



Reaktionen feinkörniger Böden auf Wasserentzug und mögliche Auswirkungen auf die Geländeoberfläche und Gebäude im Rheinischen Braunkohlenrevier

(Prof. Dr.-Ing. Horst Düllmann)



Gliederung:

1. Veranlassung
2. Problembeschreibung
3. Theoretische Grundlagen zum Wasserhaushalt
 - 3.1 Allgemeine Wasserhaushaltsgleichung
 - 3.2 Erscheinungsformen von Wasser im Boden
 - 3.3 Entwässerung durch Gravitation
 - 3.4 Theorie des kapillaren Potentials
 - 3.5 Potenzial-Gleichgewicht
 - 3.6 Saugspannung und Wassergehalt
 - 3.7 Wasserbindung und Porengrößenverteilung
 - 3.8 Saugspannung ψ und Partialdruck p des Wasserdampfes im ungesättigten Boden
4. Theoretische Grundlagen zum Schrumpfverhalten von Böden
 - 4.1 Mechanismus des Schrumpfens, Schrumpfphasen
 - 4.2 Schrumpfkurve - Entwässerungskurven
 - 4.3 Indexparameter
5. Verhältnisse im konkreten Untersuchungsraum
 - 4.4 Auswahlkriterien, räumliche Einordnung
 - 4.5 Bodenphysikalische Charakterisierung
 - 4.6 Zusammenfassende Bewertung
6. Anwendung der Grundlagen auf unterschiedliche Untergrund- und thermodynamische Belastungssituationen sowie Auswirkungen auf die Tagesoberfläche mit einer Bebauung
 - 4.7 Oberflächennahe Mehrschichtsysteme
 - 4.8 Tiefliegende Mehrschichtsysteme
7. Gesamtfazit der Untersuchungen



1. Veranlassung

Unterschiedliche Auffassungen über mögliche Bergschadensursachen infolge Sumpfung.

Bergbautreibender:

- Konsolidationssetzungen durch Wegfall des Auftriebs sind in der Regel relativ gleichmäßig und für Gebäude unkritisch
- Einwirkungen einer hydraulisch aktiven tektonischen Störung
- Torfverzehr durch Luftzufuhr in Aueböden

Netzwerk Bergbaugeschädigter e.V.:

- Neben dem Torfverzehr muss auch die Schrumpfung durch Wasserverlust (Austrocknung) in feinkörnigen Böden (Tone, Schluffe) berücksichtigt werden.
- Dieser bergbauliche Einfluss ist bisher nie beachtet worden, es wurde nur auf humose Bestandteile hin untersucht.
- Dieser Untersuchungspunkt ist aber insofern wichtig, da Tonlinsen auch außerhalb von Aueböden in den Sand- und Kiesformationen angetroffen werden können.
- Im Gegensatz zur Veränderung der humosen Bestandteile existieren zu der Entwässerung von tonigen Böden bereits veröffentlichte Erkenntnisse zu den jeweiligen Zeitabläufen in Abhängigkeit von Tongehalt und Tonmächtigkeit.

2. Problembeschreibung

- Wassergehaltsverteilung in den oberen Schichten ist abhängig von:

Natürliche Verhältnisse wie:

- Bodenart, Bodenstruktur.
- Niederschlag, Temperatur, Klimaverhältnisse.
- Tiefenlage des Grundwassers.
- Gefälle der Oberfläche.
- Vegetation.

Beeinflusste Verhältnisse wie:

- Grundwasserabsenkungs- und Dränmaßnahmen.
- Versiegelung der Geländeoberfläche durch Überbauung.
- Kontrollierte und unkontrollierte Grundwasseranreicherung über Gräben oder defekte Grundleitungen.



- Wesentliche, vom Wasser ausgehende Krafteinwirkungen auf das Korngerüst sind Gravitation und kapillare Spannungen:
 - Wassergehaltsabnahmen führen immer zu Volumenminderungen (Schrumpfen).
 - Schrumpfprozesse sind charakteristisch für feinkörnige Böden und sind nach der Potenzialtheorie von der Wechselwirkung zwischen dem Porenwasser und der Porenstruktur abhängig.
 - Je feinkörniger und wasserhaltiger ein Material ist, desto höher ist das Ausmaß möglicher Schrumpfungen infolge Wasserentzug.
- Im natürlichen Zustand liegt der Boden in einem spezifischen Wassergehaltsbereich vor, dem in der Bodenmatrix eine bestimmte Saugspannung zugeordnet ist.
- Ursachen für Änderungen der Saugspannung und damit Wassergehaltsänderungen können sehr komplex sein. Mögliche Ursachen sind z.B.:
 - Wasserbewegungen (Feuchtefluss) infolge von thermischen Gradienten. Von Bedeutung nur im Bereich der Bodenoberfläche, in heißen Sommern bis 1,2 – 1,5 m unter GOK. Im Boden dagegen nimmt der Einfluss von Temperaturgradienten zur Tiefe hin deutlich ab.
 - Bei konstanten Auflastbedingungen und konstanten Temperaturen wird eine Entwässerung und damit Abtrocknung einer bindigen Bodenschicht auch dann ausgelöst, wenn entweder durch Wurzeln Wasser entzogen wird, oder durch benachbarte Schichten ein höheres Matrixpotential aufgeprägt wird, so dass ein Potenzialgefälle und ein konvektiver Wassertransport entstehen kann.
- Das Schrumpfen eines bindigen Bodens kann (muss nicht) grundsätzlich zu gebäudeschädlichen Setzungen und Setzungsunterschieden führen.
- In der Literatur wird seit Beginn des vorigen Jahrhunderts von zahlreichen Schadensfällen berichtet, die auf Gelände- und Gebäudeverformungen infolge von vor allem oberflächennahen Schrumpfprozessen zurückgehen.
- Häufig wird von bergschadenähnlichen Beeinträchtigungen an Gebäuden in Gebieten ohne jeglichen Bergbaueinfluss berichtet.
- Eine Chronologie des wichtigsten zugänglichen Schrifttums zwischen 1873 bis 1979 enthält die Untersuchung zum Schwindverhalten bindiger Böden von PLACZEK (1982).
- Neuere Arbeiten zu Bodenverformungen infolge von Wassergehaltsänderungen wurden u.a. von BACHMANN (1998) und WITTE (2003) vorgelegt, weitere eigene Arbeiten sind in Vorbereitung.
- Im Falle von Baugrundverformungen infolge Grundwasserabsenkung ist jedoch immer zu beachten, dass neben dem Schrumpfen auch Bodenverformungen infolge Auftriebsverlust, d.h. lastabhängige Verformungen, auftreten können.

- Da in einem Baugrund oder Bauwerksuntergrund durch physikalische Einwirkungen hervorgerufene Saugspannungs- bzw. Wassergehaltsänderungen in einem sehr komplexen Zusammenhang mit der Bodenart und Bodenstruktur bei ein- und mehrschichtigen, gesättigten oder teilgesättigten Bodensystemen stehen, muss nachfolgend zum besseren Verständnis des Gesamtzusammenhanges zunächst auf einige theoretische Grundlage eingegangen werden. Ohne diese Grundlagen verbleibt die vorliegende Problematik im Bereich von Spekulationen.
- Eine Versachlichung der Diskussion und eine Entkoppelung der Begriffe bzw. Sachverhalte: Ton im Untergrund – Sumpfung – Schrumpfung – Setzungsschäden ist zwingend erforderlich.

3. Theoretische Grundlagen zum Wasserhaushalt

3.1 Allgemeine Wasserhaushaltsgleichung (Abb. 3.0)

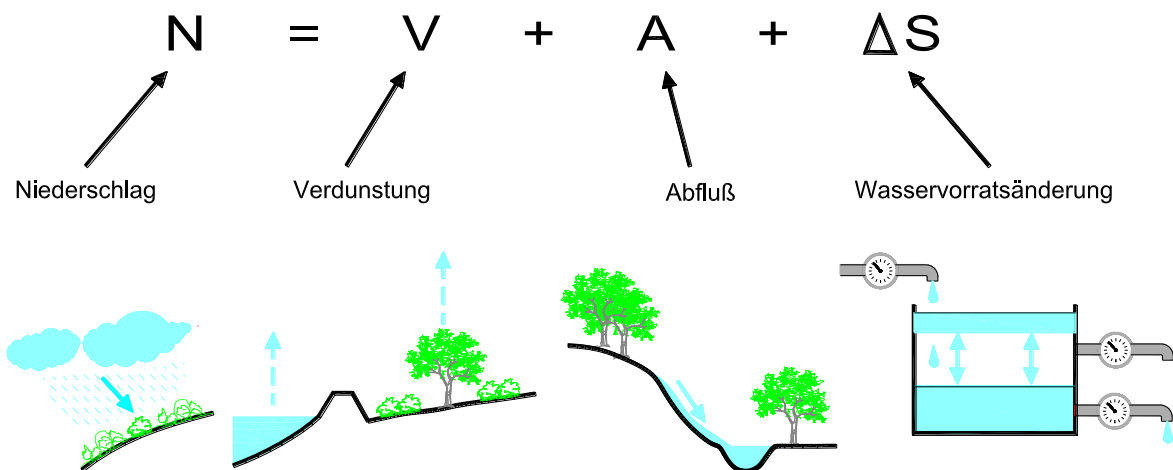


Abb. 3.0: Komponenten der Wasserhaushaltsgleichung

3.2 Erscheinungsformen von Wasser im Boden

- Übersicht nach DIN 4049, T3

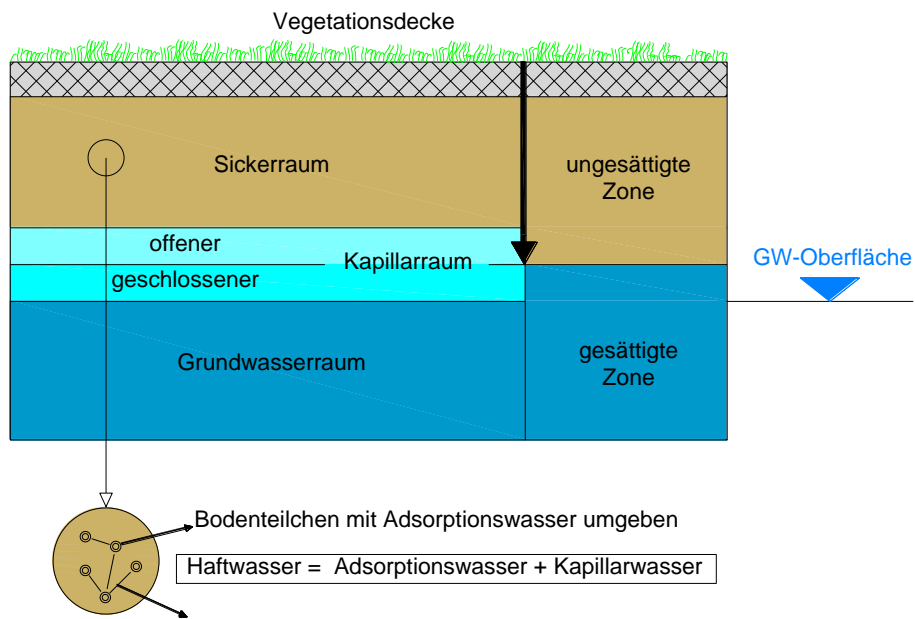


Abb. 3.1: Einteilung des Bodenwassers (aus DÜLLMANN, 2011)

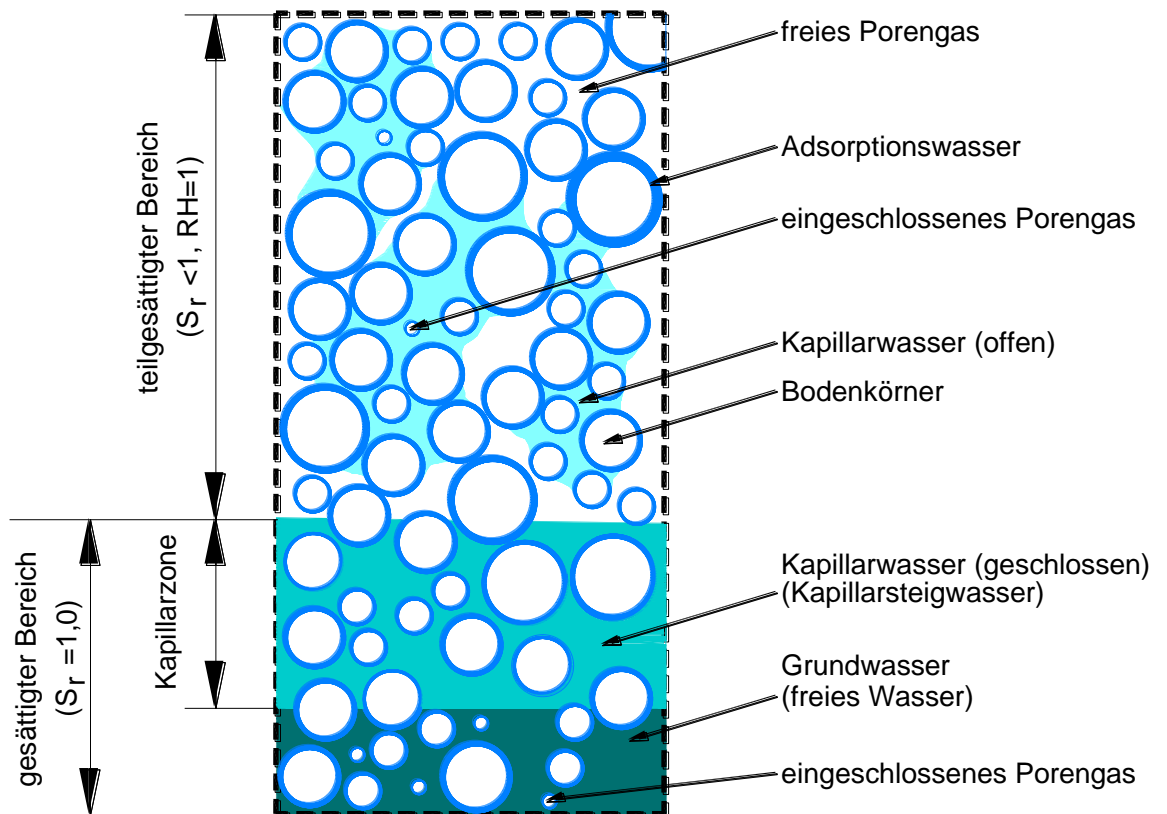


Abb. 3.2: Formen des Bodenwassers und in welchen Bereichen sie angesiedelt sind [1]

- Durch Bindungskräfte zwischen dem Bodenwasser und dem Bodengefüge wird ein Teil des Wassers entgegen der Schwerkraft als Haftwasser zurückgehalten. Die Wechselwirkungen zwischen dem Bodenwasser und dem Bodengefüge beruhen i.W. auf Kapillar- und Adsorptionskräften, die besonders ausgeprägt sind in dicht gelagerten feinkörnigen Böden.
- Das übrige Wasser kann sich dagegen infolge der Schwerkraft als **Sickerwasser** frei bewegen. In grobkörnigen, sehr durchlässigen Böden sind die Bindungskräfte für Wasser sehr gering, wodurch es bevorzugt als Sickerwasser auftritt. Kommt es oberhalb einer gering durchlässigen Schicht zu einem Aufstau von Sickerwasser, spricht man von **Stauwasser**. Tritt dieses dauerhaft auf, wird es als **Grundwasser** bezeichnet.
- Als Kapillarwasser wird der Teil des Haftwassers bezeichnet, der durch Kapillarkräfte gegen die Schwerkraft gehalten wird. Die Kapillarität beschreibt als Oberbegriff das durch die Grenzflächenspannung verursachte Verhalten von Flüssigkeiten und die Größe der Wasserspannungen (bzw. Matrixpotenzials) infolge Kapillaraufstieg in Bodenporen (sog. Kapillaren).
- Der Einfluss dieser Kapillarität wird im Allgemeinen immer größer, je kleiner die Poren werden.
- Das einfachste Modell zur Bestimmung der Wasserspannungen und der anziehenden Kräfte in Abhängigkeit von der Grenzflächengeometrie ist ein Kapillarmodell mit einem Rohr, dessen Querschnitt konstant und zylindrisch ist, siehe Abb. 3.3.

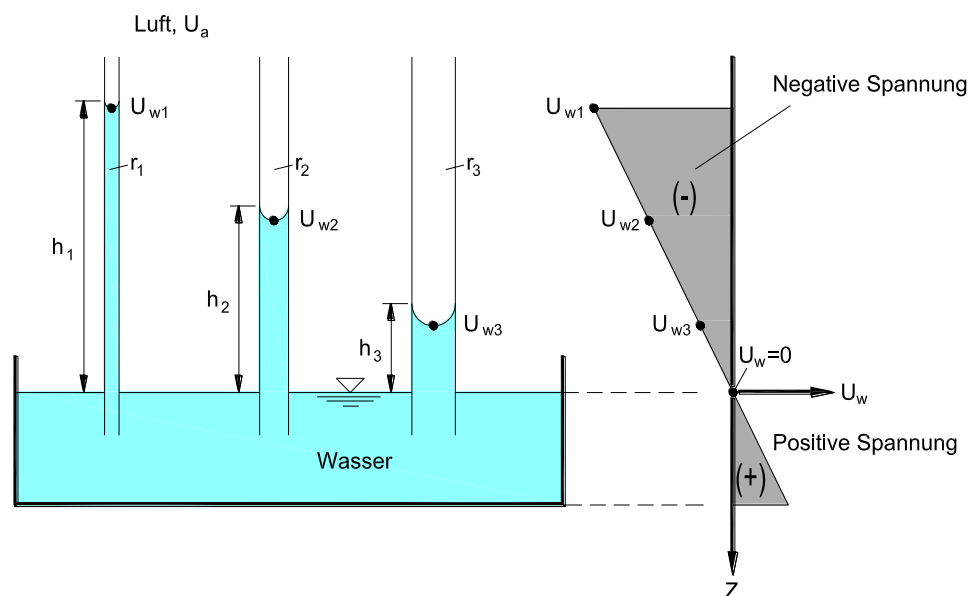


Abb. 3.3: Wasseranstieg in Kapillarröhren verschiedener Durchmesser (LU/LIKOS, 2004).

- Die kapillare Wasserbewegung erfolgt durch die Oberflächenspannung. Die zusammengesetzte Porenstruktur bedingt sehr komplexe Verhältnisse.

Tab. 3.1: Erfahrungswerte für die Steighöhe des geschlossenen Kapillarwassers h_{kp} (Grundbau-Taschenbuch, Bd. 1, 1999)

| Bodenart | h_{kp} |
|--------------------------------|---------------|
| Mittel- bis Grobkies | bis 0,05 m |
| sandiger Kies oder Feinkies | bis 0,2 m |
| Grobsand oder schluffiger Kies | bis 0,5 m |
| Mittel- und Feinsand | bis 1,5 m |
| Schluff | bis 5 m |
| Ton | bis über 50 m |

3.3 Entwässerung durch Gravitation

- Je feinkörniger der Boden ist, umso weniger Wasser kann durch Gravitation entfernt werden.
- Einen auf TERZAGHI (1948) zurückgehenden Kurvenbereich zeigt Abb. 3.5. Aufgetragen ist der Sättigungsgrad S_r als Funktion des wirksamen Korndurchmessers d_{10} , der über eine lange Periode der Entwässerung überhaupt erreichbar ist.
- In das Diagramm ist beispielsweise der d_{10} -Bereich für einen Lösslehm eingetragen, der in der Niederrheinischen Bucht als oberste Deckschicht weit verbreitet vorkommt. Eine Entwässerung durch Gravitation findet quasi nicht statt.

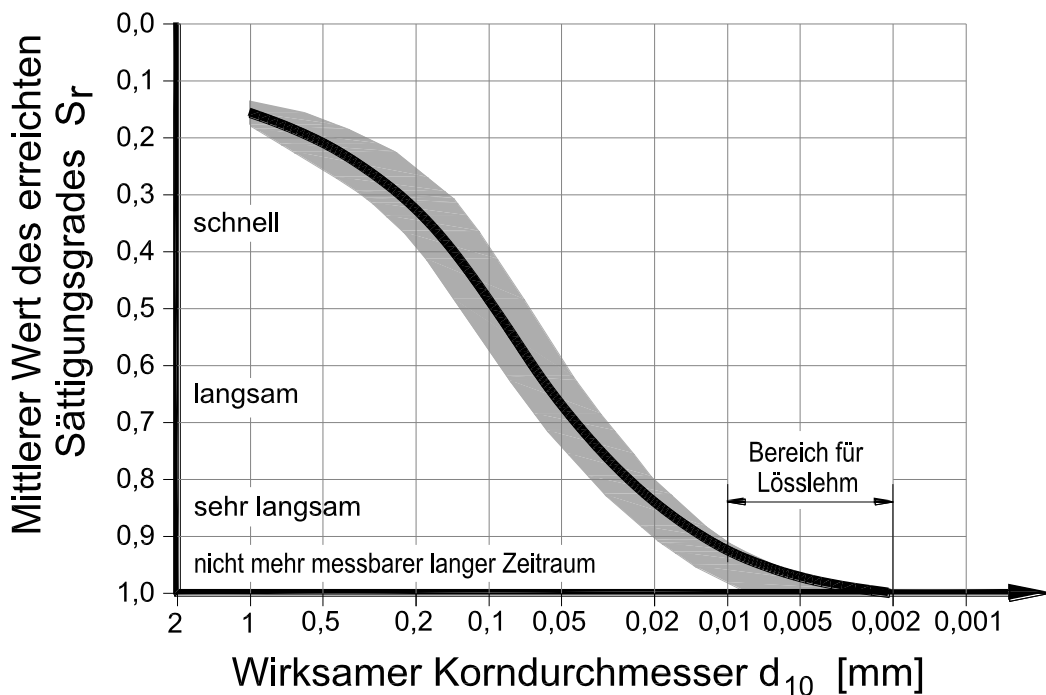


Abb. 3.5: Zusammenhang zwischen Korngröße d_{10} und Sättigungsgrad S_r , der nach einer Entwässerung durch Gravitation im Untergrund entsteht.



3.4 Theorie des kapillaren Potentials

- Das kapillare Potenzial ist eine Größe, die das Saugvermögen der Böden charakterisiert. Dieses ist wiederum eine Funktion des Sättigungsgrades.
- Ein trockener Schwamm kann z.B. mehr Wasser aufsaugen als ein feuchter. Genauso ist eine größere Energie nötig, um aus einem relativ trockenen Boden die gleiche Wassermenge auszupressen wie aus einem gesättigten.
- In der Physik bedeutet Potenzial die Arbeit, die nötig ist, um die Einheitsmasse aus einer gewissen Lage in eine andere zu bringen. Das kapillare Potenzial gibt also die Arbeit an, die nötig ist, um die Einheitsmasse des Wassers gegen die Kapillarkräfte zu bewegen.
- Für die **Saugspannung** oder das **Matrixpotential** ψ_M gilt:
 - Sie gibt die Arbeit an, die geleistet werden muss, um dem Boden das Wasser zu entziehen.
 - Die Saugspannung ist immer ein Unterdruck mit einem negativen Wert (- h Pa, cm).
 - Je größer der negative Zahlenwert, desto stärker ist die Saugwirkung.
 - Die Saugspannung (Wasserspannung) ist eine Funktion der Porengrößenverteilung und des Wassergehaltes.
 - Das Matrixpotential umfasst alle durch das Bodensubstrat auf das Wasser ausgeübte Einwirkungen.
 - Je weniger Wasser der Boden enthält, umso stärker binden die matrixbedingten Kräfte das vorhandene Wasser an das Substrat und umso schwerer ist der Boden zu entwässern.
 - Bei einem vollgesättigten Boden beträgt die Matrixspannung null.

3.5 Potenzial-Gleichgewicht

- Wasser bewegt sich immer vom höheren zum niedrigen Potenzial.
- Durch Störungen (z.B. Verdunstung, Beregnung) verändert sich das Matrixpotential, was zu ausgleichenden Wasserbewegungen führt.
- Durch einen Energieeintrag, z.B. in Form von Sonneneinstrahlungen, wird dem Boden von der Geländeoberfläche ausgehend Wasser durch den Prozess der Evaporation (Verdunstung) entzogen. Die Reduktion des Wassergehaltes führt zu einem Anstieg der Porenwasserspannung und damit zu einer aufwärts gerichteten Wasserbewegung.
- Der Entzug von Porenwasser führt andererseits zu Schrumpfprozessen. Durch Schwerkraft kann diese Entwässerung nicht bewirkt werden.

3.6 Saugspannung und Wassergehalt

- Der Wassergehalt, der einer bestimmten Saugspannung zugeordnet werden kann, hängt vom Porenvolumen und der Porengrößenverteilung und damit vom Verdichtungszustand bzw. von der Lagerungsdichte ab.
- Der Verlauf der Beziehung zwischen dem volumetrischen Wassergehalt und Matrixpotenzial bzw. der Wasserspannung ist für jede Bodenart charakteristisch (Abb. 3.10). Zwischen dem volumetrischen Wassergehalt θ und dem gravimetrischen Wassergehalt w besteht dabei folgende Beziehung:

$$\theta = w \cdot \frac{\rho_d}{\rho_w} \quad (\text{cm}^3/\text{cm}^3)$$

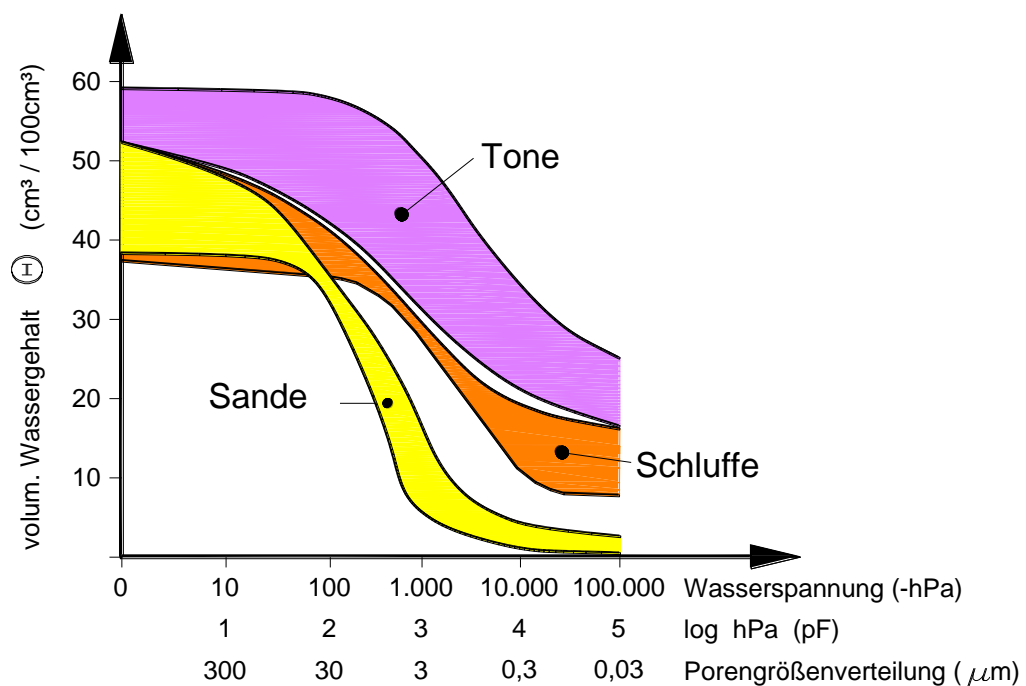


Abb. 3.10: Allgemeiner Verlauf von Bodenwasser-Retentionskurven bzw. Wasserspannungskurven bei Sand-, Schluff- und Tonböden (HARTGE/HORN, 2009)

3.7 Wasserbindung und Porengrößenverteilung

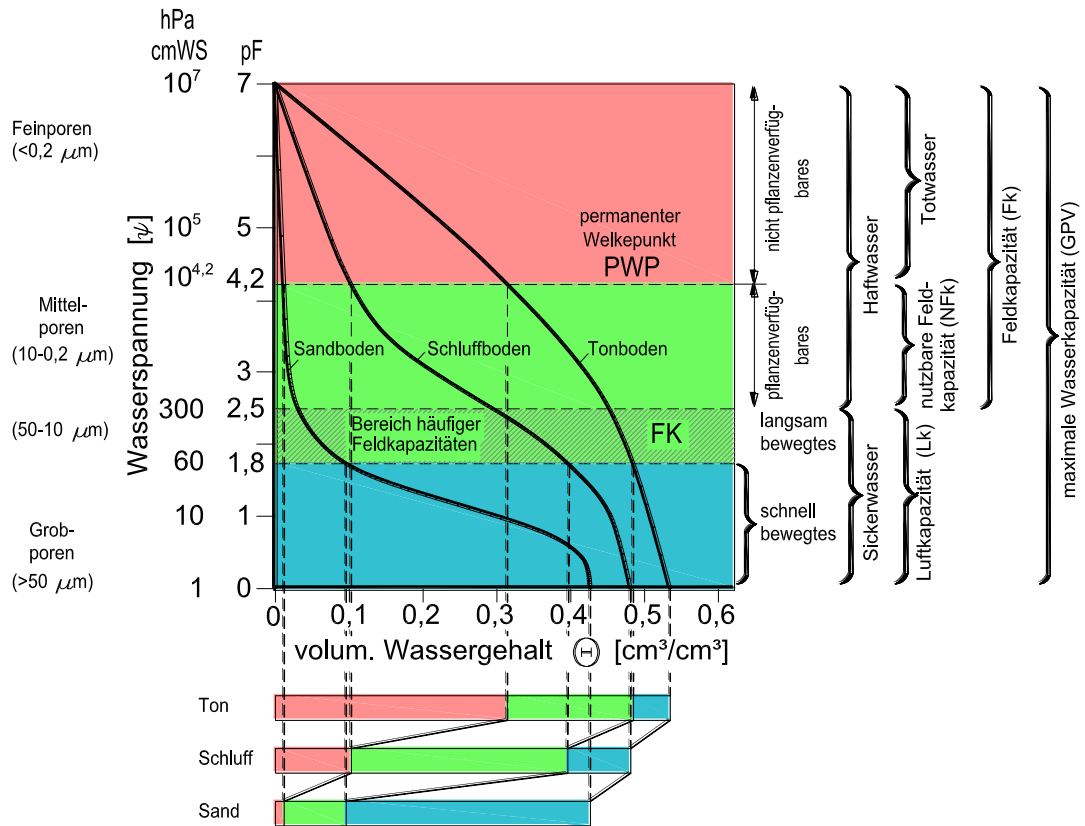


Abb. 3.13: Wasserspannungskurven verschiedener Böden (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1998)

3.8 Saugspannung ψ und Partialdruck des Wasserdampfes im ungesättigten Boden

Isotherme Bedingungen:

- Thermodynamischer Zusammenhang zwischen Saugspannung und dem Partialdruck des Wasserdampfes P bzw. der rel. Luftfeuchtigkeit im Boden kann aus der KELVIN-Gleichung abgeleitet werden:

$$\psi = - \frac{R \cdot T}{v_{wo} \cdot \omega_v} \cdot \left(\frac{P}{P_o} \right)$$

mit:



ψ = totale Saugspannung

R = universelle Gaskonstante = 8,314 (J/mol · K)

T = Temperatur in Kelvin (K)

V_{wo} = Inverse der Dichte des Wassers (= $1/\rho_w$)

ω_v = Masse des Wasserdampfes

P = Porenwasserdampfdruck bei Teilsättigung

P_o = Wasserdampfdruck (gesättigt) über einer Oberfläche reinen Wassers (bei derselben Temperatur)

P/P_o = Relative Luftfeuchtigkeit RH

- Für relative Luftfeuchten zwischen 0,7 und 1,0 bzw. 70 und 100 % und Temperaturen zwischen 10 – 30° C gilt nach TERZAGHI/PECK (1964) näherungsweise:

$$\psi = 150 (1 - RH) \quad [\text{MPa}]$$

- Luft mit RH-Werten von 90 bzw. 50 % übt im Kontakt mit einem feinkörnigen Boden eine Saugspannung ψ im Bereich pF = 5 bzw. 6 aus und führt analog zum Schrumpfversuch zu einer entsprechenden Entwässerung bzw. Trocknung.
- Im Boden selbst nimmt aber der Einfluss von Temperaturgradienten mit zunehmender Tiefe deutlich ab. Abb. 3.15 zeigt einen typischen Jahresgang durch Temperaturprofile im Februar und August. Im Oberbodenbereich sind typische Tageszwickel angedeutet.

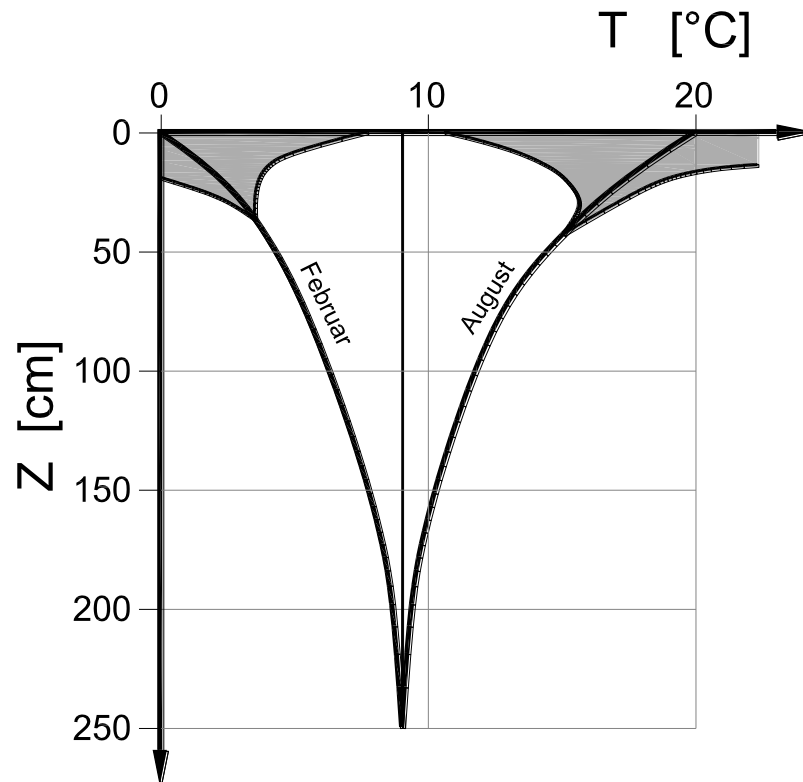


Abb. 3.15: Charakteristische Temperaturprofile eines Bodens im Februar und August (nach RICHTER, 1986)

- Danach dringen die jährlichen Temperaturschwankungen wesentlich tiefer in den Boden ein als die täglichen. Die Mitteltemperatur in ca. 2 m Tiefe ist dabei ungefähr gleich dem Jahresmittel der Lufttemperatur über dem Boden.

Anisotherme Bedingungen:

- In der gasförmigen Phase kann Wasser als Wasserdampf bewegt werden z.B. durch eine konvektive Luftbewegung oder auch Diffusionsvorgänge.
- Maßgebende Ursachen für einen Wasserdampftransport sind Temperatur- und untergeordnet Feuchtegradienten.
- Die sich im Boden einstellenden Dampfdruckgradienten führen zu einem Abströmen des Wasserdampfes von wärmeren Regionen zu Regionen niedriger Temperatur. In kälteren Bodenpartien kondensiert Wasserdampf, wenn der Sättigungsdampfdruck überschritten wird.
- Die Wasserdampfbewegung ist ein Diffusionsprozess.
- Bei natürlichen Bodenprofilen ist eine Wasserbewegung infolge von thermischen Gradienten allenfalls im unmittelbaren Bereich der Bodenoberfläche, d.h. den ca. oberen 1,2 – 1,5 m zu beachten, da es dort infolge z.B. der Sonneneinstrahlung zu nennenswerten Temperaturgradienten kommen kann.



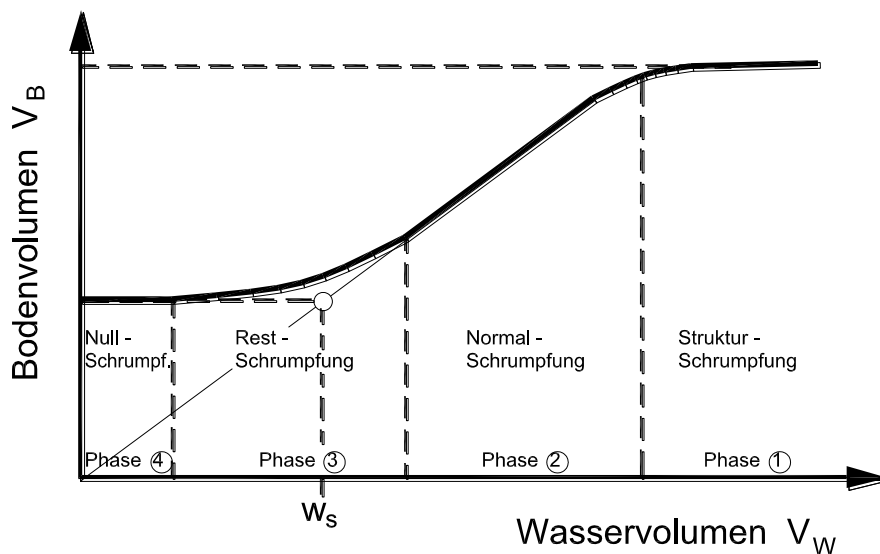
- Hierzu zählen auch Temperaturunterschiede, die in Sonderfällen im Kontakt von nicht ausreichend isolierten Gründungssohlen zum gewachsenen Boden auftreten können (z.B. Kühlräume, Heizräume, Brennöfen).
- Von besonderer Bedeutung für die anisothermen Wasserbewegungen im Boden sind damit die Eigenschaften des Wasserdampfes unter Temperatureinfluss.
- In einem **geschlossenen System** mit genügend viel Flüssigkeit stellt sich nach einiger Zeit ein Gleichgewicht zwischen flüssiger und gasförmiger Phase ein, pro Zeiteinheit verdampfen und kondensieren gleich viele Wasserteilchen. Die Menge der Flüssigkeit bleibt konstant.
- Schlussfolgerungen

Bei z.B. einem durch eine Grundwasserabsenkung in einem Grundwasserleiter unter einer bindigen Zwischenschicht sich einstellenden teilgesättigten Milieu ist bei geschlossenem System und weitgehender Temperaturkonstanz deshalb immer von einer vollständigen Sättigung der Dampfphase in der Porenluft auszugehen, d.h. eine relative Luftfeuchte (RH) im Porenraum kann mit ~ 100 % angenommen werden. Aus der umgeformten KELVIN-Gleichung folgt daraus, dass die Saugspannung ψ gegen Null geht und damit eine Entwässerung einer überlagernden wasserhaltigen Tonschicht aufgrund von Saugspannungen ausgeschlossen werden kann.

4. Theoretische Grundlagen zum Schrumpfverhalten von Böden

4.1 Mechanismus des Schrumpfens, Schrumpfphasen

- Schrumpfprozesse entstehen bei zunehmender Entwässerung bzw. Wasserspannung in einem Boden.
- Einzelne Phasen werden in Abb. 4.1 erläutert.
- Bei einer Wiederbefeuchtung wird der Ausgangszustand nicht mehr erreicht (Irreversibilität).



Phase 1: Strukturschrumpfung (Entwässerung)

- $\frac{\Delta V_B}{\Delta V_W} \ll 1$
- Entleerung grober Poren,
 - Übergang vom gesättigten in den teilgesättigten Zustand der Gesamtprobe.

Phase 2: Normalschrumpfung (Bodenverdichtung) infolge Kapillarkraft des Wassers

- $\frac{\Delta V_B}{\Delta V_W} = 1$
- Wasserverlust führt zu gleich großer Volumenabnahme (1:1),
 - Annäherung der Bodenteilchen, Zunahme der Trockendichte ρ_d , Abnahme der Porenzahl e ,
 - kein Luftzutritt.

Phase 3: Restschrumpfung (Wasserverlust mit nur geringer Volumenabnahme) infolge von Hydrationskräften

- $\frac{\Delta V_B}{\Delta V_W} < 1$
- Wassergehaltsreduktion bis unter die Ausrollgrenze w_p ,
 - Kaum mehr weitere Annäherung der Bodenteilchen möglich,
 - Wasserverlust > Volumenabnahme,
 - Luftzutritt.

Phase 4: Nullschrumpfung (Wasserverlust ohne weitere Volumenabnahme)

- $\frac{\Delta V_B}{\Delta V_W} = 0$
- stabile Bodenmatrix, nur noch geringe Wasserabgabe,
 - drastische k-Wert-Abnahme zwischen Phase 1 und Phase 4

Abb. 4.1: Schrumpfphasen (schematisch) wassergesättigter, feinkörniger Böden

4.2 Schrumpfkurve – Entwässerungskurven

- Qualitative Darstellung in Abb. 4.2.
- Geringe Saugspannungen sind erforderlich bei hohen Ausgangswassergehalten und entsprechend niedrigen Trockendichten.
- Mit zunehmender Abtrocknung steigt die erforderliche Saugspannung exponentiell an.
- Im Bereich der Schrumpfgrenze w_s liegen die erforderlichen Saugspannungen ψ bei pF 4 bis 5.

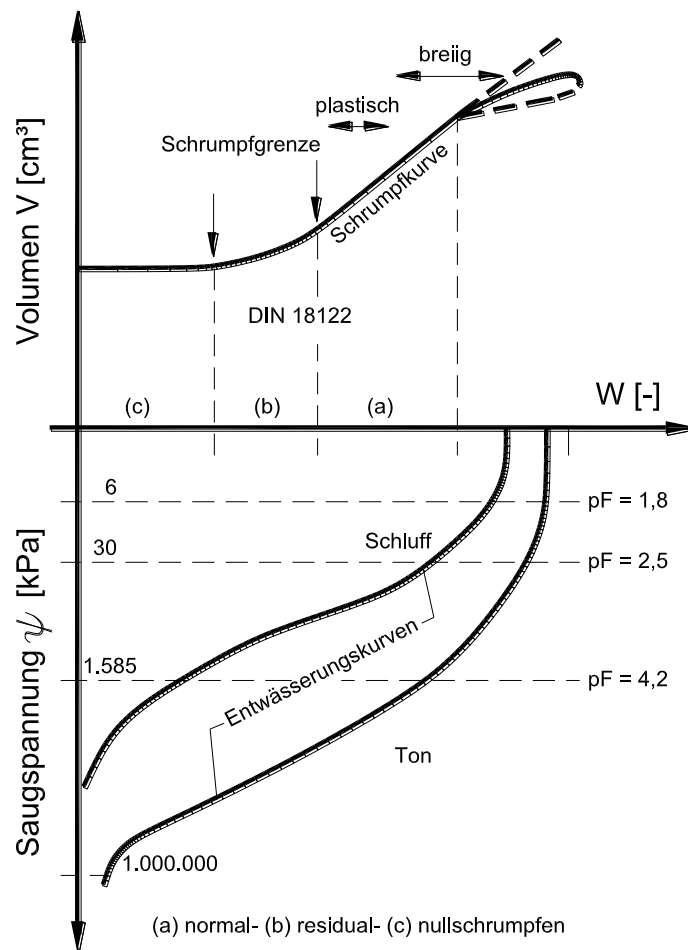
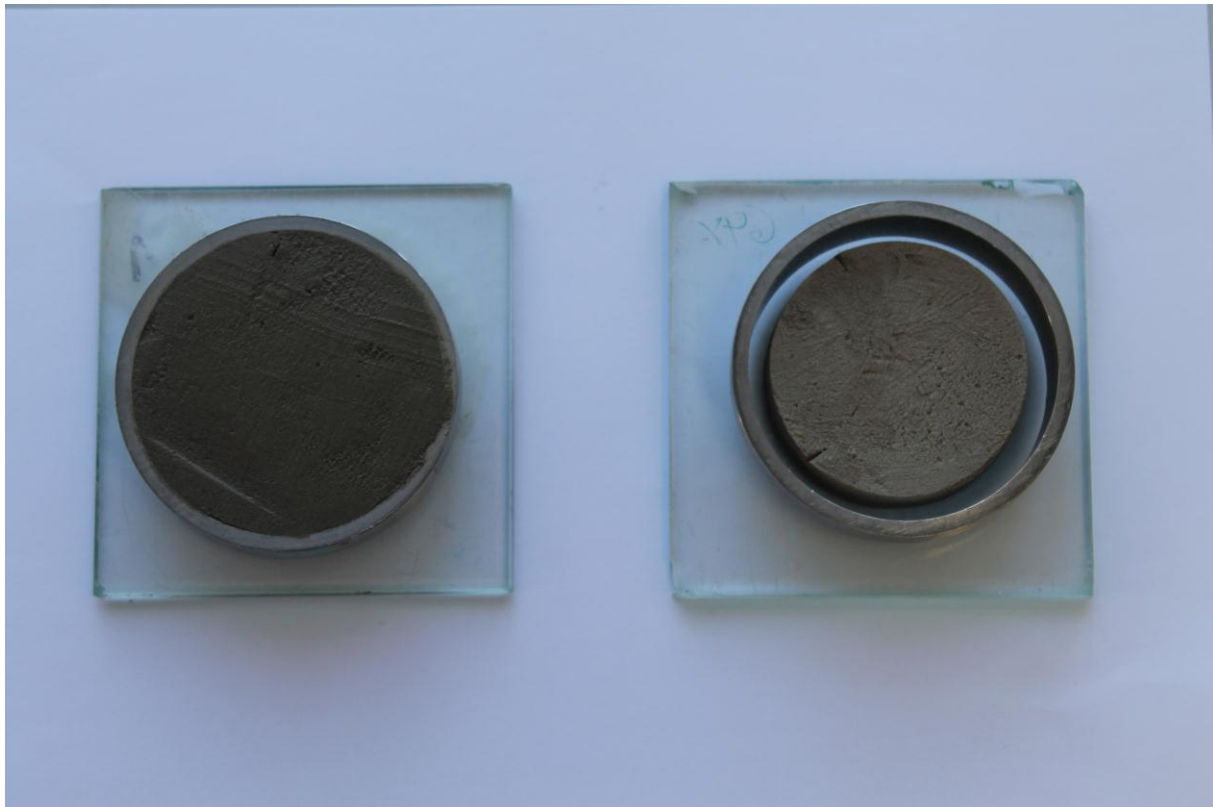


Abb. 4.2: Qualitativer Verlauf der Schrumpfkurve mit typischen Entwässerungskurven (WITT, ZEH, 2004)

4.3 Indexparameter

Schrumpfgrenze w_s nach DIN 18122 T2

- Ermittlung im Versuch (Abb. 4.3)



a)

b)

Abb. 4.3: Schrumpfversuch nach DIN 18122

- a) nach Einbau
- b) nach völliger Abtrocknung

- Berechnungsformel:

$$w_s = \left(\frac{V_d}{m_d} - \frac{1}{\rho_s} \right) \cdot \rho_w \quad \text{mit:}$$

V_d = Volumen des trockenen Probekörpers (cm^3)

m_d = Trockenmasse des Probekörpers (g)

ρ_s = Korndichte des Bodens (g/cm^3)

ρ_w = Dichte des Wassers (g/cm^3)



- Näherungsformel nach KRABBE (1958)

$$w_s = w_L - 1,25 \cdot I_p \quad [1] \quad \text{mit:}$$

w_L = Wassergehalt an der Fließgrenze [1]

I_p = Plastizitätszahl = $w_L - w_P$ [1]

w_P = Wassergehalt an der Ausrollgrenze [1]

- Volumetrische und lineare Schrumpfung

- Das **Volumenschrumpfmaß** oder die **volumetrische Schrumpfung** ε_v ist wie folgt definiert:

$$\varepsilon_v = \left(\frac{V - V_d}{V} \right) \cdot 100 \quad [\%] \quad \text{mit:}$$

V = Probenvolumen vor Trocknung (cm³)

V_d = Probenvolumen nach Trocknung (cm³)

- Die volumetrische Schrumpfung ε_v kann für ein näherungsweise gesättigtes Material und der Annahme, dass die Volumenänderung bei $w < w_s$ vernachlässigbar ist, über den Ansatz (DÜLLMANN, 2010) berechnet werden:

$$\varepsilon_V = 1 - \frac{1 + w_s \cdot \rho_s}{1 + w \cdot \rho_s} \quad [1] \quad \text{mit:}$$

w_s = Wassergehalt an der Schrumpfgrenze

ρ_s = Rohdichte des Bodens [g/cm³]

w = Ausgangswassergehalt des Bodens [1]

Die **lineare Schrumpfung** ε_L beträgt etwa 1/3 der volumetrischen Schrumpfung. Es gilt:

$$\varepsilon_L = \frac{\varepsilon_v}{3} \quad [\%]$$

- Die lastunabhängige Schrumpfung ε_L kann mit der bezogenen Setzung s' infolge einer äußeren Auflastspannung σ in vertikale Richtung verglichen werden.

- Weitere Bewertungsansätze:

- Schrumpfzahl $S = w - w_s$

- Schrumpfindex $I_s = w_L - w_s$

- Baugrundcharakterisierung über ε_v (Tab. 4.1)

Tab.: 4.1: Zusammenhang zwischen Volumenschumpfmaß ϵ_v , Baugrundbeschaffenheit und Schrumpff Gefahr (SCHEIDIG, 1937)

| Schrumpfmaß ϵ_v [%] | Baugrundbeschaffenheit | Schrumpff Gefahr |
|------------------------------|------------------------|------------------|
| < 5 | gut | gering |
| 5 – 10 | mittel | mittel |
| >10 - 15 | schlecht | hoch |
| >15 | sehr schlecht | sehr hoch |

5. Verhältnisse im konkreten Untersuchungsraum

5.1 Auswahlkriterien, räumliche Einordnung

- Abdeckung der Spannweite von leicht- bis hochplastischen Tonen (TL – TA) nach DIN 18196 mit unterschiedlichen, aber charakteristischen Schrumpfparametern und Schrumpfpotenzialen bei Wassergehaltsänderungen.
- Horizonte, die von Wasserhaltungsmaßnahmen beeinflusst werden können oder bereits betroffen worden sind und sich u.U. infolge schrumpfungsbedingter Bodenverformungen auf Bauwerke schädlich auswirken.
- Bodenschichten, bei denen auf belastbare, ausreichend große Datensätze (Stichprobengrößen) – einschließlich Parameter zum Schrumpfverhalten – zurückgegriffen werden kann.
- Lage der Gewinnungsstellen nach Abb. 5.1.

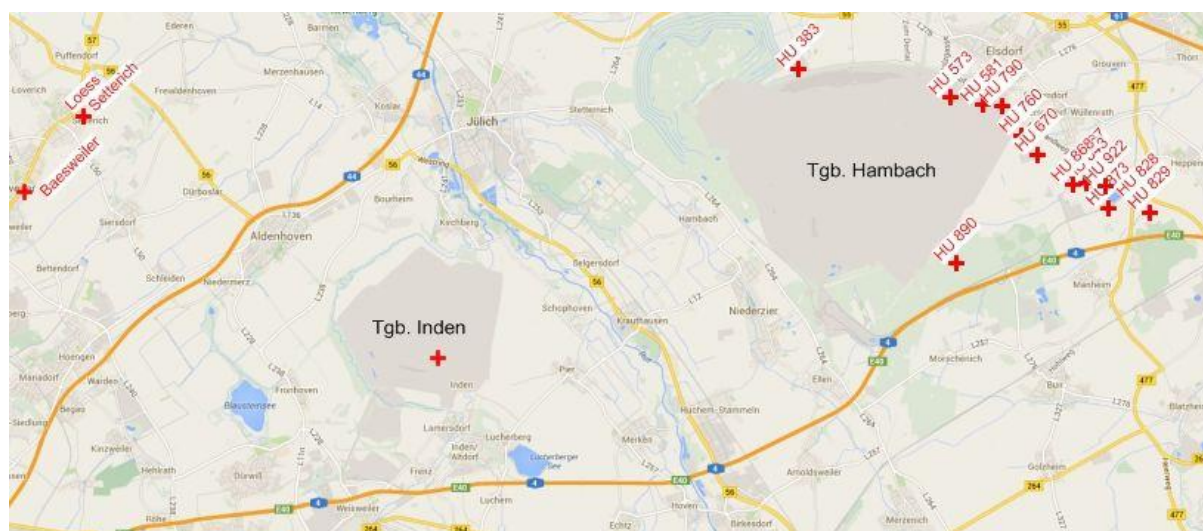


Abb. 5.1: Lage der Gewinnungsstellen für repräsentatives Bodenmaterial
Bodenphysikalische Charakterisierung

- Kornverteilung (Abb. 5.17)

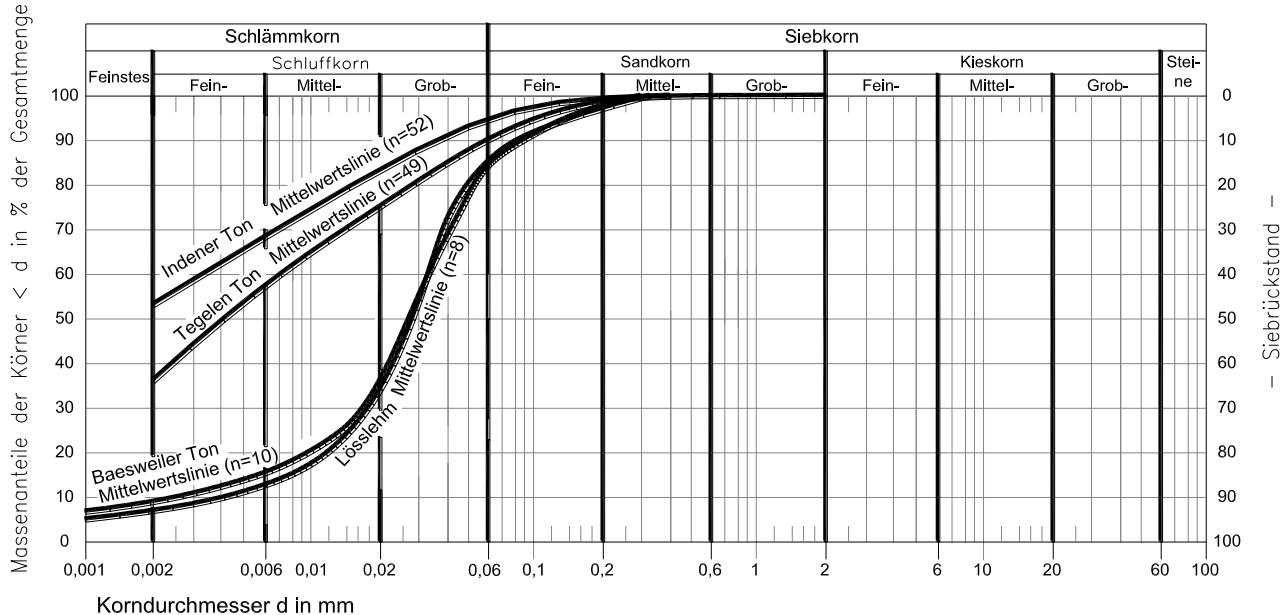


Abb. 5.17: Mittelwertlinien der untersuchten Horizonte

- Plastizität (Abb. 5.18)

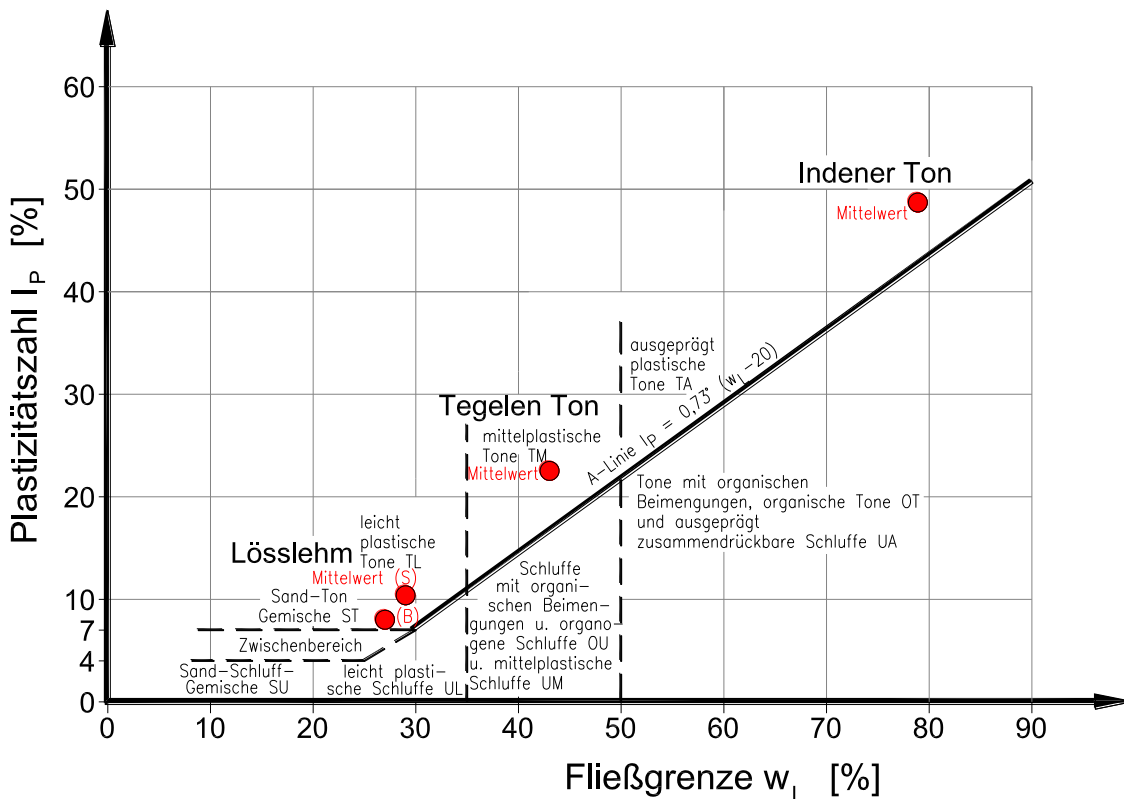


Abb. 5.18: Plastizitätsdiagramm mit Eintragung der Mittelwerte
 - Schrumpfverhalten (Abb. 5.5 + 5.10)

Lößlehm:

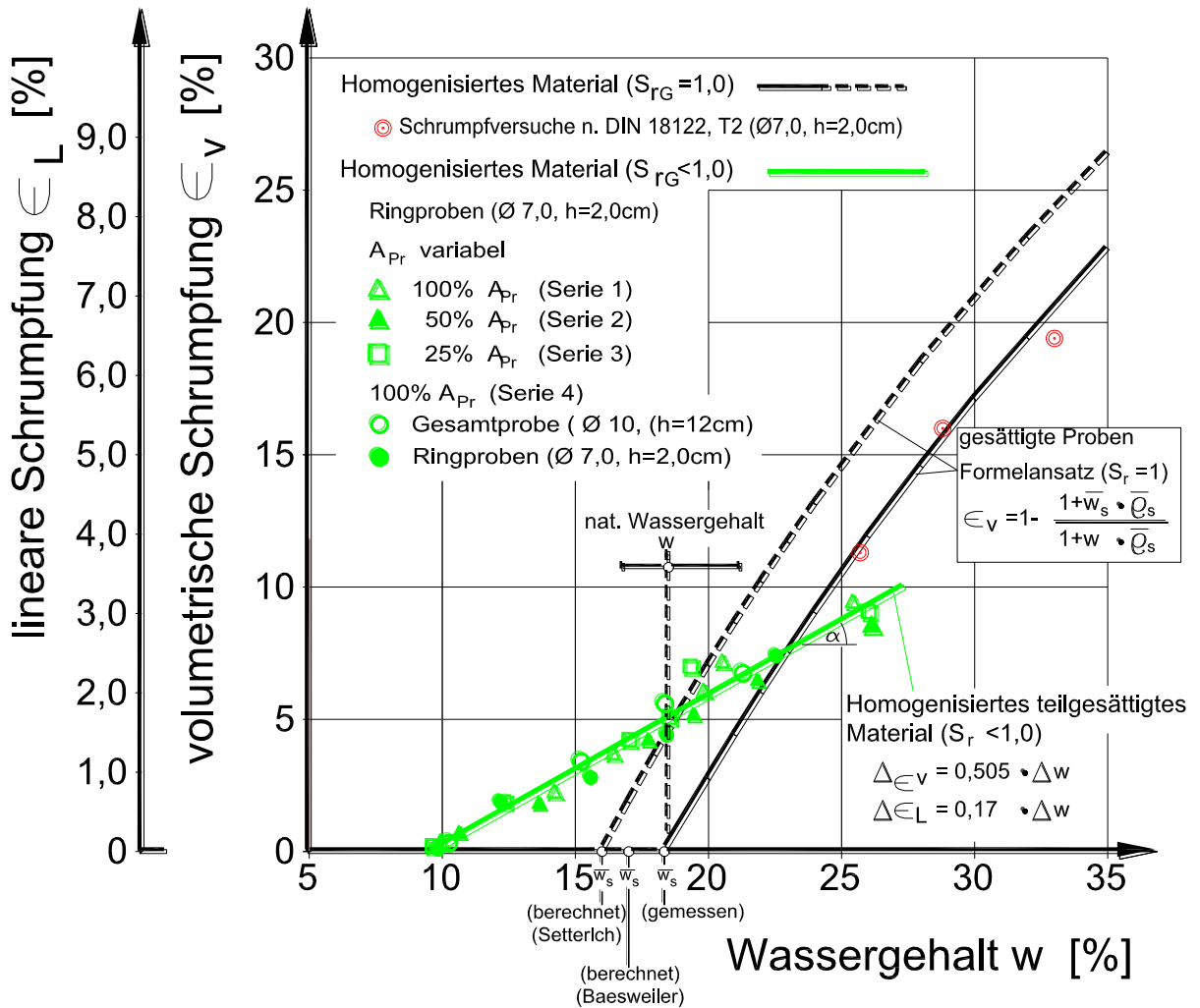


Abb. 5.5: Beziehung zwischen Schrumpfmaß ϵ_v , ϵ_L und dem Wassergehalt für gesättigte ($S_r = 1$) und teilgesättigte Proben ($S_r < 1$, $\rho_d = \text{variabel}$) (DÜLLMANN, 2010)

Tegelen-Ton

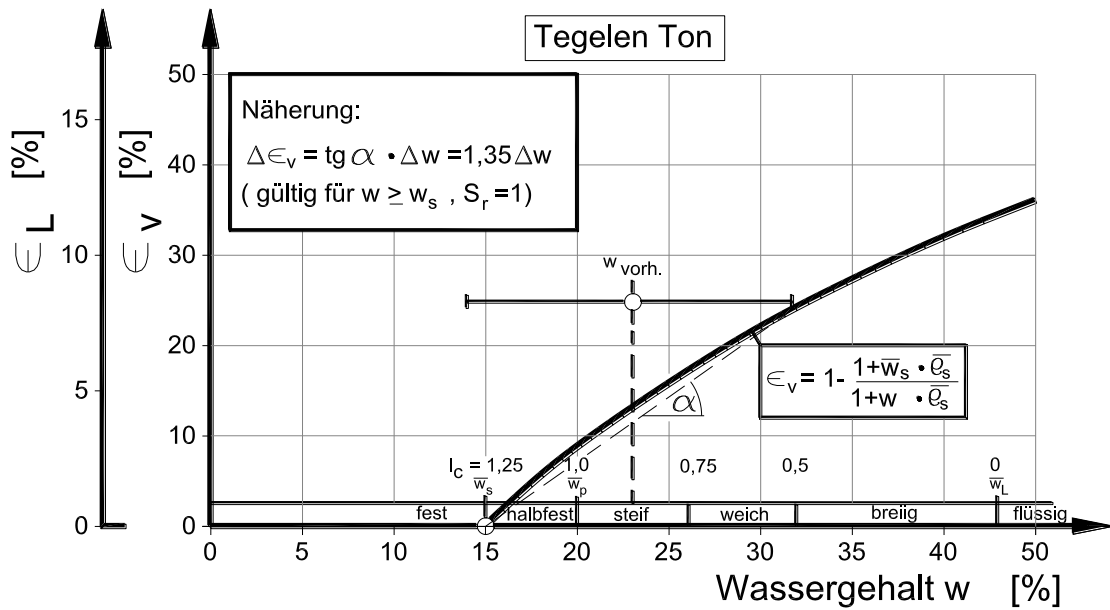


Abb. 5.10: Beziehung zwischen der Volumenschrumpfung ϵ_v , der linearen Schrumpfung ϵ_L und dem Wassergehalt w für weitgehend wassergesättigte Proben des Tegelen-Tons (Hambach)

- Statistische Gesamtauswertung (Tab. 5.1)



Tab. 5.1: Statistische Gesamtauswertung der Daten

| Kennwert | Dim. | Lösslehm (Setterich) | | | | Lösslehm (Baesweiler) | | | | Tegelen-Ton (13E) | | | | Indener-Ton (7A) | | | |
|--|-------------------|----------------------|-----------|-------|-------|-----------------------|-----------|------|------|-------------------|-----------|------|-------|------------------|-----------|------|-------|
| | | n | \bar{x} | s | v | n | \bar{x} | S | v | n | \bar{x} | s | v | n | \bar{x} | s | v |
| Tongehalt T | % | 8 | 6,4 | 3,9 | 0,60 | 10 | 8,9 | 3,3 | 0,37 | 49 | 36,0 | 12,2 | 0,34 | 52 | 53,5 | 7,5 | 0,14 |
| Schluffgehalt U | % | 8 | 78,6 | 6,1 | 0,08 | 10 | 78,8 | 3,6 | 0,05 | 49 | 54,5 | 12,3 | 0,22 | 52 | 43,6 | 8,5 | 0,196 |
| Sandgehalt S | % | 8 | 15,0 | 5,7 | 0,38 | 10 | 12,3 | 5,3 | 0,43 | 49 | 9,5 | 7,8 | 0,82 | 52 | 2,9 | 5,6 | 1,96 |
| Korndichte ρ_s | g/cm ³ | 8 | 2,709 | 0,4 | 0,001 | 3 | 2,69 | - | - | 32 | 2,656 | 0,04 | 0,017 | 52 | 2,572 | 0,02 | 0,009 |
| Feuchtdichte ρ | g/cm ³ | 8 | 1,903 | 0,121 | 0,064 | 10 | 1,96 | 0,04 | 0,02 | 33 | 1,996 | 0,09 | 0,045 | 52 | 1,819 | 0,02 | 0,015 |
| Trockendichte ρ_d | g/cm ³ | 8 | 1,607 | 0,117 | 0,073 | 10 | 1,664 | 0,02 | 0,02 | 33 | 1,626 | 0,12 | 0,079 | 52 | 1,357 | 0,03 | 0,023 |
| Wassergehalt w | % | 8 | 18,5 | 1,7 | 0,094 | 10 | 18,0 | 3,0 | 0,15 | 33 | 23,1 | 4,6 | 0,197 | 52 | 34,1 | 1,9 | 0,055 |
| Porenzahl e | 1 | 8 | 0,694 | 0,133 | 0,192 | 10 | 0,617 | 0,03 | 0,04 | 32 | 0,643 | 0,14 | 0,218 | 52 | 0,897 | 0,04 | 0,047 |
| Sättigungsgrad S_r | 1 | 8 | 0,734 | 0,093 | 0,126 | 10 | 0,775 | 0,10 | 0,13 | 32 | 0,953 | 0,05 | 0,055 | 52 | 0,979 | 0,03 | 0,032 |
| Fließgrenze w_L | % | 8 | 29,0 | 3,7 | 0,128 | 10 | 27,0 | 2,0 | 0,09 | 33 | 42,8 | 7,6 | 0,178 | 52 | 78,9 | 7,7 | 0,098 |
| Ausrollgrenze w_P | % | 8 | 18,6 | 1,4 | 0,077 | 10 | 19,0 | 2,0 | 0,10 | 33 | 20,6 | 4,2 | 0,203 | 52 | 30,2 | 3,6 | 0,12 |
| Plastizitätszahl I_P | % | 8 | 10,4 | 4,6 | 0,447 | 10 | 8,0 | 2,0 | 0,22 | 33 | 22,2 | 5,9 | 0,264 | 52 | 48,7 | 8,6 | 0,177 |
| Konsistenz. I_C | 1 | 8 | 1,088 | 0,336 | 0,309 | 10 | 1,23 | 0,46 | 0,37 | 33 | 0,858 | 0,23 | 0,273 | 52 | 0,934 | 0,18 | 0,193 |
| Vol. Wassergehalt θ | % | 8 | 29,6 | 2,0 | 0,068 | 10 | 29,6 | 4,2 | 0,14 | 33 | 37,0 | 4,8 | 0,13 | 52 | 46,3 | 1,8 | 0,039 |
| Aktivitätszahl. I_A | 1 | 8 | 1,9 | 0,8 | 0,42 | 10 | 1,04 | 0,53 | 0,52 | 33 | 0,67 | 0,35 | 0,52 | 52 | 0,911 | 0,11 | 0,127 |
| Enslin-Wasserg. w_E | 2 | 52,0 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 52 | 87,1 | - | - |
| Glühverlust V_{Gl} | % | n.b. | - | - | - | - | - | - | - | 26 | 5,1 | 1,5 | 0,294 | 52 | 15,7 | 1,4 | 0,087 |
| Schrumpfgr. $w_s^{1)}$ | % | 8 | 16,0 | 2,4 | 0,151 | 10 | 17,0 | 2,0 | 0,12 | 33 | 15,0 | 4,8 | 0,282 | 52 | 17,2 | 5,0 | 0,277 |
| Schrumpfgr. $w_s^{2)}$ | % | 3 | 18,4 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | 52 | 19,3 | 8,4 | 0,435 |
| Schrumpfz. $S = w_s - w$ | % | 8 | 2,0 | 4,0 | 1,618 | 10 | 1,0 | 4,0 | 6,9 | 33 | 8,1 | 4,0 | 0,491 | 52 | 16,8 | 5,6 | 0,345 |
| Vol. Schrumpfung. $\varepsilon_v^{1)}$ | % | 8 | 4,3 | 7,0 | 1,64 | 10 | 1,0 | 7,0 | 9,1 | 31 | 13,4 | 5,7 | 0,428 | 52 | 22 | 7,5 | 0,339 |
| Lin. Schrumpfung $\varepsilon_L^{1)}$ | % | 8 | 1,4 | 2,3 | 1,64 | 10 | 0,3 | - | - | 31 | 4,5 | 1,9 | 0,422 | 52 | 7,3 | 2,5 | 0,342 |
| Vol. Schrumpfung $\varepsilon_v^{2)}$ | % | 8 | 5,2 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| Lin. Schrumpfung $\varepsilon_L^{2)}$ | % | 8 | 1,7 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |

1) berechnet

2) gemessen



5.3 Zusammenfassende Bewertung

Für die Schrumpfgefährdung einer oberflächennahen Tonschicht (Gründungsboden) spielen folgende Einflussgrößen eine Rolle:

- Wassergehalt des Bodens im natürlichen Zustand relativ zu dem materialspezifischen Schrumpf-Wassergehalt w_s - ausgedrückt durch die Schrumpfungszahl S und das Schrumpfmaß ε_v bzw. ε_L (s.a. Abschn. 4.4.2). S und ε sind damit Indikatoren für das Schrumpfpotenzial. Für den nahezu ausschließlich anstehenden Lösslehm (= leicht plastischer Ton nach DIN 18196) ist die Schrumpfungszahl S mit 1 bzw. 2 % besonders niedrig.
- Da sich die Schrumpfgrenzen w_s der unterschiedlichen Bodengruppen (s. Tab. 5.1) nur unwesentlich voneinander unterscheiden, andererseits aber die Wassergehalte in natürlicher Lagerung mit zunehmender Bindigkeit ansteigen, steigt auch das Schrumpfpotenzial von TL über TM nach TA an.
- Sättigungsgrad S_r des bindigen Bodens. Bei gleichem Ausgangswassergehalt fällt das Schrumpfmaß für ein wassergesättigtes Material deutlich höher aus als bei einem nur teilgesättigten Material. Der Vergleich der Daten für einen ungesättigten Lösslehm (TL) mit denen eines nahezu gesättigten TM- bzw. TA-Bodens bestätigt diese These.
- Die beispielhaft für die drei Böden der Gruppen TL, TM, TA ermittelten inkrementellen Werte für $\Delta\varepsilon_v$, $\Delta\varepsilon_L = f(\Delta w)$ sind für die betrachteten Wassergehaltsbereiche zwar als konstant anzusehen, mit zunehmender Annäherung des natürlichen Wassergehaltes an die Schrumpfgrenze (s.a. Abschn. 4.3) steigt gleichzeitig aber die erforderliche exponentielle Saugspannung an, um dem Boden Wasser zu entziehen.

6. Anwendung der Grundlagen auf unterschiedliche Untergrund- und thermodynamische Belastungssituationen sowie Auswirkungen auf die Tagesoberfläche mit einer Bebauung

6.1 Oberflächennahe Mehrschichtsysteme mit und ohne Abdeckung sowie mit und ohne Grundwasseranschluss

Behandelte Lastfälle

Oberseite

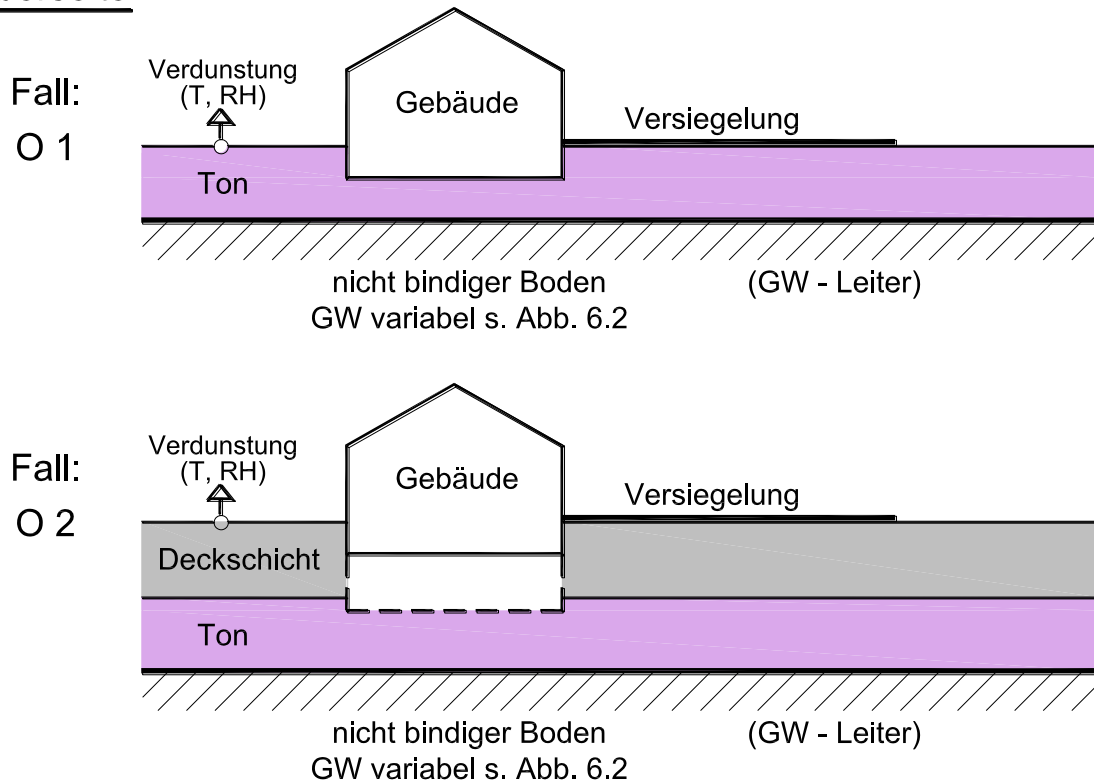


Abb. 6.1: Randbedingungen für den Schrumpfvorgang bei natürlicher Lagerung, ohne und mit Versiegelung der Oberfläche



Unterkante

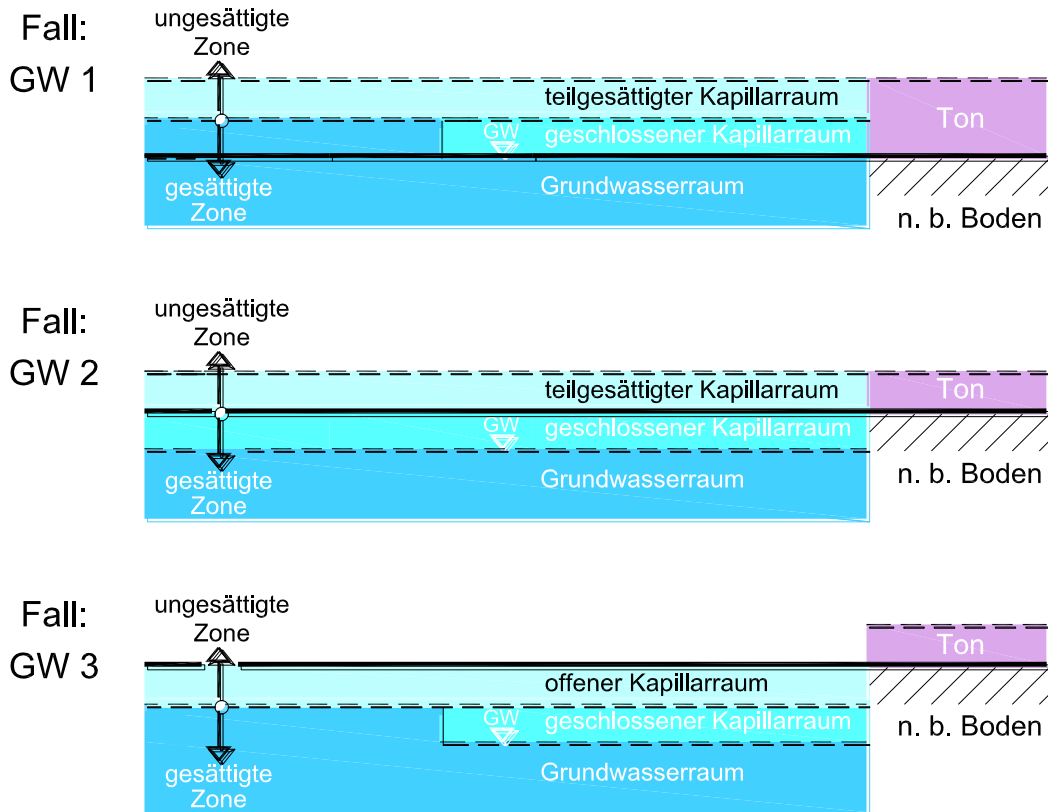


Abb. 6.2 GW-Situationen an der Unterseite einer Tonschicht ohne und mit GW-Absenkung

Sonstige Einwirkungen von der Oberfläche

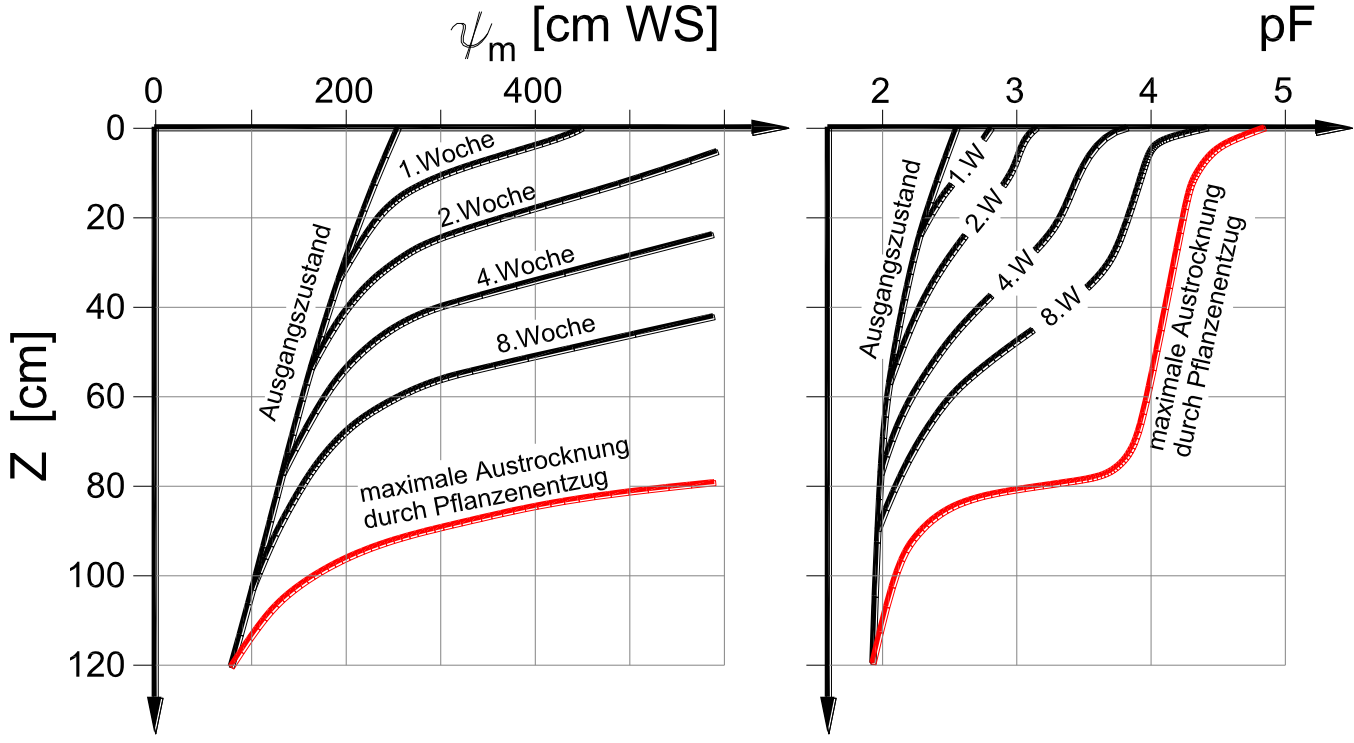


Abb. 6.4: Langfristiger Austrocknungsvorgang bei einem unbewachsenen Lössboden (RICHTER, 1986)

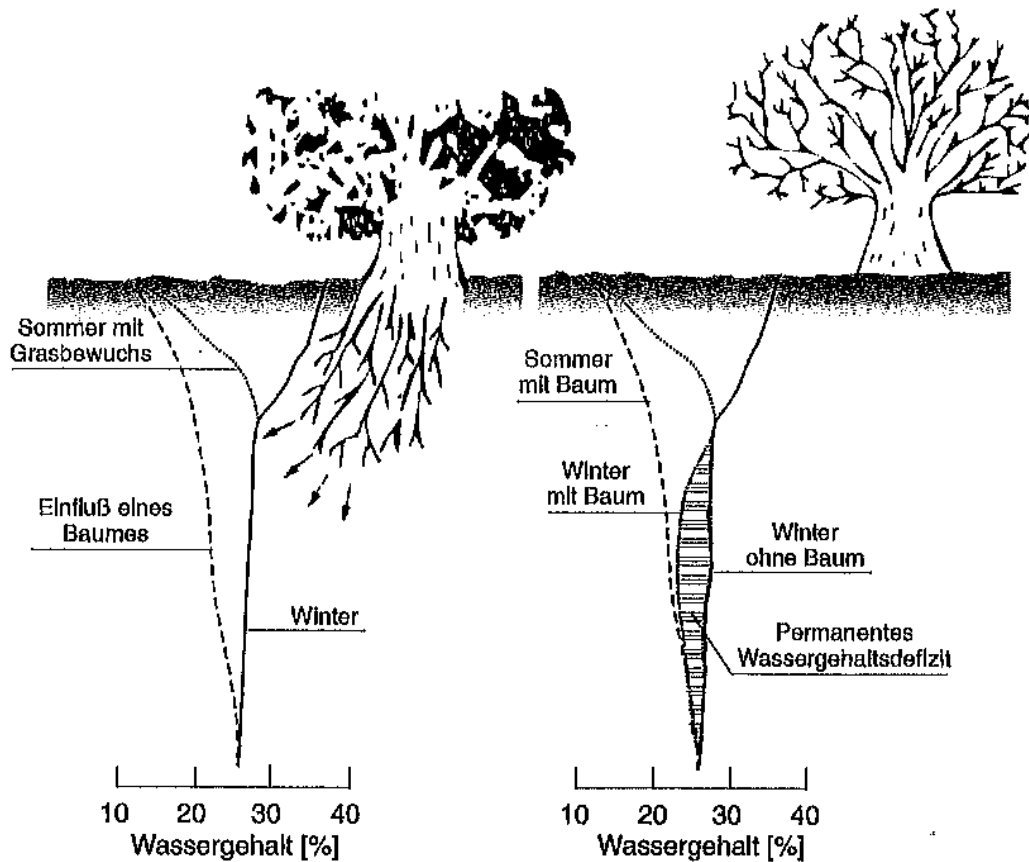


Abb. 6.5: Einfluss eines Baumes auf den Bodenwassergehalt bei Tonböden (BODEN/DRISCOLL, 1987)

Schrumpfsetzungen

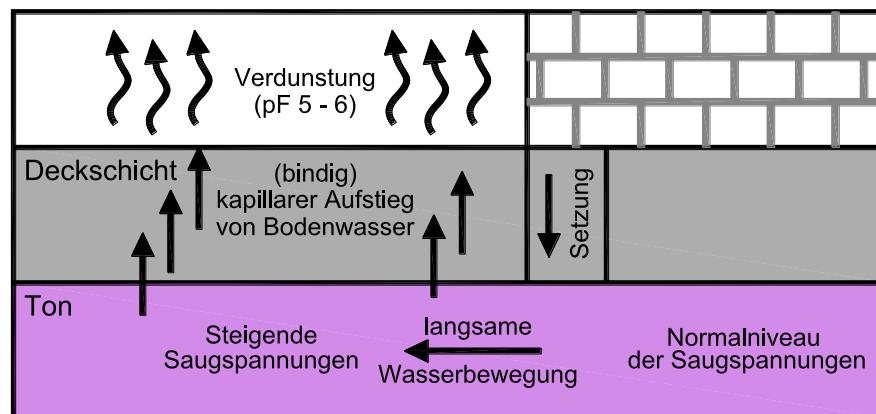


Abb. 6.6: Mechanismus der Bodenverformung bei Wasserentzug (BACHMANN, 1998)



Schlussfolgerungen

- In einem feinkörnigen, stark bindigen Gründungsboden sind grundsätzlich als Folge von durch Wassergehaltsänderungen hervorgerufene Feuchtebewegungen und Schrumpfprozesse Setzungserscheinungen und in deren Folge Bauwerksschäden möglich.
- Besonders komplex sind diese Vorgänge, wenn sie durch Verdunstungsprozesse von der Oberfläche aus initiiert werden. Solche möglichen Setzungen und Setzungsunterschiede sind jedoch mehr standort- und bauwerksspezifisch und gehen i.d.R. nicht auf bergbauliche Aktivitäten zurück.
- Wie die vergleichenden Untersuchungen für drei feinkörnige Böden mit unterschiedlichen Tongehalten und Plastizitätszahlen gezeigt haben, wird das Schrumpfpotenzial durch den Abstand des natürlichen Wassergehaltes zur Schrumpfgrenze bestimmt und zeigt generell einen signifikanten Anstieg mit dem Tongehalt.
- Für den Bereich des Rheinischen Braunkohlenreviers spielen diese durch Schrumpfprozesse hervorgerufenen Setzungen im oberflächennahen Bereich eher eine untergeordnete Rolle, weil die natürliche Deckschicht überwiegend aus Lösslehm besteht mit einem ausgesprochen niedrigen Schrumpfpotenzial. Dieses ist i.W. durch den relativ niedrigen Tongehalt und den natürlich vorhandenen geringen Abstand der Wassergehalte von der Schrumpfgrenze bedingt.
- Setzungsrelevante Bedingungen können im Einzelfall in oberflächennahen Schichten zwar gegeben sein, z.B. wenn ein bisher vorhandener Kapillarwasser-Nachschub von unten bei von oben einwirkenden Saugspannungen einen Schrumpfungsprozess bevorzugt unter Außenfundamenten verhindert hat und dieser infolge einer GW-Absenkung wegfällt.
- Die GW-Absenkung in oder unter der Deckschicht selbst bleibt dagegen ohne Auswirkungen auf den Sättigungs- und damit Saugspannungszustand und führt folglich auch nicht zu lastunabhängigen Schrumpfsetzungen.
- Aus dem abgesenkten GW-Leiter wirken wegen der Wasserdampfsättigung der Porenluft keine Saugspannungen auf den überlagernden Ton ein.

6.2 Tiefliegende Mehrschichtsysteme unter dem Einfluss von Sumpfungsmaßnahmen

Hydrogeologische Randbedingungen

- Die im Rheinischen Braunkohlenrevier vertretenen wasserstauenden Tonhorizonte und Braun-kohlenflöze trennen das Grundwasser in mehrere übereinander angeordnete Horizonte, die mit Ausnahme des obersten, freien Grundwasserspiegels in unbeeinflusstem Zustand gespannt sind.
- Um den Braunkohleabbau im Tagebau zu sichern, müssen die Hangendgrundwasserleiter im unmittelbaren Tagebaubereich entleert und das Liegendstockwerk entspannt werden.
- Beispielhaft wird die Situation im Bereich des Tagebaus Hambach betrachtet (Abb. 6.7).

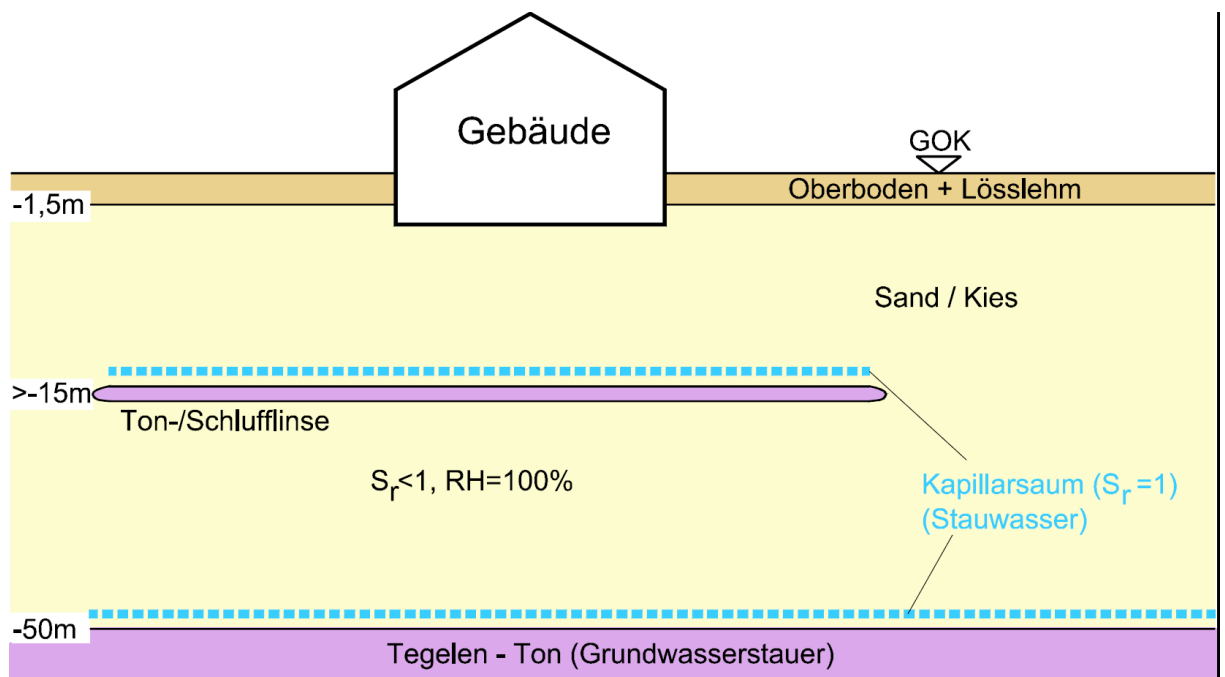


Abb. 6.7: Schichtenaufbau (schematisch) oberes Grundwasserstockwerk im Raum Hambach



Schlussfolgerungen

- In die Terrassenablagerungen des 1. Grundwasserstockwerkes eingelagerten Schluffbänder bzw. -linsen wie auch die unterlagernden GW-Stauer sind auch nach einer Grundwasserabsenkung oder Druckentspannung immer in Kontakt mit einer wassergesättigten Kapillarzone (2-Phasen-System) oder einer teilgesättigten Bodenzone aber mit vollständiger Sättigung der Dampfphase im Porenraum (3-Phasen-System).
- Dadurch werden eine Übertragung von Saugspannungen auf die feinkörnigen, bindigen Bodenhorizonte und damit lastunabhängige Schrumpfsetzungen vermieden.
- Eine Ausnahme können lediglich Randbereiche in Nähe der Tagebauböschungen bilden, wo die thermodynamischen Randbedingungen für ein „geschlossenes System“ nicht mehr in vollem Umfang erfüllt sind. Diese Zonen liegen aber in einem ausreichenden Abstand zu einer Wohnbebauung, weshalb durch Wasserentzug bedingte kritische Bodenverformungen auf Gebäude hier auszuschließen sind.

7. Gesamtfazit der Untersuchungen

- Sumpfbungsbedingte Schrumpfprozesse sind auf wenige Sonderfälle oberflächennaher, stark bindiger Bodenschichten beschränkt, bei denen infolge einer Sumpfbungen in oder unter der Gründungsebene Saugspannungen und in deren Folge Schrumpfprozesse eingeleitet werden können. Dieser mögliche Effekt ist bei einer Schadensanalyse im konkreten Einzelfall selbstverständlich mit zu berücksichtigen.
- Im Gegensatz zu den Verhältnissen an der Geländeoberfläche sind bei Ton/Schlufflinsen in den nichtbindigen Terrassenablagerungen oder bei grundwasserstauenden tonigen Schichten in tieferem Untergrund wegen der gegebenen grundwasserhydraulischen und thermodynamischen Randbedingungen auch im teilgesättigten 3-Phasen-System (Boden, Wasser, Luft) keine Schrumpfprozesse zu erwarten.