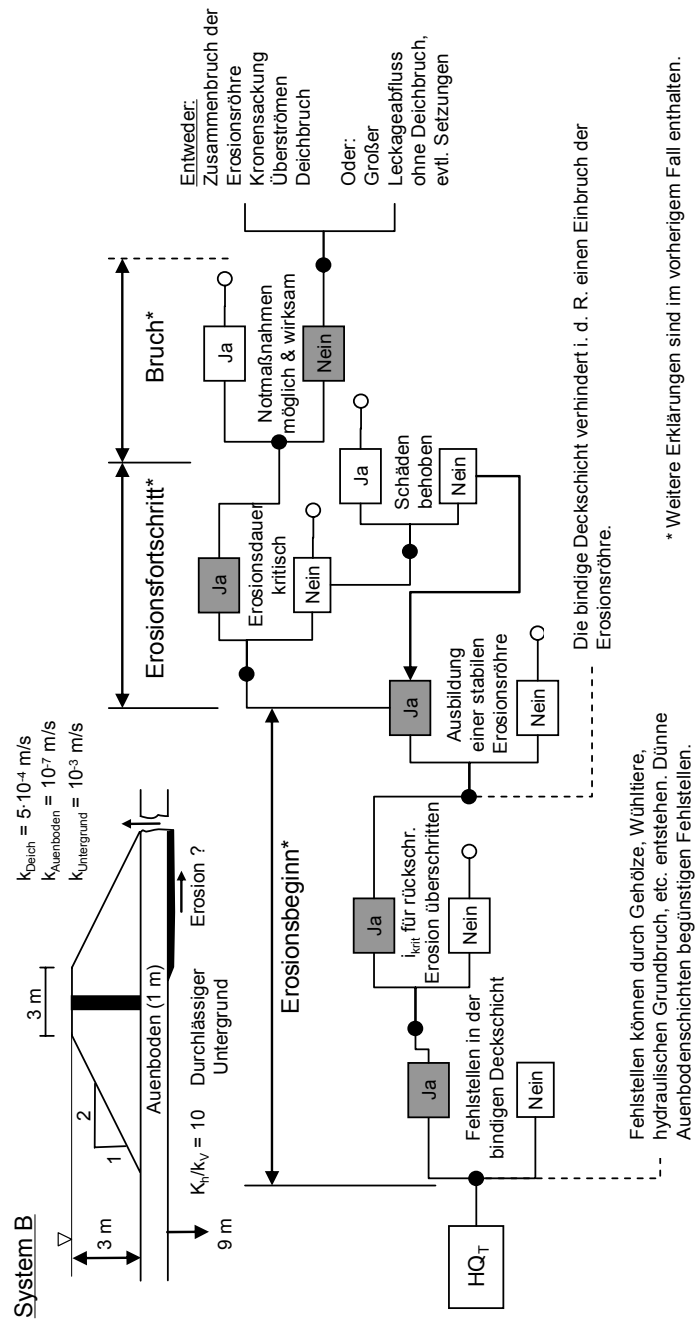


Abb. 7: System B - Rückschreitende Erosion unter der bindigen Deckschicht beginnend am landseitigen Böschungsfuß

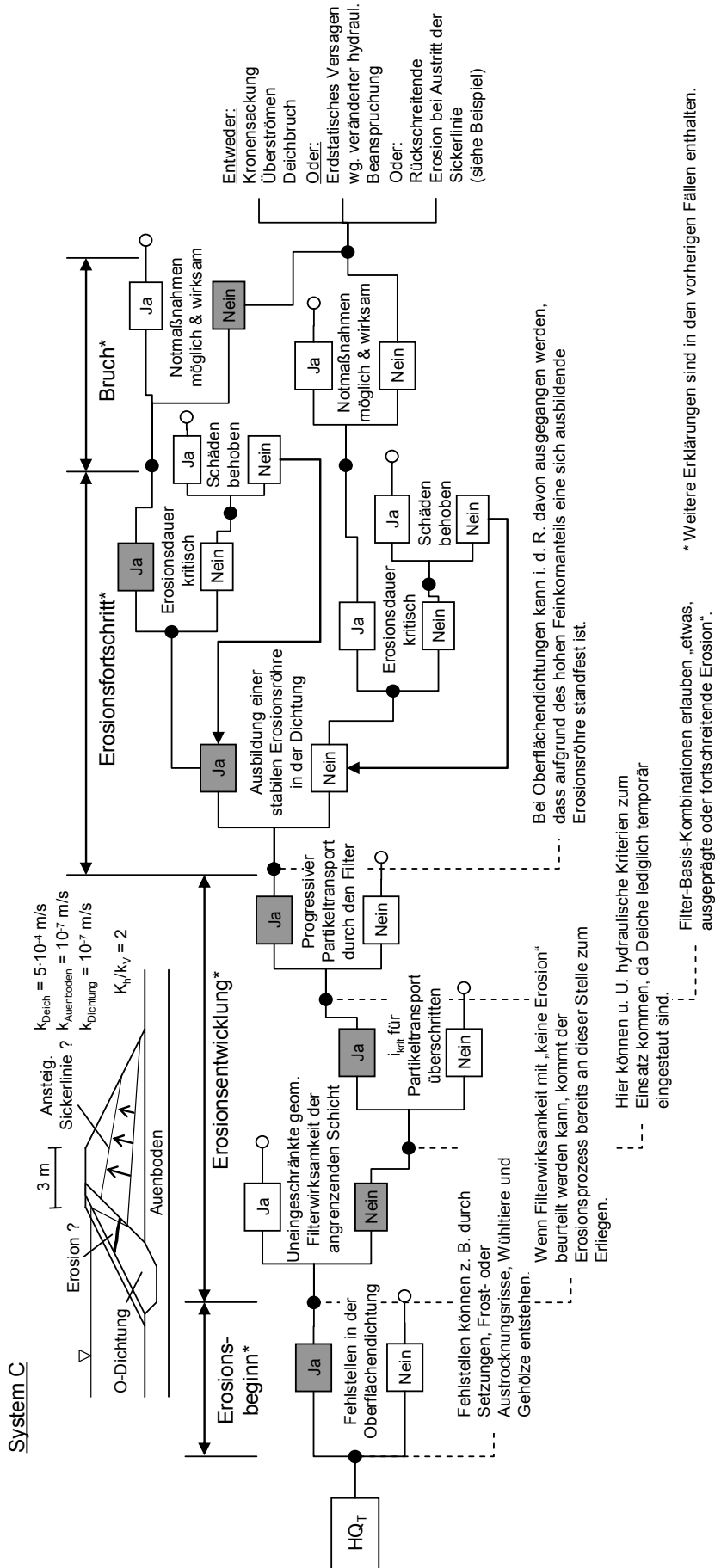


Abb. 8: System C - Rückschreitende Erosion durch eine natürliche Oberflächendichtung

Die Belastung der Deiche resultiert bei allen Fällen aus einem Einstau bis zur Krone (LF 3, DIN 19712/1997). Zur Beurteilung der Erosion müssen im Einzelfall die lokal auftretenden hydraulischen Gradienten betrachtet werden. Abb. 9 a enthält die vorhandenen lokalen maximalen hydraulischen Gradienten $i_{lok,max}$, die bei Deichsystem A auftreten. Die vorhandenen Gradienten unter der Deckschicht für Deichsystem B können aus Abb. 9 b entnommen werden. Die hydraulischen Gradienten beider Systeme wurden mittels eines F-E-Grundwassermodells anhand der berechneten Geschwindigkeitsverteilung ermittelt.

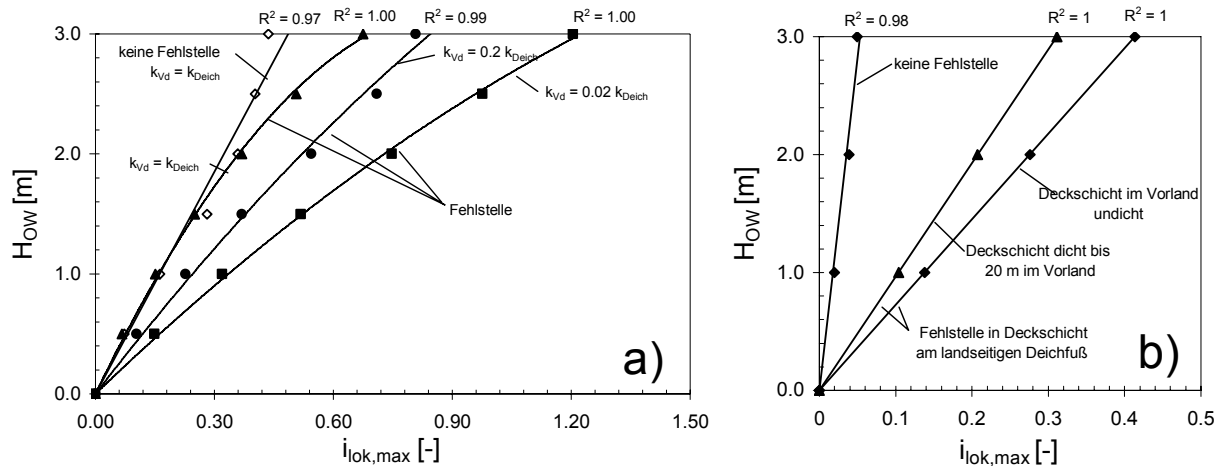


Abb. 9: Punktgradienten innerhalb der kritischen Bereiche an der landseitigen Deichböschung am Deichauflager (a, System A, Abb. 6) und unterhalb der Deckschicht am Deichfuß (b, System B, Abb. 7)

3.3 Beurteilung der hydrodynamischen Bodenumlagerung

In Tab. 2 sind die in Abb. 6 bis 8 markierten Ereignispfade aufgeführt und mit unscharfen Wahrscheinlichkeiten belegt (vgl. Tab. 1). Die Gefahr des Deichbruches durch mögliche Bodenumlagerung bis hin zum Deichbruch resultiert aus der Überlagerung der markierten Einzelprozesse bzw. -wahrscheinlichkeiten. Unterschieden wird hier zwischen der absoluten Eintretenswahrscheinlichkeit, d. h. die Wahrscheinlichkeit unter Berücksichtigung des Auftretens des Bemessungshochwassers, und der bedingten Eintrittswahrscheinlichkeit, die den Zustand bei Bemessungshochwasser betrachten. Für das Bemessungshochwasser (hier: Kronenstau) wurde eine Wiederkehrzeit von $T = 200$ a angenommen. Die absolute Eintrittswahrscheinlichkeit kann zur Beurteilung des vorhandenen Risikos unter Verwendung des Schadenspotentials herangezogen werden. Die bedingte Wahrscheinlichkeit dagegen ermöglicht hier eine Aussage, mit welcher Wahrscheinlichkeit der Deich als Ingenieurbauwerk bei Auftreten der Bemessungskräfte versagen kann.

Die Ergebnisse der untersuchten Versagensprozesse sind sehr unterschiedlich. System A weist bei eingetretenem Einstau bis zur Krone eine relative Eintrittswahrscheinlichkeit, dass der Deichbruch beginnt, von $p = 1,0 \cdot 10^{-4}$ auf (vgl. Tab. 2, oben). Diese relativ geringe Wahrscheinlichkeit beruht auf der schützenden Wirkung der Vegetationsdecke, die relativ hohen kritischen hydraulischen Gradienten für Kies und die Möglichkeit, dass bei Kiesdeichen mit angenommenen kleinen Fehlstellen die Belastungsdauer größer sein müsste als die Dauer eines einzelnen Hochwassers.

Tab. 2: Wahrscheinlichkeitsorientierte Beurteilung der Gefahr des Deichbruchs durch Erosion an drei verschiedenen Deichsystemen (vgl. Abb. 6 bis 8)

System A		Ja	Nein	
Prozess / Ereignis	Bezeichnung	p	1- p	Anmerkung*
HQ _T	-	5.0E-03	1.0E+00	Annahme eines HQ ₂₀₀ (Kronenstau)
Austritt der Sickerlinie an der Böschung	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Sehr durchlässiger Deichkörper, grobe Abschätzung nach Abb. 2
Vegetationsdecke vorhanden	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Ist i. d. R. immer vorhanden.
Fehlstellen in der Vegetationsdecke	Wahrscheinlich	1.0E-01	9.0E-01	Kleine Fehlstellen durch Wühltiere sind wahrscheinlich.
$k_{veg.} > k_{Deich}$	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Magerrasen mit hoher Durchlässigkeit vorhanden.
Lokale Standsicherheit gegeben	Auszuschließen	0.0E+00	1.0E+00	Der Nachweis des körnigen Erdmaterials muss ohne (Wurzel)Kohäsion geführt werden.
i_{krit} für rück. Erosion überschritten	Wahrscheinlich	1.0E-01	9.0E-01	$i_{lok,max} = 0,68$ (Abb. 9 a) $i_{krit} = 0,40$ (PERZLMAIER u. HASELSTEINER 2006, Abb. 3)
Ausbildung einer standfesten Erosionsröhre	Auszuschließen	0.0E+00	1.0E+00	Feinteilanteil des Deichbodens < 10 % (Abb. 5)
Erosionsdauer kritisch	Möglich	1.0E-02	9.9E-01	progressiver Materialaustrag nicht ausgeschlossen
Notmaßnahmen möglich & wirksam	Unwahrscheinlich	1.0E-04	1.0E+00	kein Deichverteidigungsweg vorhanden
Vergrößerung der Erosionsröhre	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Materialaustrag findet in hohem Maße statt.

Wahrscheinlichkeit für Beginn des Deichbruchs **5.0E-07**

(bei eingetretenem Hochwasser) 1.0E-04

System B		Ja	Nein	
Prozess / Ereignis	Bezeichnung	p	1- p	Anmerkung*
HQ _T	-	5.0E-03	1.0E+00	Annahme eines HQ ₂₀₀ (Kronenstau)
Fehlstellen in der bindigen Deckschicht	Wahrscheinlich	1.0E-01	9.0E-01	Auenböden variieren in ihrer Dicke, Auftriebsicherheit nicht gegeben
i_{krit} für rück. Erosion überschritten	Wahrscheinlich	1.0E-01	9.0E-01	$i_{lok,max} = 0,41$ (Abb. 9 b): Suffosion nach KENNEY U. LAU (1989) und BURENKOVA (1993) unwahrscheinlich, $i_{krit} = 0,40$ (nach PERZLMAIER u. HASELSTEINER 2006, Abb. 3)
Ausbildung einer stabilen Erosionsröhre	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Tragwirkung der bindigen Deckschicht
Erosionsdauer kritisch	Unwahrscheinlich	1.0E-04	1.0E+00	$i_{vorh,mittel} = 0,2$: nach CHUGAEV (1960) ok / nach BLIGH (1912) nicht ok / nach SCHMERTMANN (2000) ok
Notmaßnahmen möglich & wirksam	Auszuschließen	0.0E+00	1.0E+00	kein Deichverteidigungsweg vorhanden

Wahrscheinlichkeit für Beginn des Deichbruchs **5.0E-09**

(bei eingetretenem Hochwasser) 1.0E-06

System C		Ja	Nein	
Prozess / Ereignis	Bezeichnung	p	1- p	Anmerkung*
HQ _T	-	5.0E-03	1.0E+00	Annahme eines HQ ₂₀₀ (Kronenstau)
Fehlstellen in der Oberflächendichtung	Wahrscheinlich	1.0E-01	9.0E-01	Ursache: Risse durch Austrocknung, Frost, Setzungen
Geom. Filterwirksamkeit der angrenzenden Schicht	Unwahrscheinlich	1.0E-04	1.0E+00	Geometrischen Filerkriterien (vgl. Abb. 5): TERZAGHI u. PECK (1948) nicht ok, SHERARD u. DUNNIGAN (1989) teilweise ok
i_{krit} für Erosion überschritten	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Keine Informationen über die Erodierbarkeit der Basis.
Progressiver Partikeltransport durch den Filter	Wahrscheinlich	1.0E-01	9.0E-01	Nach FOSTER u. FELL (2001) "fortschreitende Erosion" nur für feinste Basis und größten Filter möglich.
Ausbildung einer stabilen Erosionsröhre	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Schluffe sind i. d. R. ausreichend kohäsiv.
Erosionsdauer kritisch	Sicher	1.0E+00	0.0E+00	Lange Einstauzeit wird angenommen. Zusätzlich ist kein wasserseitiger Reservefilter vorhanden. Die Erosionsrate liegt sehr hoch: $\varepsilon_T > 50$ kg/(sm ²) (nach WAN u. FELL)
Notmaßnahmen möglich & wirksam	Auszuschließen	0.0E+00	1.0E+00	Notmaßnahmen zur Verhinderung der Durchsickerung wasserseitig i. allg. nicht wirksam.

Wahrscheinlichkeit für Beginn des Deichbruchs **5.0E-05**

(bei eingetretenem Hochwasser) 1.0E-02

(erdstatisches Versagen durch Anstieg der Sickerlinie)

* zitierte Literatur aus PERZLMAIER u. HASELSTEINER (2006)

System B zeigt bei rückschreitender Erosion eine weitaus geringere Eintrittswahrscheinlichkeit für den beginnenden Deichbruch von $p = 1,0 \cdot 10^{-6}$ bei eingetretenem Hochwasser (vgl. Tab. 2, mitte). Dies ist darauf zurückzuführen, dass sich zuerst eine Fehlstelle durch die Deckschicht entwickeln muss und die kritischen hydraulischen Gradienten für den Beginn der Erosion für Kiese groß sind, was einen

Initiationsprozess aufgrund von Strömungskräften nur „wahrscheinlich“ ermöglicht. Ausschlaggebend für die niedrige Eintretenswahrscheinlichkeit sind jedoch die Nachweise, die es ermöglichen, den Erosionsfortschritt bzw. das Eintreten einer kritischen Erosionsdauer als unwahrscheinlich zu klassifizieren. Dies hängt i. allg. mit den niedrigen mittleren hydraulischen Gradienten im Untergrundbereich zusammen und hat auch Einfluss auf eine mögliche Vergrößerung der Erosionsröhre.

System C weist bei Kronenstau eine sehr hohe Wahrscheinlichkeit für beginnenden Deichbruch von ca. 10^{-2} auf (vgl. Tab. 2, unten). Dies liegt daran, dass die mit 50 cm relativ dünne Oberflächendichtung wahrscheinlich Fehlstellen aufweist und die Filterwirksamkeit des Kiesstützkörpers sehr unwahrscheinlich ist. Eine Überprüfung der Filterkriterien (vgl. Abb. 5) zeigt, dass unter Berücksichtigung der Schwankungsbreite der Deichkies gegenüber dem Bodenmaterial für die Dichtung nicht ausreichend geometrisch filterwirksam ist. Eine fortschreitende Erosion kann nicht ausgeschlossen werden. Zudem kann aufgrund der sehr hoch ermittelten Erosionsrate die kritische Erosionsdauer bei den entsprechend langen Einstauzeiten auftreten. Das Versagen bzw. der Deichbruch kann bei dem betrachteten Fall auf verschiedene Weise erfolgen. Eine davon ist, dass sich durch die erhöhte Durchsickerung der Dichtung die hydraulischen Belastungen auf die landseitige Böschung erhöhen und somit die erdstatische Standsicherheit (Böschungsbruch) gefährdet es, was zum Deichbruch führen kann. Ob und wie sich ein Deichbruch ausbildet, hängt wiederum von zahlreichen Faktoren ab, auf die im Rahmen dieser Betrachtung nicht näher eingegangen wird.

Insgesamt zeigen die ermittelten Eintrittswahrscheinlichkeiten für das Versagenszenario von System A ($p = 5 \cdot 10^{-7}$ bzw. $1 \cdot 10^{-4}$) und System B ($p = 5 \cdot 10^{-9}$ bzw. $1 \cdot 10^{-6}$), dass in diesen Fällen ein gewisses Maß an Sicherheitsreserven in den Systemen vorhanden sind. System C mit $p = 5 \cdot 10^{-5}$ bzw. $1 \cdot 10^{-2}$ kann dagegen Grund zur Besorgnis geben, wenn man bedenkt, dass dies nach Tab. 1 bedeutet, dass der Deichbruch nicht „auszuschließen“ ist.

4 Resümee und Ausblick

Die Anwendung des Systemansatzes mag beim ersten Blick aufwendig und unübersichtlich erscheinen, ist jedoch genau das Gegenteil. Abläufe können auf diese Weise in Prozesse unterteilt werden, dass es möglich ist, wenn auch teilweise nur qualitativ, Einzelprozessen entsprechende Wahrscheinlichkeiten zuzuweisen. Dadurch ist die Beurteilung der Gefährdung eines Deiches durch Erosion möglich. Schwierigkeiten liegen sicherlich darin, die Prozesse ordentlich aufzuschlüsseln und zu beschreiben und die Ergebnisse von Nachweisen an richtiger Stelle einfließen zu lassen. Es besteht deshalb sowohl bei der Weiterentwicklung der vorhandenen Nachweise als auch bei der probabilistischen Beurteilung von nicht direkt greifbaren Einflussgrößen wie z. B. die Wahrscheinlichkeit einer wirksamen Deichverteidigung Forschungs- und Klärungsbedarf. Erfahrungswerte, die seit langem bei Deichbau und -verteidigung gemacht wurden, lassen sich bei der Beurteilung von Deichsystemen auf diese Weise nachweislich sicherer verwerten. Um sich beim Versuch, die Gefährdung eines Deiches mit einer Wahrscheinlichkeit zu belegen, nicht in den vielen, unterschiedlichen Versagensabläufen, Ereignisbäumen und Nachweisen zu verlieren, ist es notwendig, wenige für das jeweilige Deichsystem maßgebende Versagensabläufe herauszufiltern.

Literatur

BAW MAK (1989): Anwendung von Kornfiltern an Wasserstraßen (MAK). Merkblatt, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe

BAW MSD (2005): Standsicherheit von Dämmen an Bundeswasserstraßen (MSD). Merkblatt, Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe

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

DWA (2005): Dichtungssysteme in Deichen. DWA-Themen, Deutsche Vereinigung für Wasserwirtschaft, Abwasser und Abfall e. V. (DWA), Hennef

FELL, R.; FOSTER, M.; Wan, C. F. (2005): A Framework for Assessing the Likelihood of Internal Erosion and Piping of Embankment Dams and their Foundation. Workshop on Internal Erosion and Piping of Dams and Foundations, Aussois (France) 2005

HASELSTEINER, R; STROBL, TH. (2004): Zum Einfluss von Bewuchs und Hohlräumen auf die Durchsickerung von Deichbauten; Lebensraum Fluss - Hochwasserschutz, Wasserkraft, Ökologie; Beiträge zum Symposium vom 16. - 19. Juni 2004 in Wallgau (Oberbayern); Berichte des Lehrstuhls und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Berichtsheft Nr. 101; Band 2, S. 92 - 100

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

HASELSTEINER, R; STROBL, TH. (2006): Deichertüchtigung unter besonderer Berücksichtigung des Gehölzbewuchses. Sicherung von Dämmen, Deichen und Stauanlagen. Handbuch für Theorie und Praxis. Hrsg. Hermann und Jensen, Universitätsverlag Siegen – universi, Siegen

HUBER, N. P.; Stamm, J.; Rettemeier, K.; Köngeter, J. (2003): Ereignisbaumanalysen zur Identifikation von relevanten Versagensmechanismen bei Staudämmen.

IDEL, K. H. (1988): Sicherheitsuntersuchungen auf probabilistischer Grundlage für Staudämme. Abschlussbericht, Anwendungsband. Untersuchungen für einen Referenzstaudamm, Deutsche Gesellschaft für Erd- und Grundbau, Essen

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

PERZLMAIER, S.; HASELSTEINER, R. (2006): Der Systemansatz zur Beurteilung der Gefahr der Hydrodynamischen Bodendeformation. Tagungsband, Fachtagung „Deichertüchtigung und Deichverteidigung in Bayern“, 13. – 14. Juli 2006, Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft, Technische Universität München, Wallgau

SAUCKE, U. (2006): Nachweis der Sicherheit gegen innere Erosion für körnige Erdstoffe. Geotechnik 29, Nr. 1, S. 43 – 54

SCHMIDT, M. (2000): Hochwasser und Hochwasserschutz in Deutschland vor 1850 – Eine Auswertung der Quellen und Karten. Oldenbourg Industrieverlag, München

SCHNEIDER, H.; SCHULER, U.; KAST, K.; BRAUNS, J. (1997): Bewertung der geotechnischen Sicherheit von Hochwasserschutzdeichen und Grundlagen zur Beurteilung von Sanierungsmaßnahmen. Abteilung Erddammbau und Deponiebau, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Karlsruhe, Heft 7, Karlsruhe

Adresse der Verfasser

Ronald Haselsteiner und Sebastian Perzlmaier

Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft

Technische Universität München

Arcisstraße 21

80290 München

r.haselsteiner@bv.tum.de und s.perzlmaier@bv.tum.de