

Neue Untersuchungen zur Schrumpfung, Durchsickerung und Aufweichung von Deichabdeckböden bei Extremsturmfluten in Schleswig-Holstein

Von HELMUT TEMMLER

Z u s a m m e n f a s s u n g

Für schleswig-holsteinische Deichabdeckböden von sehr unterschiedlichen Körnungs- und plastischen Eigenschaften werden die aus Saugspannungs- und Schrumpfversuchen abgeleiteten Beziehungen zwischen verschiedenen bodenkundlichen und geotechnischen Parametern (volumetrischer Wassergehalt, Wasserspannung, prozentuale Volumenänderung, Feuchte- und Porenziffer, Tonanteil, Fließgrenzwassergehalt) dargestellt und analysiert.

Weitere Schwerpunkte waren Untersuchungen zur Infiltrationsgeschwindigkeit sowie zu den Festigkeits- und Wassergehaltsveränderungen des Deichbodens während des in-situ-Infiltrationsversuches sowie nach mehrtägiger Aufsättigung ungestörter Zylinderproben im Erdbaulabor.

Aus den Ergebnissen dieser Untersuchungen werden Prognosen zum wahrscheinlichen Verhalten verschiedener Deichabdeckböden bei lang anhaltenden Starkniederschlägen sowie unter Wellenüberschlag bei Extremsturmfluten abgegeben.

S u m m a r y

For silty and clayey liners on dikes in Schleswig-Holstein with material of very different grain size distribution and plastic characteristics in the unsaturated zone correlations between different soil and geotechnical properties like volumetric water content, water suction, change of soil volume, void ratio, moisture ratio, clay content and liquid limit are described.

Other main points were investigations concerning in-situ-velocity of infiltration and change of vane shear strength with increasing water content under the dike crest and on undisturbed saturated specimens in the geotechnical laboratory.

From the results of these investigations forecasts were given to the probability of strength behaviour of dike liners for continuous strong rainfall or under wave overtopping during extreme storm tides.

I n h a l t

1. Einleitung	28
2. Untersuchte Deichstandorte	30
3. Infiltrationsversuche	35
4. Versuche zur Wasserspannungscharakteristik	40
5. Schrumpfversuche	44
6. Scherversuche	49
7. Festigkeitsversuche an Geschiebeböden	58
8. Schlussfolgerungen	59
9. Schriftenverzeichnis	62

1. Einleitung

Im Rahmen einer Untersuchung zur Interaktion von Wellenüberlauf und den Eigenschaften von Deichabdeckböden wurden u.a. Großversuche an einem künstlichen Deich im Großen Wellenkanal der Universität Hannover mit unterschiedlichen Wellenüberlaufspektren und -mengen durchgeführt (MÖLLER et al., 2002). Bei allen drei untersuchten, verdichtet eingebauten Deichböden – sandiger und toniger Klei sowie kleischlieriger Schluffsand aus dem Großraum Wilhelmshaven – war die Ausbildung tiefer Erosionsrinnen und -kolke die eigentliche Versagensursache während des Großversuches. Das unter natürlichen Bedingungen während einer Extremsturmflut häufig beobachtete Deichbruchgeschehen mit beginnender Aufweichung der Deichabdeckung, einem Aufreißen der Kleidecke hinter der Deichkrone mit anschließendem en-bloc-Abgleiten der Deichbinnenböschung bis hin zum teilweisen oder vollständigen Deichbruch (SCHÜTTRUMPF, 2002) konnte in den GWK-Versuchen nicht nachvollzogen werden. Aus den Saugspannungsmessungen wurden mittlere Sickergeschwindigkeiten von $2.0E-05$ m/s (Versuch 4, Sandschluff), $3.5E-05$ m/s (Versuch 3, sandiger Klei) und $7.9E-05$ m/s (Versuch 1, toniger Klei) abgeleitet.

Gemäß Generalplan Küstenschutz, Integriertes Küstenschutzmanagement in Schleswig-Holstein 2001, sollten die bestehenden Landesschutzdeiche an der Unterelbe und Westküste Schleswig-Holsteins einen Wellenüberlauf von $2 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m})$ ohne nennenswerte Schäden überstehen können. Zur Überprüfung, wieweit diese im Wesentlichen auf niederländischen Erfahrungen beruhende Annahme auch bei einem ungünstigen Bodenaufbau der Deichabdeckung zutreffend ist, hat der Verf. im Zeitraum vom 17.1. bis 6.4.2005 ergänzend zu früheren geotechnischen und bodenkundlichen Untersuchungen an Deichabdeckböden (RICHWIEN u. WEISSMANN, 1995, 1996–1999; TEMMLER u. FILIPINSKI, 1997) an insgesamt 28 Deichstandorten an der Unterelbe und Westküste Schleswig-Holsteins sowie zwei Standorten an der Ostseeküste jeweils auf der Bewuchsdecke in-situ-Infiltrationsversuche mit einem Doppelring-Infiltrometer nach DIN 19682 durchgeführt (TEMMLER, 2006). Die neuen Versickerungsversuche wurden bewusst in die niederschlagsreichen Wintermonate gelegt, um den möglichen Einfluss einer Volumenzunahme im Boden durch Quellvorgänge mit einer partiellen Zudrückung vorhandener Schrumpfrisse auf die Wasserdurchlässigkeit des Untergrundes besser abschätzen zu können.

Die Wasserleitfähigkeit von bindigen Böden wird durch das Makrogefüge, die Verteilung des Porenraumes sowie den aktuellen Entwässerungszustand bestimmt (BAUMGARTL et al., 1998). Die unterschiedlichen Porenanteile lassen sich dabei aus der Wasserspannungs-/Wassergehaltsbeziehung, der sog. Saugspannungskurve, ableiten.

Bei sand- und schluffreichen bindigen und organischen Böden besitzt die Saugspannungskurve zumeist eine sigmoidale Form (VAN GENUCHTEN, 1980; PENG u. HORN, 2005; WEISSMANN, 2003), die mit Hilfe des k_f -Wertes und der Van Genuchten-Parameter Θ_s , Θ_r , α , m und n mathematisch beschrieben werden kann (WEISSMANN, 2003). Im durch verschiedenste Witterungsprozesse veränderten A-Horizont eines Bodens ist diese Verlaufsform im allgemeinen weniger stark ausgeprägt, während beim tonreichen Oberboden im normalen Messbereich $0 < pF < 4.2$ eines Schrumpfversuches ein konvexer Kurvenverlauf dominiert (SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL, 1989).

Bei der Beschreibung der Wasserbewegung im ungesättigten Boden mit Hilfe des Potentialkonzeptes werden Wassergehalts-Saugspannungskurven häufig nach dem Van Genuchten-Ansatz – oft unter Verwendung der von SIMÚNEK et al. (1986) angegebenen Parameter – rechnerisch ermittelt (WEISSMANN, 2003). Die von diesen Autoren aus Rückrechnungen mit dem Computerprogramm HYDRUS 2-D gewonnenen, in der Tab 6.2 bei WEISSMANN



Abb. 1: Übersichtsplan der 2005 untersuchten Deichstandorte

(2003) mitgeteilten Tabellendaten weichen jedoch erheblich von den Zahlenwerten ab, die mit Tensiometern bei ebenfalls ausgeprägt s-förmigem Kurvenverlauf im Bereich $1 < p < 4$ bei allen drei Versuchsböden in den GWK-Großversuchen ermittelt worden sind. Die detaillierte Auswertung dieser Messungen sowie der Ergebnisse früherer bodenkundlicher Untersuchungen an Stechzylinderproben aus einem Deichschurf bei Ockholm/Nordfriesland (HEINEKING, 1998) ergab bei sämtlichen Arten von Deichabdeckböden keine nennenswerte Korrelation zwischen dem Tongehalt und den Saugspannungsniveaus bei unterschiedlichem Austrocknungsgrad (TEMMLER, 2006). Insbesondere ergab sich auch keine relevante Beziehung zwischen dem Durchlässigkeitsbeiwert k_f im wassergesättigten Zustand und dem Anteil an schnell dränierenden Grobporen $> 50 \mu\text{m}$ Porenäquivalentdurchmesser als Maß für die Speicherkapazität für Luft, Grund- oder Stauwasser.

Zur Klärung der Fragen, inwieweit sich einerseits die Porenverteilung in der bindigen Deichabdeckung gegenüber dem Zustand beim Einbau geändert hat und ob andererseits die Verwendung der o.g. Tabellenwerte von SIMÚNEK et al. bei der Berechnung der instationären Sickerwasserströmung im FEM-Modell für Böden mit mehr oder weniger ausgeprägtem Gefüge zulässig ist, wurden im Rahmen dieser Untersuchung vom Institut für Pflanzenernährung und Bodenkunde der Christian-Albrechts-Universität (CAU) Kiel an 15 vom Verf. ausgewählten Deichstandorten für verschiedene Deichabdeckböden aus drei Tiefenhorizonten mit jeweils 8 Einzelproben kombinierte Saugspannungs- und Schrumpfversuche an ungestört entnommenen Bodenproben durchgeführt. Im Institut für Bodenkunde wurde neben der Wasserspannungs-/Wassergehaltsbeziehung zugleich das Schrumpfungsverhalten der ungestört entnommenen, bei Versuchsbeginn vollständig aufgesättigten Bodenproben ermittelt.

Bei dem nach DIN 18122 an gestörtem Probenmaterial durchgeführten Schrumpfversuch wird das Schrumpfmaß außer von den Körnungs- und plastischen Eigenschaften ganz wesentlich durch den Einbauwassergehalt bei Versuchsbeginn geprägt. Während der Schrumpfung entspricht der Verringerung der Porenziffer eine gleichgroße Abnahme des gleichfalls auf das Volumen der Festsubstanz bezogenen volumetrischen Wassergehaltes, der sog. Feuchteziffer δ . Mit Hilfe der im Zuge dieser Untersuchung durchgeführten Schrumpfversuche soll geklärt werden, wie weit sich der Schrumpfungsprozess bei einem konsolidierten bindigen Boden mit \pm ausgeprägtem Gefüge nach vorangegangener Aufsättigung der Probe gegenüber dem Normversuch nach DIN 18122 unterscheidet und welche Restschrumpfungen im Falle einer weiteren witterungsbedingten Austrocknung der bindigen Deichabdeckung ggf. zu erwarten sind.

Die von der Infiltrationsgeschwindigkeit des Sickerwassers im Abdeckboden abhängige Versickerung von lang dauernden Starkniederschlägen, Spritzwasser (Gischt) oder überlaufenden Wellen bei einer Extremsturmflut führt in allen Fällen zu einer Aufweichung der Deichabdeckung. Die Tiefe dieser Infiltration hängt von der effektiven Durchlässigkeit des Bodens sowie von der Bodenstruktur (Rissbildung, Wurmröhren, Gänge von Bodenwühlern) ab. Die Aufweichung des Bodens vollzieht sich entweder mehr oder weniger schnell auf breiter Front (beim Einzelkorn- oder nicht gerissenen Kohärentgefüge) oder sie geht wie bei allen \pm ausgeprägten Sekundärgefügen von den zuerst durchströmten Rissen und Makroporen aus und ergreift in den Randzonen beginnend allmählich auch die inneren Kerne der in sich kohärenten Bodenprismen, -polyeder oder -krümel (WEISSMANN, 2003, S. 44 f.). Beim tonreichen Klei kann es viele Tage dauern, ehe der zuerst in der Randzone der Bodenaggregate einsetzende, anfangs lokale Festigkeitsverlust einen bedeutenden Anteil an der gesamten Bodenmasse erreicht. Dies erklärt auch die vielfach beobachtete große Widerstandsfähigkeit einer strukturierten tonreichen Kleiauffüllung gegen überströmendes Schwallwasser im Falle einer Extremsturmflut.

2. U n t e r s u c h t e D e i c h s t a n d o r t e

Nach der visuellen geotechnischen Bewertung nach DIN 4022 und dem Gefügezustand (Bodenkundliche Kartieranleitung, 2005) lassen sich die untersuchten Deichabdeckböden den folgenden drei Bodenklassen zuordnen, die nicht mit den Bodengruppen nach DIN 18196 identisch sind:

- Klasse 1: aufgefüllter sandiger Klei (= Schluff, tonig, sandig bis stark sandig), häufig mit schlrieriger Schichtung, vorwiegend mit schwach ausgeprägtem Polyeder- bis Kohärentgefüge; oben erdig-bröckelig, örtlich Wühlgänge, im Tiefenbereich zwischen 40 und 60 cm unter der Deichkrone bereichsweise stark verdichtet.
- Klasse 2: aufgefüllter toniger Klei (= Schluff + Ton, schwach feinsandig); oben krümelig, tiefer bröckelig-rissig mit ausgeprägtem Polyeder- und Prismengefüge, häufig mit Wühlgängen; unten weich, hier Kohärentgefüge mit einzelnen, bis zum unterlagernden sandigen Deichkern durchschlagenden Trockenrissen.
- Klasse 3: aufgefüllter Wattschluff (= Schluff + Feinsand, schwach tonig); oben krümelig, häufig Gänge von Bodenwühlern, tiefer Einzelkorngefüge, örtlich stark verdichtet.

Die vereinzelt Aufgrabungen sowie eigenen Feststellungen nach schweren Sturmfluten an partiell abgetragenen, aus aufgefülltem Geschiebelehm und -mergel bestehenden schleswig-

holsteinischen Ostseedeichen ergaben zumeist einen sehr inhomogenen Bodenaufbau mit tlw. großen und unregelmäßigen Hohlräumen über die gesamte Aufschlusstiefe.

Die Untersuchungen zeigten nicht nur zwischen den einzelnen Deichstandorten beträchtliche Unterschiede in den geotechnischen Eigenschaften, sondern örtlich auch im Bereich eines einzelnen Schurfes (in den ca. Abmessungen l/b/t \approx 2,5/1,0/1,0 m) selbst. Die in der Tab. 2 angegebenen Zahlenwerte aus jeweils einer Einzelmessung geben daher nicht die örtliche Bandbreite der geotechnischen Eigenschaften wieder.

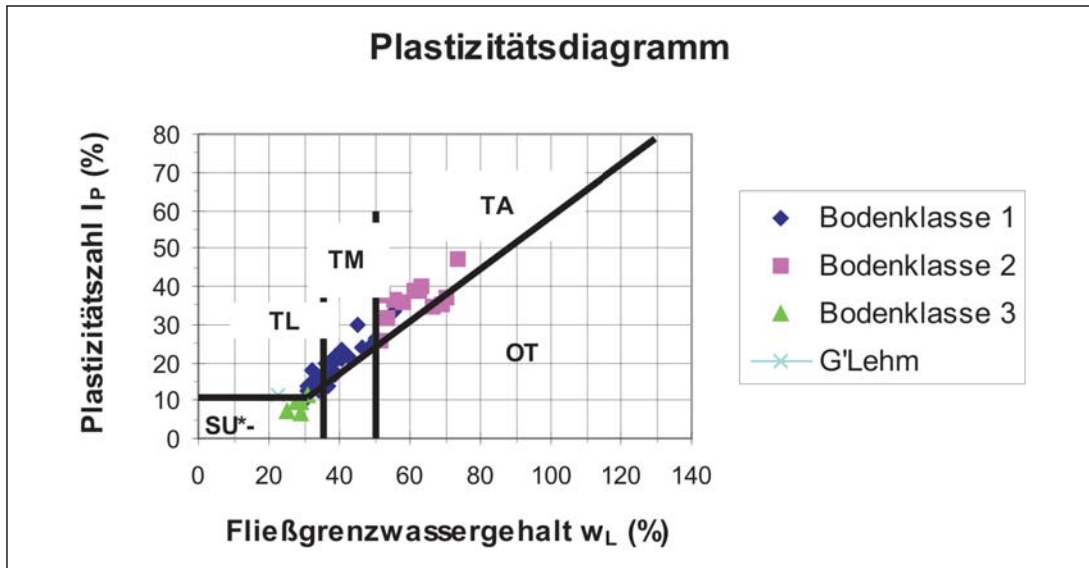


Abb. 2: Plastizitätskarte von Deichabdeckböden

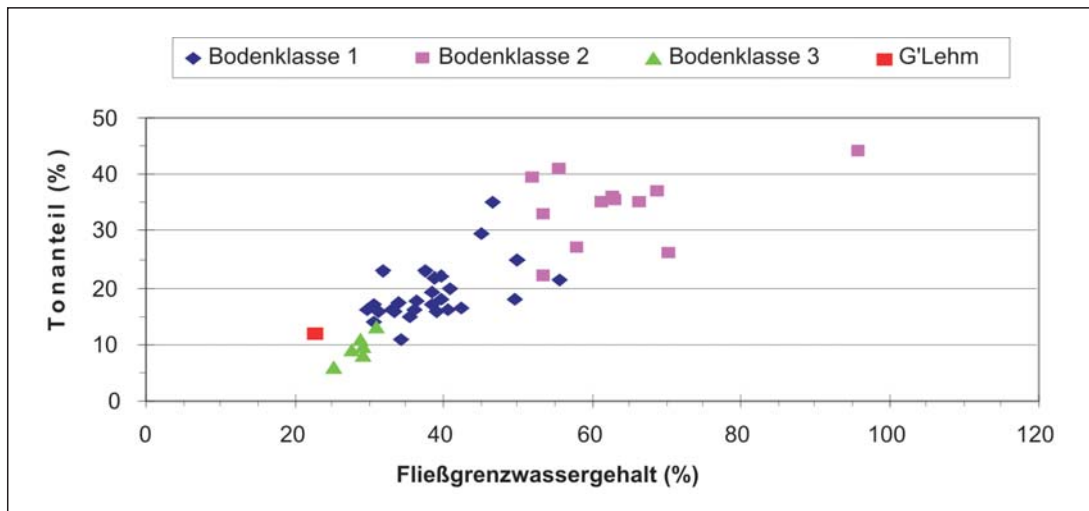


Abb. 3: Tongehalt vs. Fließgrenze bei Deichabdeckböden

Tab. 1: geotechnische Klassifizierungsmerkmale der Deichabdeckböden aus den 2005 angelegten Schürfgruben

Mess- stelle 2005	Ort	Bodenart	Boden- klasse K	T/U/S (% TS)	Atterberg- Param. wL/wP/Ip (%)	Gruppen- symbol DIN 18196	Glüh- verlust (% TS)
1	Sönke-Nissen-Koog	U, t, fs', brl, Wühlgänge	2	26/61/13	70,3/33,3/37,1	TA	4,39
2	Beltringharderkoog	U, t, fs; abw (fs')	1	16/53/31	40,5/19,4/21,1	TM	3,01
3	Neukoog/Nordstrand	U, fs*, t, abw (U, fs, t')	3	11/61/28	28,8/22,2/6,6	TL	3,13
4	Porrenkoog	U, t, fs', slr (fS, u)	1	16/51/33	33,1/18,7/14,4	TL	2,56
5	Finkhaushalligkoog	U + fS; t', Wühl- gänge	3	6/47/47	25,4/18,1/7,3	ST	2,09
6	Westerheverkoog	T, u, fs', Wühl- gänge	1	17/58/25	30,8/17,2/13,6	TL	2,67
7	Westerhever-Stufhusen	U, fs, t, Wühl- gänge	1	35/46/19	46,6/23,0 /23,8	TM	3,34
8	Ording-Nackhörn	U; fs, t	1	22/45/33	39,7/18,2/21,5	TM	2,26
9	Hedwigenkoog	U + fS, t'	3	8/40/52	29,3/19,5/9,8	ST	1,64
10	F.W.Lübkekoog	T, u, fs'	2	37/51/12	68,8/33,6/35,3	TA	4,26
11	Marienkoog	T, u, fs'	1	23/48/29	37,5/20,2/17,3	TM	2,55
12	Ockholmer Neuer Koog	U, fs, t	1	17/66/17	38,6/22,0/16,6	TM	4,16
13	Fahretofter Westerkoog	U; t, fs, h, abw (U, t, fs')	2	22/48/30	53,5/21,8/31,7	TA	4,32
14	Osewolderkoog	U, t, fs, 'h, abw (U, fs, t)	1	16/60/24	36,2/22,4/13,8	TM	
15	Hauke-Haienkoog- Süd	U, fs, t, h-h', un (U, fs*t')	1 (3)	15/42/43	35,4/20,3/15,1	TL	4,98
16	Dieksanderkoog	U; fs*, t	1	11/56/31	34,3/21,8/12,6	TL	2,53
17	Kaiser-Wilhelmkoog	fS; u*, t'	3	13/44/43	31,0/19,6/11,4	TL	2,67
18	St. Marg.-Harrwetternsiel	T; u, rissig, Wühlgänge	2	35/55/10	61,3/22,2/39,1	TA	4,66
19	Büttel-Holstenreck	T; u, rissig, Wühlgänge	2	36/57/07	62,8/23,8/39,0	TA	4,82
20	Nordhusen bei Neufeld	U; fs*, t	1	16/59/25	29,7/20,0/9,7	TL	2,13
21	Brunsbüttel - Groden	U; fs, t	1	14/47/29	30,7/18,4/12,3	TL	1,68
22	Brokdorf - Mitte	U; t, fs	1		36,9/23,2/13,8	TM	3,31
23	Brokdorf - Arentsee	T; u, rissig, Wühlgänge	2	35/52/13	66,6/31,7/34,9	TA	8,40
24	Siel Vierstieghufen	T; u, rissig, Wühlgänge	2		51,6/26,2/25,4	TA	3,67
25	Glückstadt-Süd	T; u, rissig	2	27/49/24	58,0/21,9/36,1	TA	4,18
26	Seestermühe	U, fs, t	1	18/39/43	37,0/16,2/20,8	TM	3,63
27	Haseldorf	U; fs, t	1	18/57/24	49,7/24,9/24,8	TM	3,85
28	Hohenhorst	T; u*, fs	1	25/62/13	50,0/23,8/26,2	TA	2,91
H	Lippe – Hohwacht	Geschiebelehm		12/38/50	22,6/11,3/11,3	(TL)	
F	Kiel – Falkenst. Strand	m S; fs', h				(OH)	

Die neuen Untersuchungsstellen lagen häufig in unmittelbarer Nähe früherer, bei RICHWIEN u. WEISSMANN (1995) sowie TEMMLER u. FILIPINSKI (1997) detailliert beschriebenen Deichaufgrabungen. In der als Abb. 2 dargestellten Beziehung zwischen der Plastizitätszahl und dem Fließgrenzwassergehalt einerseits und der in Abb. 3 dargestellten Korrelation zwischen Tonanteil und Fließgrenzwassergehalt andererseits sind daher die früheren Versuchsergebnisse an schleswig-holsteinischen Abdeckböden mit berücksichtigt worden.

Die an acht Sonderproben in triaxialen CU-Versuchen ermittelte Endscherfestigkeit ergab für schleswig-holsteinische Deichabdeckböden einen gemessenen wirksamen Reibungswinkel von $\varphi' = 30,6...35,4$ (i.M. 33,4)° und eine wirksame Haftfestigkeit von $c' = 3,2...9,1$ (i.M. 4,8) kPa (TEMMLER u. FILIPINSKI, 1997).

Bedingt durch die wechselnden Witterungsverhältnisse bilden sich in einer stärker bindigen Deichabdeckung nach dem Einbau der Kleiauffüllung in Abhängigkeit vom verwendeten Boden im Laufe der Zeit unterschiedlich tiefe und breite Trockenrisse, welche die Durchlässigkeit und Festigkeit der bindigen Deckschicht maßgeblich mitbestimmen. Auffällige Rissbildungen in der Deichabdeckung – örtlich bis an die Kleibasis rd. 1m unter die Deichhaut herunterreichend – wurden bei der Detailaufnahme der Schürfgruben insbesondere im Bereich der Deichkrone bei einer tonreichen, während des Einbaus sehr weichen bis breiigen Kleiauffüllung beobachtet. Die Grenzzone zwischen zwei Einzellagen unterschiedlicher Zusammensetzung oder Verdichtung *innerhalb* der Deichabdeckung (oft bei alten Kleideichen) bildet im Bemessungslastfall mit einer aufgeweichten, durchnässten bindigen Deckschicht über einem wasserstauenden, anfangs nur erdfeuchten, verfestigten Untergrund im tieferen Teil der Kleiabdeckung häufig eine vorgeprägte Schwächezone sowohl beim Erosionsprozess (GWK-Versuche Hannover) wie auch bei der Infiltration und Blockrutschung einer zu steilen Deich-Innenböschung.

Eine möglichst genaue Kenntnis der Risttiefe in Deichabdeckungen ist in zweifacher Hinsicht von Bedeutung

- tiefe, in größeren Abständen vorhandene, die Kleischicht durchschlagende Risse vergrößern die Gesamtdurchlässigkeit der bindigen Kleiabdeckung. Sie können bei lang anhaltenden Starkregenfällen und/oder bei hoch auflaufendem Sturmflutwasserstand mit entsprechendem Spritzwasseranfall oder Wellenüberlauf zu einem Aufstau des Innenwasserspiegels im sandigen Deichkern führen (TEMMLER, 2004).
- flache, aber engständig vorkommende Risse, vor allem aber auch tierische Wühlgänge vermindern die Dichtwirkung in der oberen Zone der Kleideckschicht. Sie werden bei Starkniederschlägen und/oder Wellenüberlauf rasch mit Sickerwasser gefüllt. Dabei beansprucht ein hoch liegender Kluftwasserspiegel insbesondere die steilere Deichinnenböschung mit einem erheblichen, die Deichstabilität u.U. gefährdenden Strömungsdruck. WEISSMANN u. RICHWIEN (2004) setzen bei ihrem Bemessungsvorschlag für die Kleideckschichtstärke die Tiefe der (im Extremfall rasch eingestauten) Schrumpfrisse gleich zur Überstauhöhe zwischen der Wasseroberfläche und der Geländeoberkante bei homogenem nicht gerissenem Boden, was nur für diesen engständigen Risstyp zutrifft.

Von den vier Baubetrieben des Amtes für Ländliche Räume in Husum wurden für die schleswig-holsteinische Elbmarsch und Westküste (einschließlich der Inseldeiche)

- im Bereich der Deichaußenböschung insgesamt 28 Wasseraustrittsstellen zwischen 5 und 1500 m Länge (Gesamtlänge rd. 8100 m) und
- im Bereich der Deichinnenböschung insgesamt 23 Stellen zwischen 4 und 1300 m Länge (Gesamtlänge rd. 6290 m)

aufgemessen (Details bei TEMMLER, 2006). Die Vernässungsstellen konzentrieren sich auf Bereiche mit geringer Stärke und relativ schlechter Qualität der bindigen Deichabdeckung

sowie auf Streckenabschnitte mit fehlender Drainage und unzureichender Entwässerung des sandigen Deichkerns während der Bauarbeiten (TEMMLER, 2004).

Einen Überblick über die 2005 untersuchten Deichstandorte mit detaillierten Lageangaben, einer Kurzbeschreibung wichtiger Daten in Form eines *Deichkatasters* sowie eine Aufzählung der von den Baubezirksleitern registrierten Vernässungsstellen an schleswig-holsteinischen See- und Tidestromdeichen findet sich bei TEMMLER (2006). Für drei dieser Aufschlussstellen sind die entsprechenden Angaben beispielhaft in der Tab. 2 aufgeführt.

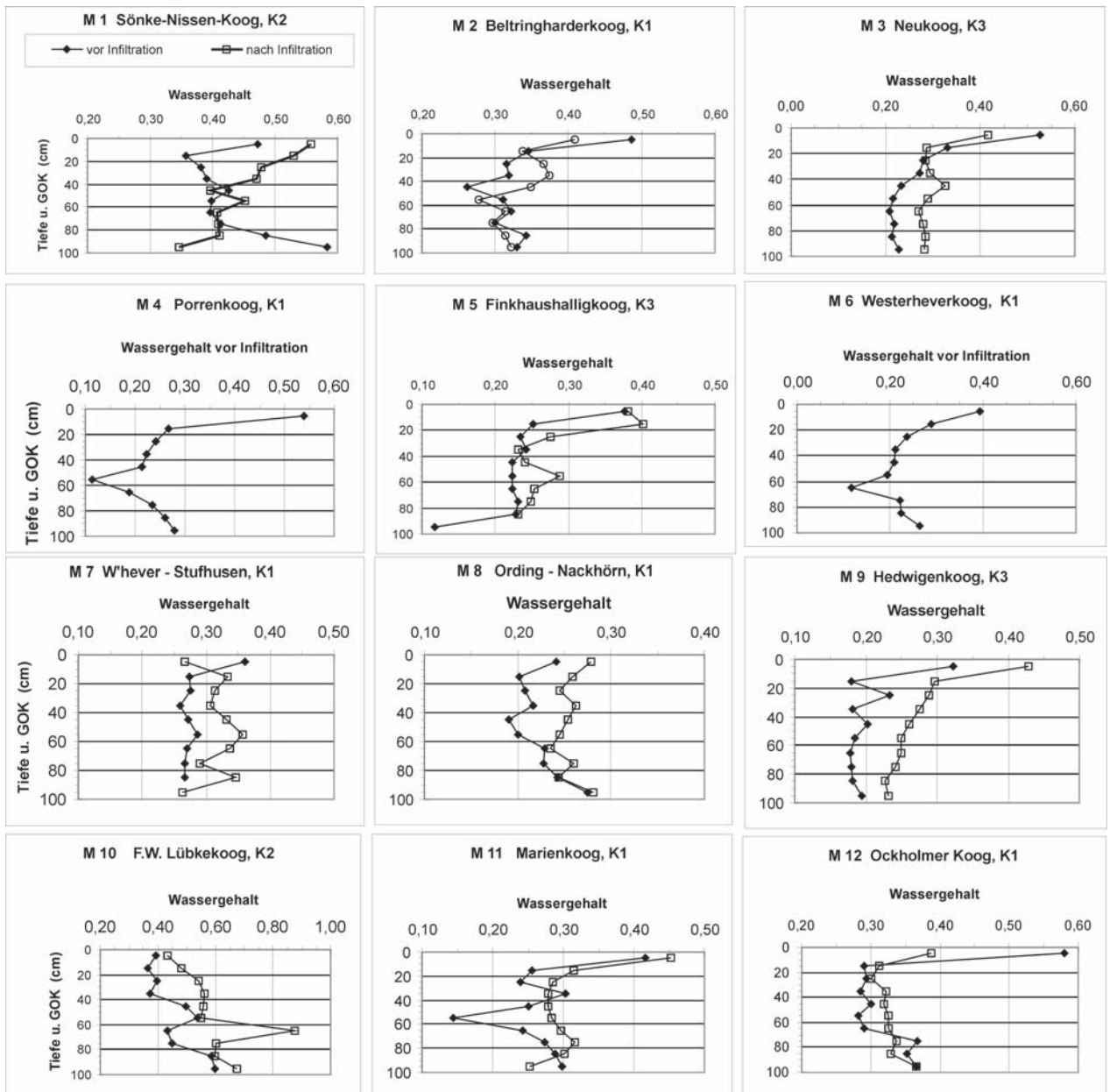
Tab. 2: Deichkataster für Sickervorgänge

Land	Schleswig-Holstein	Schleswig-Holstein	Schleswig Holstein
Ort	Neuer Ockholmer Koog	Neufeld – Nordhusen	Büttel – Holstenreck
Untersuchungsstelle	Schurf 6 (2005)	Schurf 20 (2005)	Schurf 22 (2005)
TK 25	1318	2020	2121
Deichabschnitt gem. Generalplan Küstenschutz	10.00	60.02	62.03
Küsten-km	39,250	224,530	238,325
Rechts-/Hochwert	3488531,8/6058156,6	3502872,4/5974606,8	3514180,8/5973407,4
Aufnahmezeitpunkt	03.02.2005/07.06.2005	21.03.2005/02.06.2005	18.03.2005/24.05.2005
Bautyp	Sandkern mit Kleidecke	Sandkern mit Kleidecke	Sandkern mit Kleidecke
Bauart	Deichneubau	Deichbegradigung	Außendeichverstärkung
Außendeichfuß	Deckwerk	geringdurchlässiges Vorland	undurchlässiges Vorland
Drainage binnen	fehlend	fehlend	fehlend
Abdeckboden/Bodenart	Schluff, feinsandig, tonig	Schluff, feinsandig, schw. tonig	Ton, schluff.-feinsandig, st. rissig
Abdeckboden/Klasse	K 1	K 3	K 2
Abdeckboden/Gruppensymbol n. DIN 18196	TM	ST - TL	TA
Abdeckboden/Eignung nach EAK 2002, "G"	2	3	1
Stärke Deckschicht	1,51	1,35	1,55
Deichkrone (m)			
Stärke Deckschicht Deichaußenböschung (m)	1,35	1,61	1,4
Stärke Deckschicht Deichinnenböschung (m)	0,60	0,75	0,81
Infiltrationsgeschwindigkeit (m/s) Sickerversuch	1,50E-05	5,60E-05	1,30E-05
Deichkernmaterial	fS; ms	mS; fs	mS; fs
Deichuntergrund	Schluff, st.feinsandig, tonig	Schluff, feinsandig, tonig	Ton, schluffig (=Klei)
Baubehelfe	Verwallungen aus sand. Klei außen und innen	sand. Kleiverwallung außen	Kleiverwallung außen
Grasnarbe („A“ = gut in homogener Bedeckung und guter Durchwurzelung/ „B“ und „C“ weniger homogene Grasnarbe und weniger gute Durchwurzelung/ „D“: ohne Gras	„A“	„A“	„A“
Bemerkungen	km 38,5–39,8 Nassstelle Binnenböschung	km 225,0–225,5 Innendeichfuß durchnässt (Moos)	zeitw. Sickeraustritt oberhalb Treibselabfuhrweg Wühlgänge Krone + Innenböschung

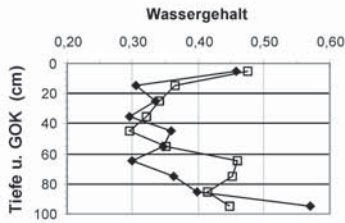
3. Infiltrationsversuche

Die Untersuchungen mit einem Doppelring-Infiltrometer sind jeweils auf der Grasnarbe am landseitigen Rand der Deichkrone durchgeführt worden. Dabei wurde nach vorheriger Befüllung des Außenrings mit Wasser der zeitliche Verlauf der Wasserspiegelabsenkung im Zentralring über eine Messbrücke kontrolliert. Bis auf wenige Ausnahmen war der Wasserverlust im Außenring gleich oder größer als im Innenring.

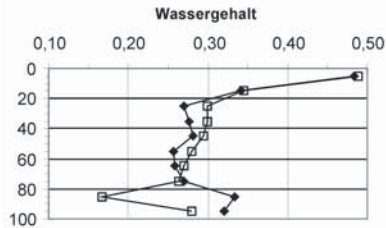
Die im Erdbaulabor nach einer engständigen Probennahme aus der Schappe des Kleinbohrgeräts (Pürckhauersonde) gemessene tiefenbezogene Veränderung des massebezogenen Wassergehaltes vor und unmittelbar nach Versuchsende im Zentrum der Sickerstelle gemessenen Wassergehalte ist für jede Messstelle in Abb. 4 dargestellt.



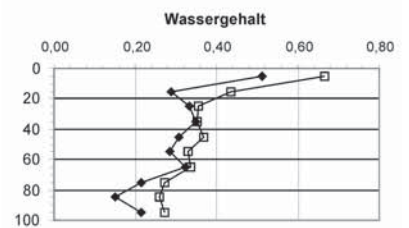
M 13 Fehmetofener Koog, K2



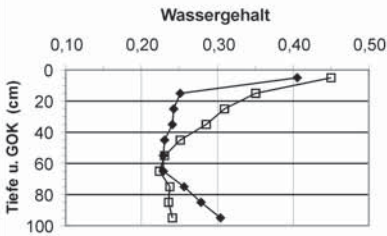
M 14 Osewolderkoog, K1



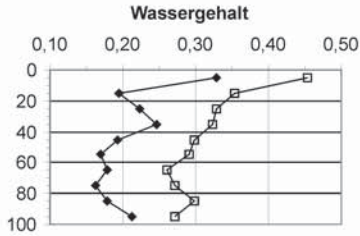
M 15 Hauke-Haien-Koog, K1



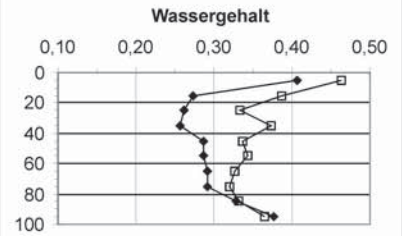
M 16 Dieksanderkoog, K1



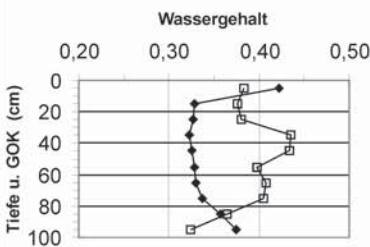
M 17 Kaiser-Wilhelm-Koog, K3



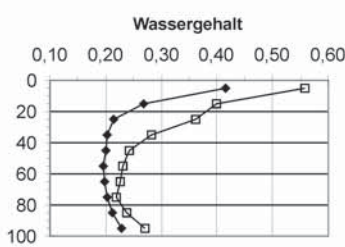
M 18 Harrowettersiel, K2



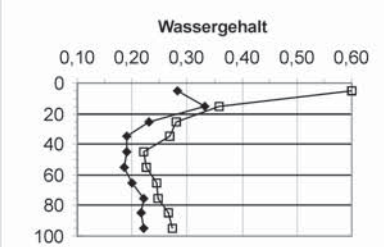
M 19 Büttel - Holstenreck, K2



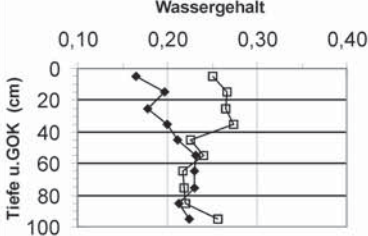
M 20 Nordhusen, K3



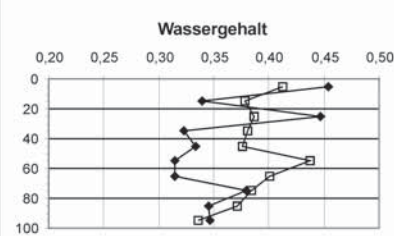
M 21 Groden, K1



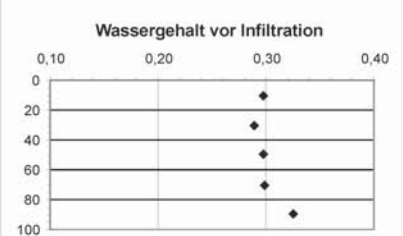
M 22 Brokdorf - Mitte, K1



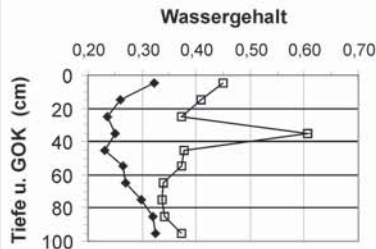
M 23 Arentsee, K2



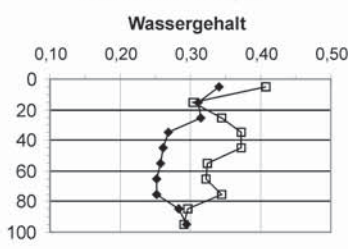
M 24 Vierstieghufener Siel, K2



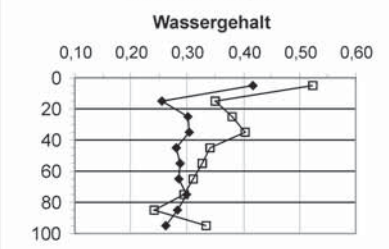
M 25 Glückstadt - Süd, K2



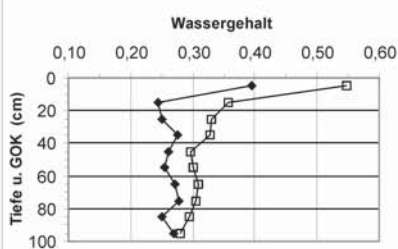
M 26 Seestermühe, K1



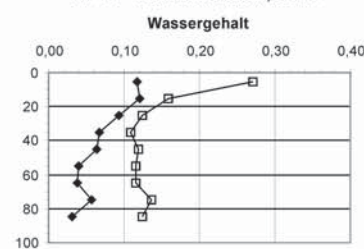
M 27 Haseldorf, K1



M 28 Hohenhorst, K1



M "F" Kiel-Falkenstein, Sand



M "H" Lippe-Hohwacht, Mergel

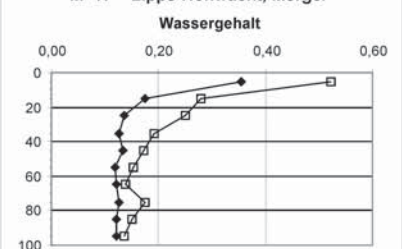
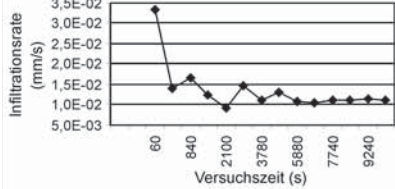
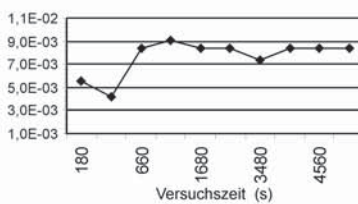


Abb. 4: tiefenbezogene Wassergehalte vor und nach dem Infiltrationsversuch

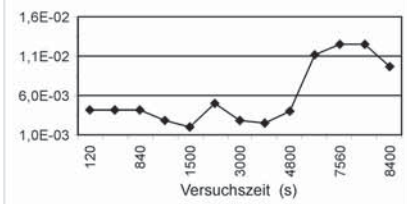
M 1 Sönke-Nissenkoog (K2)
Die Küste, 72 (2007), 27-63



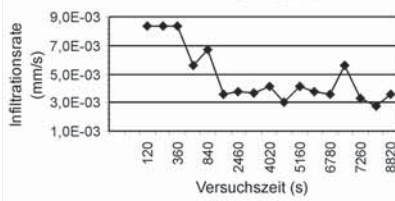
M 2 Beltrigharderkoog (K1)



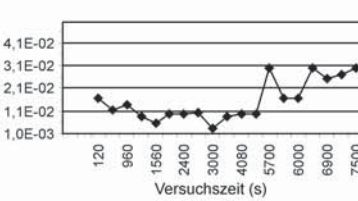
M 3 Neukoog (K3)



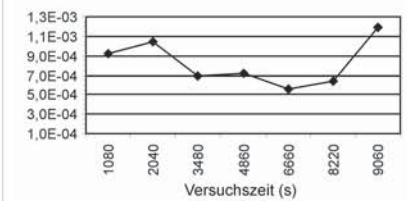
M 5 Finkhaushalligkoog (K3)



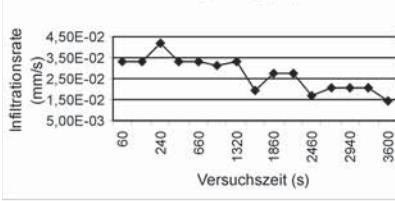
M 7 Westerhever-Stufhusen (K1)



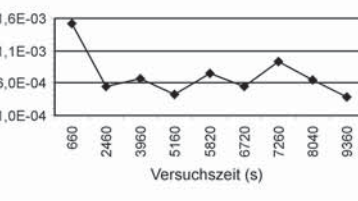
M 8 Ording-Nackhörn (K1)



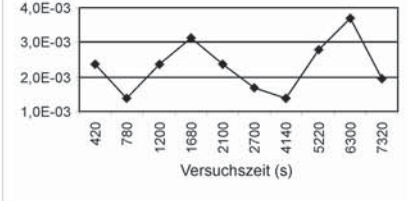
M 9 Hedwigenkoog (K3)



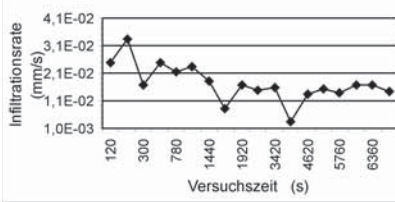
M 10 F.W.Lübkekoog (K2)



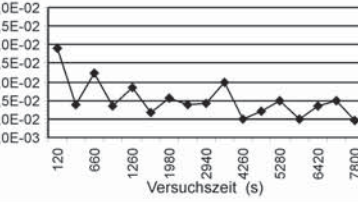
M 11 Marienkoog (K1)



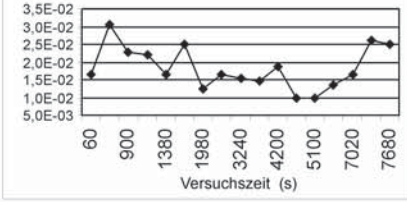
M 12 Ockholm (K1)



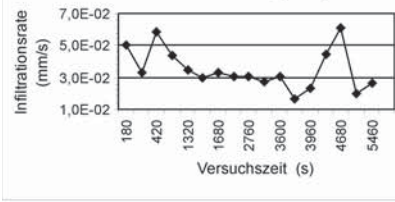
M 13 Fahretoft (K2)



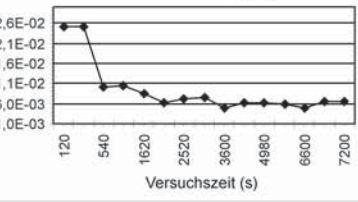
M 14 Osewolder Koog (K1)



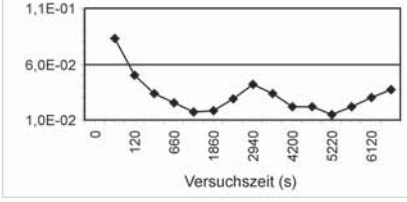
M 15 Hauke-Haien-Koog (K1-3)



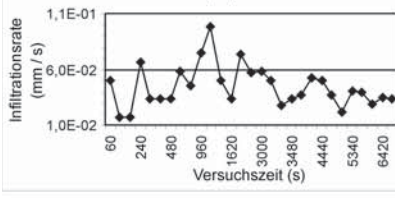
M 16 Dieksanderkoog (K1)



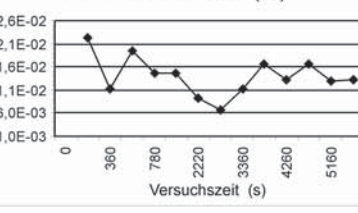
M 17 Kaiser-Wilhelmkoog (K3)



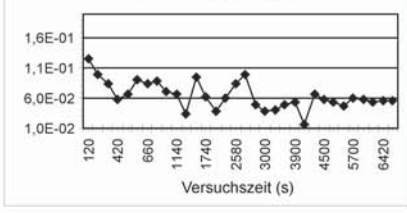
M 18 St.Margarethen-Harrwettersiel (K2)



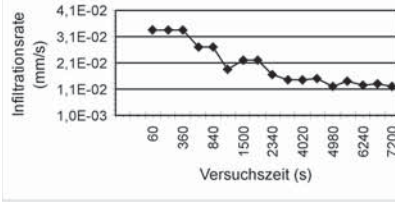
M 19 Büttel-Holstenreck (K2)



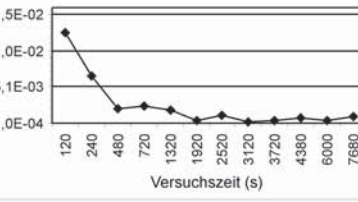
M 20 Nordhusen (K1)



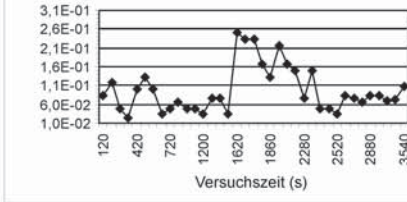
M 21 Groden (K1)



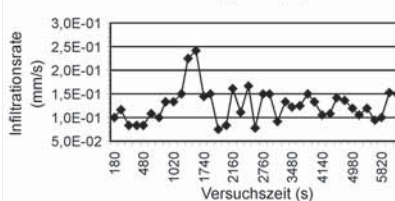
M 22 Brokdorf-Mitte (K1)



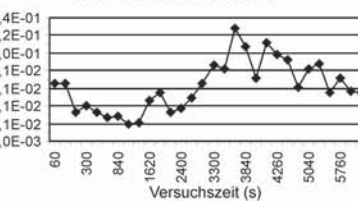
M 23 Brokdorf - Arentsee (K2)



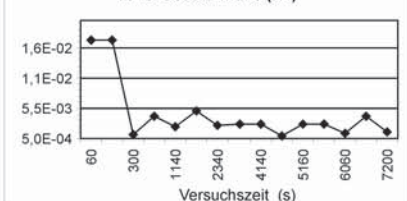
M 24 Siel Vierstieghufen (K2)



M 25 Glückstadt-Süd (K2)



M 26 Seestermühe (K1)



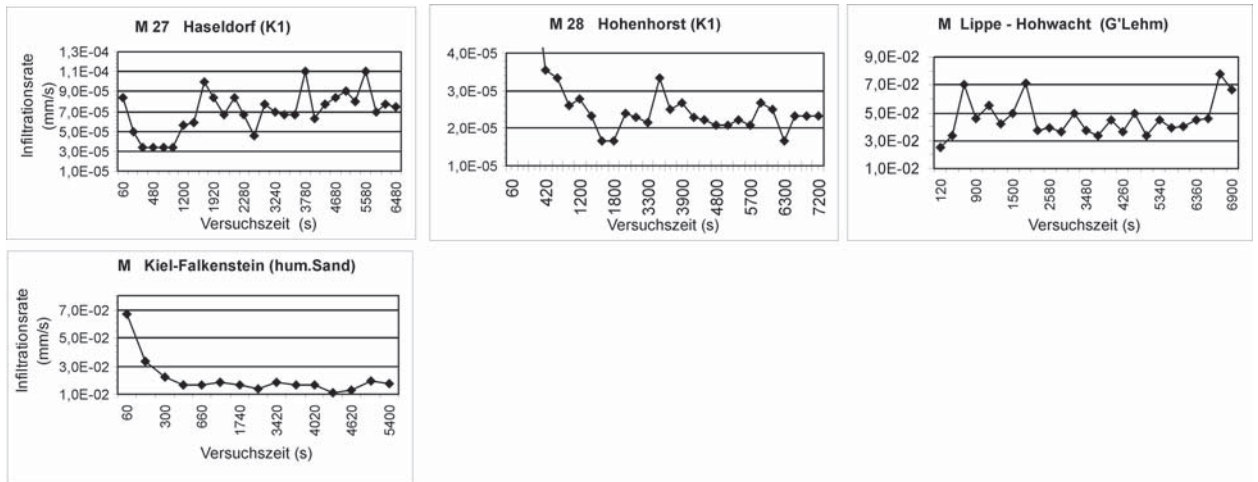


Abb. 5: Verlauf von Infiltrationsversuchen

Der zeitliche Verlauf der Sickerwasserinfiltration ist für die einzelnen untersuchten Deichstandorte in Abb. 5 grafisch dargestellt. Tab. 3 gibt eine generelle Übersicht über die Messergebnisse.

Tab. 3: Ergebnisse der Sickerversuche 2005

Ort	Versuchsdatum	Bodenklasse K	Deichbaujahr	v_{inf} (Anfang) m/s	v_{inf} (Ende) m/s	Vers. dauer min	Sicker- tiefe cm
Sönke-Nissen-Koog	17.01.2005	2	1987	3,30E-05	1,10E-05	163	40
Beltringharderkoog	18.01.2005	1	1987	5,50E-06	8,30E-06	88	52
Neukoog/Nordstrand	18.01.2005	3	1962	4,20E-06	1,10E-05	140	>95
Porrenkoog	19.01.2005	1	1977			76	<5
Finkhaushalligkoog	19.01.2005	3	1963–64	8,30E-06	3,60E-06	147	85
Westerheverkoog	31.01.2005	1	1983			60	<5
Westerhever-Stufhusen	31.01.2005	1	1976	1,35E-05	2,70E-05	125	95
Ording-Nackhörn	01.02.2005	1	1994–95	1,00E-06	7,00E-07	151	65
Hedwigenkoog	01.02.2005	3	1974	3,30E-05	2,10E-05	60	>95
F.W.Lübkekoog	02.02.2005	2	1999	1,50E-06	5,50E-07	156	>95
Marienkoog	02.02.2005	1	1982–85	2,40E-06	2,00E-06	122	85
Ockholmer Neuer Koog	03.02.2005	1	1990–91	2,50E-05	1,50E-05	120	70
Fahretofter Wester-Koog	03.02.2005	2	1988	2,40E-05	1,10E-05	130	85
Osewoldterkoog	04.02.2005	1	1979	2,80E-05	2,50E-05	128	70
Hauke-Haienkoog-Süd	04.02.2005	3	1958–60	5,00E-05	2,70E-05	91	>95
Dieksanderkoog	17.03.2005	1	1990	2,50E-05	6,67E-06	120	55
Kaiser-Wilhelmkoog	17.03.2005	3	1962–64	8,33E-05	3,75E-05	106	>>95
St.Marg.-Harrwettersiel	18.03.2005	2	1992–94	5,00E-05	3,33E-05	113	85
Büttel-Holstenreck	18.03.2005	2	1993–94	2,22E-05	1,33E-05	165	85
Nordhusen	21.03.2005	1	1978–80	1,25E-04	5,56E-05	110	>95
Brunsbüttel-Groden	21.03.2005	1	1975	3,33E-05	1,20E-05	120	>95
Brokdorf-Mitte	04.04.2005	1	2004	1,25E-05	4,32E-07	128	50
Brokdorf-Arentsee	04.04.2005	2	1992–93	1,17E-04	7,22E-05	59	75

Ort	Versuchsdatum	Boden-Klasse K	Deichbau-jahr	v_inf (Anfang) m/s	v_inf (Ende) m/s	Vers.dauer min	Sickertiefe cm
Siel Vierstieghufen	04.04.2005	2	1985: 1994	1,00E-04	1,28E-04	94	>95
Glückstadt-Süd	05.04.2005	2	1998–2000	6,67E-05	5,56E-05	105	>95
Seestermühe	05.04.2005	1	1967–1969	1,67E-05	1,52E-06	120	90
Haseldorf	06.04.2005	1	1976	8,33E-05	7,50E-05	108	75
Hohenhorst	06.04.2005	1	1977–1980	2,29E-05	2,33E-05	120	>95
Lippe-Hohwacht	19.03.2005	Lehm	ca. 1878	2,50E-05	6,70E-05	115	>95
Kiel-Falkenstein	22.03.2005	Sand	1874	6,70E-05	1,80E-05	90	>>90

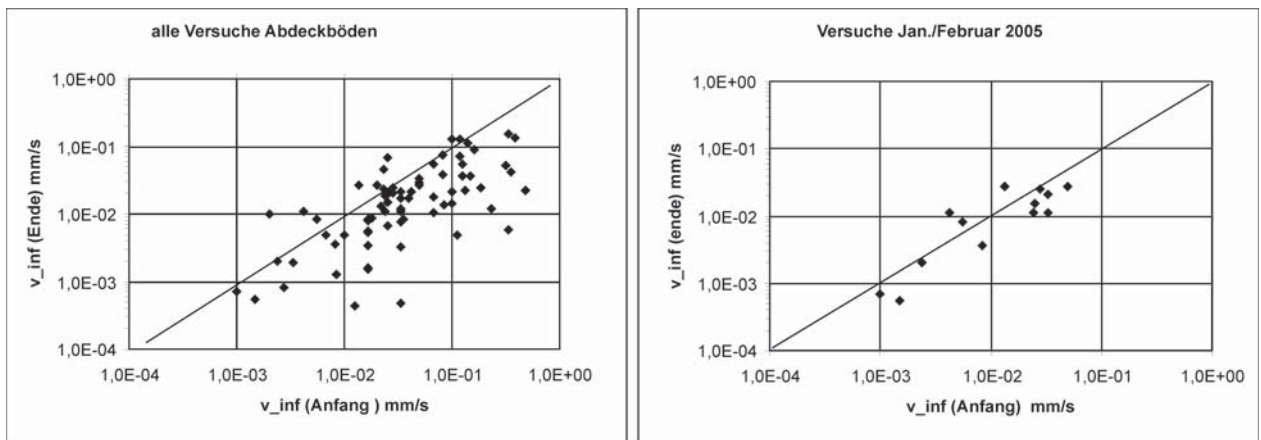


Abb. 6: Anfangs- und Endinfiltrationsrate von Sickerversuchen

In Abb. 6 sind die in der Anfangs- und Endphase des Infiltrationsversuches gemessenen Sickergeschwindigkeiten als Zahlenwerte aufgeführt und miteinander korreliert. Bei den in den niederschlagsreichen Wintermonaten (Januar – Februar 2005) ausgeführten Sickerversuchen lagen die beiden Grenzwerte innerhalb einer relativ geringen Schwankungsbreite nahe beieinander. Dies lässt darauf schließen, dass sich als Folge der im Januar 2005 sehr nassen Witterung vorher vorhandene Trockenrisse weitgehend geschlossen hatten. Für eine gleichmäßige Durchsickerung des Bodens beim Infiltrationsversuch spricht auch die Feststellung, dass die im Sickerversuch ermittelte Infiltrationsgeschwindigkeit ein ähnliches Maß erreicht wie in den Überlaufversuchen im Großen Wellenkanal an künstlich eingebauten und verdichtetem Altdeichmaterial mit allenfalls flachen und feinen Trockenrissen an der Deichoberfläche vor Versuchsbeginn. Bei den später nach dem Frostaufgang bzw. in früheren Jahren ausgeführten Versuchen lag die Sickergeschwindigkeit in der Anfangsphase zumeist deutlich, z.T. bis zum 40-fachen über dem am Versuche gemessenen Zahlenwert. Dieser Befund ist offensichtlich eine Auswirkung der ausgeprägten Frost- und Trockenrissbildung vor Versuchsbeginn, welche die gefügeabhängige Wasserdurchlässigkeit des Deichabdeckbodens vor Ort entscheidend prägt.

Zwischen der Infiltrationsgeschwindigkeit und den wichtigsten geotechnischen Klassifizierungsmerkmalen (Ton- und Fließgrenzwassergehalt) bestehen nach den vorliegenden Versuchsergebnissen keine signifikanten Beziehungen (Abb. 7).

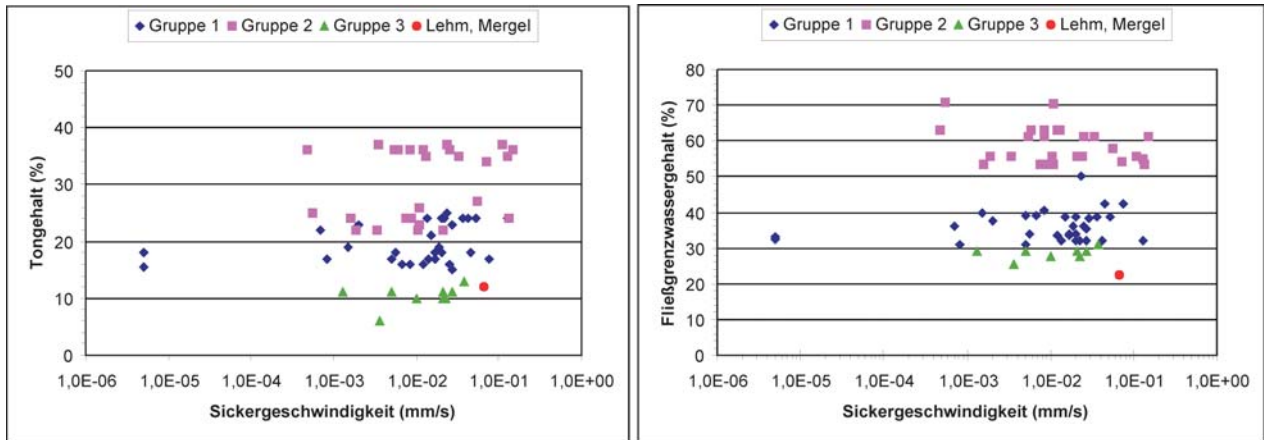


Abb. 7: Korrelation der Infiltrationsgeschwindigkeit mit geotechnischen Kennwerten

Das Ergebnis einer Einzeluntersuchung der Infiltrationsgeschwindigkeit auf der Krone eines aus Geschiebeboden bestehenden Ostseedeiches entsprach ungefähr den an sandreichen Kleiaufschüttungen gemessenen Zahlenwerten.

4. Versuche zur Wasserspannungscharakteristik

Die aus den Schürfen entnommenen Stechzylinderproben wurden im bodenkundlichen Labor aufgesättigt und anschließend stufenweise entwässert. Für die Entwässerung auf -30 hPa wurden die Proben auf dem Sandbad entwässert. Für die Entwässerungsstufen -60 , -150 , -300 und -500 hPa erfolgte dies mittels keramischer Platten, an denen ein definierter Unterdruck angelegt wurde. Die pF-Werte 3.2 und 4.2 (5 und 15 bar Unterdruck) wurden unter Überdruck bestimmt. Nach erfolgter Gleichgewichtseinstellung wurden die Proben gewogen, zuletzt bei 105 °C ofengetrocknet und die Masse trockenen Bodens bestimmt (Näheres bei HARTGE u. HORN, 1992). Mit der nach DIN 18124 im geotechnischen Labor ermittelten Korndichte ρ_s sind anschließend für jede Entwässerungsstufe (pF) das Setzmaß und Proben­volumen, die Trockendichte, der volumetrische Wassergehalt, das Porenvolumen sowie die Poren- und Feuchte­ziffer rechnerisch bestimmt worden.

In der Abb. 8 ist in Form eines Originaldiagramms aus dem bodenkundlichen Institut der Universität Kiel die im Versuch ermittelte Saugspannungs-/Wassergehaltsbeziehung mit Abgrenzung der Bereiche Luftkapazität, nutzbare Feldkapazität und Totwasseranteil beispielhaft dargestellt. Abb. 9 zeigt für jeweils eine Tiefenstufe aus sämtlichen bodenkundlichen Messstellen den Verlauf der Wasserspannung mit abnehmendem volumetrischem Wassergehalt. Eine s-förmige Form der pFWG-Kurve war nur bei zwei sandreichen Böden (Hedwigenkoog und Nordhusen) deutlich erkennbar, angedeutet noch bei den stark schluffigen Proben Groden und Dieksanderkoog. Die meisten Kurven hatten im Messbereich $0 < pF < 4.2$ bei Saugspannungen < 15 bar eine konvexe Form, wie sie auch von SCHEFFER u. SCHACHTSCHABEL (1989) für den A-Horizont eines Tonbodens als typisch angegeben wird. Aus einem solchen Kurvenverlauf lässt sich der sog. Restwassergehalt (residual volumetric water content) Θ_r nicht ersehen, der häufig auch nur als Stützstelle für die rechnerische An-

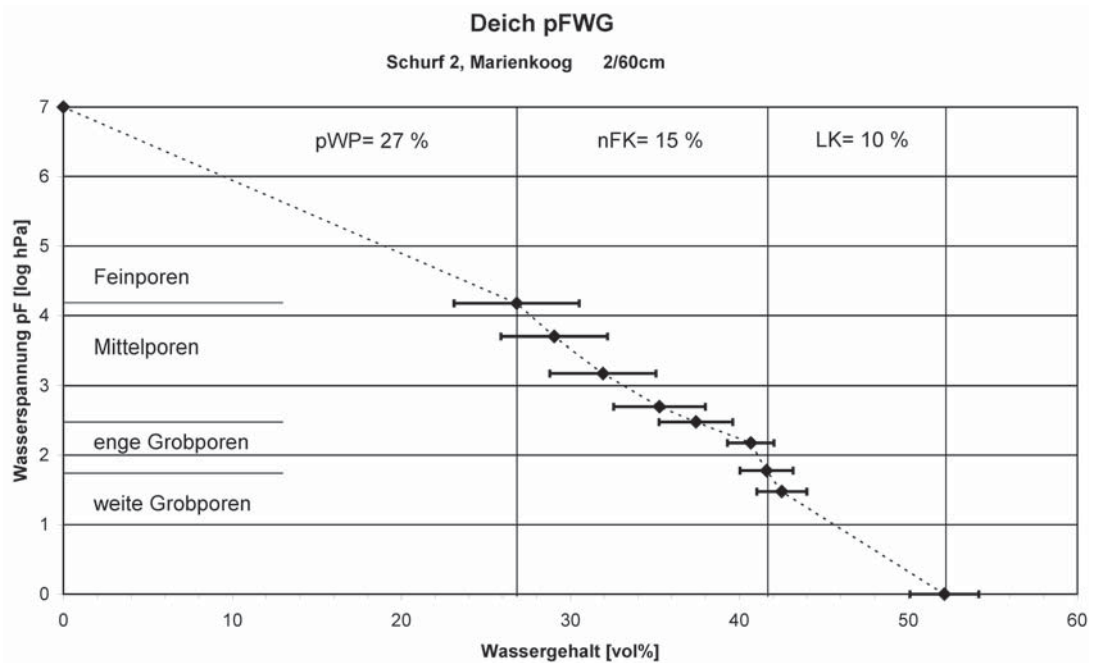


Abb. 8: pFWG-Diagramm einer sandigen Kleideckschicht

passung der pFWG-Versuchskurve durch die Messpunkte nach dem Van Genuchten-Ansatz dient.

Die insgesamt 44 Einzelmessungen lassen sich hinsichtlich der Verteilung des Porenraumes und der Speicherkapazitäten in den Bodengruppen wie folgt zusammenfassen:

Tab. 4: Porenraumverteilung und Speicherkapazitäten von Deichabdeckböden

Boden- gruppe	DIN 18196	Schurf-Nr.	Luftkapazität (%)	Nutzb.Feldkapazität (%)	Totwasseranteil (%)
			Weite Grobporen	Enge Grob- und Mittelporen	Feinporen
K 2	OT	1/4 tlw.	3,3 ... 10,2	10,7 ... 11,8	40,0 ... 50,0
K 2	TA	3 tlw./ 22/23/24/ 27/29 + 30	2,3 ... 10,8	7,3 ... 18,1	19,6 ... 38,7
K 1	TM	2/26/28	2,5 ... 10,1	9,8 ... 19,4	21,8 ... 32,6
K 1	TL	18/21/20 tlw.	3,3 ... 8,1	18,2 ... 20,3	18,8 ... 23,4
K 3	UL-ST	15/20 tlw.	5,9 ... 9,9	22,0 ... 33,0	9,1 ... 13,9

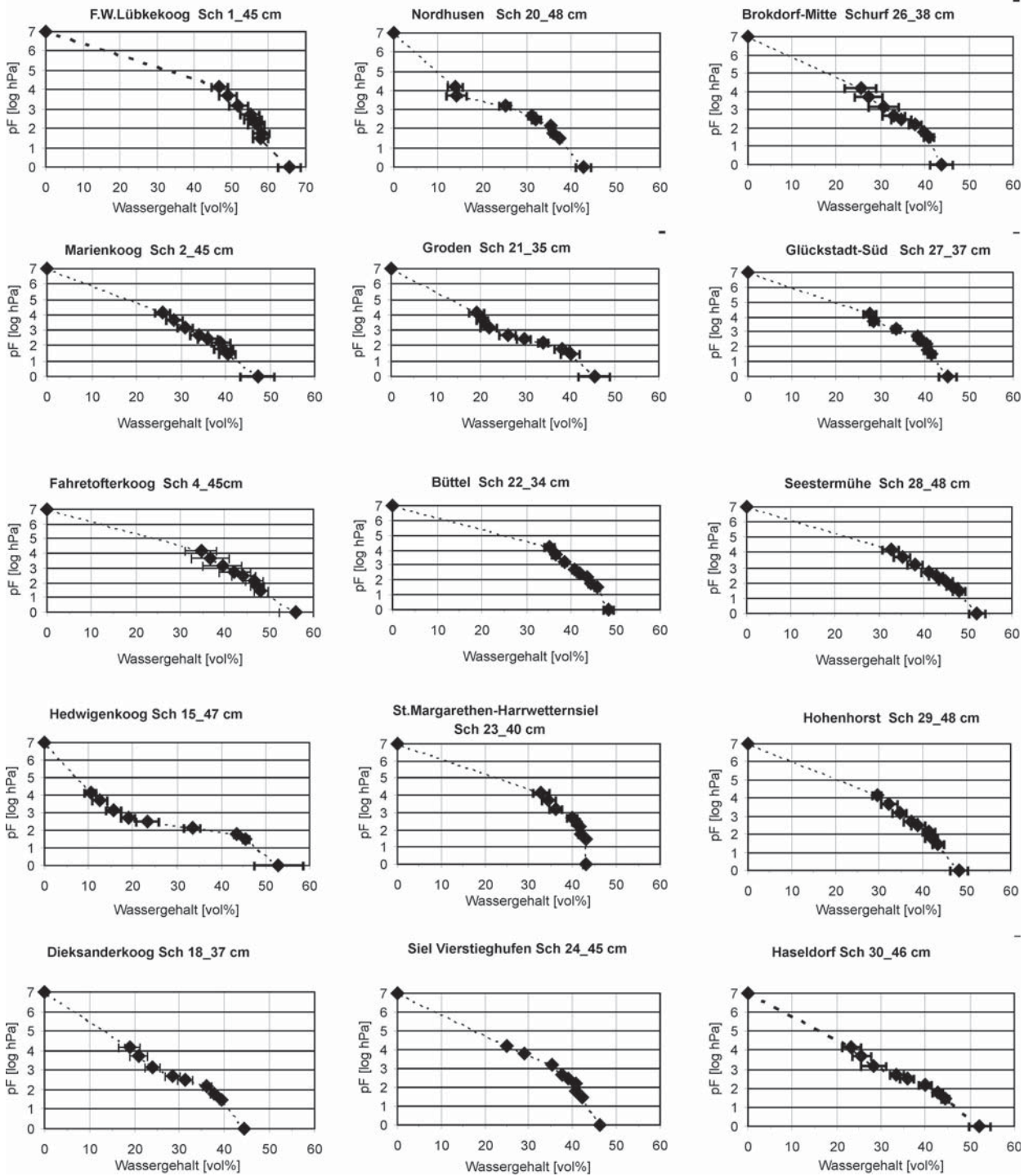


Abb. 9: pFWG-Diagramme von Deichabdeckböden

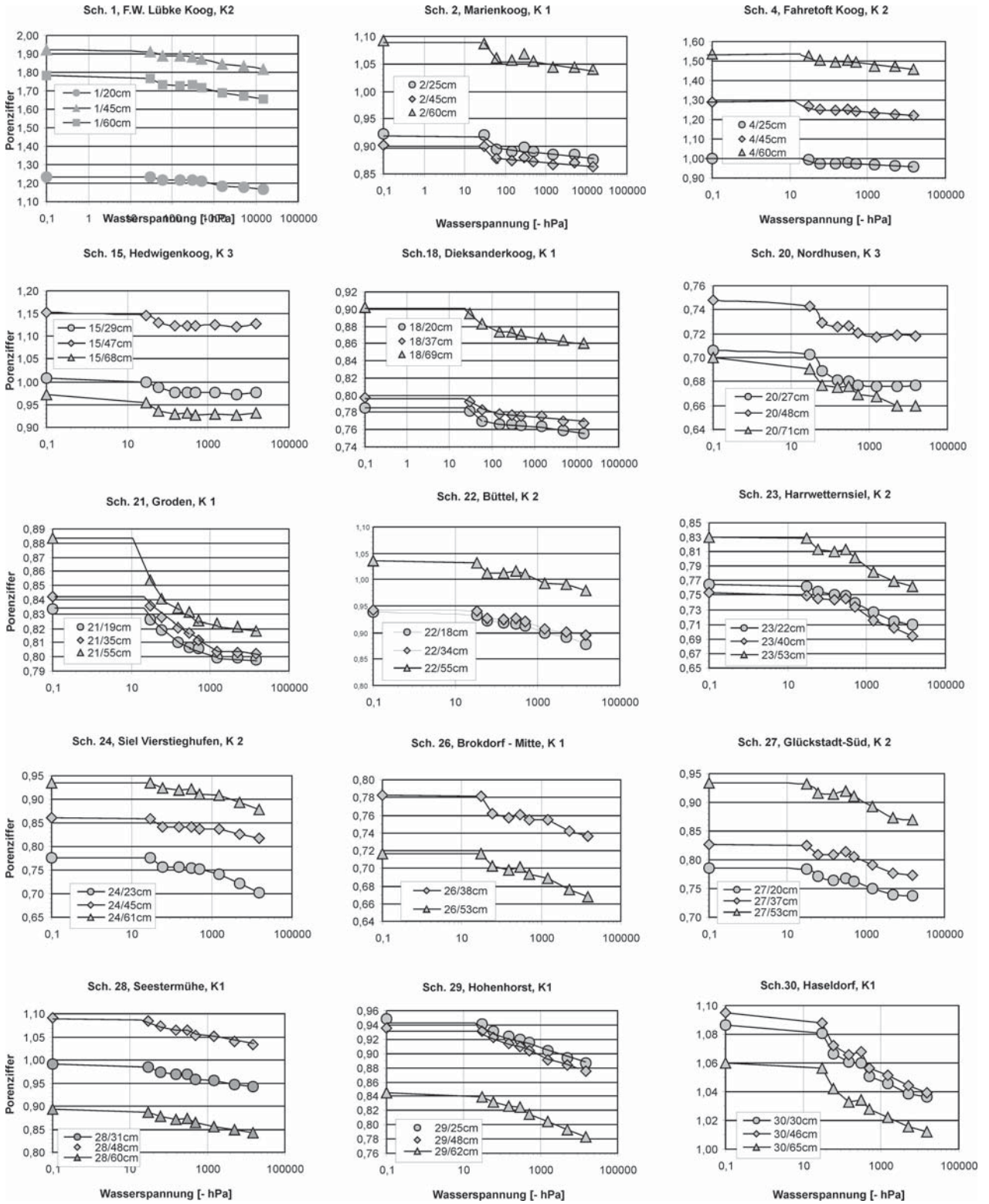


Abb. 10: Porenziffer vs. Wasserspannung bei Deichabdeckböden

In Abb. 10 ist die Veränderung der Wasserspannung in Abhängigkeit von der Porenziffer e für alle Einzelversuche dargestellt. Unabhängig vom Absolutmaß der Porenzahl, welches u.a. von der örtlichen einbaubedingten Lagerungsdichte sowie der Art und Ausbildung des Bodengefüges abhängt, wurde bei fast allen Versuchen bei stärkerer Entwässerung eine enge Korrelation zwischen der Porenzahl und dem pF-Wert festgestellt. Generell lassen sich im Prinzip drei Kurventypen unterscheiden

- Typ 1: geradliniger Kurvenverlauf während des gesamten Versuches
- Typ 2: zwei jeweils geradlinige Kurvenabschnitte mit einem Knick in der Mitte
- Typ 3: ein konkav gekrümmter Kurvenverlauf bis zum Versuchsende.

Insgesamt ergab sich jedoch für eine bestimmte Bodenklasse kein charakteristischer Verlauf der Porenziffer – Wasserspannungskurve.

5. Schrumpfv ersuche

Bei neuen bodenkundlichen Untersuchungen des Schrumpfungsprozesses an bindigen und organischen Böden mit ungestörtem Gefüge hat sich eine Darstellung der Messergebnisse in einem Porenziffer-Feuchtezahlendiagramm (Abb. 11) mit der Einteilung in vier verschiedene Schrumpfungsphasen bewährt (PENG u. HORN, 2005 u. 2007). Die Feuchtezahl δ (Moisture ratio) [$\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$] ist analog zur Porenziffer (Void ratio) das auf das Volumen der Festsubstanz bezogene Volumen des Porenwassers. Die gepunktete Linie gibt das Verhältnis $e(\delta) = \delta$ an, wobei sich Poren- und Feuchtezahl im gleichen Maße ändern.

Bei den bindigen Deichböden hat als Folge der langjährigen Liegezeit der Kleideckschichten mit zahlreich erlittenen Schrumpfungs- und Bewässerungszyklen gegenüber dem

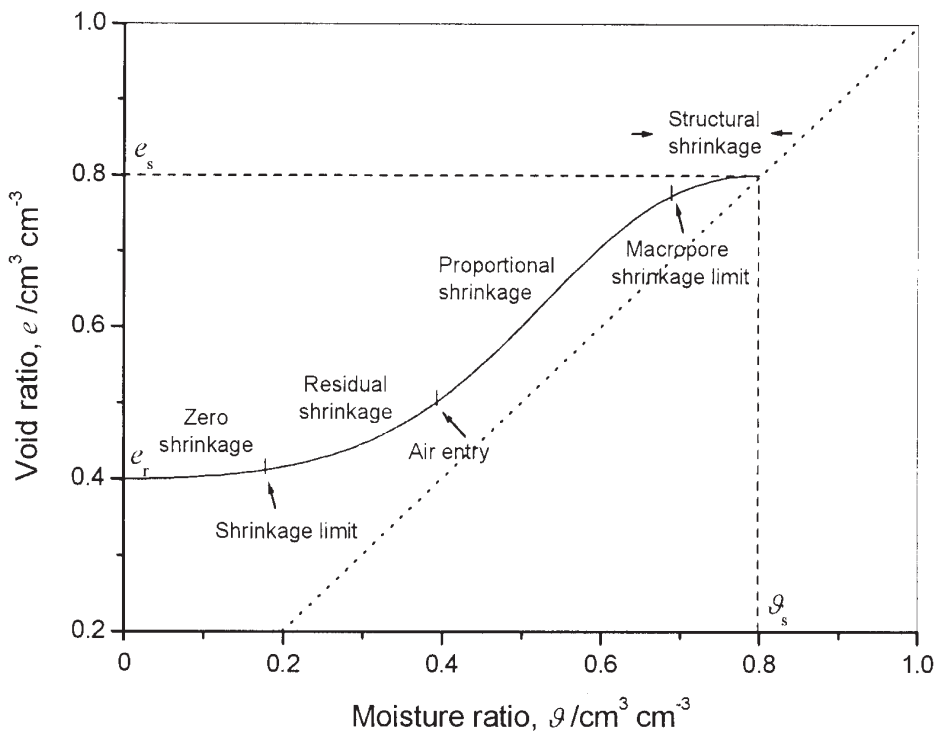


Abb. 11: schematische Schrumpfkurve eines ungestörten Bodens

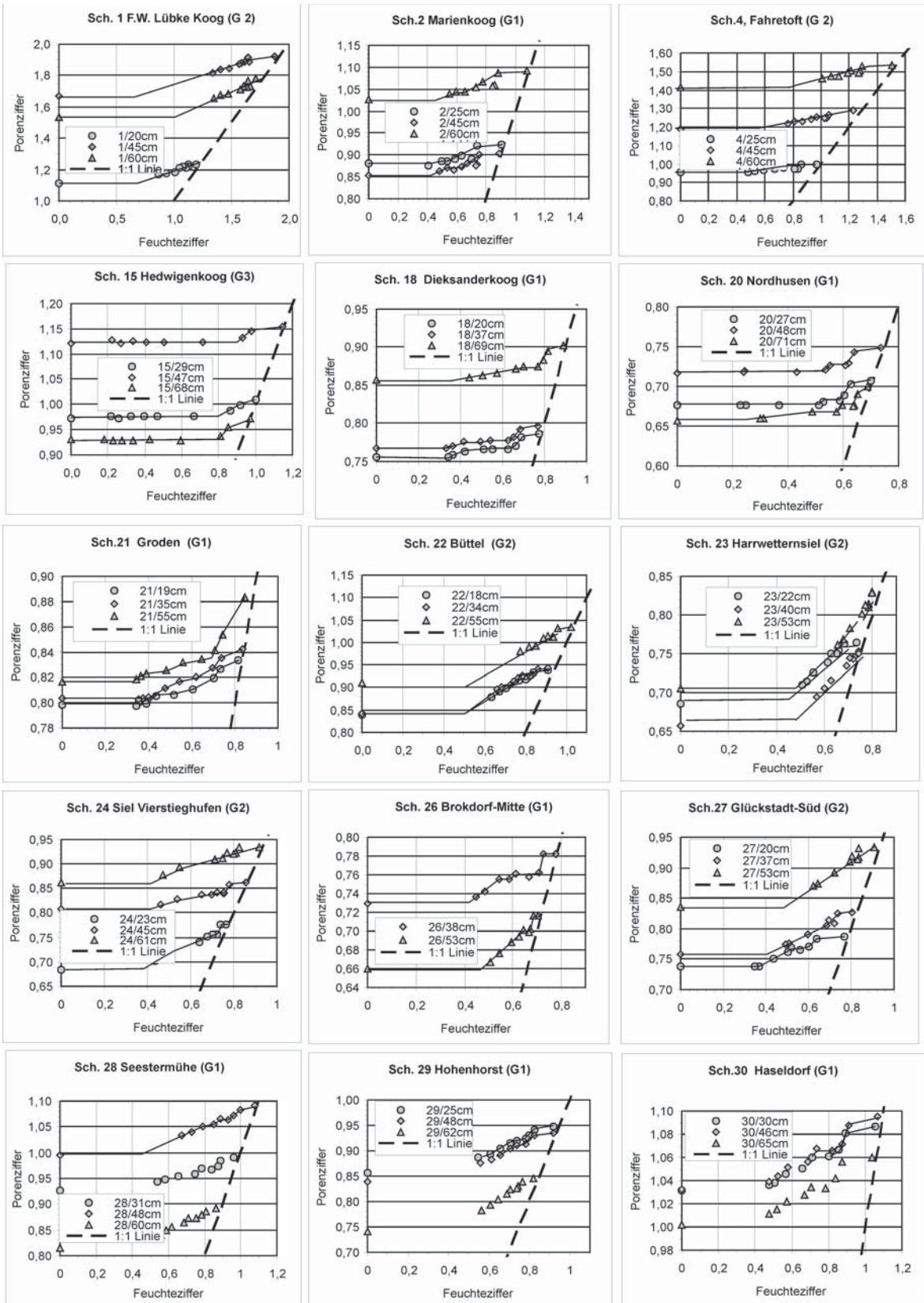


Abb. 12: Schrumpfungsverlauf von Deichabdeckböden

Zustand beim Bodenauftrag ein erheblicher irreversibler Volumenverlust mit einer entsprechenden Abnahme der Porenzahl e stattgefunden. Dies wirkt sich auch entscheidend auf den jeweiligen Verlauf der Porenziffer-/Feuchte-zifferbeziehung aus (Abb. 12).

Bei allen Deichabdeckböden ist die sog. *strukturelle Anfangsschrumpfung* zumeist nur sehr schwach ausgeprägt; teilweise wird sie durch eine geringe Resthebung der aufgesättigten Probe während der folgenden ersten Trocknungsstufe auch nur vorgetäuscht.

Während der Hauptphase der Schrumpfung verlaufen zwar alle Kurven annähernd geradlinig, doch fällt die Abnahme der Porenziffer im Vergleich zur Feuchte-ziffer wesentlich geringer aus. Der Proportionalitätsfaktor als Quotient zwischen der Poren- und Feuchte-ziffer variiert unabhängig von der Bodengruppe zwischen den Zahlenwerten 0,04 und 0,60 (Abb. 13).

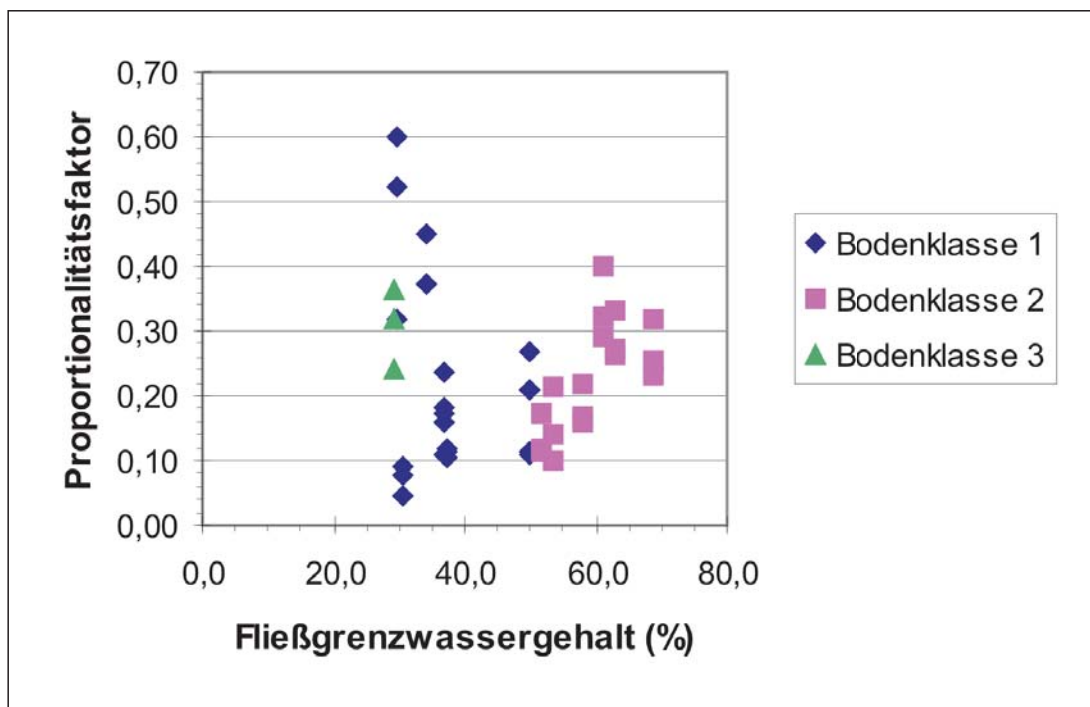


Abb. 13: Proportionalitätsfaktor zwischen Poren- und Feuchte-ziffer vs. Fließgrenzwassergehalt

Bei einigen Proben (Nordhusen, Dieksanderkoog, Hohenhorst, Siel Vierstieghufen, Seestermühe) kann aus dem unregelmäßigen, sprunghaften Verlauf der δ/e -Kurven (Abb. 12) auf einen ein- oder mehrmaligen Gefügestrukturbruch während der Haupttrocknungsphase geschlossen werden. Der Anteil der sog. Restschrumpfung ist bei den Deichabdeckböden durchweg sehr gering. Bei den sand- und schluffreichen Deichböden grenzt die proportionale Schrumpfung abweichend vom theoretischen Versuchsverlauf (Abb. 11) Übergangslos an den Bereich der Nullschrumpfung an.

Für die vergleichende Bewertung der Schrumpfungseigenschaften verschiedener Abdeckböden ist die als Mittelwert aus jeweils 5 Einzelversuchen gemessene, auf das Ausgangsvolumen nach Aufsättigung bezogene *prozentuale Volumenveränderung* während der Austrocknung wesentlich aufschlussreicher (Abb. 14).

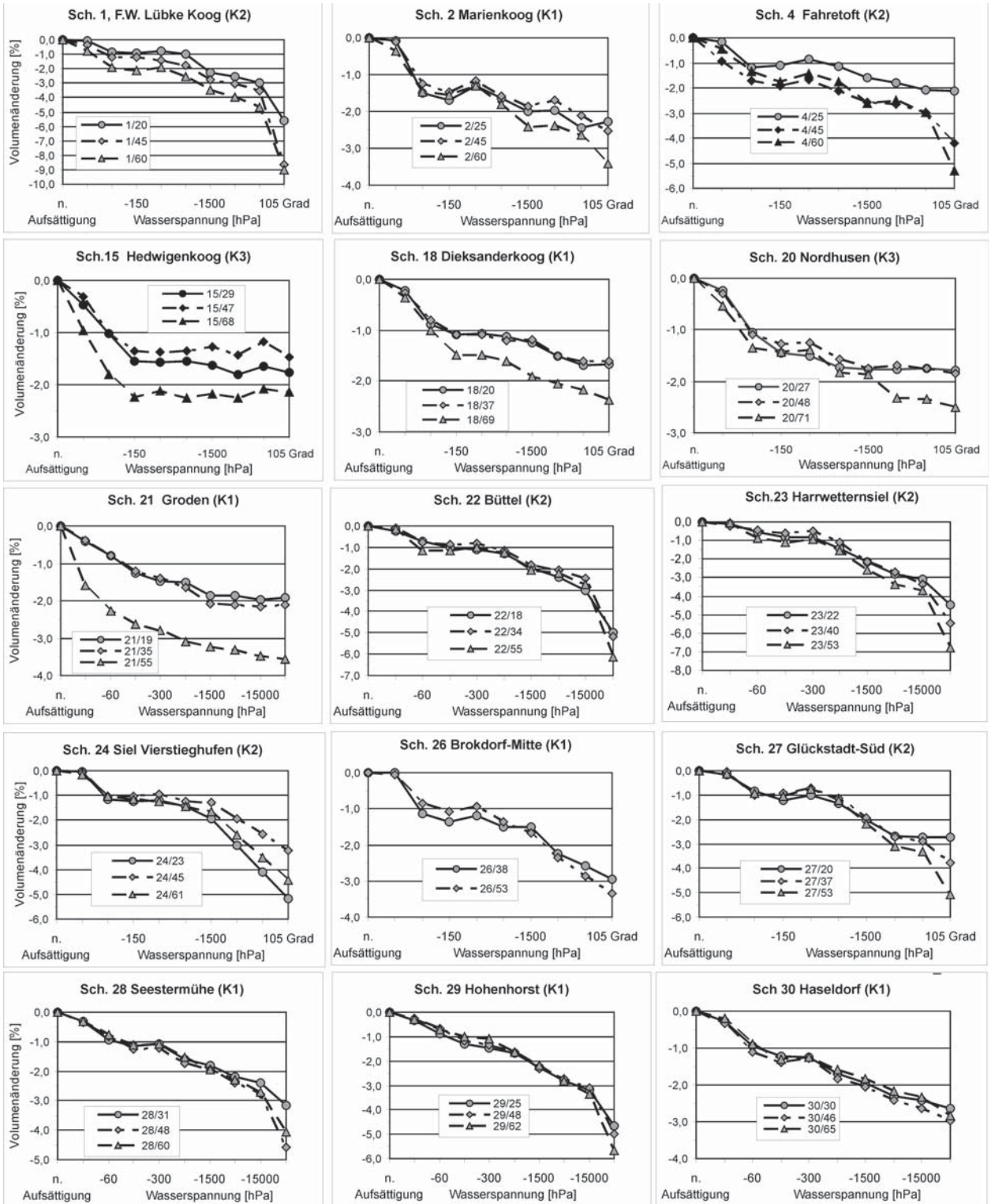


Abb. 14: Volumenänderung während der Austrocknung

Im Anschluss an die Aufsättigung wurden in 27 % aller Einzelversuche in der niedrigsten Entwässerungsstufe *Anfangshebungen* registriert. Diese scheinbaren Hebungen betreffen i.d.R. nur einzelne Versuche innerhalb einer Messgruppe; ihre Häufigkeit ist über die gesamte Untersuchungstiefe (18–65 cm unter der Deichkrone) hinweg ziemlich gleichmäßig verteilt.

Im Einzelfall einer erst einjährigen Deichabdeckung aus sandigem Klei (Brokdorf-Mitte) lassen sich die hier in allen 10 Einzelversuchen gemessenen Anfangshebungen zu Beginn des Schrumpfvorgangs ziemlich sicher auf eine zunächst noch vorhandene – offensichtlich durch eine starke Verdichtung des Bodens beim Einbau bedingte – Restspannung zurückführen, die bei der Aufsättigung nicht abgebaut worden ist. Da einerseits eine Hebung in der Anfangsphase der Schrumpfung bei einer „gealterten“ Deichauffüllung real wenig wahrscheinlich ist und zum anderen für eine Prognose die *maximal mögliche Volumenschrumpfung* interessiert, wurde im Falle einer gemessenen Anfangshebung die Ausgangsprobenhöhe mit dem Messwert bei $h_p = -30$ hPa gleichgesetzt und danach alle Folgemessungen auf diesen bezogen.

Für eine realistische Grenzwertbetrachtung der linearen Schrumpfung wurden an Hand der an Deichböden ausgeführten Schrumpfvversuche zwei Szenarien betrachtet:

- Im Falle einer *geringen bis mittleren Austrocknung* ist die auf das Ausgangsvolumen nach einer vollständigen Aufsättigung bezogene durchschnittliche prozentuale Volumenänderung mit Zahlenwerten zwischen
1,0 und 2,2 (im Einzelfall bis 3,2) %
bei den sandigen wie tonigen Abdeckböden *vollständig unabhängig* von allen wichtigen geotechnischen Parametern (Abb. 15).
- Bei *starker Austrocknung* bis an die Grenze der pflanzenverfügbaren (nutzbaren) Feldkapazität bei $p_F 4.2$ entsprechend einer Saugspannung von -15 bar steigt die gemessene mittlere Volumenänderung mit dem Tonanteil bzw. dem Fließgrenzwassergehalt an von
1,0–2,0 % beim Schluffsand auf
2,5–4,5 % beim tonreichen Klei (Abb. 16).

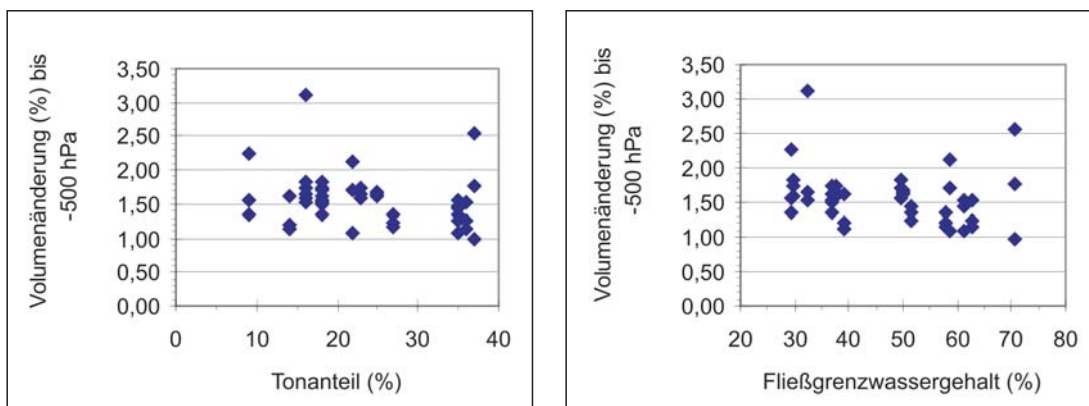


Abb.15: Volumenänderung bei einer Entwässerung auf $p_F = 2.7$ Unterdruck vs. Tonanteil bzw. Fließgrenzwassergehalt

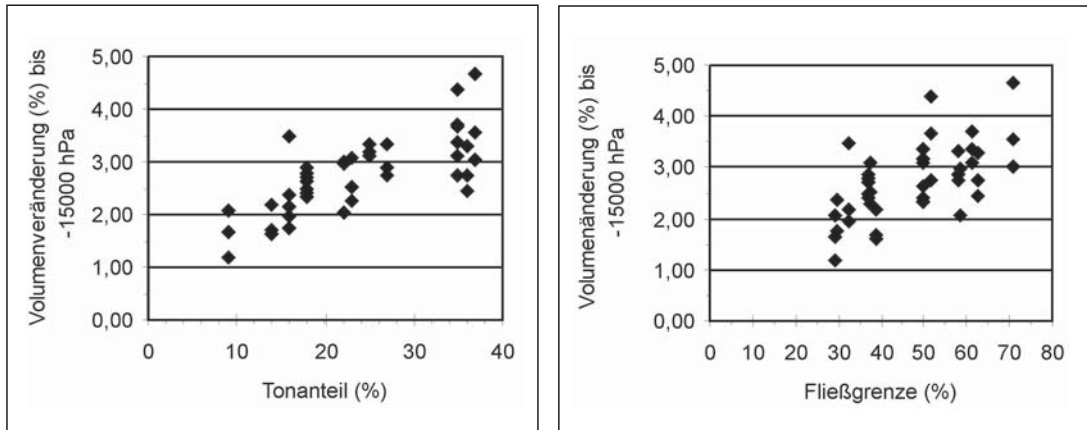


Abb. 16: Volumenänderung bei einer Entwässerung auf $pF = 4.2$ Unterdruck vs. Tonanteil bzw. Fließgrenzwassergehalt

6. Scherversuche

Zur Abschätzung der beim Versickerungsvorgang veränderten, wassergehaltsabhängigen undrainierten Scherfestigkeit c_u wurde eine Laborflügelsonde mit verlängerbarer Führungsstange (Typ GEONOR 600) verwendet. Damit wurde an insgesamt 30 Deichstationen in Tiefenabständen von 10–20 cm vor Ort die Anfangs- und Restfestigkeit (τ_{fl} , $\tau_{fl-gest}$) der erdfeuchten Probe vor Beginn des Infiltrationsversuches sowie unmittelbar nach Versuchsende im Zentrum der Versickerungsstelle gemessen (Abb. 17: Scherfestigkeitsdiagramme). Die zugehörigen, tiefenbezogenen Wassergehaltsveränderungen sind jeweils als Begleitmessung zum Infiltrationsversuch bestimmt worden (Abb. 4).

Versuchsbedingt erfolgt das Abscheren beim Flügelsondenversuch auf einer durch die Flügelabmessung vorgegebenen und erzwungenen kreiszylindrischen Bruchfläche, die lokale Festigkeitsanomalien nur bedingt berücksichtigen kann. Bei allen ausgeführten Versuchen wurden sehr kleine Flügel (i.d.R. $h/d = 40/20$ mm bzw. $30/15$ mm bei sehr hoher Anfangsscherfestigkeit) verwendet, um die Fehlermarge möglichst gering zu halten.

Der im Erdbaulabor gemessene Wassergehalt eines angetrockneten oder bewässerten, stark bindigen Bodens mit ausgeprägtem Sekundärgefüge (Prismen, Polyeder) bezieht sich ebenso wie die zugehörige Konsistenzzahl I_c auf den geometrischen Durchschnitt zwischen dem anfangs noch relativ trockenen Kern und der aufgeweichten Randzone innerhalb eines durchnässten Aggregatgefüges (Abb. 3.20 bei WEISSMANN, 2003). Die versuchsmäßig ermittelte Konsistenzzahl beschreibt somit bei gleichen kornanalytischen und plastischen Eigenschaften in Abhängigkeit von der infolge klimatischer Veränderungen wechselnden Ausgangsfeuchtigkeit im Polyederkern unterschiedliche Zahlenwerte des Wassergehaltes und damit der Festigkeit in der zuerst aufgeweichten Randzone eines Bodenaggregates. Dadurch erklärt sich auch die sehr unterschiedliche Konsistenzzahl I_{c-sat} des wassergesättigten bindigen Bodens trotz angenähert gleicher geotechnischer Klassifizierungsmerkmale.

Bei den Messungen während der Wintermonate 2005 erwies sich die Deichabdeckung trotz der Regenfälle vor und während der Versuchsdurchführung als verhältnismäßig trocken (Bodenfeuchtezustand gemäß Bodenkundlicher Kartieranleitung 2005 im Allgemeinen

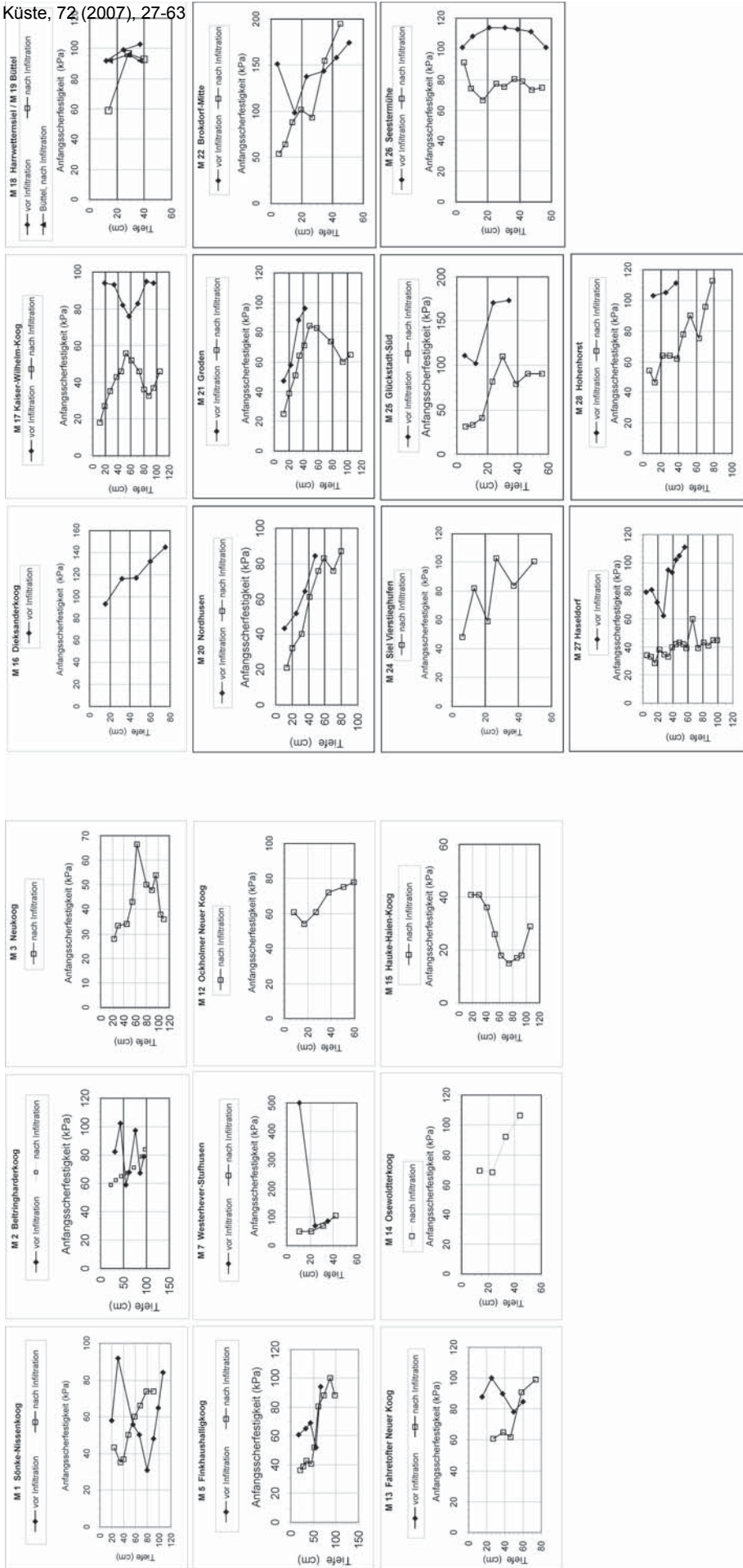
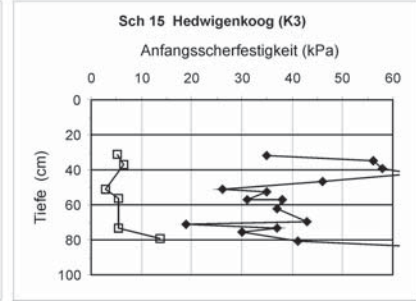
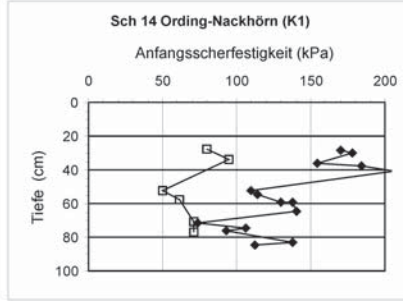
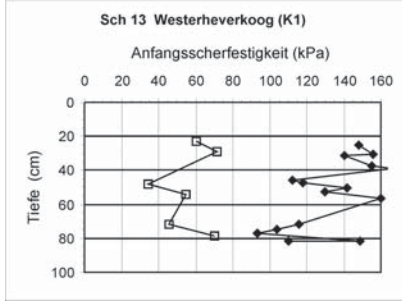
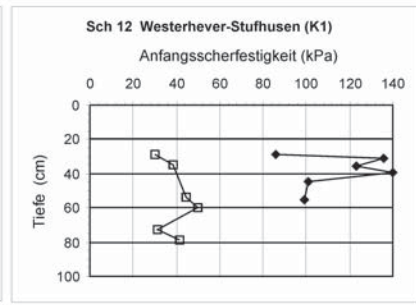
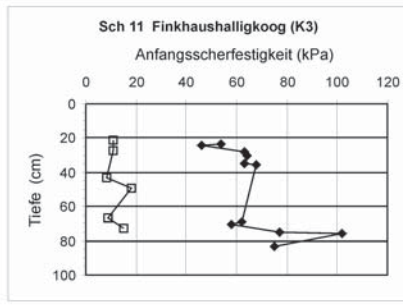
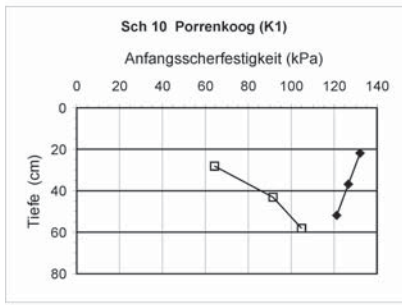
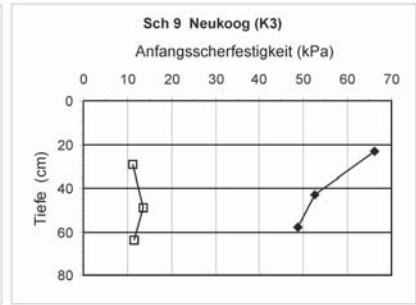
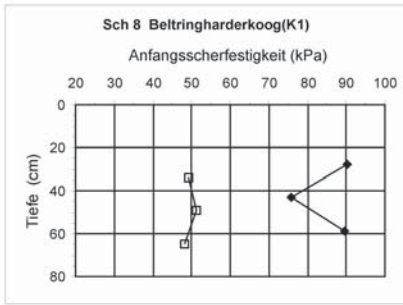
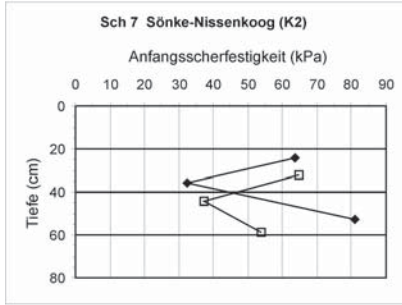
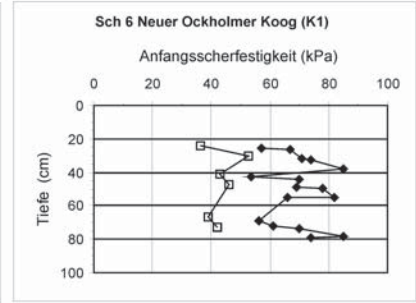
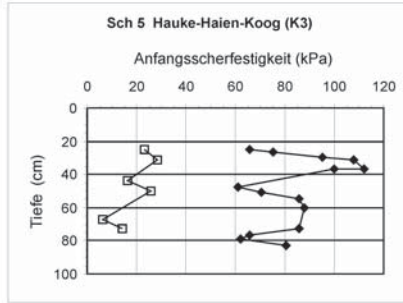
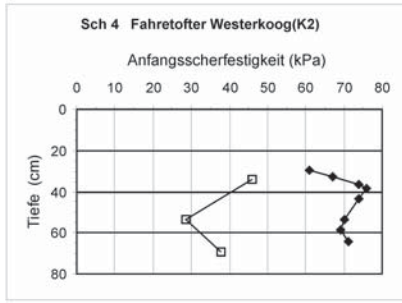
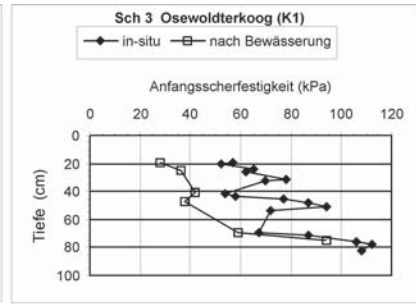
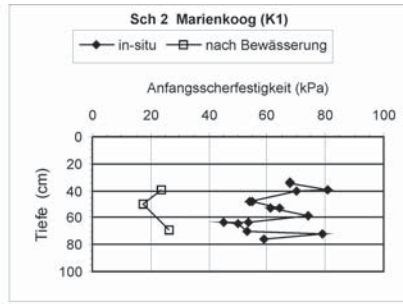
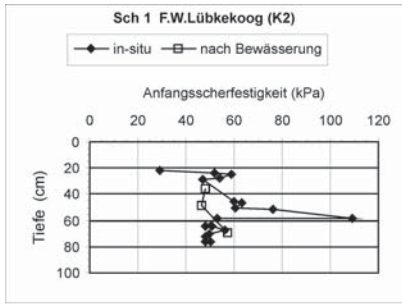


Abb. 17: tiefenbezogene Verteilung der Anfangsscherfestigkeit τ_{η} vor und nach Infiltrationsversuch

feu 2 = schwach feucht, tlw. feu 3 = feucht). Die mit der Laborflügelsonde im erdfeuchten Abdeckboden gemessenen Anfangsfestigkeiten waren dementsprechend mit $\tau_{fl} = 60\text{--}110$ kPa im ungestörten Zustand bzw. 20–40 kPa als Restfestigkeit nach mehrmaliger Flügelumdrehung – beide Male mit einer deutlichen Festigkeitszunahme mit wachsender Tiefe unter Flur – relativ hoch (s. auch SCHUPPENER u. KIEKBUSCH, 1988).

Die nach etwa 2-stündiger Infiltration in der Versickerungsstelle gemessenen Anfangsfestigkeiten zeigten in Abhängigkeit von der Bodenart untereinander große Unterschiede: einen verhältnismäßig geringen Festigkeitsabfall gegenüber dem Ausgangswert vor der Versickerung beim tonreichen Klei (Bodenklasse 2); deutlich niedrigere, aber immer noch ausreichend hohe Anfangsscherfestigkeiten beim schluffig-tonigen Klei (Bodenklasse 1) sowie einen starken Festigkeitsverlust im schwach tonigen, sandigen Schluff bzw. Schluffsand (Bodenklasse 3). Diese Feststellung wird durch die in der Abb. 19 links für verschiedene Bodenklassen bzw. Bodengruppen gem. DIN 18196 aufgegliederte Korrelation zwischen der (ungestörten) Anfangsscherfestigkeit und der Versuchstiefe unter der Deichkrone illustriert.

Bei einer etwa 2-stündigen Dauer des Infiltrationsversuches auf dem Deich war nicht sicher, ob in diesem Zeitraum eine dem extremen Belastungszustand bei Wellenüberlauf entsprechende Aufweichung des Bodens eintreten kann. Deshalb wurden im Mai/Juni 2005 an allen neuen Versickerungsstellen (ergänzt durch einige zusätzliche Untersuchungen in bereits 1996 bei TEMMLER u. FILIPINSKI (1997) beprobten Deichprofilen) Schürfe angelegt und aus drei unterschiedlich tiefen Bodenhorizonten Stechzylinder und Sonderproben für die bodenkundliche und geotechnische Untersuchung entnommen. In jedem Entnahmehorizont wurde vor Ort die Anfangsscherfestigkeit mit einer Taschenflügelsonde vom Typ GEONOR 600 ermittelt. Die mit Boden gefüllten Stahlstutzen wurden im Erdbaulabor des Landesamtes für Straßenbau und Verkehr Kiel (= ehemaliges geotechnisches Labor des LANU), auf einem Filtervlies aufgesetzt und von unten über mehrere Tage hinweg so lange bewässert, bis der glänzende Zustand der oberhalb des Wasserspiegels gelegenen Zylinderoberfläche eine vollständige Aufsättigung der Bodenprobe anzeigte. An jeder der auf diese Weise wassergesättigten Proben hat der Verfasser an jeweils 5 Stellen über die Kreisfläche verteilt im oberen und unteren Teil der Zylinderprobe mit der bereits im Gelände eingesetzten Laborflügelsonde die undrainierte Scherfestigkeit des aufgeweichten Bodens gemessen und den jeweiligen Wassergehalt mit der zugehörigen Konsistenzzahl ermittelt. Die ermittelten Scherfestigkeitswerte sind in Abb. 18 für die einzelnen Messstellen tiefenbezogen aufgetragen und in Abb. 19 rechte Seite – für die verschiedenen Bodengruppen nach DIN 18196 getrennt – mit der Entnahmetiefe unter Deichkrone sowie zusätzlich in Abb. 20 mit der für den Sättigungszustand errechneten Konsistenzzahl I_{c_sat} korreliert.



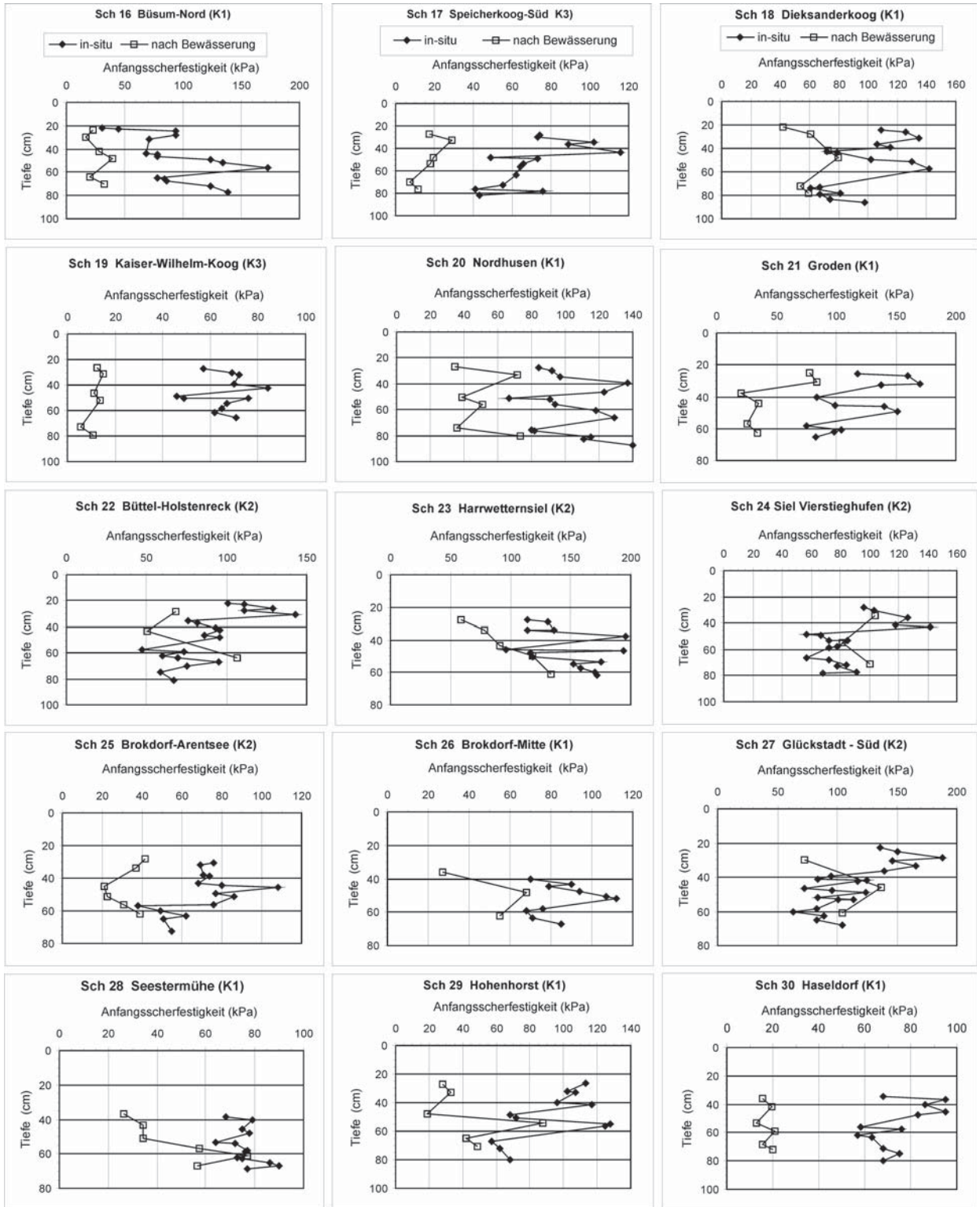


Abb. 18: Anfangsscherfestigkeit τ_{fl} in-situ und nach der Aufsättigung im Erdbaulabor

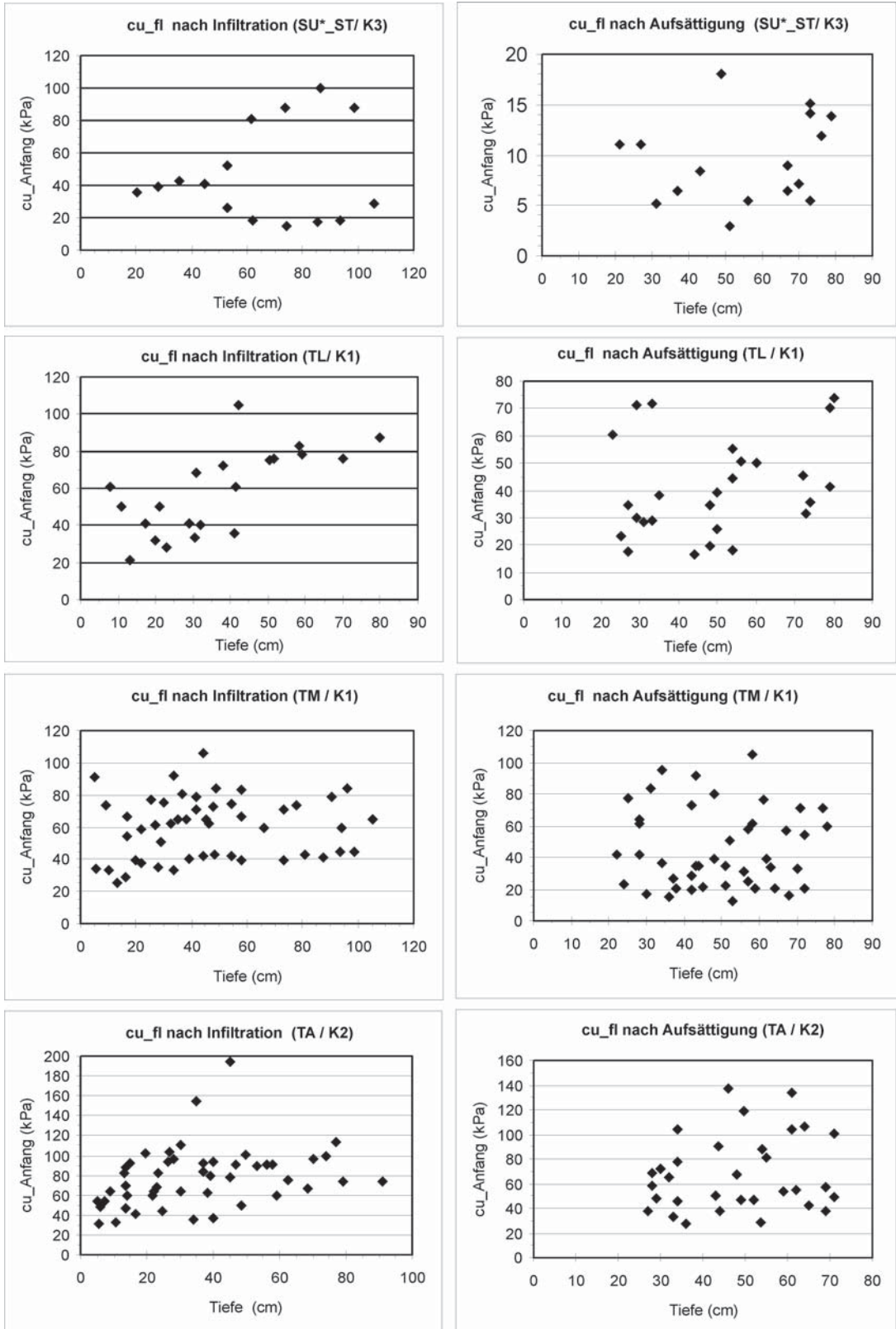


Abb. 19: tiefenbezogene Anfangsscherfestigkeit durchfeuchteter Deichabdeckböden (Infiltrations- und Bewässerungsversuche 2005)

Tab. 6: Auswirkung der Bewässerung auf die undrained Scherfestigkeit

geringe Scherfestigkeitsabnahme durch die Bewässerung:

Messstelle Nr.	Schurf Nr.	Ort	Bodenklasse	DIN 19196
1	7	Sönke-Nissen-Koog	2	TA
10	1	F.W.Lübkekoog	2	OT
18	23	Harrwettersiel	2	TA
19	22	Büttel-Holstenreck	2	TA
24	24	Vierstieghufener Siel	2	TA
25	27	Glückstadt-Süd	2	TA

starke Festigkeitsabnahme durch die Bewässerung mit ausreichend hoher Restscherfestigkeit:

Messstelle Nr.	Schurf Nr.	Ort	Bodenklasse	DIN 18196
2	8	Beltringharderkoog	1	TM
4	10	Porrenkoog	1	TL
6	13	Westerheverkoog	1	TL
7	12	Westerhever-Stufhusen	1	TM
8	14	Ording-Nackhörn	1	TM
11	2	Marienkoog	1	TM
12	6	Ockholmer Neuer Koog	1	TM
13	4	Fahretofter Westerkoog	2	TA-OT
14	3	Osewoldter Koog	1	TM
15	5	Hauke-Haien-Koog (oberer Teil)	1	TM
16	18	Dieksanderkoog	1	TL
20	20	Nordhusen-Mühlenstraßen	1	TL
21	21	Brunsbüttel-Groden	1	TL
23	25	Brokdorf-Arentsee	2	TA
22	26	Brokdorf-Mitte	1	TM
26	28	Seestermühe	1	TM
27	30	Haseldorf	1	TM-TA
28	29	Hohenhorst	1	TM-TA
4/1996	16	Büsum-Nord	1	TL
2/1996	17	Speicherkoog-Süd (oberer Teil)	1	TL

sehr starke Festigkeitsabnahme durch die Bewässerung bis auf eine geringe, bereits kritische Restscherfestigkeit:

Messstelle Nr.	Schurf Nr.	Ort	Bodenklasse	DIN 18196
3	9	Neukoog (Nordstrand)	3	SU*-ST
5	11	Finkhaushalligkoog	3	UL
9	15	Hedwigenkoog	3	UL
15	5	Hauke-Haien-Koog (unterer Teil)	3	UL
17	19	Kaiser-Wilhelm-Koog	3	TL-UL
2 (1996)	17	Speicherkoog-Süd (unterer Teil)	3	UL

Beim tonigen Klei veränderte sich der vor und nach der Aufsättigung gemessene Wassergehalt und damit verbunden die Konsistenzzahl infolge der Bewässerung nur geringfügig von

$$I_{c(\text{erdfeucht})} = 0,64 \dots 1,11 \text{ (i.M. } 0,875) \text{ auf } I_{c(\text{sat})} = 0,32 \dots 0,80 \text{ (i.M. } 0,603);$$

beim schwach tonigen Sandschluff sank sie dramatisch von

$$I_{c(\text{erdfeucht})} = 0,67 \dots 2,35 \text{ (i.M. } 1,308) \text{ auf } I_{c(\text{sat})} = -0,76 \dots 0,29 \text{ (i.M. } -0,245).$$

Beim schluffig-sandigen Klei lagen die Konsistenzzahlen nach der Aufsättigung je nach Plastizität und Ausgangswassergehalt dazwischen bei

$$I_{c(\text{sat})} = -0,27 \dots 0,80 \text{ (i.M. } 0,445).$$

Laboruntersuchungen mittels *einaxialer Druckversuche* an gleichfalls über mehrere Tage hinweg künstlich bewässerten Sonderproben des Deichmaterials ergaben – soweit die aufgeweichten Proben nicht beim Auspressen aus dem Entnahmestutzen zerbrachen bzw. zerfielen – durchweg deutlich niedrigere Anfangsfestigkeiten. Dieses Ergebnis bestätigt frühere im LANU gemachte Erfahrungen des Verf., dass diese Versuchsmethode wegen fehlender seitlicher Probenstützung beim Abscheren insbesondere bei schwach- bis mittelplastischen, vorkonsolidierten Kleischichten zur realistischen Bestimmung der Anfangsscherfestigkeit im allgemeinen nicht geeignet ist.

Für die Bodenklassen 1 und 2 ist in Abb. 20 die statistisch ermittelte Korrelation zwischen der Flügelsondenfestigkeit der ungestörten, mehrtägig bewässerten und wassergesät-

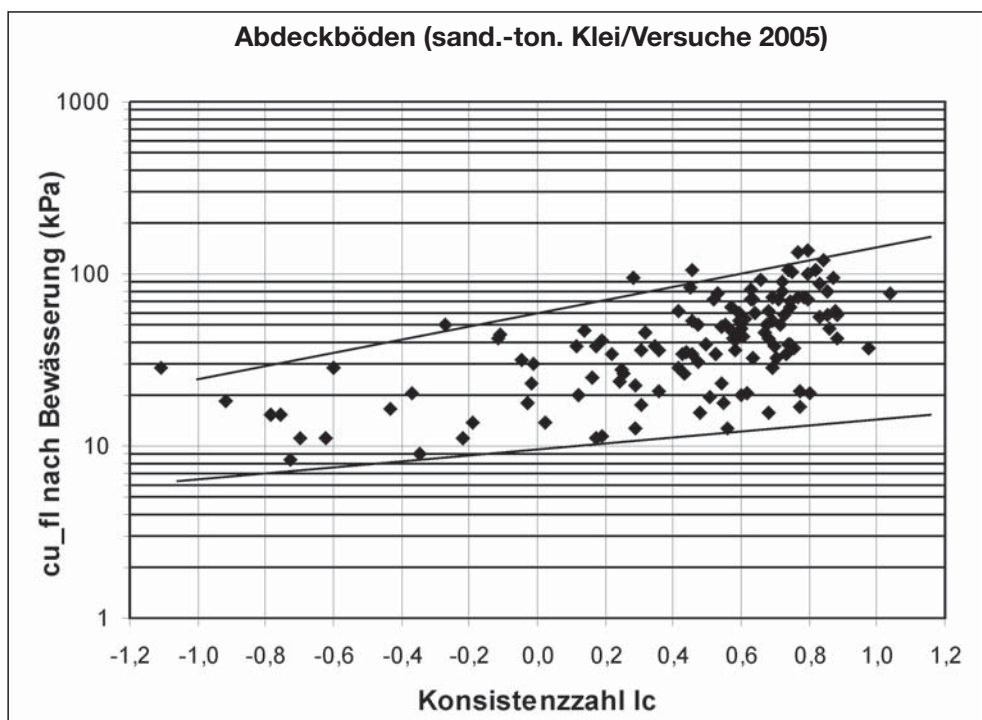


Abb. 20: Anfangsscherfestigkeit τ_{fl} vs. Konsistenzzahl bindiger Deichabdeckböden nach mehrtägiger Bewässerung (Versuche 2005)

tigten Proben mit der Konsistenzzahl I_{c_sat} der Einzelproben und den umhüllenden Geraden grafisch dargestellt. Die niedrigsten Messwerte lagen zwischen 10 und 15 kPa und damit weit über den von WEISSMANN (2003) als kritisch angesehenen, aus seinem Diagramm für aufbereiteten Boden mit völlig zerstörtem Gefüge abgeleiteten Zahlenwerten.

In der Abb. 21 ist die vom Verf. in früheren Bodengutachten des Landesamtes für Natur und Umwelt (LANU) Schleswig-Holstein für einen ausgeprägt plastischen Schlick aus dem Deichvorland Cecilienkoog (NF) von zähflüssiger bis künstlich angetrockneter Beschaffenheit ermittelte Korrelation der Anfangsscherfestigkeit mit der Konsistenzzahl für wenig gestörten Boden einerseits und durchgekneteten Schlick/Klei mit vollständigem Gefügeverlust

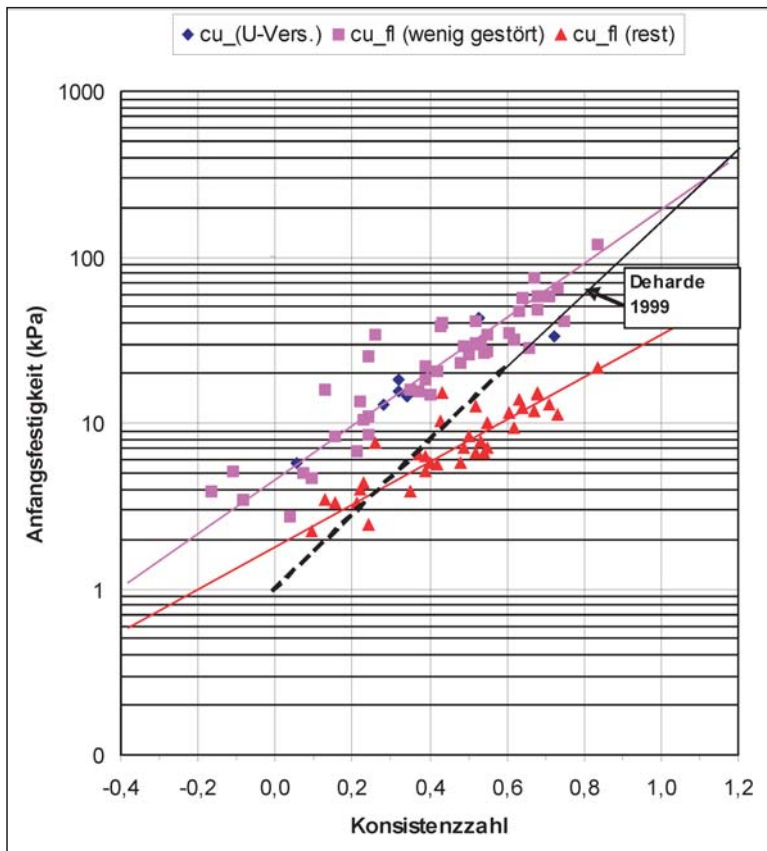


Abb. 21: Anfangsscherfestigkeit vs. Konsistenzzahl für schlickigen Klei (Vorland Cecilienkoog) bei mäßig gestörtem Bodengefüge bzw. durchgekneteter Probe

bei gleichem Wassergehalt (I_c) der Probe andererseits dargestellt. Die an einigen ungestörten Sonderproben aus der schwach konsolidierten Schlickdeckschicht an einaxialen Druckversuchen ermittelten Anfangsscherfestigkeiten lagen hier innerhalb der gemessenen Streubreite der Flügelsondenfestigkeiten für wenig gestörten bindigen Boden.

Im Konsistenzbereich steif bis halbfest ($I_c = 0,9$ bis $1,25$) stimmt die für angetrockneten Schlick vom Cecilienkoog mit geringer Gefügestörung ermittelte Ausgleichsgerade (cu_fl [wenig gestört], Abb. 21) mit den von DEHARDE (1999) in Zylinderdruckversuchen an zuvor wassergesättigten Kleiprobe mit ausgeprägtem Aggregatgefüge und ähnlichen geo-

technischen Eigenschaften ($T = 33 \%$, $w_L = 77 \%$, $I_p = 45 \%$) vom Deichstandort Cäcilien-
groden (Jadebucht) ermittelten Anfangsfestigkeiten angenähert überein, wogegen die von
DEHARDE für den Konsistenzbereich weich bis zähflüssig ($I_c = 0,6$ bis $0,0$) *durch Extrapolation nach unten abgeschätzten*, von WEISSMANN und RICHWIEN (2004) für ihre Berechnungen verwendeten Anfangsfestigkeiten die am nordfriesischen Schlick gemessenen τ_{fl} -Zahlenwerte bei Konsistenzzahlen $I_c < 0,1$ um das 3- bis 4-fache *unterschreiten*.

7. Festigkeitsversuche an Geschiebeböden

Bei aufgefüllten Geschiebeböden in Ostseedeichen handelt es sich zumeist um schwachplastische Sande, Schluffe und Tone. Wegen der darin enthaltenen Kies- und Steinanteile lässt sich bei diesen Bodenarten die Anfangsscherfestigkeit vor Ort oder im Erdbaulabor nur in Ausnahmefällen mit der Flügelsonde ermitteln. Hilfsweise wurde die undrainierte Scherfestigkeit in der Vergangenheit vielfach mit Hilfe des Taschenpenetrometers an Proben aus Kleinrammbohrungen mit relativ intaktem Bodengefüge bestimmt (diverse LANU-Gutachten des Verf. zur Baustoffuntersuchung für geplante Deichbaumaßnahmen an der Ostseeküste). Die Variationsbreite der untersuchten Proben mit einer erheblichen Streubreite der plastischen Eigenschaften reicht vom stark sandigen bis zum tonigen Lehm /-mergel mit einigen Stichproben aus Beckenschluff (Bojendorf/Fehmarn).

Für erdstatische Berechnungen kann die ansetzbare, nach DIN V 1054-100 (Abb. D.2) in Abhängigkeit von der Plastizitätszahl abzumindernde Anfangsfestigkeit c_u näherungsweise aus den Abb. 22 und 23 abgeleitet werden.

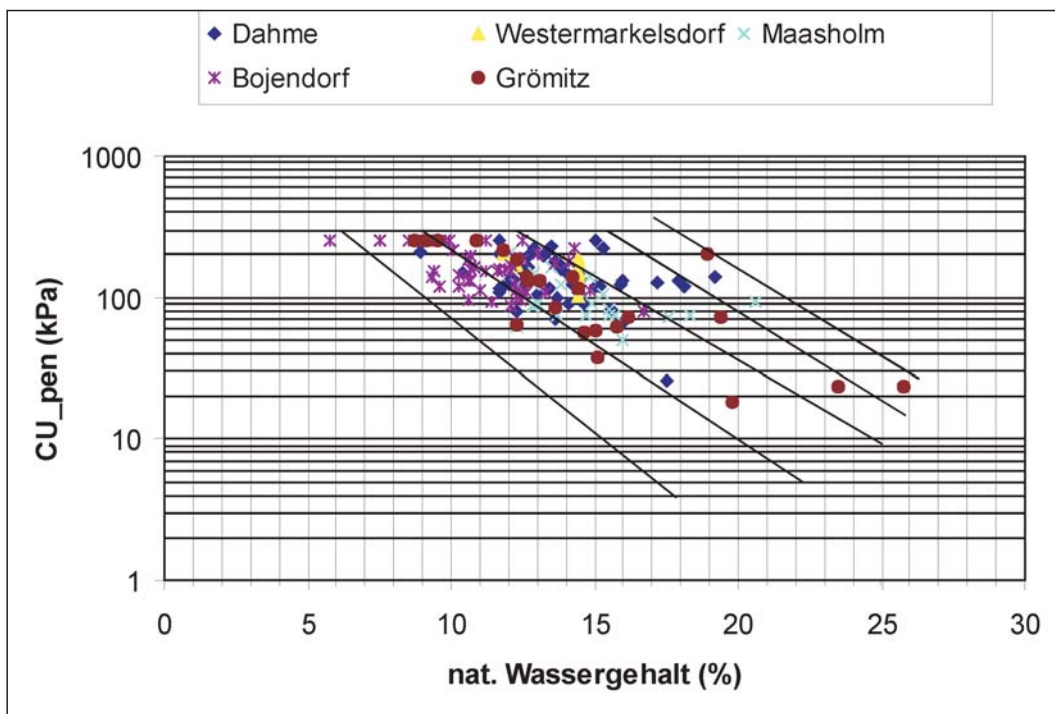


Abb. 22: Anfangsfestigkeit c_{up} vs. natürlicher Wassergehalt für Geschiebeböden (Lehm und Mergel)

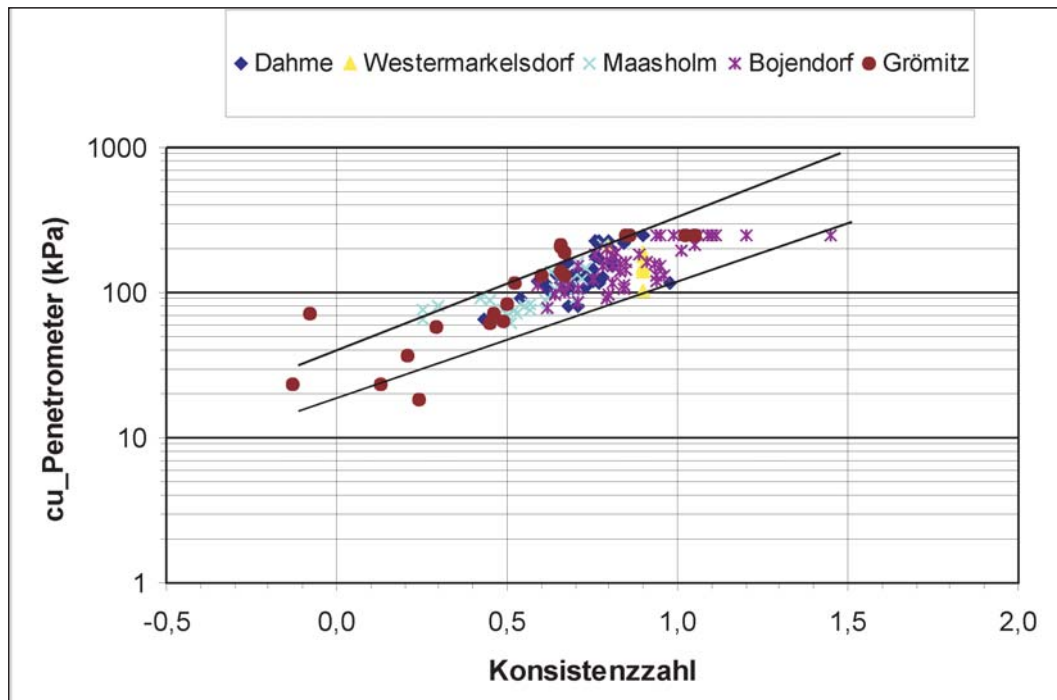


Abb. 23: Anfangsfestigkeit c_{up} vs. Konsistenzzahl für Geschiebeböden (Lehm und Mergel)

8. Schlussfolgerungen

Die optimalen geotechnischen Eigenschaften eines deichfähigen Kleis sind in der EAK 2002 ausführlich dargelegt. In der Vergangenheit wurde öfters auch ein sehr weiches bindiges Schüttmaterial für die Deichabdeckung verwendet, welches beim Einbau kaum verdichtet werden konnte und im Laufe der Zeit als Folge wechselnder Witterungsbedingungen ein ausgeprägtes Polyedergefüge mit zahlreichen Schrumpfrissen ausgebildet hat.

Die Ergebnisse der vor Ort durchgeführten Versickerungsversuche zeigten für alle Deichabdeckböden unabhängig von ihren geotechnischen Klassifizierungseigenschaften eine sehr große Schwankungsbreite der Infiltrationsgeschwindigkeit, deren Größe ganz wesentlich durch die örtlichen Einbaubedingungen (beim sand- und schluffreichen Klei), besonders aber durch das während der witterungsbedingten Alterung des Bodens entstandene Gefüge (speziell beim tonreichen Klei) bedingt ist. Die aktuelle, auch zeitlichen Veränderungen unterliegende Infiltrationsgeschwindigkeit für Sickerwasser insbesondere bei Wellenüberlauf kann daher im Einzelfall örtlich sehr unterschiedlich sein; sie lässt sich allenfalls in ihrer Größenordnung abschätzen (Abb. 7). Für die nach der Katastrophensturmflut von 1872 hauptsächlich aus aufgefüllten Geschiebeböden errichteten Ostseedeiche in Schleswig-Holstein ist wegen der damaligen, für heutige Verhältnisse unzureichenden Verdichtung des Schüttmaterials im Regelfall eine hohe Porosität mit entsprechender Infiltrationsrate anzunehmen.

Die hohe Wasserdurchlässigkeit einer rissigen Kleiauffüllung kann generell einen deutlichen Anstieg des Stauwasserspiegels im sandigen Deichkern verursachen und damit bei fehlender Drainage zu einem verstärkten Sickerwasseraustritt am Innen- und Außendeichfuß

führen. Nach entsprechenden Messergebnissen (TEMMLER, 2004) empfiehlt es sich, in solchen Fällen für den Standsicherheitsnachweis unabhängig vom Sturmflutfall bereits für den Normalzustand grundsätzlich einen gegenüber dem Tidehochwasser deutlich erhöhten Grundwasserstand im Deichkern anzusetzen.

Die Schrumpfungintensität eines nach längerer Liegezeit mit unterschiedlichsten Witterungsbedingungen „gealterten“ Deichabdeckbodens beträgt nur einen Bruchteil derjenigen eines sehr weichen, frisch aufgebracht bindigen Füllmaterials. Auch diese Beobachtung steht im Einklang mit bodenkundlichen Erfahrungstatsachen und ist daher als allgemeingültige Aussage plausibel.

Die ermittelten Wassergehalts-/Saugspannungskurven haben – von einer Schluffsandprobe abgesehen – im Bereich hoher Wasserspannungen nicht den in der bodenkundlichen Literatur allgemein angenommenen s-förmigen Verlauf entsprechend dem Van Genuchten-Modell. Die Bestimmung eines sog. „Restwassergehaltes Θ_r “ nach dem Verfahren Van Genuchten (erläutert bei WEISSMANN, 2003) ist deshalb bei den strukturierten Deichabdeckböden nicht möglich.

Ungeklärt ist bisher, bis zu welchem Grenzwert der Saugspannung der Abdeckboden unter natürlichen Verhältnissen während einer extremen Trockenphase austrocknen kann. Exakt lässt sich dieses Maß nur durch vor Ort durchgeführte Tensiometeruntersuchungen bestimmen. Solche Messergebnisse liegen jedoch von Deichabdeckböden bislang nicht vor.

Nach eigenen Untersuchungen von Böschungsrutschungen an Deichbinnenböschungen erreicht die nach lang anhaltenden Starkniederschlägen und Wellenüberlauf aufgeweichte Deckschicht nahezu unabhängig vom Bodenaufbau eine Tiefe von rd. 20–30 cm. In kompakten, nicht verstärkten Kleideichen kann die Unterkante einer aus einer früheren Deichverstärkungsmaßnahme resultierenden geringscherfesten Weichzone auch deutlich tiefer liegen (TEMMLER, 1999).

Ein Großteil der bei früheren Extremsturmfluten (1962, 1976, 1991) an damals steileren Deichinnenböschungen kompakter Kleideiche beobachteten Hangrutschungen als Auslöser von weitergehenden, tlw. bis zum Deichbruch reichenden Schäden hatte seine Ursache nicht in einem hohen Binnenwasserstand im Deichkern, sondern in einer Aufweichung der durchnässten bindigen Deckschicht unterhalb der Grasnarbe über dem wasserstauenden, nur erdfeuchten Untergrund des schwerdurchlässigen Deichkerns (TEMMLER u. FILIPINSKI, 1997).

Für zukünftige Untersuchungen sollte daher besonderes Augenmerk auf die Übergangszone zwischen der engständig gerissenen bindigen Deckschicht und der unterlagernden, relativ kompakten Zone der Kleiabdeckung gelegt werden, da sich bevorzugt an dieser Stelle böschungparallele Scher- oder Schwächezonen (potentielle Gleitfugen) ausbilden können. Diese Gefahr ist insbesondere bei verhältnismäßig großer Stärke und sehr weicher Konsistenz der kompakten Kleischicht (z.B. eines vorhandenen bindigen Altdeichkerns unter der Deichinnenböschung) relevant.

Die eigenen Untersuchungsergebnisse an ungestörten Bodenproben entsprechen mit gemessenen Anfangsfestigkeiten zwischen 5 und 20 \gg 1 kPa im Zustand der Fließgrenze denen von SCHUPPENER (1987, Abb. 9) sowie SCHUPPENER u. KIEKBUSCH (1988, Bilder 3–8).

Zur Risikobeurteilung der Deichstandsicherheit bei Wellenüberlauf empfiehlt es sich, die folgenden allgemeinen Bewertungskriterien zu Grunde zu legen:

- (1) Tab. G 3 der EAK 2002 der empfohlenen Grenzwerte für Klei als Deichabdeckung mit den dortigen Abb. G 23–25
- (2) die Versickerungsrate v_{inf} beim Infiltrationsversuch

- (3) die gemessene undrainierte Scherfestigkeit nach dem Infiltrations- oder Bewässerungsversuch, hilfsweise eine Abschätzung der Anfangsscherfestigkeit für einen aufgeweichten bindigen Abdeckboden mit einer Konsistenzzahl $I_c \approx 0,1$ nach Abb. 20 bzw. Abb. 23
- (4) beobachtete Sickerwasseraustritte aus der Deichböschung als Hinweis auf einen hohen Grundwasserstand im sandigen Deichkern.

In einzelnen Peilbrunnen in schleswig-holsteinischen Deichen wurden im sandigen Deichkern jährliche Grundwasserspiegelschwankungen bis zu 1,20 m gemessen (TEMMLER, 2004). An Stellen mit erheblichem Sickerwasseraustritt am Binnendeichfuß sind ggf. Drainierungsmaßnahmen erforderlich. Bisher wirkten sich solche Vernässungsstellen nicht standsicherheitsgefährdend aus.

Ausgehend von der vom Verf. an aufgeweichten bindigen Abdeckböden der Bodenklassen 1 und 2 gemessenen Anfangsscherfestigkeit ergibt sich nach den üblichen Bemessungsverfahren mit *geradlinigen* Gleitflächen (wedge-Methode DIN 4084, FRANKE in BRÖSKAMP et al. (1976), mathematisches Modell für hangparalleles Versagen nach WEISSMANN [2003]) für eine auf 1:3 abgeflachte durchströmte Deichinnenböschung im Allgemeinen eine ausreichende rechnerische Standsicherheit. Damit ist bei dichtem Grasbewuchs auf der Deichinnenböschung zugleich auch eine hinreichende Böschungstabilität für einen gemäß Generalplan Küstenschutz in Schleswig-Holstein (2001) zulässigen Wellenüberlauf von $2 \text{ l}/(\text{s} \cdot \text{m})$ gegeben.

Für die Landesschutzdeiche in Schleswig-Holstein wurden die nach Kenntnis des Verf. aus langjähriger gutachterlicher Tätigkeit im ehemaligen Geologischen Landesamt, später Landesamt für Natur- und Umwelt (LANU), Abt. Geologie und Boden, hinsichtlich eines Wellenüberlaufs als kritisch angesehenen Streckenabschnitte in einem für das Land Schleswig-Holstein erstellten Gutachten (TEMMLER, 2006) im Einzelnen aufgeführt. Ausschlusskriterien für eine hinreichende Qualitätsbewertung waren insbesondere der zu geringe Tonanteil in Verbindung mit einer sehr niedrigen Plastizitätszahl. Der damit verbundene sehr starke Scherfestigkeitsabfall bei Durchnässung kann bei überlaufenden Wellen zu einem Abrutschen der rasch aufgeweichten Deichinnenböschung führen. Hiervon sind insbesondere viele der bei der Sturmflut vom 18.10.1936 beschädigten Deichabschnitte betroffen, die anschließend häufig mit deichnah vorhandenem, aus heutiger Sicht oft nicht geeignetem Baumaterial verstärkt worden sind. Dass viele dieser, nach der Sturmflut von 1962 auf ähnliche Weise erhöhten, kompakt aus schwach tonigem Schluffsand bestehenden Altdeiche bis jetzt auch die sehr hohen Sturmfluten der letzten Jahrzehnte zumeist ohne größere Schäden überstanden haben, liegt i.d.R. an der guten und dichten Grasnarbe, die sich auf solchen Böden mit mäßiger Durchlässigkeit und hoher Kapillarität mit Feuchtigkeitstransport von unten an die Deichoberfläche auch während lang anhaltender sehr trockener Jahreszeiten ausbilden und halten konnte.

Bei ausreichender Kronenhöhe besteht kein Grund zur Besorgnis, dass die aus schwach tonigem Sandschluff bestehenden oder mit sandreichem, gering plastischen Klei abgedeckten Seedeiche nicht auch weiterhin eine ausreichende Sturmflutsicherheit gewährleisten können, *solange sie nicht vom Wellenüberlauf betroffen oder gar bei einer Extremsturmflut überströmt werden.*

9. Schriftenverzeichnis

- AG BODENKUNDE: Bodenkundliche Kartieranleitung. 5. Aufl., Hannover, 2005.
- BAUMGARTL, T.; THIENEMANN, J.; JUNGE, T. u. HORN, R.: Wasserbindungskräfte und Wasserfluß in bindigen Substraten. – *Geotechnik*, 21, Nr. 1, S. 29–35, 1998.
- BRÖSKAMP, K. H. et al.: Seedeichbau – Theorie und Praxis. Vereinigung der Nassbagger-Unternehmungen e.V., 1976.
- DEHARDE, S.: Festigkeitsuntersuchungen an bindigen Böden mit Sekundärstruktur. – Diplomarbeit im Fachbereich 10 Grundbau und Bodenmechanik der Universität GH Essen (unveröffentlicht), 1999.
- EAK 2002: Empfehlungen für Küstenschutzwerke. *Die Küste*, H. 65, 2002.
- HARTGE, K. H. u. HORN, R.: *Bodenphysikalisches Praktikum*. 3. Auflage, 1992.
- HEINEKING, A.: Bodenphysikalische Betrachtung der Stabilität künstlicher Schüttungen anhand eines Deiches. – Diplomarbeit, Christian-Albrechts-Universität Kiel (unveröffentlicht), 1998.
- HENNIG, A.: Untersuchungen und Szenarien zum Einfluß der Schrumpfrißbildung auf die Stabilität einer flachen Hangrutschung. – *Geotechnik*, 23, S. 185–195, 2000.
- KIEKBUSCH, M.: Beziehung zwischen Konsistenzzahl und undrännierter Scherfestigkeit. *Bautechnik*, 76, S. 775–784, 1999.
- MÖLLER, J.; WEISSMANN, R.; SCHÜTTRUMPF, H.; GRÜNE, J.; OUMERACI, H.; RICHWIEN, W. u. KUDELLA, M.: Interaction of Wave Overtopping and Clay Properties for Seadikes. Proc. 28th Int. Conf. on Coastal Engineering ICCE '02, Cardiff, Wales, UK, 2002.
- MUIJS, J. A. u. KRUSE, G. A. M.: Erosion and Permeability of Material for Clay Liners on Dikes. – Proceedings 6th International IAEG Congress, Bd. 2, S. 1213–1219, 1990.
- PENG, X. u. HORN, R.: Modelling Soil Shrinkage Curve Across a Wide Range of Soil Types. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 69, 584–592, 2005.
- PENG, X. u. HORN, R.: Anisotropic Shrinkage and Swelling of Some Organic and Inorganic Soils. *Europ. J. Soil Sci.* 58 (1), 2004, 98–107, 2007.
- PENG, X.; HORN, R.; PETH, S. u. SMUCKER, A.: Quantification of Soil Shrinkage in 2D by Digital Image Processing of Soil Surface. *Soil Tillage Res.* 91: 173–180, 2006.
- RAGUTZKI, G.: Beurteilung von Kleiabdeckungen ostfriesischer Seedeiche auf der Grundlage bodenphysikalischer Kennwerte. – Forschungsstelle Norderney, 19, S. 121–145, 1967.
- RICHWIEN, W.: Ansätze zum Formänderungs- und Festigkeitsverhalten nicht wassergesättigter aggregierter Böden. Nach einem Vortrag auf der Fachsitzung über Festigkeits- und Verformungsverhalten von nicht wassergesättigten und aggregierten Böden am 2. und 3. März 1993 im Nds. Landesamt für Bodenforschung Hannover, Sitzungsbericht S. 237–248, Hannover, 1993.
- RICHWIEN, W.: kritische Beanspruchungen von Deichböden. Versagensformen und Nachweis-konzepte. HTG-Kongress '95, 1995.
- RICHWIEN, W. u. WEISSMANN, R.: Zur Standsicherheit von Deichbinnenböschungen bei Wellenüberlauf. Teile I – IX. Essen (unveröffentlicht) Juli 1995.
- RICHWIEN, W. u. WEISSMANN, R.: Quantifizierung der Sicherheitsreserven von Seedeichen bei Wellenüberlauf. Teile I–IV Essen (unveröffentlicht), 1996, 1997, 1998, 1999.
- RICHWIEN, W. u. WEISSMANN, R.: Belastung der Binnenböschung von Seedeichen durch Wellenüberlauf. Teile I – III (bodenmechanische Voruntersuchungen sowie Versuche im Großen Wellenkanal der Universität Hannover. Essen (unveröffentlicht), 2001.
- RICHWIEN, W. u. POHL, C.: Abschlußbericht zum Forschungsvorhaben Bemessung der Kleiabdeckung von Deichaußenböschungen für die geplante Deicherhöhung und -verstärkung von Schweiburg bis Dangast. Essen. (unveröffentlicht), 2004.
- RICHWIEN, W. u. WEHNER, T.: Bodenmechanische Kennwerte gespülter Seedeiche im norddeutschen Küstenraum TIS 10/88, S. 544–549, 1988.
- SCHEFFER, F. u. SCHACHTSCHABEL, P.: *Lehrbuch der Bodenkunde*. 12. Aufl., Enke Verlag Stuttgart, 1989.
- SCHOOFS, S.; SCHRIJVER, R. u. v. DUINEN, A.: Plaxflow as a Useful Tool in an Advanced Assessment of the ‚Risk of Sliding of an Inner Slope Cover During Wave Overtopping: Ijs-selmeerdijk‘. *Plaxis Bulletin*, issue 14, September 2003.
- SCHUPPENER, B.: Erfahrungen mit bodenmechanischen Laborversuchen an Klei. – *Mitt.-Bl. BAW*, 60, S. 93–113, 1987.

- SCHUPPENER, B. u. KIEKBUSCH, M.: Plädoyer für die Abschaffung und den Ersatz der Konsistenzzahl. – *Geotechnik*, 11, S. 186–192, 1988.
- SCHÜTTRUMPF, H.: Wellenüberlaufströmung bei Seedeichen. – Experimentelle und theoretische Untersuchungen. Mitt. Leichtweiss-Institut für Wasserbau TU Braunschweig, H. 149, S. 1–127, Braunschweig, 2002.
- SCHÜTTRUMPF, H.; MÖLLER, J. u. OUMERACI, H.: Untersuchungen zum Wellenüberlauf für Naturspektren. Mitt. Leichtweiss-Institut für Wasserbau TU Braunschweig, H. 149, S. 199–216, Braunschweig, 2002.
- SCHÜTTRUMPF, H. u. OUMERACI, H.: Schäden an See- und Stromdeichen. Mitt. Leichtweiss-Institut für Wasserbau TU Braunschweig, H. 149, S. 129–171, Braunschweig, 2002.
- SCHÜTTRUMPF, H. u. REINHARDT, F.: Untersuchungen zu Sickervorgängen in See- und Ästuardeichen bei instationären Randbedingungen. Version 24.10.2004. Manuskript Bundesanstalt für Wasserbau Hamburg (unveröffentlicht), Hamburg, 2004.
- SIMÚNEK, J.; ŠEJNA, M. u. VAN GENUCHTEN, M. TH.: HYDRUS 2-D, Simulating Water Flow and Solute Transport in Two-Dimensional Variably Saturated Media, Colorado School of Mines, International ground water modelling Center, Riverside, California.
- TEMMLER, H.: Über eine Rutschung der Innendeichböschung bei Brokdorf-Arentsee. LANU-Gutachten Nr. 89/53 (unveröffentlicht), Flintbek, 1989.
- TEMMLER, H. u. FILIPINSKI, M.: Zur Stabilität von Landesschutzdeichen bei Wellenüberlauf an der Westküste und Elbe in Schleswig-Holstein. Teilbericht I: Untersuchungen an vorhandenen Deichen (LANU-Gutachten Nr. 95/25-1, unveröffentlicht), Flintbek, 1997.
- TEMMLER, H.: Zur Stabilität von Landesschutzdeichen bei Wellenüberlauf an der Westküste und Elbe in Schleswig-Holstein. Teilbericht II: ergänzende Untersuchungen an vorhandenen Deichen sowie zur Infiltration des sandigen Deichkerns (LANU-Gutachten 95/25-2, unveröffentlicht), Flintbek, 1998.
- TEMMLER, H.: Zur Stabilität von Landesschutzdeichen bei Wellenüberlauf an der Westküste und Elbe in Schleswig-Holstein. Teilbericht III: Zur Aufweichung der bindigen Deichabdeckung durch Niederschläge und Sturmfluten (LANU-Gutachten 95/25-3, unveröffentlicht), Flintbek, 1999.
- TEMMLER, H.: Über Grundwasserstandsbeobachtungen in Deichen. – *HANSA*, 141. Jahrgang, Nr. 8, S. 51–58, 2004.
- TEMMLER, H.: Untersuchungen an Deichabdeckböden in Schleswig-Holstein zur Durchsickerung und Aufweichung infolge Wellenüberlaufs bei Extremsturmfluten/Stellungnahme zur Empfehlung R. Weißmann u. W. Richwien: „Funktionale und statische Bemessung der Abdeckung von Deichbinnenböschungen“. – Gutachtliche Stellungnahme (unveröffentlicht), Altenholz, 2006.
- VAN DER MEER, J. W.: Toelaatbare Golfoverslag bij Grasdijken. – Ber. Waterloopkundig Laboratorium Delft, H. 1765, Delft, 1995.
- VAN GENUCHTEN, M.T.: A closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Vol. 44, p. 892–898, 1980.
- WEISSMANN, R.: Die Widerstandsfähigkeit von Seedeichbinnenböschungen gegenüber ablaufendem Wasser. – Dissertation. Mitteilungen Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Heft 30, Verlag Glückauf Essen, 2003.
- WEISSMANN, R. u. RICHWIEN, W.: Ein Bewertungsverfahren für Klei im Deichbau. – *HANSA*, 140. Jahrgang, Nr. 7, S. 71–75, 2003.
- WEISSMANN, R. u. RICHWIEN, W.: Funktionale und statische Bemessung der Abdeckung von Deichbinnenböschungen. – *HANSA*, 141. Jahrgang, Nr. 6, S. 69–75, 2004.