

Saugspannungsänderungen und ihr Einfluss auf das Verformungs- und Bruchverhalten teilgesättigter Böden

Suction changes and its influence on deformation behaviour and failure conditions in unsaturated soils

H.-J. Köhler

Bundesanstalt für Wasserbau (BAW), Karlsruhe

Federal Waterways Engineering and Research Institute (BAW), Karlsruhe, Germany

KURZFASSUNG: Böden oberhalb der geschlossenen Kapillarzone über dem Grundwasserspiegel gelten als teilgesättigt. Sie sind als Dreiphasensystem (Gas, Wasser und Feststoff) zu beschreiben. Insbesondere in Böden mit großer Saugspannungscharakteristik können durch Änderung des jeweiligen Wasseranteils (Zunahme oder Abnahme) beachtliche Verformungen entstehen, die zum Schwellen oder Schrumpfen des Bodens führen. Der vorliegende Beitrag beschreibt die Untersuchungsmethode und die im Labor ermittelten Ergebnisse zum Schrumpfverhalten solcher Böden. Die im Jahre 1978 im Rahmen einer Beweissicherung durchgeführten Untersuchungen zur Abschätzung möglicher Schäden als Folge einer dauernden Grundwasserabsenkung durch den Staustufenausbau eines natürlichen Flusses werden erläutert. Sowohl die Größe als auch der zeitliche Verlauf der Schrumpfsetzungen in Abhängigkeit vom Wassergehaltsverlust werden vorgestellt.

ABSTRACT: Soils lying above the saturated capillary rise level, above phreatic surface, are regarded as a three-phase medium (gas, water and solids). Changes in water content may lead to swelling or shrinkage of the wetting or drying soil segments. Especially in soils with high suction characteristic, swelling and shrinkage behavior should be taken into consideration, in order to maintain structure safety. Dangerous deformations caused by shrinkage should be avoided. The contribution describes the investigation method and the results gained from laboratory measurements, which had been carried out in the framework of a safety assessment investigation performed in 1978. In order to calculate the subsidence due to shrinkage caused by an enduring lowered piezometric level in a river project, shrinkage tests were undertaken. The results of these special investigations lead to estimation levels of the expected size of settlements and their time dependent development, plotted over the specific loss in water content.

1 EINFÜHRUNG

Zur Absicherung gegen mögliche Schäden, mit denen in der Folge einer dauernden Grundwasserabsenkung innerhalb bebauter Flächen zu rechnen war, verursacht durch den Staustufenausbau eines natürlichen Flusses, waren Untersuchungen zu den befürchteten Untergrundsetzungen im Rahmen einer Beweissicherung durchzuführen. Für das zu erwartende maximale Absenkungsmaß von bis zu 3 m zwischen dem bisher maßgebenden Niedrigwasserstand und dem nach dem Ausbau sich einstellenden, dauerhaft abgesenkten Grundwasserstand waren sowohl die Größen als auch die zeitlichen Veränderungen dieser Setzungen von Bedeutung. Hierzu wurden im Jahre 1978 gesonderte Kernbohrungen (KB) in den betroffenen Ortslagen bis auf den tiefer liegenden Sandsteinfels niedergebracht.

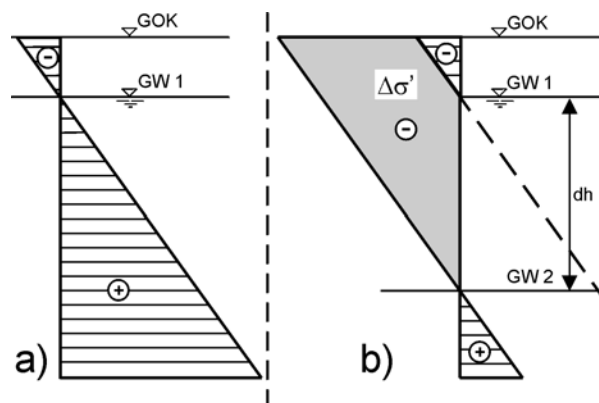


Bild 1 Änderung der schrumpfsetzungs erzeugenden Kapillarspannung durch das Maß $\Delta\sigma'$, ausgelöst durch eine dauerhafte Grundwasserstandsänderung um das Maß dh von a) GW1 nach b) GW2

Zahlreiche gestörte und ungestörte Proben aus den maßgebenden Bodenschichtungen wurden entnommen und im Labor untersucht.

Nach diesen Bodenerkundungen gliederte sich der Untergrundaufbau in der betroffenen Flußausbaustrecke in eine bindige und eine rollige Deckschicht, die unterlagert wird von Fels. Die bindige Deckschicht reichte teilweise bis zu 7 m unter Gelände. Ihre mittlere Schichtenmächtigkeit betrug etwa 5,5 m. Sie bestand aus sandigem und tonigem Auelem (klassifiziert nach DIN 18196 in die Bodengruppen SU, TL und TM), der in seinem Kornaufbau sowohl schluffige Fein- bis Mittelsande als auch sandige Tone und Schluffe umfaßte. In diesem Bereich enthielt der Auelem teilweise auch Kalkanteile von bis zu 20%.

Unterhalb der Sande und Kiese mit einer mittleren Schichtenmächtigkeit von rund 4 m wurde der anstehende Fels des Buntsandsteins mit geringer bis mittlerer Festigkeit angetroffen.

Die Grundwasserverhältnisse vor dem Ausbau waren mit einer mittleren piezometrischen Druckhöhe bis zu etwa 4 m unter Gelände als gespannter Grundwasserdruckhorizont zu beschreiben, der in Abhängigkeit von Hochwasserzeiten über die den Auelem unterlagernden Sande und Kiese mit dem jeweiligen Flusswasserstand kommunizierte. Aber auch in Niedrigstwasserzeiten war das piezometrische Druckniveau des Grundwassers zuvor noch nicht bis unter die Auelemdeckschicht abgefallen.

Diese Vorbelastungen aus den vorausgelaufenen natürlichen jahreszeitlichen Schwankungen des Grundwasserdruckniveaus waren bei den Auswertungen der zu erwartenden Setzungsgrößen aus möglichen Schrumpfungen der bindigen Deckschicht zu berücksichtigen (BAW 1978).

2 GRUNDWASSERABSENKUNG UND BODENSETZUNG

Durch Änderung der Saugspannungen sowohl in der geschlossenen wie auch in der offenen Kapillazone oberhalb der piezometrischen Druckhöhe des Grundwassers und in allen darüber liegenden Bodenbereichen werden durch die schrumpfsetzungszeugenden Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma'$ (vergl. Bild 1) Volumenverminderungen des Bodens ausgelöst, die zur Rissbildung im Boden und zu zusätzlichen Setzungen von Gebäuden führen, die in diesen Schichten gegründet wurden. Insbesondere die ungleichen Setzungen können für diese Gebäude beim Auftreten von schädlichen Setzungsdifferenzen zu massiver Gefährdung der Gebäudestandsicherheit und damit auch zu hohen Regressansprüchen an den verursachenden Bauherren führen, der durch bauliche Maßnahmen in den Grundwasserhaushalt eingreifen mußte. Beweissicherungsmaßnahmen an hierdurch

gefährdeten Objekten sind dann dringend geboten.

2.1 Art, Größe und zeitlicher Verlauf der Setzungen

In gut wasserdurchlässigen Bodenverhältnissen mit vernachlässigbar kleinen Saugspannungswirkungen ist der Setzungseinfluß aus Grundwasserabsenkung allein auf die Spannungsdifferenz $\Delta\sigma$ aus dem Verlust der Auftriebswirkung durch den hydrostatisch verteilten Wasserdruck über die Bodentiefe z zurückzuführen. Eine Grundwasserabsenkung von z.B. einem Meter erhöht die setzungserzeugenden Spannungen im jeweils betrachteten Bodenhorizont der Tiefe z um rund 10 kN/m^2 (vergl. Bild 2). Diese Spannungsänderung tritt in sehr durchlässigen Böden, deren Wasserdurchlässigkeit k [m/s] größer ist als die Absinkgeschwindigkeit v_{za} [m/s] der Grundwasserspiegelabsenkung regelmäßig ohne zeitliche Verzögerung ein. Die Setzungswirkung kann damit sofort für den stationären Endzustand nach Erreichen der abgesenkten Grundwasserhöhe GW2 in seiner Gesamtgröße berechnet werden.

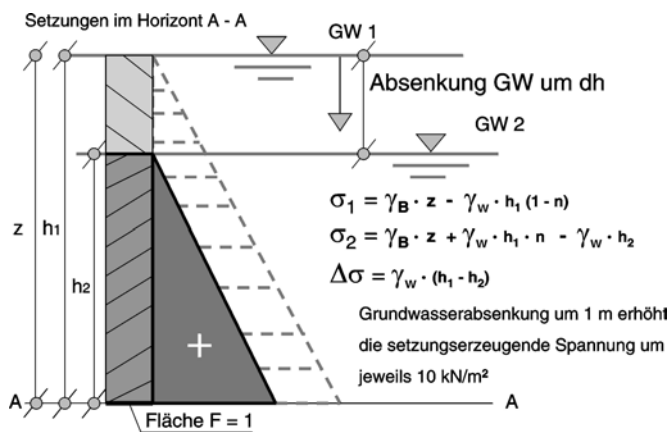


Bild 2 Erhöhung der setzungserzeugenden Spannungen um das Maß $\Delta\sigma$, hervorgerufen aus der Grundwasserspiegelabsenkung dh in einem sehr durchlässigen Untergrund ohne Kapillarspannungen

In wenig durchlässigen Böden sind auf Grund des natürlichen Gehalts von Gasanteilen im Porenwasser, die sich unter dem Wasserspiegel in Form von fein verteilten Gasblasen zu erkennen geben, diese Setzungen zeitverzögert. Sie werden erst nach dem völligen Porenwasserdruckabbau zum Zeitpunkt t_∞ nach dem Absinken des Wasserspiegels auf das stationäre Grundwasserniveau GW2 in der vollen Größe erreicht (vergl. Bild 3). Mit den instationären Porenwasserdruckverteilungen zu den Zeitpunkten t_i lassen sich die jeweils setzungserzeugenden wirksamen Spannungsdifferenzen $\Delta\sigma'(z,t)$ zu den jeweiligen Zeitpunkten t_i jedoch auch in Abhängigkeit von der zeitlichen Porenwasserdruckänderung $\Delta u(z,t)$ in ihrer entsprechenden Tiefe z schrittweise berechnen (Köhler 2001a).

Der zeitliche Verlauf der aus dem Auftriebsverlust des Bodens resultierenden Setzungen wird hierdurch ebenfalls berechenbar.

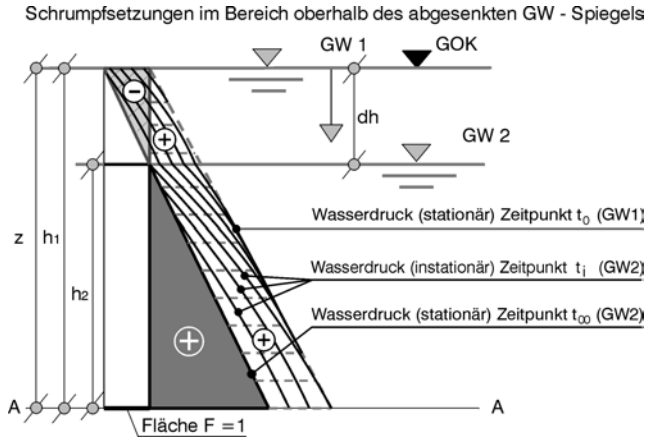


Bild 3 Erhöhung der setzungserzeugenden Spannungen um $\Delta\sigma'(z,t)$ in Abhängigkeit von der transienten Porenwasserdruckänderung $\Delta u(z,t)$ unterhalb des abgesenkten GW-Spiegels GW 2 um das Maß dh sowie zeitabhängige Schrumpfssetzungen im Saugspannungsbereich oberhalb von GW 2

Ähnliche Zeitverzögerungen gibt es auch im Ablauf der Schrumpfssetzungen oberhalb des abgesenkten Wasserspiegels, die mit einer ständigen Saugspannungsänderung $\Delta\sigma'$ bis zum Erreichen des stationären Gleichgewichtszustand verbunden sind. Es bildet sich ein geschlossener Kapillarsaum (Bodensättigung $S \approx 1$) aus, der in Abhängigkeit von der jeweiligen Bodenart unterschiedliche Anstiegshöhen h_k erreichen kann. Ist die durch die jeweilige Absenkung eintretende Wasserspiegeldifferenz dh [m] größer als diese kapillare Steighöhe h_k [m], werden im Boden oberhalb der geschlossenen Kapillarzonen durch die mit ansteigender Höhe verbundene Zunahme der Saugspannungen h_{ks} [kPa] Volumenänderungen im Boden bei gleichzeitig abnehmendem Wassergehalt w_n [%] ausgelöst, die das eigentliche Schrumpfen des Bodens bewirken (Bodensättigung $S < 1$). Dabei entspricht die jeweilige Saugspannung der Differenz zwischen dem Porenwasserdruck u_a [kPa] unter atmosphärischen Bedingungen und dem negativen Porenwasserdruck u_w [kPa] im sogenannten offenen Kapillarsaum und in der über die darüber hinaus reichenden Bodenzone oberhalb des offenen Kapillarsaumes bei zunehmender Austrocknung des Bodens und gleichzeitig abnehmenden Bodensättigungswerten mit $S \ll 1$. Hier können die Volumenänderungen des Bodens (Schrumpfssetzungen) und damit auch die Saugspannungen in Abhängigkeit von der Bodenart und deren Vorbelastung besonders groß werden.

Der maßgebende Anteil zu der Erklärung dieser sich oftmals gleichzeitig überlagernden Setzungs- und Schrumpfungsvorgänge kann mit der Kompressibilität aller beteiligten Phasenanteile des Bodens begründet werden.

Der das Porenmedium selbst bildende Feststoffanteil kann sich durch Umstrukturierung in seiner

Verteilung über dem Raum bei gleichzeitiger Porenraumabnahme (Setzung) verändern, was in der Bodenmechanik als Kompressibilität α des Bodens definiert wird und sich unmittelbar im sogenannten Steifemodul E_s [kN/m²] umgekehrt proportional zu α ausdrückt.

Die beiden anderen beteiligten Phasen Wasser und Luft erfüllen den Porenraum des Bodens je nach vorhandenem Sättigungsgrad S [-] entsprechend ihrer jeweiligen Anteile innerhalb des Porenvolumens n [-] im entweder voll oder teilgesättigten Boden. Ein völlig ausgetrockneter Boden besitzt daher einen Sättigungsgrad $S = 0$, ein völlig mit Wasser ausgefüllter Porenraum einen Sättigungsgrad $S = 1$. Bei dieser Definition des Sättigungsgrades S blieb in der klassisch überlieferten Bodenmechanik der im natürlichen Porenwasser aber stets vorhandene Anteil von Gas in gelöster oder freier Form (Gasblasen) bisher vernachlässigt.

Bei der Betrachtung von stationären Belastungszuständen des Bodens konnte der damit verbundene Fehler in seinen Auswirkungen aber auch vernachlässigbar bleiben.

Sind jedoch instationäre Betrachtungen zum Verhalten des Bodens während der Belastungsänderung gefordert, sollten diese natürlichen Gasanteile im Porenwasser jedoch keinesfalls unbeachtet bleiben (Köhler 2001b).

Einen Vergleich der den beiden Phasen Wasser und Luft jeweils zuzuordnenden Kompressibilität α_w (Wasser) und α_a (Luft) gestattet das Diagramm in Bild 4 (Fredlund et al. 1993). Hiernach besitzt eine völlig mit luftfreiem (reinem) Wasser ausgefüllte Pore bei Vollsättigung ($S = 1$) eine Kompressibilität von $\alpha_w = 4,58 \times 10^{-7}$ [1/kPa]. Umgekehrt gilt unter konstanten Umgebungsbedingungen für eine völlig wasserfreie, mit reiner Luft angefüllten Pore unter Atmosphärendruck und unter Vernachlässigung von möglichen Temperaturänderungen eine Kompressibilität von $\alpha_a = 4,94 \times 10^{-3}$ [1/kPa].

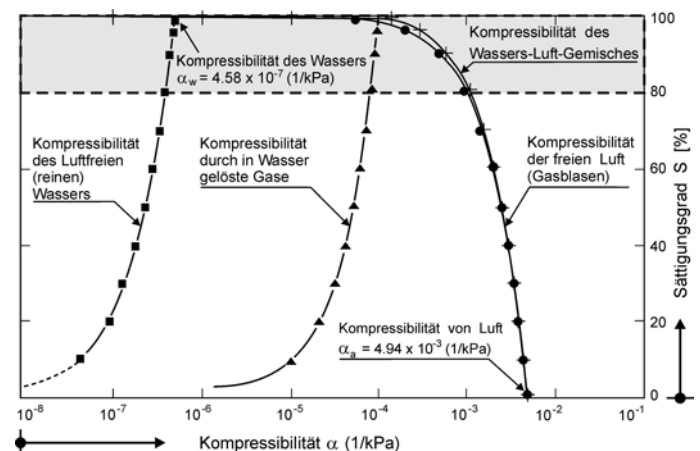


Bild 4 Kompressibilitätsbeiwerte α [1/kPa] für luftfreies (reines) Wasser, freie Luft und Wasser-Luft-Gemische in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad S [-] (nach Fredlund et al.). Der grau markierte Bereich mit Sättigungsgraden $S > 80\%$ ist auch für Böden unter Wasser gültig.

Der in Wasser gelöste Gasanteil nimmt danach Kompressibilitätsbeiwerte zwischen etwa $\alpha = 1 \times 10^{-6}$ und rund 8×10^{-5} [1/kPa] an.

Nur unwesentlich verschieden von der Kompressibilität der freien Luft verhält sich das Wasser-Luft-Gemisch des Porenwassers mit gleichmäßig fein verteilten Gasanteilen zwischen den Sättigungsbe-reichen von $S = 0$ [%] bis etwa zum Sättigungszustand bei $S = 80$ [%]. Lediglich in dem darüber liegenden Sättigungsbereich zwischen $S = 80$ [%] und $S = 100$ [%] sind die Werte der reinen Luft und die des Wasser-Luft-Gemisches voneinander verschieden.

Für eine völlig mit dem Wasser-Luft-Gemisch erfüllte Pore wird bereits bei einem nahezu gesättigten Zustand ($S \approx 1$) eine Kompressibilität zwischen ungefähr $\alpha = 1 \times 10^{-4}$ und $\alpha = 1 \times 10^{-6}$ [1/kPa] erreicht.

Für Böden unterhalb des Wasserspiegels erlangt der im Diagramm (vergl. Bild 4) grau unterlegte Bereich zwischen $S = 80$ % und $S = 100$ % besondere Bedeutung bei der Porenwasserdruckänderung $\Delta u(z,t)$ infolge schnell einwirkender Belastungen.

Bei der Ausbildung von Saugspannungen oberhalb der piezometrischen Drucklinie des maßgebenden Grundwasserstandes sind sowohl innerhalb des Kapillarsaumes wie auch im sogenannten Feuchtigkeitsbereich des Bodens oberhalb der offenen Kapillarzzone die Kompressibilitätswerte der Wasser-Luft-Mischung ausschlaggebend. Sie erstrecken sich hierbei über den gesamten Wertebereich der Sättigungsgrade zwischen $S \approx 1$ bis $S = 0$.

2.2 Kapillare Steighöhe und Porenwasserspannung

So wie der Boden noch bis etwa 40 m, in besonderen Fällen sogar auch bis rund 80 m Tiefe unterhalb des Wasserspiegels noch nicht als vollkommen wassergesättigt angenommen werden kann (Köhler et al. 1999), kann oberhalb der piezometrischen Grundwasserhöhe ebenfalls keine Vollsättigung erwartet werden.

Auch innerhalb der sogenannten geschlossenen Kapillarzzone des Bodens kann deshalb nicht vom vollgesättigten Zustand ausgegangen werden. Ohne genaue Bestimmung des jeweiligen vorhandenen Sättigungszustandes der im Labor untersuchten Bodenproben sollten die aus diesem Bereich entnommenen Proben deshalb auch nur als nahezu gesättigt angenommen werden ($S \approx 1$).

Die kapillare Steighöhe h_k ist abhängig von der Oberflächenspannung innerhalb einer durchgängigen Poren-röhre mit dem Durchmesser d , die sich an dieser Röhrenwandung in Höhe der Grenze zwischen aufsteigendem Porenwasser und atmosphärischer Luft ausbildet. Das in Bild 5 dargestellte Modell beschreibt die Möglichkeit der Verkrümmung dieser

Oberfläche. Je größer die Krümmung und je kleiner der Durchmesser der Poren-röhre wird, um so höher kann das Wasser kapillar aufsteigen. Konkave wie auch konvexe Oberflächenkrümmungen können beobachtet werden, was durch unterschiedliche Wirkungen der Adhäsionskräfte an den Rohrwandungen, aber auch durch äußere Luftdruckänderungen erklärt werden kann.

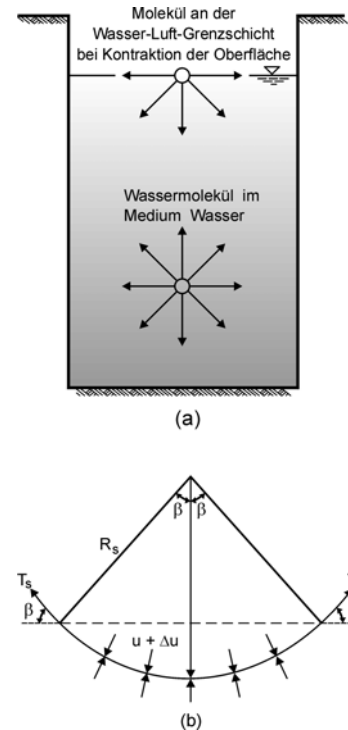


Bild 5 Modellvorstellung (nach Fredlund et al.) für die in einer Kapillare an der Grenze zwischen dem kapillar aufsteigenden Porenwasser und dem atmosphärischen Luftdruck wirkende Oberflächenspannung bei kontraktilem Verhalten (konkave Verkrümmung der Oberfläche durch Δu)

Wetterbedingte Austrocknungen und Vernässungen können das Gleichgewicht der Spannungen im geschlossenen Kapillarsaum stören, was einerseits zur Erhöhung und andererseits aber auch zur Verminderung der örtlich wirkenden Saugspannungen führt.

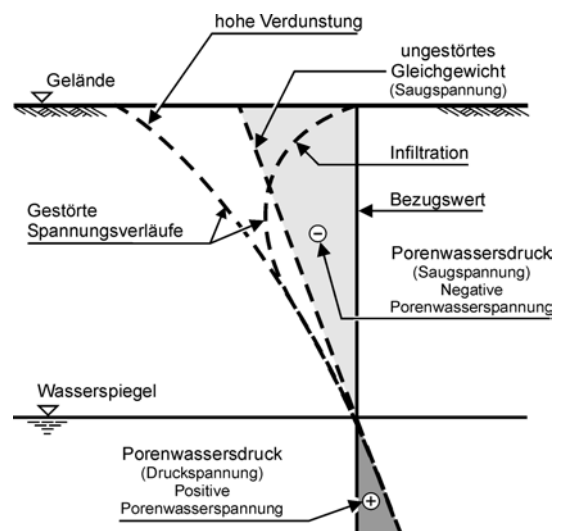


Bild 6 Saugspannungsänderungen in der Kapillarzzone oberhalb des Grundwasserspiegels durch Verdunstung oder Infiltration in Abweichung zum stationären Zustand des ungestörten Gleichgewichts.

Bei starker Infiltration kann die Kapillarwirkung völlig verloren gehen bis hin zur völligen Umkehrung der Porenwasserspannungen. Aus Saugspannungen können bei ausreichender Vernässung Druckspannungen werden. Umgekehrt können bei hoher Verdunstung weit höhere Saugspannungen entstehen als Sie für den Gleichgewichtszustand erforderlich wären. Das Bild 6 gibt einen Überblick über die möglichen Saugspannungsänderungen.

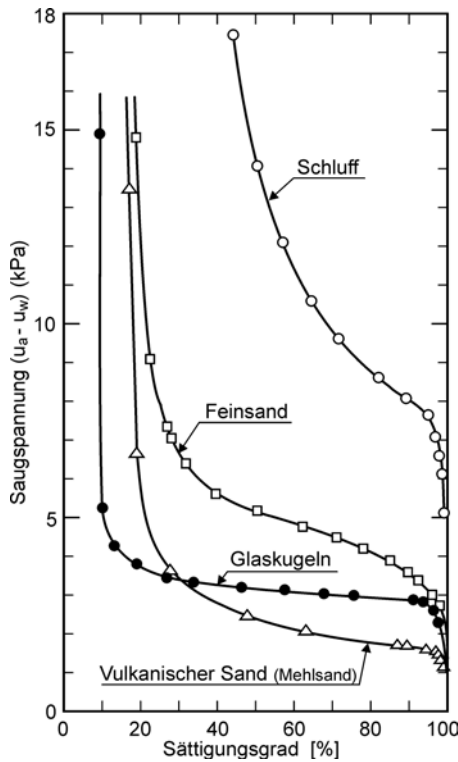


Bild 7 Beispiele für Saugspannungskurven oberhalb des Grundwasserspiegels für unterschiedliche Materialien (nach Fredlund et al.)

Saugspannungen oberhalb der kapillaren Steighöhe können in Abhängigkeit von der Art des Bodens sehr groß werden, wodurch die Wirkung der durch diese inneren Haftspannungen ausgelösten Schrumpfvorgänge je nach Bodenart in ihren unterschiedlichen Größen zu begründen sind. Das Bild 7 zeigt Beispiele für solche möglichen Saugspannungsgrößen, die mit abnehmendem Sättigungsgrad des Bodens stark zunehmen. Im völlig ausgetrockneten Zustand sind die höchsten Saugspannungen zu erwarten.

3 UNTERSUCHUNGSMETHODEN UND LABORERGEBNISSE

Um die zeitlich veränderlichen Setzungen in den von der Grundwasserabsenkung betroffenen Ortslagen nach dem Staustufenausbau abschätzen zu können, war in erster Linie das Verhalten der bindi-

gen Deckschicht oberhalb der Sande und Kiese von Bedeutung. Bei einem solchen Untergrund wäre ohne den Einfluß von möglichen Schrumpfungen infolge der zu erwartenden Grundwasserabsenkung lediglich mit Setzungen zwischen 4 und 8 mm zu rechnen gewesen. Diese allein aus dem Auftriebsverlust des Bodens resultierenden Setzungsgrößen waren praktisch vernachlässigbar.

Als Folge einer dauernden Grundwasserabsenkung von etwa 3 m war jedoch als Ursache von weiteren Untergrundverformungen auch die Möglichkeit von Schrumpfungen innerhalb der bindigen Deckschicht (Tone und Schluffe) überall dort nicht auszuschließen, wo der Grundwasserspiegel auf Dauer unterhalb dieser Schicht bis hinein in die darunter liegenden rolligen Flussablagerungen (kiesige Sande und sandige Kiese) absinken konnte. In einem solchen Fall wirken diese unterlagernden Sande und Kiese wie eine natürliche Kapillarsperre, wodurch es zu Austrocknungen in der darüber liegenden, bindigen Deckschicht kommen konnte. Die damit verbundenen Schrumpfsetzungen waren anhand von speziell durchzuführenden Laboruntersuchungen zu ermitteln und sowohl in ihrer Größe als auch in ihrem zeitlichen Verlauf abzuschätzen.

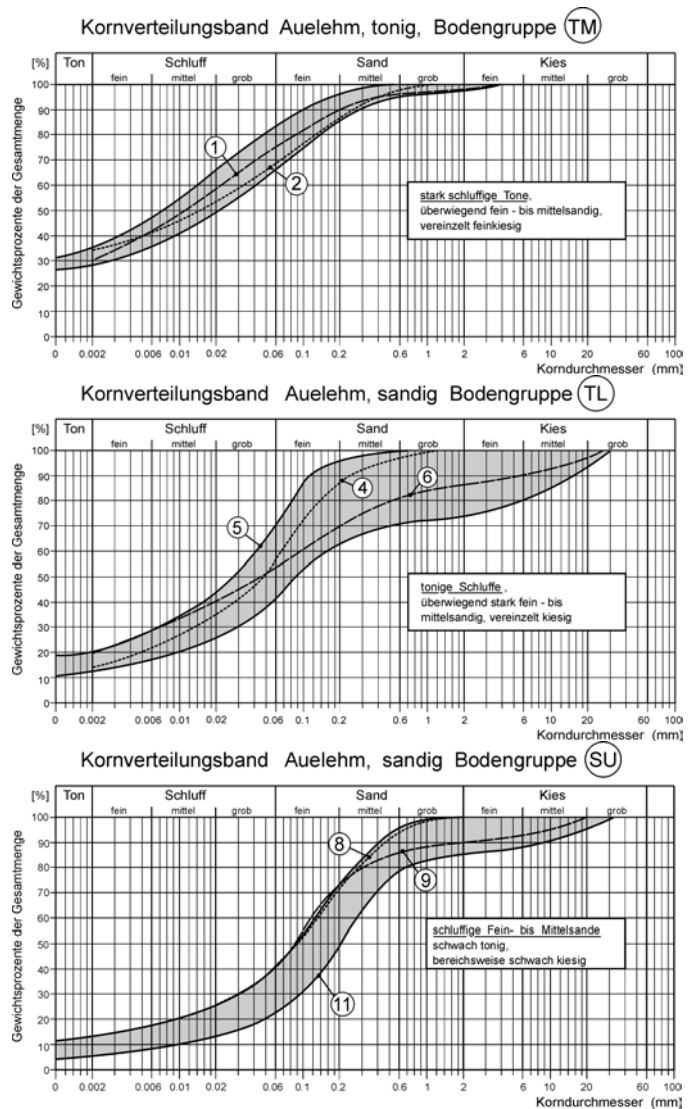


Bild 8 Kornverteilungsbänder der im Bereich der Grundwasserspiegelabsenkung anstehenden Böden, getrennt aufgetragen nach den Bodengruppen TM (Bild oben), TL (Bild mitte) und SU (Bild unten)

In Bild 8 sind die Kornverteilungsbänder der in der Deckschicht angetroffenen Bodenarten entsprechend ihrer Zuordnung zu den Bodengruppen der DIN 18196 aufgetragen. Der Ton der Bodengruppe TM (oberer Teil von Bild 8) war entsprechend des örtlichen Vorkommens mit seiner größten zusammenhängenden Schichtdicke von etwa 3 m auch der für das zu erwartende Schrumpfmaß maßgebende Boden. Die beiden anderen Bodenarten TL und SU (mittlerer und unterer Teil von Bild 8) waren in ihren Schichtenmächtigkeiten geringer und in ihrer flächigen Ausbreitung relativ unregelmäßig verteilt angetroffen worden. Zur Ermittlung der Schrumpfsetzungsgrößen wurden jedoch an allen repräsentativen Bodenproben dieser drei Bodengruppen TM, TL und SU die erforderlichen Austrocknungsversuche mit und ohne vertikale Belastung sowohl an der Luft als auch im Ödometer durchgeführt. Die zur Charakterisierung dieser drei Bodengruppen ermittelten bodenphysikalischen Kennwerte sind in der Tabelle 1 zusammengestellt.

Boden- gruppe	w _L [%]	w _P [%]	w _n [%]	w _s [%]	n [%]	ρ _s [t/m ³]	S [%]
TM	37,6	16,9	22,6	12,7	38,4	2,70	97,6
TL	26,4	14,3	18,4	13,5	33,8	2,69	97,0
SU	21,4	11,5	18,0	13,1	30,7	2,68	99,0

Tabelle 1 Bodenphysikalische Kennziffern für die Bodengruppen TM, TL und SU (Mittelwerte)

Die Tabelle 1 enthält jeweils die Mittelwerte der Laboruntersuchungen zu Fließgrenze w_L, Ausrollgrenze w_P, natürlichem Wassergehalt w_n, Schrumpfgrenze w_s, Porenvolumen n, Rohdichte des Bodens ρ_s und Sättigungsgrad S.

Zur Untersuchung des Setzungsverhaltens während des Schrumpfvorgangs wurden sowohl die für standardmäßige Laboruntersuchungen allgemein üblichen Schrumpfversuche mit den an der Luft austrockneten Probezylindern als auch abweichend von diesem Standard gesondert angesetzte Kompressionsversuche im Ödometer durchgeführt. Die Kompressionsversuche hatten das Ziel, den möglichen Einfluß aus ständig wirkenden Auflasten (Fundamentlasten u. ä.) auf das Schrumpfverhalten der bindigen Böden getrennt nach den Bodengruppen TM, TL und SU zu erfassen.

Das Bild 9 zeigt das typische Ergebnis einer solchen Untersuchung im Kompressionsdurchlässigkeitsgerät (KD) mit den unterschiedlichen Phasen aus der jeweiligen Erstbelastung, Entlastung und Wiederbelastung vor dem eigentlichen Schrumpfen durch Austrocknung im Ödometer unter der

vertikalen Auflastspannung von σ_v = 260 kN/m². Nachdem die Schrumpfsetzungen bei etwa 5,3 % abgeklungen waren, wurden die Proben bis auf

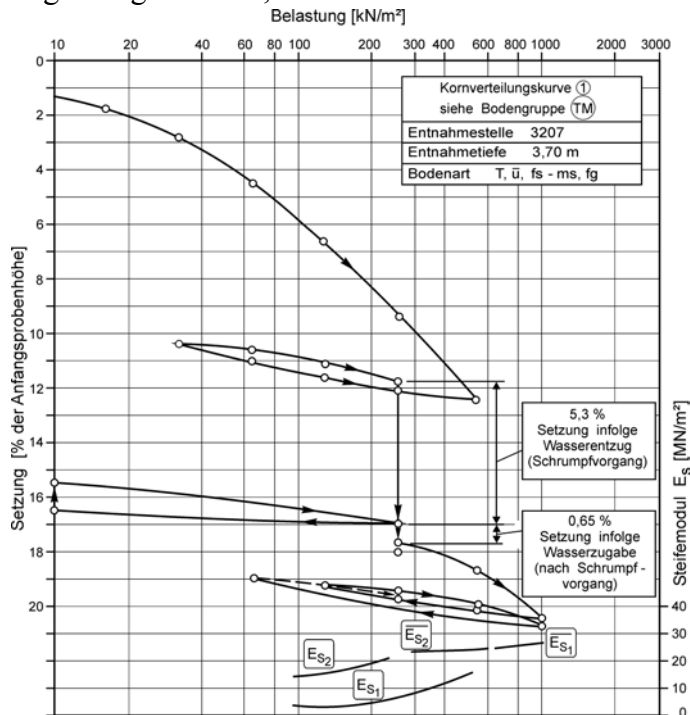


Bild 9 Schrumpfsetzungs- und Kompressionsmessungen im Kompressionsdurchlässigkeitsgerät (Ödometer) für die Bodengruppe TM (Ton, KB 3207, Tiefe 3.70 m) unter einer vertikalen Auflastspannung von σ = 260 [kN/m²] mit vorauslaufender Vorkonsolidierung bis auf σ = 520 [kN/m²] (Be-, Ent- und Wiederbelastung zurück bis auf σ = 260 kN/m²)

σ_v = 0 entlastet und zwecks Wassergehalts- und Volumenbestimmung analog der üblichen Untersuchungen zum Schrumpfverhalten der an der Luft austrockneten Probezylinder vermessen. Nach dem Wiedereinbau der Proben in das Ödometer und der Wiederbelastung bis auf das ursprüngliche Belastungsniveau von σ_v = 260 kN/m², wurde den Proben die Möglichkeit zur erneuten Aufsättigung durch Wasserzugabe gegeben. Es kam hierbei zu einer erneuten Setzung von ungefähr 0,5 % bei gleichbleibender konstanter Auflast. Statt möglicher Hebungen infolge Quellen des Tones bei der Aufsättigung kam es während der Wasserzugabe offenbar zu einem kollapsartigen Sacken der Probe, was auf Gefüge- und Strukturveränderungen innerhalb der untersuchten Proben hinweist.

Danach wurden die Proben unter Wasserzugabe weiter belastet bis auf eine maximale vertikale Belastung von σ_v = 1000 kN/m², um danach auch noch weitere Entlastungen und Wiederbelastungen zu erfahren (vergl. Bild 9 und Bild 11). Aus den Ergebnissen der Versuche im Ödometer kann nach den durchgeführten Belastungsphasen geschlossen werden, daß durch das völlige Austrocknen der Proben auch eine Änderung der maßgeblichen Bodeneigenschaften dieses Tones verbunden ist. Aus dem ursprünglichen Erstbelastungsast und den nach der Schrumpfung weitergeführten Belastungen bis auf

$\sigma_v = 1000 \text{ kN/m}^2$ wird deutlich, daß sich der Boden nach der Schrumpfung stark in seinen Verformungseigenschaften verändert hat. Die beiden Belastungsäste laufen nicht mehr zu einem Verformungsast zusammen. Es ist danach vielmehr ein paralleler Verlauf der Verformungskurven mit Belastungen oberhalb von $\sigma_v = 1000 \text{ kN/m}^2$ entstanden, mit der Folge, daß vermutlich erst nach sehr viel größeren Belastungen eine erneute Zusammenführung dieser Verformungskurven zu erwarten wäre.

Mit dem Versuch im Ödometer konnte bei der Schrumpfung der Probe unter Wasserentzug eine Gesamtsetzung von rund 5 % der Anfangsprobenhöhe ermittelt werden.

Ausgehend vom nahezu gesättigten Zustand der Probe ($S \approx 1$) beim Einbau in das KD-Gerät mit einem Einbauwassergehalt von $w_{\text{Einbau}} = 24,7 \%$ durch die vorauslaufende Konsolidierung der Probe aus der Erst-, Ent- und Wiederbelastung zurück bis auf $\sigma_v = 260 \text{ kN/m}^2$ hatte die Probe eine Setzung von rund 12 % der Anfangsprobenhöhe h_A unter gleichzeitiger Verdrängung von Porenwasser bis auf den für die Austrocknung beim Schrumpfen maßgebenden Ausgangswert des gravimetrischen Wassergehaltes von $w_A = 16,7 \%$ erlitten.

Durch den nachfolgenden Wasserentzug schrumpfte die Probe um 5,3 % der Anfangsprobenhöhe h_A auf das Endmaß nach dem Abklingen der Schrumpfung auf die Probenhöhe h_s zusammen. Aus der ermittelten zeitlichen Verformung der standardmäßig durchgeführten Schrumpfversuche an luftgetrockneten Probezylindern und den im Ödometer gemessenen Verformungen und den gemessenen Anfangs-, Zwischenausbau- und Endwerten der Wassergehalte im Ödometer konnte nunmehr auch nachträglich eine für diesen Ton typische Saugspannungskurve über die maßgebenden Volumenprozentabnahmen des Wasserverlustes während der Schrumpfung unter Auflast mit den jeweils zugehörigen Saugspannungsgrößen aufgestellt werden, die in Bild 10 aufgetragen ist.

Danach besitzt der Boden vor Beginn der Schrumpfung einen volumetrischen Wassergehalt von 31,3 % im nahezu gesättigten Zustand, der bis zum Ende des Schrumpfvorganges auf 4,1 % abnimmt, wobei die Saugspannung von 0 beginnend bis auf etwa 1500 kPa am Ende der Schrumpfung mit nahezu völlig ausgetrocknender Probe ansteigt.

Aus dem Ergebnis der Erstbelastungskurve in Bild 9 kann gleichzeitig auch abgelesen werden, welche Äquivalentbelastung über die maximale Erstbelastung von $\sigma_v = 260 \text{ kN/m}^2$ hinaus benötigt würde, um eine gleich große spezifische Setzung von 5,3 % zu erzeugen, wie sie durch den Schrumpfvorgang im Ödometer zu beobachten war. Verlängert man den Erstbelastungsast bis zur spezifischen Setzungsgröße von rund 17,3 % (Addition der spezifischen Setzungen von rund 12 % aus der Konsolidierung bis 520 kN/m^2 und der spezifischen

Setzung aus der Schrumpfung von 5,3 %) kann auf der Abszisse die hierfür erforderliche Äquivalentauflast von ungefähr $\sigma_v = 1500 \text{ kN/m}^2$ abgelesen werden. Die Größe deckt sich damit auffallend gut mit dem in der Saugspannungskurve in Bild 10 abzulesenden Maximalwert für die nahezu völlig ausgetrocknete Probe nach dem Schrumpfen.

Gleiches gilt natürlich auch für die Setzungsgröße beim Schrumpfen ohne zusätzliche Vertikalaufplast. Aus dem Schrumpfmaß der an der Luft getrockneten Probe wurde für diesen Ton ein etwa gleich großer Wert von rund 4,5 % der Anfangsprobenhöhe am Standardprobenzylinder ermittelt.

Um im Ödometer unter Erstbelastung, ausgehend vom nahezu gesättigten Zustand bei $\sigma_v = 0$, eine gleich große spezifische Setzungsdifferenz dieser Größenordnung zu erzeugen, würde eine vertikale Auflast von rund $\sigma_v = 150 \text{ kN/m}^2$ erforderlich. Nach dieser Belastung der Probe bis auf die äquivalente Spannung von 150 kN/m^2 wäre die Probe immer noch nahezu wassergesättigt ($S \approx 1$).

Dieser Spannungswert entspricht damit deshalb auch unmittelbar der maximal erreichbaren Kapillarspannung in der geschlossenen Kapillarezone mit einer kapillaren Steighöhe oberhalb des Grundwasserspiegels von rund $h_k = 15 \text{ m WS}$ ($\cong \sigma_v = 150 \text{ kN/m}^2$), mit der die Probe belastet werden muß, um eine gleich große Verformung (Setzung) zu erzwingen.

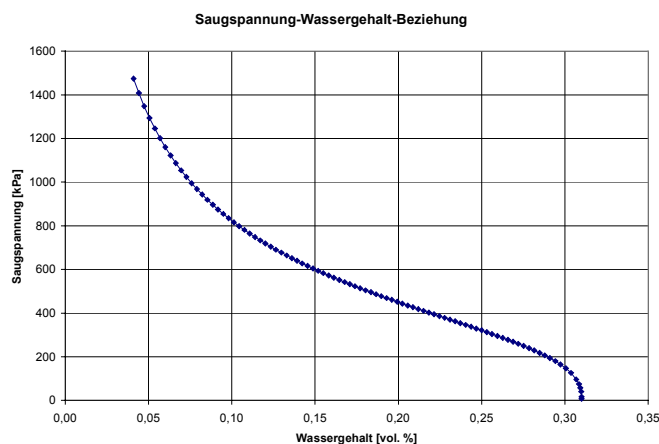


Bild 10 Saugspannungen während des Schrumpfvorganges im Ödometer für die Bodengruppe TM (Ton, KB3207, Tiefe 3,70 m) in Abhängigkeit vom Wassergehalt (volumetrisch) unter der Belastung von $\sigma = 260 \text{ kN/m}^2$ nach einer Vorbelastung von $\sigma = 520 \text{ kN/m}^2$ und Entlastung auf $\sigma = 32 \text{ kN/m}^2$ (vergl. Bild 9)

Gleichartige Untersuchungsergebnisse an den Proben aus den Böden der Bodengruppen TL und SU haben sich auch in den Parallelversuchen ergeben, die sich jedoch in ihren jeweils charakteristischen zeitlichen Verlaufskurven und Größen gegenseitig voneinander unterscheiden.

Eine Vorstellung der während des Austrocknungsvorganges sich einstellenden intergranularen Haftspannungen beschreibt das Bild 12, das aus dem in New York erschienen Buch von Terzaghi und

Peck über die Bodenmechanik in der Ingenieurpraxis entnommen wurde (Terzaghi & Peck 1948).

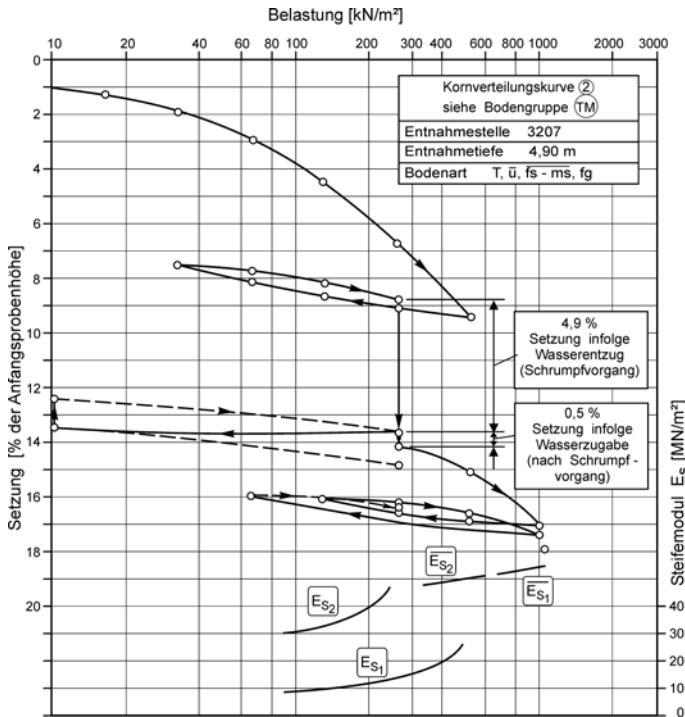


Bild 11 Schumpfsetzungen im Kompressionsdurchlässigkeitsgerät (Ödometer) für die Bodengruppe TM (Ton, KB 3207, Tiefe 4.90 m) unter einer vertikalen Auflastspannung von $\sigma = 260 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ mit vorauslaufender Vorkonsolidierung bis auf $\sigma = 520 \text{ [kN/m}^2\text{]}$ (Be-, Ent- und Wiederbelastung zurück bis auf $\sigma = 260 \text{ [kN/m}^2\text{]}$)

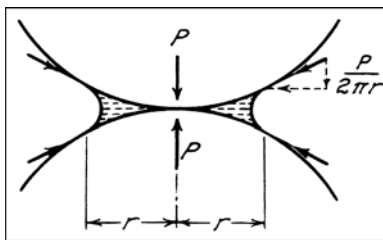


Bild 12 Modellvorstellung für Saugspannungen in der offenen Kapillarzzone oberhalb des Grundwasserspiegels (Feuchtigkeitskohäsion) mit einem Sättigungsgrad $S \ll 1$, was durch Verdunstung oder Austrocknung des Bodens oberhalb des Grundwasserspiegels entsteht (nach Terzaghi & Peck, 1948)

Die Ergebnisse aus diesen Versuchen konnten an Hand aller der in den Schumpfuntersuchungen gemessenen Setzungsgrößen in einem Diagramm zusammengefasst werden, das in Bild 13 dargestellt ist. Wie diese Ergebnisse zeigen, war eine Lastabhängigkeit der ermittelten Schumpfsetzungsgrößen $[\Delta h_s/h_{As}]$ für die jeweiligen Bodengruppen SU, TL und TM (DIN 18196) nicht gegeben. Sie unterschieden sich je nach Art des Bodens lediglich in ihrer absoluten Setzungsgröße.

Für die Bodengruppen SU und TL (sandiger Auehlm) wurde die Gesamtgröße der Schumpfsetzung zwischen 1,5 % und 3,7 % ermittelt.

Für den leicht plastischen Schluff (TL) wurden Setzungsgrößen von 1,5 % bis 3,7 % und für die

Sand-Schluff-Gemische (SU) Setzungsgrößen zwischen 1,7 % und 2,3 % erhalten.

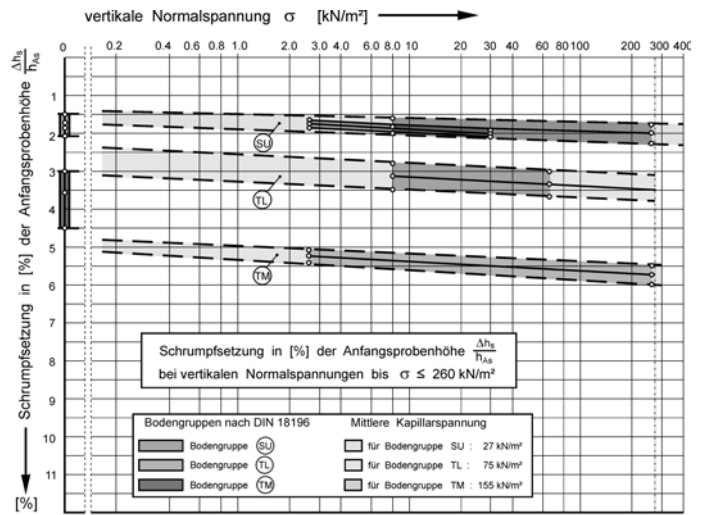


Bild 13 Im Ödometer und an der Luft ermittelte spezifische Gesamtschrumpfsetzungsgrößen in [%] der Anfangsprobenhöhe für die untersuchten Bodengruppen TM, TL und SU (mit und ohne vertikale Belastungen), anwendbar für vertikale Auflastspannungen (z.B. Fundamentlasten) bis zu maximal $\sigma \leq 260 \text{ [kN/m}^2\text{]}$

Für die Bodengruppe TM (toniger Auehlm) lagen die Schumpfsetzungen mit 3,0 % bis 6,0 % um den nahezu doppelten Betrag höher als sie für die Bodengruppen SU und TL zu bestimmen waren.

Aus dem Zeitsetzungsverlauf der im Kompressionsversuch gemessenen Schumpfsetzungen und den Wassergehaltsänderungen beim Schumpfversuch an der Luft konnte eine Beziehung zwischen dem Setzungsverlauf und der jeweils zugehörigen Wassergehaltsänderung $[\Delta w_n/w_n]$ hergestellt werden.

Die hierzu ermittelten Setzungsverlaufskurven für die Bodengruppen SU, TL und TM sind in Bild 14 aufgetragen.

Bei der Bodengruppe TM wird zwar eine deutlich

größere Wassergehaltsänderung bis zum Eintritt von z.B. 50% der Schumpfsetzung notwendig, jedoch genügen in Bezug zur absoluten Setzungsgröße zwischen den Bodengruppen TM und SU/TL schon etwa gleichgroße Wasserverluste bei gleichgroßen Schumpfsetzungen.

Anhand dieser Versuchsergebnisse konnte ein Diagramm (vergl. Bild 15) erstellt werden, mit dessen Hilfe die jeweiligen Setzungsgrößen in Abhängigkeit von der jeweiligen Wassergehaltsänderung während des Schrumpfvorgangs angegeben werden können, getrennt nach den untersuchten Bodengruppen. So sind bei den Bodengruppen SU und TL schon etwa 50% der Schumpfsetzungsgröße erreicht, wenn der natürliche Wassergehalt des Bodens mit einem Sättigungsgrad von $S \approx 1$ nur um rund 8% bis 14% seines Ursprungswertes abnimmt.

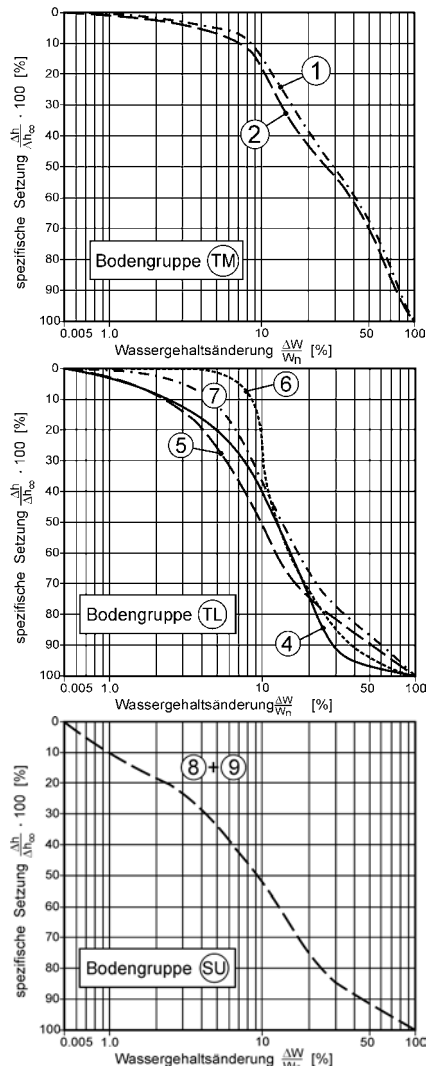


Bild 14 Ermittelte zeitliche Änderung der spezifischen Schumpfsetzungen [%] für die im Ödometer und an der Luft untersuchten Bodengruppen TM, TL und SU in Abhängigkeit vom gravimetrischen Wassergehaltsverlust [%], ausgehend vom ursprünglichen Ausgangswassergehalt der anfangs gesättigten Bodenproben ($S \approx 1$).

Auelehm (TM) kann diese Kapillarzone sogar rund 15 m betragen.

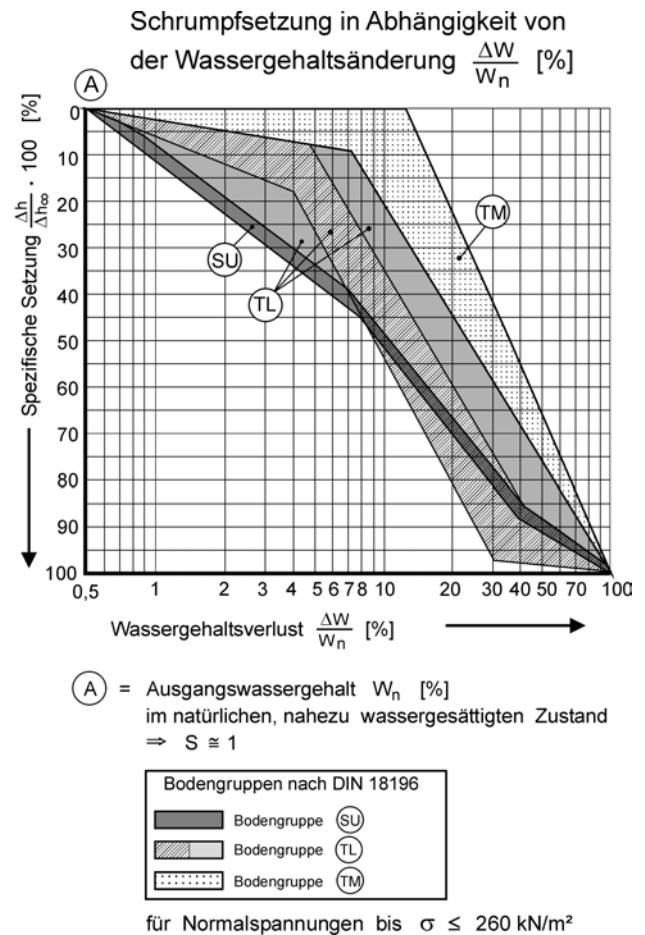


Bild 15 Spezifischer Schumpfsetzungsverlauf in [%] für die Bodengruppen TM, TL und SU in Bezug zur jeweils ermittelten Gesamtschumpfungsgröße Δh_∞ (vergl. Bild 13) in Abhängigkeit vom spezifischen Wassergehaltsverlust (gravimetrisch), ausgehend vom quasi gesättigten Zustand des Bodens mit dem Sättigungsgrad von $S \approx 1$ (Bemessungsdiagramm für die zeitliche Änderung der Schumpfsetzung bei abnehmendem Wassergehalt)

Ausgehend vom natürlichen Wassergehalt von z.B. $w_n = 20\%$ sind damit schon rund 50% der Schumpfsetzungen eingetreten, wenn der Wassergehalt vom ursprünglichen Wert mit $w_n = 20\%$ auf etwa $w_n = 17,8\%$ abnimmt.

Aus diesen Untersuchungen zur Abschätzung möglicher Setzungen als Folge von Schrumpfungen der bindigen Deckschicht konnte insbesondere deutlich gemacht werden, wie empfindlich diese Böden auf natürliche Wassergehaltsänderungen reagieren. Die Größe der in den Kompressionsversuchen ermittelten Kapillardrücke (vergl. Bild 15) ist gleichzeitig auch ein Maß für die kapillare Steigfähigkeit des Wassers im noch quasi gesättigten Boden oberhalb des Grundwasserspiegels (geschlossener Kapillarsaum). Danach ist oberhalb des Grundwasserspiegels der sandige Auelehm (SU) noch etwa 3 m, der leicht plastische Auelehm (TL) noch etwa 8 m als wassergesättigt anzunehmen, für den tonigen

4 SCHLUSSBEMERKUNG

Von Bedeutung sind die Setzungseinflüsse aus Schrumpfungen daher überall dort, wo die Höhe der geschlossenen Kapillarzone mit der Bodensättigung von $S \approx 1$ als Folge einer dauernder Grundwasserabsenkung unterhalb bestehender Gründungshorizonte absinken kann. Die sich oberhalb dieser geschlossenen Kapillarzone möglicherweise einstellenden Wassergehaltsverluste sind mit Volumenänderungen als Folge der dann einsetzenden Schrumpfung des Bodens verbunden, die zu beachtlichen baulichen Schäden führen können.

Beweissicherungsmaßnahmen an hierdurch gefährdeten Objekten sind immer dann unumgänglich, wenn setzungsgefährdende Schrumpfungen zu befürchten sind, die ihre Ursache in der durch Bau

maßnahmen verursachten Absenkung unterhalb des maßgebenden tiefsten Grundwasserspiegels finden.

Darüber hinaus kann auf weitergehende Betrachtungen und Beobachtungen zu möglichen Setzungen aus wechselnden Wasserständen und wiederholt auftretenden Durchfeuchtungen nicht verzichtet werden, wenn unberechtigte Schadensansprüche infolge von bauseits verursachten Grundwasserspiegelschwankungen mit Erfolg abgewehrt werden sollen oder berechnete Forderungen sachlich begründet werden müssen.

Hierzu bedarf es einer ständigen Kontrolle der im natürlichen Boden vor Ort zu messenden Wassergehaltsänderungen. Ihr Maß und die zeitlichen Veränderungen gestatten damit an Hand gesondert durchzuführender Labor- und Felduntersuchungen, über die tatsächlichen Größen von möglichen Setzungen aus Schrumpfen weitestgehend zutreffende Aussagen anzuführen und zu begründen. Tatsächlich aufgetretene und möglicherweise schon zuvor vorhandene Schäden an Gebäuden, die durch Grundwasserstandsveränderungen gefährdet wurden, können hierdurch in ihrer Wirkung (Setzungsgröße und zeitlicher Verlauf) entweder bestätigt oder aber auch als unberechtigte Forderung erfolgreich abgewehrt werden.

Im vorliegenden Fall der hier durchgeführten Beweissicherung waren diese Untersuchungen von ausschlaggebender Bedeutung, um die an den Bauherrn seiner Zeit herangetragenen unberechtigten Forderungen nach einer über mehrere Jahre andauernden gerichtlichen Auseinandersetzung erfolgreich abzuwehren.

Über das Verhalten des Dreiphasensystems Boden unter und über Wasser gilt es im Hinblick auf die vielen noch offenen Fragen hinsichtlich der Verformbarkeit des Bodens unter Belastung infolge extern auf das Bodensystem einwirkender Druckänderungen unter Beteiligung der im ungesättigten Boden vorhandenen drei Phasen Feststoff, Gas und Wasser noch große Anstrengungen zu unternehmen. Insbesondere die Interaktion zwischen dem Wasser-Luft-Gemisch und dem die Poren bildenden Feststoffanteilen der jeweiligen Bodenmaterialien ist von entscheidender Bedeutung für die praktischen Auswirkungen, die für Bemessungszwecke dem Ingenieur noch zur Hand gegeben werden müssen.

5 LITERATUR

- BAW 1978. Gutachten-Nr. 82 4130 der Bundesanstalt für Wasserbau vom 30.11.78 (unveröffentlicht) Beweissicherung in den Ortslagen Rehlingen und Saarfels (Schrumpfsetzungen: Ortslage Saarfels), BAW Karlsruhe, Abteilung Geotechnik
- Fredlund, D. G. & Rahardjo, H. 1993. *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*, John Wiley & Sons, Inc. New York

Köhler, H.-J., I. Feddersen & R. Schwab 1999. Soil and structure deformations due to reconstruction of an old lock built on unsaturated submerged clay. In M. Jamiolkowski et al. (eds.), *Proc. 2nd International Symposium on Pre-failure Deformation Characteristics of Geomaterials*, Torino, 26-29 September 1999, 793-800. Rotterdam: Balkema

Köhler, H.-J. 2001a. Dreiphasensystem Boden unter Wasser – Auswirkungen auf die Porenwasserspannungen, *Schriftenreihe Geotechnik, Heft 06, Bauhaus-Universität Weimar, 3. Workshop 2001 Teilgesättigte Böden*, S. 59 – 90, ISBN 3-86068-167-2, Weimar

Köhler, H.-J. 2001b. Druckwechselbelastung an Wasser-Boden-Grenzflächen. In: *Zeitschrift für angewandte Geologie (ZAG)*, Heft 47

Terzaghi, K. & Peck, R. B. 1948. *Soil Mechanics in Engineering Practice*, John Wiley and Sons, Inc. New York