



Durchsickerung von Flussdeichen – Physikalische Versuche und deren Vergleich mit numerischen Berechnungen

Ronald Haselsteiner

Kurzfassung

In den Jahren 2003 bis 2005 wurde am Lehrstuhl und der Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft der Technischen Universität München ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben mit dem Thema „Deichsanierung“ bearbeitet (Haselsteiner u. Strobl 2005). Im Rahmen dieses Projektes wurde an der Versuchsanstalt in Oberrach ein Modelldeich im Maßstab 1:1 geschüttet, um die Einflüsse von unterschiedlich verlaufenden Hochwasserwellen, von Vorregen- und Vorwellenereignissen, von Vegetationsdecken sowie von in den Deichkörper reichenden Störstellen bzw. Röhren auf den Durchsickerungszustand des Deiches zu untersuchen.

Neben einer Beschreibung des verwendeten Messaufbaus und der Messinstrumentierung enthält folgender Beitrag eine Übersicht der im Sommer 2004 durchgeführten Versuche sowie die aus den physikalischen Versuchen gewonnenen Erkenntnisse. Anschließend werden die ersten Ergebnisse numerischer Berechnungen sowohl für stationäre als auch für instationäre Verhältnisse mit den Versuchsergebnissen verglichen.

1 Einleitung

Hochwasserschutzdeiche sind im Gegensatz zu Stauhaltungsdämmen und den meisten Talsperrendämmen, Ausnahmen können Hochwasserrückhaltebecken sein, nicht dauerhaft eingestaut (DIN 19712/1997). Dennoch wird bei der Bemessung häufig von stationären Durchsickerungsverhältnissen ausgegangen. Damit liegt man i. d. R. auf der sicheren Seite, außer Zustand des Deiches (Aufbau, Bodenbeschaffenheit, Fehlstellen...) weicht von den Bemessungsannahmen derart ab, dass sich in der Praxis eine abweichende, stärkere Durchsickerungssituation einstellen kann. Werden Deiche jedoch nach den a.a.R.d.T. ertüchtigt oder neu gebaut und danach regelmäßig den entsprechenden Unterhaltungsmaßnahmen unterzogen, kann man davon ausgehen, dass der Deichaufbau sowie die Bodenbeschaffenheit langzeitbeständig sind, was die Möglichkeit der Abschätzung der Durchsickerungsverhältnisse begünstigt.

Sowohl für stationäre als auch für instationäre Betrachtungen ist die Fragestellung identisch: Welche maximale Durchsickerung sprich Belastung kann sich einstellen? Instationäre Betrachtungen hängen neben den Parametern der stationären

Berechnung – Einstauhöhe, Deichgeometrie, Deichaufbau, Bodenbeschaffenheit und hydraulische Randbedingungen – u. A. noch von der Dauer und der variablen Höhe des Einstaus und dem Vorfeuchtezustand ab. Der Vorfeuchtezustand wird von vorlaufenden Trockenperioden, Regen- oder Hochwasserereignissen sowie den vorhandenen physikalischen Eigenschaften der Böden bestimmt.

2 Modelldeich, Messaufbau und -instrumentierung

2.1 Modelldeich

Für die Deichschüttung wird überwiegend Sand der Körnung 0/4 mm verwendet. Die Neigung der Sandböschung beträgt 1:2,5, die Kronenbreite 2,0 m. Der Deich ist 1,6 m hoch und liegt auf einer 0,4 m mächtigen Sandschicht auf. Im Einlauf- sowie im Auslaufbereich der Untergrundsicht ist ein zweistufiger Kornfilter eingebaut. Die Böschungen werden aus Stabilitätsgründen mit gebrochenem Kies 8/32 mm auf 1:2,8 abgeflacht. Die Kieslage ist vom Sandkörper sowie von den Filtern mittels eines Geotextils getrennt (Abb. 1). Der Stützkörper aus Sand wird in Lagen zu je 0,25 cm im Überprofil geschüttet und bei 90 % der Proctordichte mit einem Rüttelgerät verdichtet. Die Böschungen werden durch Abziehen profiliert. Die Durchlässigkeit des Deichsandkörpers beträgt $k = 4 \cdot 10^{-4}$ m/s. Der gebrochene Kies hat eine Durchlässigkeit von ungefähr $k = 10^{-2}$ m/s.

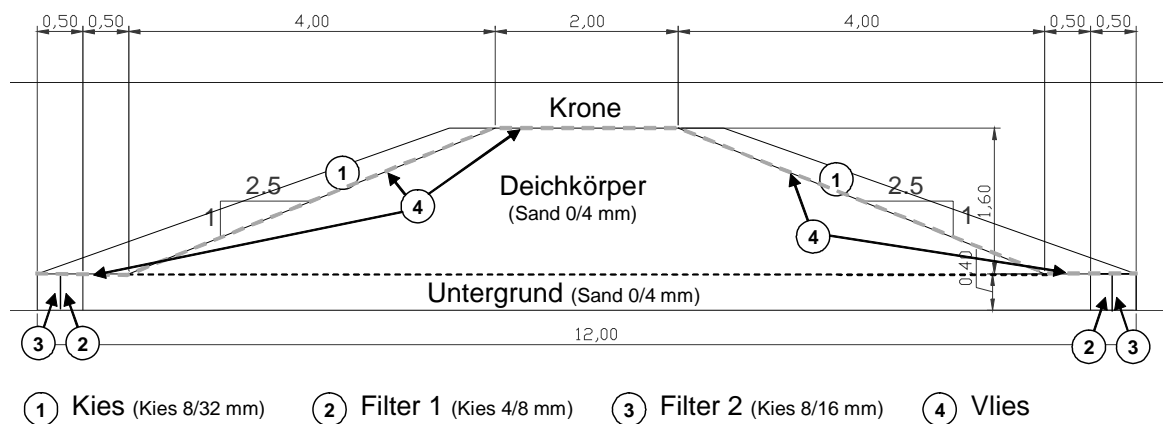


Abb. 1: Deichquerschnitt – Sanddeich auf Untergrund mit Kiesböschung

2.2 Messgrößen, Messaufbau und -instrumentierung

Im und am Deich werden die Messgrößen Wasserstand, Temperatur, Sättigung, Porenwasserdruck, Luftdruck und Standrohrspiegelhöhe (Pegelrohre) gemessen. Insgesamt werden 28 elektronische Messaufnehmer an neun Messquerschnitten im Deich installiert. Die Wasserstände im Ober- und Unterwasser sowie die Sickerwassermengen werden mittels Ultraschallpegel aufgenommen. Mittels drei Standrohrpegeln kann der Wasserstand im Deich manuell mittels Lichtlot gemessen werden (Abb. 2). Darüber hinaus werden die Temperaturen des Wassers im Einstaubereich und die Umgebungstemperatur festgehalten. Ebenso werden alle drei

digital aufgezeichneten Wasserstände ständig mittels Messlatte, Stechpegel oder Meterstab kontrolliert.

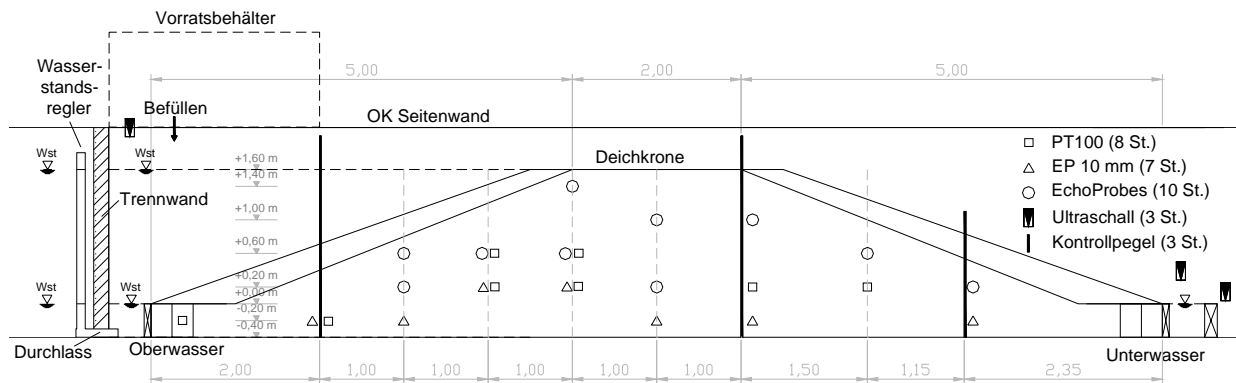


Abb. 2: Deichquerschnitt mit Messinstrumentierung

Das durch den Deich sickernde Wasser wird mittels einer Wasserfassung indirekt über den Wasserstand vor dem Ausfluss aus einer Lochblende gemessen. Die elektronisch aufnehmbaren Messgrößen werden über eine Erfassungseinheit auf einem PC mittels spezieller Software gespeichert. Temperatur- und Sättigungsgeber konnten direkt an die Erfassungseinheit angeschlossen werden. Luftdruckgeber, Ultraschallpegel sowie die elektronischen Porenwasserdruckgeber benötigten eine eigene Versorgungsspannung. Das Eingangssignal der Porenwasserdruckgeber musste mit einem Messverstärker 100fach vergrößert werden (Abb. 3).

Mit Hilfe der gemessenen Größen wird die mittlere Sättigung des Deiches, die durchsickernde Wassermenge, die Lage der Sickerlinie und die Temperaturverteilung im Deich ermittelt und ausgewertet. In Abb. 4 sind die ausgewerteten Messwerte der elektronischen

Porenwasserdruckgeber für den Versuch Nr. 1 (siehe Tab. 1) dargestellt. Die Einstauhöhe (WST 1 [cm]) und die Lage der einzelnen Porenwasserdruckgeber im Deich sind ebenfalls abgebildet. Die mittels Pegelrohre ermittelten Standrohrspiegelhöhen sind als Kontrollpunkte (KP 1 bis KP 3) zur Verifizierung der Porenwasserdruckgeber auch dargestellt.

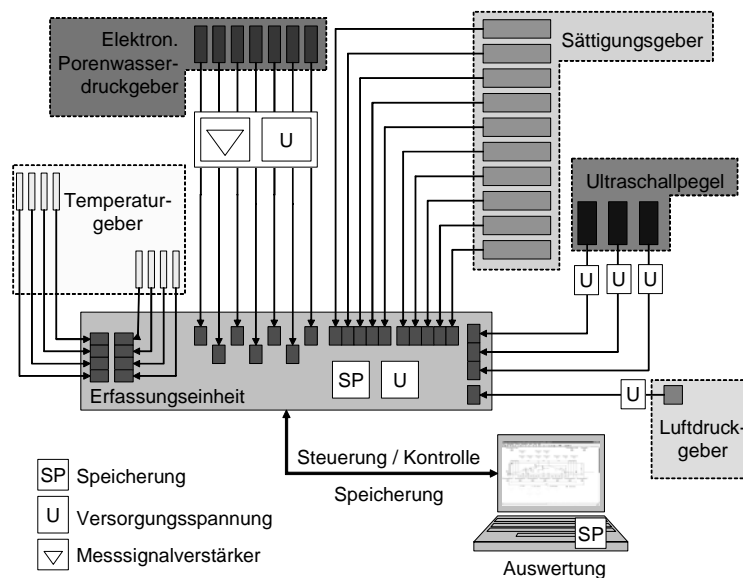


Abb. 3: Messaufbau (Skizze)

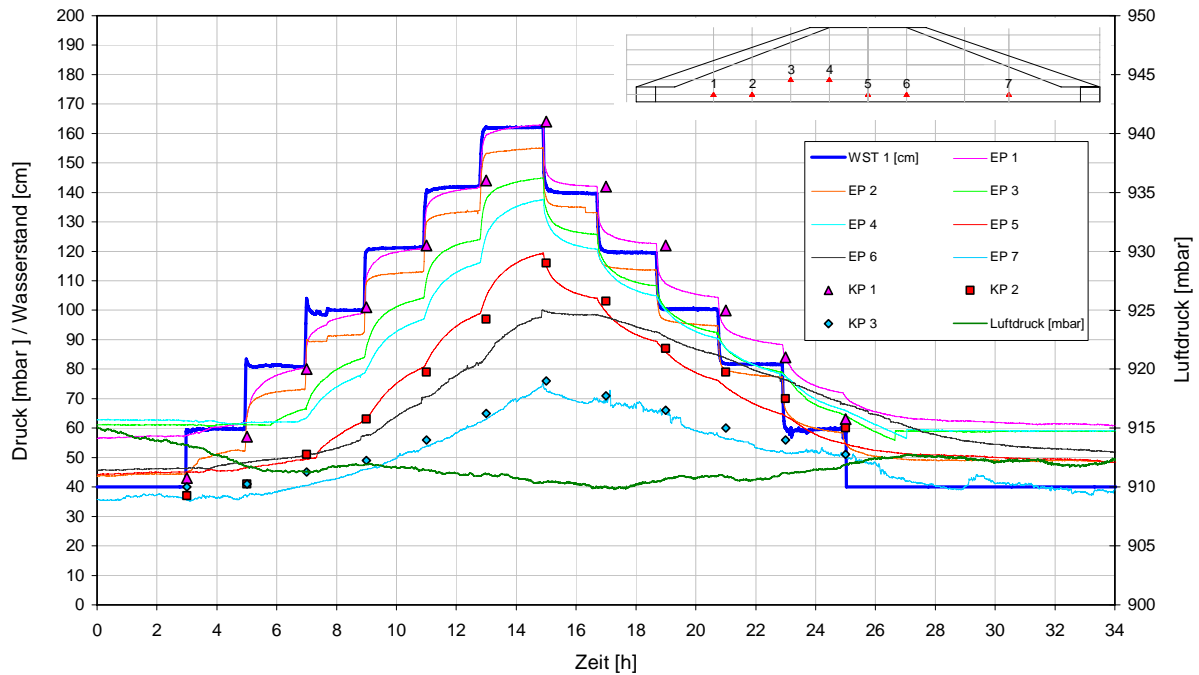


Abb. 4: Wasserdrücke der elektronischen Aufnehmer und Kontrollpegel beim Versuch 01 (Nullversuch, Bez. 00, Serie A)

3 Versuchparameter, durchgeführte Versuche, Erkenntnisse (Serie A)

Im Sommer 2004 wurden 13 Versuche durchgeführt (Serie A; Tab. 1). Im Sommer 2005 wurden ergänzend weitere acht Versuche (Serie B) durchgeführt, die innerhalb dieser Betrachtung größtenteils noch nicht berücksichtigt wurden.

Tab. 1: Durchgeführte Versuche (Serie A)

Nr.	Versuchsbeschreibung	Bez.	Versuchsdauer [h]	Datum
1	Normalwelle	00	34	27.10.2004
2	Stationäre Welle	01	46	04.08.2004
3	Schnelle Welle	02	33	18.08.2004
4	Schnelle Welle ¹	02a	51	08.09.2004
5	Langsame Welle	03	66	22.08.2004
6	Vorwelle + Normalwelle	04	59	29.08.2004
7	Vorregen I + Normalwelle	05a	109	12.09.2004
8	Vorregen II ²	05b	71	17.09.2004
9	Vorregen III + Normalwelle	05c	71	20.09.2004
10	Normwelle + Grasnarbe	06	47	04.10.2004
11	Vorregen III + Normalwelle + Grasnarbe	07	35	14.10.2004
12	Vorwelle + Normalwelle + Grasnarbe	08	48	11.10.2003
13	Stationäre Welle + Grasnarbe + Störstellen	09	42	20.10.2004

¹ Redundanzversuch

² Nur Beregnung

Σ: 712 h

3.1 Hochwasserganglinien / Wellencharakteristik

Es wurden innerhalb von Serie A vier unterschiedliche Hochwasserganglinien untersucht. Bei den einzelnen Ganglinien werden normale, schnelle, langsame und stationäre Ereignisse unterschieden. Wesentliche Charakteristika der Wellen sind die mittlere Anstiegsgeschwindigkeit $v_{m,an}$ [m/h], die mittlere Abstiegsgeschwindigkeit $v_{m,ab}$ [m/s], der Scheitelwasserstand h_{Sch} [m] und die Scheitelverweildauer d_{Sch} [h]. Die vier verschiedenen Ganglinien sind tabellarisch mit ihren charakteristischen Größen in Tab. 2 aufgelistet. Der Ausgangswasserstand liegt auf der Oberkante der Untergrundsicht +0,40 m (vgl. Abb. 2 und 3) über der Gründungssohle. Die Wasserstände wurden entweder jede Stunde oder alle zwei Stunden angepasst.

3.2 Vorwellenereignisse

In zwei der durchgeführten Versuche (Nr. 06 und 12; vgl. Tab. 1) wurde der Einfluss einer Vorwelle mit anschließender Normalwelle untersucht. Die Vorwelle erreicht bei einer Anstiegs- und Abstiegsgeschwindigkeit von $v_{m,an} = v_{m,ab} = 0,10$ m/h einen Wasserstand von 1,20 m und fällt dann auf 0,80 m ab. Der Wasserstand geht anschließend in die Normalwelle über, die auf 1,60 m ansteigt und wieder auf 0,00 m fällt.

3.3 Vorregenereignisse

Es wurden innerhalb der Versuchsserie A drei verschiedene Vorregenereignisse untersucht. Dabei wurden die Niederschlagshöhen bis zu $h_N = 140$ mm in 4 Stunden intensiviert. Das Wiederkehrintervall T erreicht bezogen auf ein 72- oder 24-stündliches Ereignis mindestens 100 Jahre (Tab. 3).

Tab. 2: Wellencharakteristika der vier verschiedenen Wellenformen (Serie A)

Bez.	Charakteristika			
	$v_{m,an}$ [m/h]	$v_{m,ab}$ [m/h]	h_{Sch} [m]	d_{Sch} [h]
Normalwelle	0,10	0,10	1,60	0
Schnelle Welle	0,40	0,20	1,60	0
Langsame Welle	0,05	0,05	1,60	0
Stationäre Welle	0,10	0,10	1,60	6 - 8

Tab. 3: Kennwerte der Vorregenereignisse (Serie A)

Bez.	Charakteristika			
	h_N [mm/h]	d_N [h]	Σh_N [mm]	T [a]
Vorregen I	3,6	48	90	100 ¹
Vorregen II	19/38	3	76	> 100 ²
Vorregen III	35	4	140	>> 100 ²

¹ bezogen auf ein 72h-Ereignis

² bezogen auf ein 24h-Ereignis

3.4 Grasnarbe und Störstellen

An einem im Jahre 2001 ertüchtigten Deich an der Mangfall im Amtsbereich des Wasserwirtschaftsamtes Rosenheim wurden aus der luftseitigen Böschung ca. 15 m² der Grasnarbe entnommen, anschließend an die VAO transportiert und wasserseitig auf das Deichmodell aufgebracht. Die mittlere Mächtigkeit der Grasnarbe betrug $h_m = 0,20$ m. In die Grasnarbe wurden zylindrische Löcher mit einem Durchmesser

D = 0,07 m gestanzt und so versucht, die Durchörterung der Grasnarbe (Störstellen) zu simulieren.

3.5 Einfluss der Untersuchungsparameter

Insgesamt wurden zur Auswertung 21 Vergleiche anhand der durchgeführten 13 Versuche (Serie A) angestellt (Abb. 5). Versuch Nr. 1 (Bez. 00; siehe Tab. 1) wird als „Nullversuch“ gefahren und kann für fast alle Versuche zum Vergleich herangezogen werden. Je nach Versuch werden die Untersuchungsparameter Durchfluss, Durchsickerung, Sättigung und Temperatur verglichen und daraus Rückschlüsse auf den Einfluss der Untersuchungsparameter Wellenform, Vorwelle, Vorregen und Grasnarbe sowie der Störstellen gezogen.

Die ersten Versuche mit Veränderung der Wellenform zeigen deutlich, dass bei einer schnellen Welle im Vergleich zum „Nullversuch“ eine Abnahme der maximalen Durchsickerung stattfindet (Vergleich 2; Abb. 5). Bei stationären Wellen mit langem Scheitelwasserstand und/oder langsam anlaufenden Hochwasserwellen findet eine verstärkte Durchsickerung statt (Vergleich 1, 3, 19, 21; Abb. 5).

Der Einfluss der Wellenform kann durch die Gegenüberstellung von Einstauggrad ε und dem gesättigten Deichflächenanteil a_{sat} (Fläche unterhalb der Sickerlinie) abgeleitet werden (Abb. 6). Je größer die Anstiegsgeschwindigkeiten sind, desto schneller befüllt

und entleert sich der Deich und umgekehrt.

In Abb. 7 sind die mittleren

Sättigungsverhältnisse des Deiches bei Versuchen mit simuliertem

Vorregenereignis aufgetragen.

Zudem ist zum Vergleich der Verlauf der mittleren Sättigung vom „Nullversuch“ hinzugefügt.

Es ist zu sehen, dass sich beim

Vorregen I annähernd ein Gleichgewichtszustand einstellt, während bei Regenereignis II und III aufgrund der höheren Intensität ein stetiger Anstieg zu verzeichnen ist. Nach Ende der Beregnung nimmt die mittlere Sättigung bei Versuch

	Versuchsbeschreibung	Normalwelle	Stationäre Welle	Schnelle Welle	Schnelle Welle*	Langsame Welle	Vorwelle + Normalwelle	Vorregen I + Normalwelle	Vorregen II	Vorregen III + Normalwelle	Normwelle + Grasnarbe	Vorregen III + Normalwelle + Grasnarbe	Vorwelle + Normalwelle + Grasnarbe	Stationäre Welle + Grasnarbe + Störstellen
Beschreibung	Bez.	00	01	02	02a	03	04	05a	05b	05c	06	07	08	09
Normalwelle	00	1												
Stationäre Welle	01		1											10
Schnelle Welle	02			1										
Schnelle Welle*	02a				1									
Langsame Welle	03					1								
Vorwelle + Normalwelle	04						1							
Vorregen I + Normalwelle	05a							1						
Vorregen II	05b								1					
Vorregen III + Normalwelle	05c									1				
Normwelle + Grasnarbe	06										1			
Vorregen III + Normalwelle + Grasnarbe	07											1		
Vorwelle + Normalwelle + Grasnarbe	08						1						1	
Stationäre Welle + Grasnarbe + Störstellen	09													1

Abb. 5: Matrix der durchgeführten Vergleiche

05a (Vorregen I) nicht mehr ab, während bei den Versuchen 05c und 07 eine Abnahme auftritt. Eine nennenswerte Auswirkung auf die bzw. Erhöhung der Sättigungsverhältnisse im Vergleich zum Nullversuch ist nicht festzustellen (!).

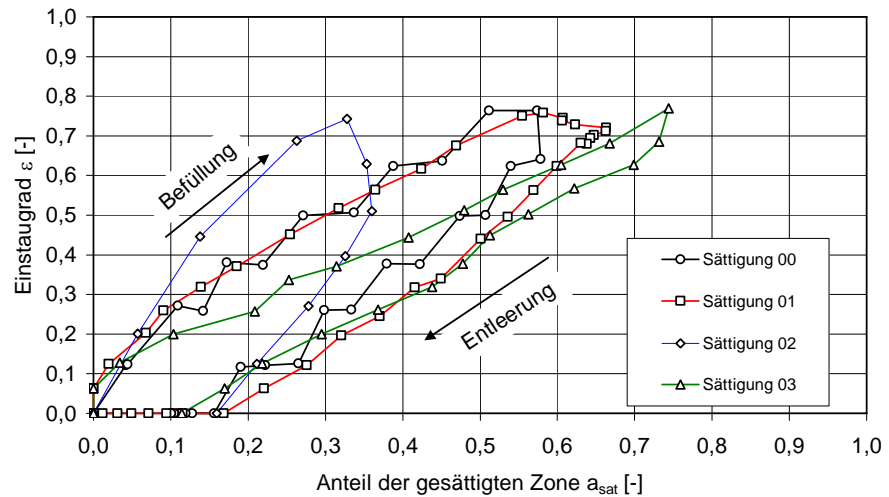


Abb. 6: Einsteigrad ε in Abhängigkeit des gesättigten Deichflächenanteils a_{sat} bei Ver.-Nr. 1, 2, 3 und 5 (Serie A)

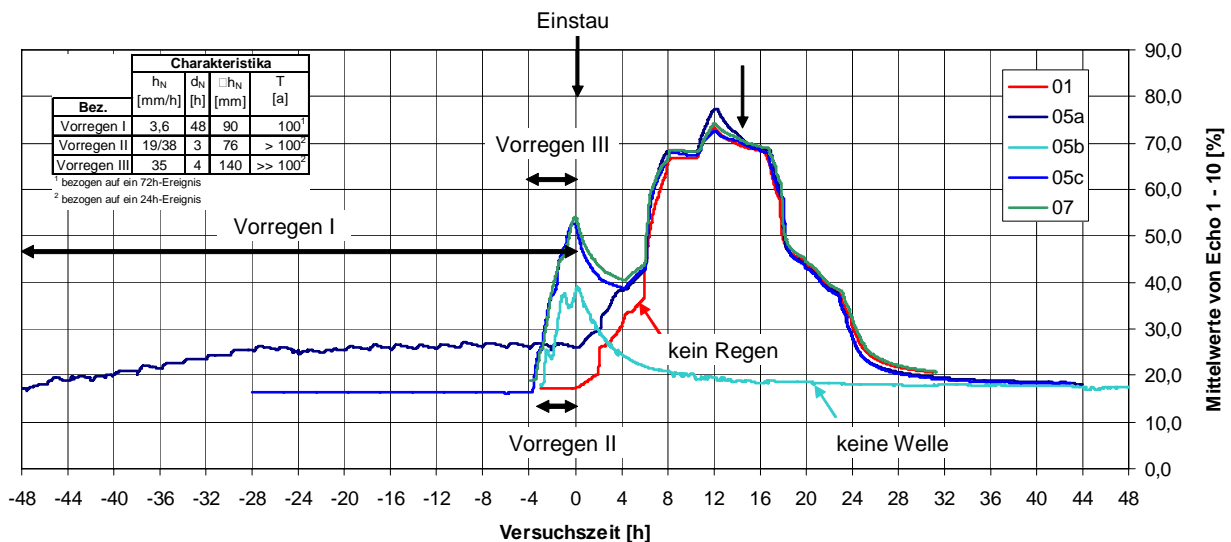


Abb. 7: Mittlere Sättigung bei Versuch 01 (ohne Regen), 05 a bis c und 07 (mit Grasnarbe)

Zusammenfassend zeigen die Auswertungen, dass vor allem die Hochwasserwelle selbst, charakterisiert durch Einstaudauer und -höhe sowie Anstiegs- und Abstiegsgeschwindigkeit des Wasserstandes, und selbstverständlich der Aufbau des Deiches und des Untergrundes und die Durchlässigkeit des vorhandenen Bodens wesentlichen Einfluss auf die Durchsickerung des Deiches haben. Die untersuchten Vorwellenereignisse zeigten eine Verstärkung der Durchsickerung. Intensivste Niederschlagsereignisse beschleunigten oder erhöhten die Durchsickerung trotz auftretender Vorsättigung nicht. Die aus einem Naturdeich entnommene und auf der wasserseitigen Böschung des Modeldeiches eingebaute Grasnarbe hatte auf die instationären Durchsickerungsverhältnisse aufgrund der ähnlichen Durchlässigkeit der beiden Erdkörper (Sanddeich und Grasnarbe) und der geringen Mächtigkeit der Grasnarbe keine wesentlichen Auswirkungen. Die Untersuchung von kleineren Störstellen offenbarten aufgrund der ohnehin schon verhältnismäßig großen

Durchlässigkeit des Deichkörpers ($k = 4 \cdot 10^{-4}$ m/s) keine merkbaren Auswirkungen auf die Durchsickerung (vgl. Haselsteiner u. Strobl 2004).

4 Vergleich der Versuchsergebnisse mit Berechnungsergebnissen

An dem kalibrierten und an den Versuchen verifizierten numerischen Grundwasserströmungsmodell wurden sowohl die stationäre als auch die instationäre Durchsickerung näher untersucht.

4.1 Stationäre Durchsickerung

In einem ersten Schritt wurden stationäre Verhältnisse untersucht und die Modellparameter (Durchlässigkeiten, Porosität, Saugspannungsverhalten...) anhand der Versuchsergebnisse und zuvor ermittelten Bodenparameter kalibriert (Abb. 9).

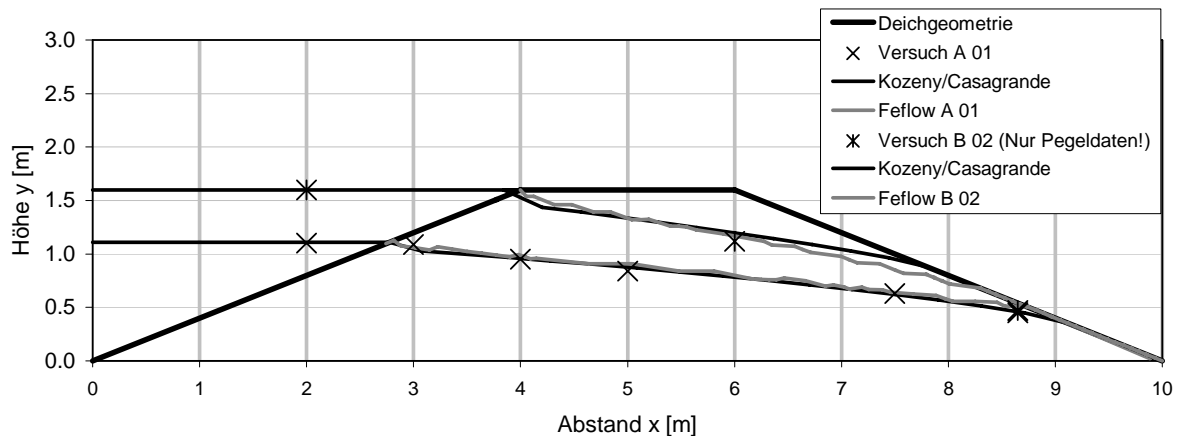


Abb. 8: Stationäre Sickerlinie im Modelldeich

Die stationäre Durchsickerung des Deiches zeigte bei Versuch Nr. 1 (Bez. 01; Serie A), dass die numerischen Berechnungen mit den Ergebnissen des physikalischen Modells übereinstimmen. Ebenso verhält es sich bei höheren Einstaugraden, wie anhand des Versuches B 02 (Bez. 02; Serie B) dargelegt werden konnte. Die Berechnungsergebnisse decken sich mit den Versuchsergebnissen. Zur Veranschaulichung wurden die Sickerlinien mittels des analytischen Verfahrens nach Kozeny-Casagrande berechnet. Die analytischen Verfahren, die auf der Theorie nach Casagrande (1934) beruhen, gelten i. d. R. nur für undurchlässigen Boden (Davidenkoff 1964). Während bei geringem Einstau die Sickerlinie nach Kozeny-Casagrande noch ungefähr die Berechnungen und Versuchsergebnisse widerspiegelt, liegt sie bei Kronenstau höher. Dies liegt daran, dass der Versuchsdeich und das numerische Modell mit Untergrundsicht erstellt und betrieben wurden und ein Teil des Sickerwassers in und durch die Untergrundsicht strömen kann.

4.2 Instationäre Durchsickerung

Ausgehend von dem gemessenen Vorfeuchtezustand im Versuchsdeich konnten während Versuch 01 (Bez. 00, Serie A) (Abb. 9), die Versuchsergebnisse hinreichend genau nachgerechnet werden.

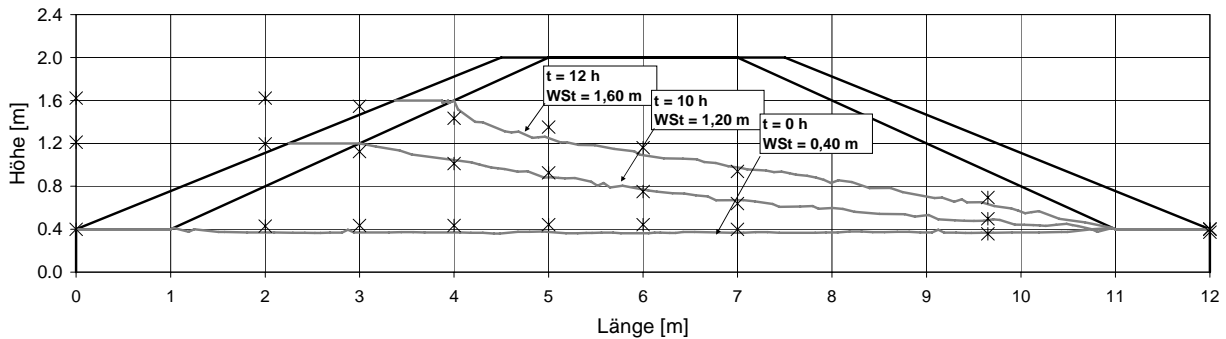


Abb. 9: Gemessene und berechnete Durchsickerungsfront bei ansteigendem Wasserspiegel während Versuch Nr. 1

Die gemessenen und berechneten sowie kontrollierten Porenwasserdrücke bzw. Standrohrspiegelhöhen im Bereich des Porenwasserdruckgebers 1 (EP 1; vgl. Abb. 2) sind in Abb. 10 dargestellt. Die Ergebnisse von Versuch und Berechnung stimmen weitgehend überein. Die verwendeten elektronischen Porenwasserdruckgeber funktionierten erst ab einer Druckhöhe von $\Delta h = 0,20$ [mWS]. Bei fallendem Wasserspiegel reagierten die Druckgeber verzögert und zeigten bei Unterschreitung der eben genannten Druckhöhe nicht mehr den korrekten Wert an.

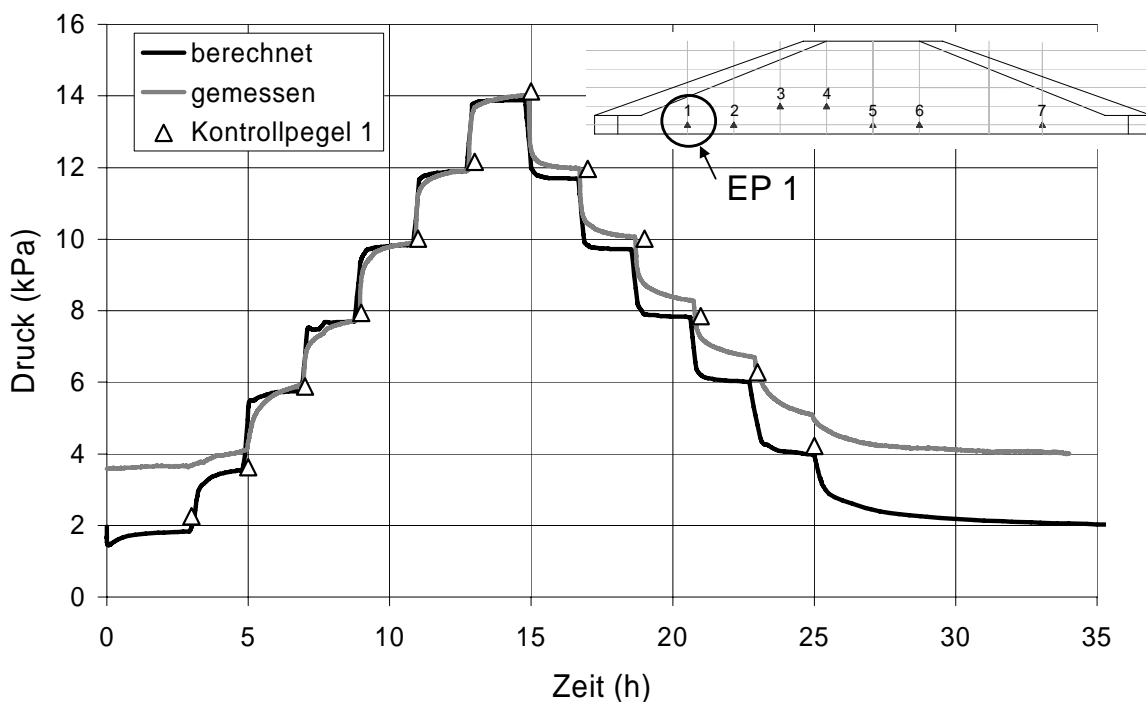


Abb. 10: Verlauf des Porenwasserdrucks bei EP 1 – berechnet, gemessen und kontrolliert mittels Standrohr

5 Resümee

Die am physikalischen Modell gewonnenen Ergebnisse konnten mittels der angestellten Berechnungen „nachgestellt“ werden. Die mathematische Modellierung von Vorregenereignissen und Störstellen wird in nächsten Schritten erfolgen. Hierzu müssen hydraulische Randbedingungen gefunden werden, welche dem im Versuch modellierten Regen und dessen Einsickerung in den Deich entsprechen. Anhand der dann möglichen Parameterstudien sollen unterschiedliche Deichaufbauten, Bodenmaterialien und Hochwasserganglinien simuliert werden, um daraus weitere, über den qualitativen Charakter der Versuchsergebnisse hinausreichende Erkenntnisse zu gewinnen.

Literatur

CASAGRANDE, L. (1934): Näherungsverfahren zur Ermittlung der Sickerung in geschütteten Dämmen auf undurchlässiger Sohle. Die Bautechnik 12, Heft 15, S. 205 – 208, 1934

DAVIDENKOFF, R. (1964): Deiche und Erddämme; Sickerströmung – Standsicherheit. Werner-Verlag GmbH, Düsseldorf 1964

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

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; Juni 2004

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, 2005 (unveröffentlicht)

Adresse der Verfasser

Ronald Haselsteiner
Lehrstuhl und Versuchsanstalt für Wasserbau und Wasserwirtschaft
Technische Universität München
Arcisstraße 21
80290 München
r.haselsteiner@bv.tum.de