



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



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

Auftraggeber: Bezirksregierung Köln, Anrufungsstelle Bergschäden Braunkohle NRW, Zeughausstr. 2-10, 50606 Köln

Ansprechpartner: Herr Debusmann, Frau Heretsch

Bestellnummer: o. Nr.

Bestelldatum: 06.11.2013

Auftragnehmer: Geotechnisches Büro Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann GmbH
Neuenhofstraße 112
52078 Aachen

Projektbearbeiter: Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann

Projektnummer: 13.207

Berichtsdatum: 31.01.2014

Berichtsumfang: 98 Seiten (einschließlich Deckblatt und Inhaltsverzeichnis)
2 Anlagen



Inhaltsverzeichnis

1	Vorgang, Aufgabenstellung	1
2	Problembeschreibung und Vorgehensweis	2
2.1	Problembeschreibung	2
2.2	Vorgehensweise	4
3	Theoretische Grundlagen zum Wasserhaushalt	6
3.1	Natürlicher Wasserhaushalt im Boden	6
3.2	Gestörter Wasserhaushalt in Böden	7
3.3	Erscheinungsformen von Wasser im Boden	7
3.3.1	Kapillarwasser	9
3.3.1.1	Allgemeines	9
3.3.1.2	Entwässerung durch Gravitation	13
3.3.2	Adsorptionswasser	16
3.4	Grundlagen der Wasserbewegung in Böden	16
3.4.1	Gesättigter Boden	16
3.4.2	Ungesättigter Boden unter isothermischen Bedingungen	17
3.4.2.1	Theorie des kapillaren Potentials	18
3.4.2.2	Potenzialgleichgewicht	20
3.4.2.3	Saugspannungen und Wassergehalt	21
3.4.2.4	Kennwerte der Wasserbindung und der Porengrößenverteilung	23
3.4.2.5	Beziehung zwischen Saugspannung ψ und Partialdruck des Wasserdampfes im Boden	25
3.4.3	Ungesättigter Boden unter anisothermen Bedingungen	26
3.4.4	Wasser- und Luftleitfähigkeit für ungesättigte Bedingungen	29
3.5	Methoden zur Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Charakteristik	32
4	Theoretische Grundlagen zum Schrumpfverhalten von Böden	33
4.1	Ursachen und Mechanismen des Schrumpfens	33
4.2	Schrumpfphasen feinkörniger Böden	33
4.3	Beziehung zwischen Schrumpfkurve und Entwässerungskurven (qualitativ)	35
4.4	Definition von Indexparametern	36
4.4.1	Wassergehalt an der Schrumpfgrenze w_s	36
4.4.2	Volumetrische und lineare Schrumpfung	37
5	Verhältnisse im konkreten Untersuchungsraum	39
5.1	Auswahlkriterien	39
5.2	Räumliche Einordnung	39
5.3	Geologische Zuordnung, Grundwassersituation	40
5.4	Auswertung bodenphysikalischer Kennwerte	42
5.4.1	Gesamtauswertung	43
5.4.2	Einzelauswertung Lösslehm	45
5.4.2.1	Kornverteilung	45
5.4.2.2	Atterberg'sche Grenzwassergehalte, Konsistenzahlen	46



5.4.2.3	Trockendichten, Porenzahlen und Sättigungsgrade	47
5.4.2.4	Mineralchemische Charakterisierung	48
5.4.2.5	Parameter zur Beschreibung von Schrumpferhalten und Schrumpfpotenzial	49
5.4.2.6	Volumetrische und lineare Schrumpfung	50
5.4.2.7	Wasserspannung ψ als Funktion des volumetrischen Wassergehaltes Θ	52
5.4.3	Einzelauswertung Tegelen-Ton (Raum Hambach).....	53
5.4.3.1	Kornverteilung	53
5.4.3.2	Grenzwassergehalte, Konsistenzahlen	53
5.4.3.3	Mineralchemische Charakterisierung	54
5.4.3.4	Trockendichte, Porenzahl, Sättigungsgrad	55
5.4.3.5	Parameter zur Beschreibung von Schrumpferhalten und Schrumpfpotenzial	56
5.4.3.6	Volumetrische und lineare Schrumpfung	56
5.4.3.7	Wasserspannung ψ als Funktion des volumetrischen Wassergehaltes θ	57
5.4.4	Detailauswertung Tegelen-Ton (Raum Hambach)	58
5.4.5	Einzelauswertung Indener-Ton (7A).....	59
5.4.5.1	Kornverteilung	59
5.4.5.2	Grenzwassergehalte, Konsistenzahlen	59
5.4.5.3	Mineralchemische Charakterisierung	60
5.4.5.4	Trockendichte, Porenzahl, Sättigungsgrad	61
5.4.5.5	Parameter zur Beschreibung von: Schrumpferhalten und Schrumpfpotenzial	61
5.4.5.6	Volumetrische und lineare Schrumpfung	62
5.4.5.7	Saugspannung ψ als Funktion des volumetrischen Wassergehaltes θ	63
5.4.6	Zusammenfassende Bewertung der Materialkenndaten	64
6	Anwendung der Grundlagen auf unterschiedliche Untergrund- und thermodynamische Belastungssituationen und deren Auswirkungen auf die Tagesoberfläche mit einer Bebauung	68
6.1	Oberflächennahe Mehrschichtsysteme mit und ohne Abdeckung sowie mit und ohne Grundwasseranschluss.....	68
6.1.1	Verhältnisse an der Oberseite des Mehrschichtsystems	69
6.1.1.1	Einflussgrößen auf das Schrumpferhalten und mögliche Bodenverformungen	69
6.1.1.2	Auslösemechanismen für Bodenbewegungen (Setzungen) - Interaktion Boden/Bauwerk.....	71
6.1.1.3	Beispiele für oberflächennahe Wechselwirkungen	73
6.1.2	Verhältnisse an der Unterseite einer oberflächennahen Tonschicht.....	76
6.1.2.1	Natürliche Ausgangsbedingungen	76
6.1.2.2	Veränderte GW-Verhältnisse.....	77
6.1.3	Rechnerische Abschätzung der schrumpferbedingten Bodenverformungen.....	78
6.1.4	Zusammenfassende Bewertung und Schlussfolgerungen	78
6.2	Tiefliegende Mehrschichtsysteme unter dem Einfluss von Sumpfermaßnahmen.....	79
6.2.1	Allgemeine Angaben zur Hydrogeologie	79
6.2.2	Oberes Grundwasserstockwerk	79
6.2.2.1	Auswirkungen der Sumpfermaßnahmen und der Grundwasserneubildung.....	81
6.2.3	Tiefere Grundwasserstockwerke	82
6.2.4	Zusammenfassende Bewertung und Schlussfolgerungen	82



7	Zusammenfassende Bewertung und Beantwortung von Fragen zum klein- und großräumigen Gefährdungspotenzial für Gebäude durch Schrumpfprozesse infolge Wasserentzug.....	83
7.1	Oberflächennahe Mehrschichtsysteme	83
7.2	Tiefliegende Mehrschichtsysteme	84
7.3	Beantwortung von Einzelfragen.....	84
7.3.1	Wodurch können Wassergehaltsänderungen im Baugrund überhaupt verursacht werden?	84
7.3.2	Wie wirkt sich eine Änderung des Wassergehalts auf Böden aller Art aus?	85
7.3.3	In welcher Größenordnung und in welcher Zeitschiene verlaufen Schrumpfprozesse infolge von Sumpfungmaßnahmen?.....	85
7.3.4	Gibt es eine Zeitschiene, in der typischerweise Schäden aus fehlerhafter Gründung bzw. bauphysikalische Mängel nach Errichtung eines Hauses auftreten können?	86
7.3.5	Gibt es Erkenntnisse über das Zusammenwirken von sumpfungsbedingten Schrumpfprozessen mit anderweitigen Ursachen – z.B. fehlerhafter Gründung, nicht tragfähiger Baugrund, etc.?	87
7.3.6	Muss die Schrumpfung durch bergbaulich verursachte Wasserverluste in Tonen bzw. tonigen Böden (Schluffe) berücksichtigt werden?.....	87
7.3.7	Existieren zu der Entwässerung von tonigen Böden veröffentlichte Erkenntnisse, insbesondere zu den jeweiligen Zeitabläufen einer Entwässerung in Abhängigkeit von Tongehalten und Tonmächtigkeit?	88
8	Literaturverzeichnis.....	89



Anlagenverzeichnis

- 1 Dokumentation der Versuchsdaten
 - 1.1 Lösslehm (Setterich und Baesweiler) (Datengrundlage: GB Düllmann GmbH)
 - 1.2 Tegelen-Ton (13E) (Datengrundlage: RWE Power)
 - 1.3 Indener-Ton (7A) (Datengrundlage: GB Düllmann GmbH)
- 2 Häufigkeitsverteilungen (Histogramme) der Parameter des Tegelen-Tons nach Anl. 1.2



1 Vorgang, Aufgabenstellung

Gemäß Schreiben vom 06.11.2013 „sieht sich die Anrufungsstelle Bergschaden Braunkohle NRW seit Beginn ihrer Tätigkeit vor einen vom Bergbaubetreibenden formulierten numerus clausus möglicher Bergschadensursachen gestellt: zum einen die Einwirkungen einer hydrologisch aktiven tektonischen Störung, zum anderen ein Torfverzehr bei Aueböden infolge Sumpfung. Die letztgenannte Ursache scheint - gestützt auf Gutachten in Einzelfällen - die Problematik von Schrumpfprozessen bei Böden infolge von Wasserentzug nicht abschließend zu beschreiben“.

In dieser Richtung zielt auch eine Stellungnahme des Netzwerkes Bergbaugeschädigter e.V. des Rheinischen Braunkohlenreviers vom 15.07.2012. Unter Ziffer B) wird dort ausgeführt:

„Neben der Volumenminderung (Schrumpfung) humoser Böden infolge Luftzufuhr und Zersetzung durch Bakterien (Oxidation, Torfverzehr, Mineralisierung) muss auch die Schrumpfung durch Wasserverlust (Austrocknung in den Tonen bzw. tonigen Böden (Schluffe)) berücksichtigt werden. Dieser bergbauliche Einfluss ist bisher noch nie berücksichtigt worden, da immer nur auf humose Bestandteile hin untersucht worden ist.

Im Gegensatz zur Veränderung der humosen Bestandteile existieren zu der Entwässerung von tonigen Böden bereits veröffentlichte Erkenntnisse zu den jeweiligen Zeitabläufen einer Entwässerung in Abhängigkeit vom Tongehalt und der Tonmächtigkeit.

Dieser Untersuchungspunkt ist insofern wichtig, da Tonlinsen auch außerhalb von Aueböden in den Sand- und Kiesformationen angetroffen werden“.

Um zu einer Klärung der genannten Sachverhalte zu kommen, hat die Geschäftsstelle der Anrufungsstelle Bergschaden Braunkohle NRW, vertreten durch den Vorsitzenden, Herrn Debusmann, am 06.11.2013 den Unterzeichnenden mit der Bearbeitung eines grundsätzlichen Gutachtens beauftragt und dabei um Berücksichtigung folgender Fragen gebeten:

- Wodurch können Wassergehaltsänderungen im Baugrund überhaupt verursacht werden?
- Wie wirkt sich eine Änderung des Wassergehalts auf Böden aller Art aus?
- In welcher Größenordnung und in welcher Zeitschiene verlaufen Schrumpfprozesse infolge von Sumpfungsmaßnahmen?



- Ab welcher Größenordnung kann ein Schrumpfungsprozess kausal für eine Gebäude/Geländesetzung sein?
- Gibt es Erkenntnisse über das Zusammenwirken von sumpfungsbedingten Schrumpfprozessen mit anderweitigen Ursachen – z.B. fehlerhafter Gründung, nicht tragfähiger Baugrund, etc.?
- Gibt es eine Zeitschiene, in der typischerweise Schäden aus fehlerhafter Gründung bzw. bauphysikalische Mängel nach Errichtung eines Hauses auftreten können?

2 Problembeschreibung und Vorgehensweis

2.1 Problembeschreibung

In den oberen Schichten des Untergrundes wird die Wassergehaltsverteilung i.W. durch die Bodenart, Bodenstruktur, Niederschlag, Temperatur und Klimaverhältnisse, Tiefenlage des Grundwassers, Gefälle der Oberfläche, Vegetation und noch weitere z.B. vom Menschen verursachte Faktoren wie Grundwasserabsenkungs- und Dränmaßnahmen sowie Versiegelung der Geländeoberfläche durch Überbauung bestimmt. Andererseits sind aber auch kontrollierte und unkontrollierte Grundwasseranreicherungen über z.B. Sickergräben und defekte Grundleitungen denkbar.

Die wichtigsten Kraffteinwirkungen auf das Korngerüst von Böden sind die Gravitation und die kapillaren Spannungen. Wassergehaltsabnahmen führen immer zu Volumenminderungen, die in der Bodenmechanik mit „Schrumpfen“ oder „Schwinden“ bezeichnet werden. Schrumpfprozesse sind charakteristisch vor allem für feinkörnige Böden und sind nach der Potenzialtheorie von der Wechselwirkung zwischen dem Porenwasser und der Porenstruktur abhängig. Schrumpfprozesse bei zunehmender Entwässerung (bzw. Wasserspannung) führen zu einer Abnahme des Porenvolumens. Der wassergefüllte Porenraum wird dabei immer kleiner (Teilsättigung) oder gleich (Vollsättigung) dem Gesamtporenraum sein. Solange die Bodenteilchen die Möglichkeit haben sich einander zu nähern, resultiert daraus eine Verdichtung und Verfestigung. Je feinkörniger und wasserhaltiger ein Material ist, desto höher ist das Ausmaß möglicher Schrumpfungen infolge Abtrocknung.

Im natürlichen Zustand liegt der Boden in einem spezifischen Wassergehaltsbereich, dem in der Bodenmatrix eine bestimmte Saugspannung zugeordnet ist. Ursachen für Änderungen der Saugspannung und damit Wassergehaltsänderungen in einem gesättigten oder ungesättigten bzw.



teilgesättigten Bodenprofil können sehr komplex sein. Wesentliche Ursachen werden von DÜLLMANN (2010) beschrieben:

- Wasserbewegungen 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 Trocknung einer bindigen Bodenschicht auch dann ausgelöst, wenn entweder durch Wurzeln Wasser entzogen wird, oder durch benachbarte Schichten ein höheres Matrixpotenzial aufgeprägt wird, so dass ein Potenzialgefälle und ein konvektiver Wassertransport entstehen. Auslösende Faktoren können dabei sein:
 - Durch Luftdruckunterschiede induzierte konvektive Porenluftströmungen und Wasserdampftransporte in grobkörnigen Schichten oberhalb und/oder unterhalb einer schrumpfanfälligen, feinkörnigen Bodenschicht. Eine solche Situation kann sich z.B. in der Polsterschicht unter einer Gebäudegründung oder einer grobkörnigen Tragschicht unter einer Oberflächenversiegelung (Pflaster, Straßenbelag, etc.) einstellen.
 - Saugspannungs-Potenzialunterschiede zwischen einer wasserhaltigen feinkörnigen Bodenschicht und angrenzenden teilgesättigten grobkörnigen Bodenschichten, in denen die Bodenluft nicht mit Wasserdampf gesättigt ist.

Das Schrumpfen eines bindigen Bodens kann (nicht muss!) 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. LIPPMANN (1960) bezeichnet diese auch als Pseudobergschäden. Bereits 1927 sprachen SPACKELER und PRINZ in ihrer Veröffentlichung ebenfalls von bergschadenähnlichen Beschädigungen an Gebäuden in Gebieten ohne jeglichen Bergbaueinfluss. 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. In der chronologischen Aufstellung von PLACZEK ist auch die Untersuchung von HORN (1968) enthalten, die explizit Veränderungen der Grundwasserverhältnisse als Faktor für die Einleitung von Schwindvorgängen und daraus resultierende Schadensfälle behandelt. Auch SCHULZE/MUHS (1967) beschreiben einen Schadensfall,



bei dem als Ursache des Schrumpfens und ungleichmäßiger Setzungen eine Grundwasserabsenkung in einem Kieshorizont unter einem schluffigen Lehm festgestellt wurde. 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.

Der Nachweis dafür, dass ein Schaden ausschließlich infolge Schrumpfen eingetreten ist, wird i.d.R. über den in der Bodenmechanik eingeführten Schrumpfvorsuch nach DIN 18122, T2 geführt. Dabei wird eine homogenisierte wassergesättigte Probe mit freier Oberfläche ohne Wasseranschub an der Luft getrocknet und daraus eine quantitative Abschätzung des Schrumpfpotenzials bzw. der Schrumpfnegung vorgenommen. Bereits KÉZDI (1969) macht aber darauf aufmerksam, dass natürliche Böden nie homogen sind und die realen Verhältnisse nie so einfach wie in einem Laborversuch abgebildet werden und deshalb häufig zu Fehleinschätzungen des Schrumpfverhaltens unter natürlichen Randbedingungen führen können. Neben der Abhängigkeit des Schrumpfmaßes von der Wassergehaltsänderung spielen nicht nur die natürlichen Randbedingungen, z.B. Klima und Lage der Schichtoberfläche des bindigen Bodens in Bezug zur Geländeoberfläche eine entscheidende Rolle, sondern auch die Wechselwirkung zwischen einer schrumpfanfälligen Bodenschicht und den über- oder unterlagernden teilgesättigten Bodenschichten und den darin ablaufenden thermodynamischen Prozessen.

2.2 Vorgehensweise

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 Bodensystemen stehen, muss nachfolgend zum besseren Verständnis des Gesamtzusammenhanges zunächst auf einige theoretische Grundlagen eingegangen werden. Ohne diese Grundlagen verbleibt die vorliegende Problematik im Bereich der Spekulationen.

In **Abschnitt 3** wird zunächst der Wasserhaushalt von Böden erläutert und dabei zwischen natürlichen Randbedingungen und gestörten Verhältnissen unterschieden. Des Weiteren werden die unterschiedlichen Erscheinungsformen von Wasser in Böden beleuchtet. Es folgen die Grundlagen der Wasserbewegung in gesättigten und ungesättigten bzw. teilgesättigten Böden unter isothermen und anisothermen Bedingungen auf der Grundlage der Potenzialtheorie und die Darstellung der Beziehung zwischen Saugspannung und Wassergehalt. Die Begriffe ungesättigt oder teilgesättigt beschreiben den gleichen Zustand.



In **Abschnitt 4** wird das Schrumpfverhalten von Böden allgemein behandelt. Neben der Beschreibung der Ursachen und des Mechanismus des Schrumpfens und der Ableitung maßgebender Indexparameter werden die Zusammenhänge zwischen Ausgangswassergehalt, Ausgangstrockendichte und Schrumpfpotenzial gesättigter und teilgesättigter feinkörniger Materialien herausgearbeitet.

Um den konkreten, praktischen Bezug zu den Verhältnissen im Rheinischen Braunkohlenrevier herzustellen, werden in **Abschnitt 5** aus dem Geohydrologischen Normalprofil der Niederrheinischen Bucht drei Horizonte ausgewählt, die den Regionalprofilen der Tagebaue Inden und Hambach zugeordnet werden können. Es handelt sich dabei um folgende Lokalitäten:

Raum Inden:

- Quartäre Lösslehm-Decke (Holozän) (0 - 6 m u. GOK) (Setterich)
- Quartäre Lösslehm-Decke (Holozän) (0 – 10 m u. GOK) (Baesweiler)
- Tertiärer Ton (7A) der Miozänen Indener Schichten (70 -80, i.M. 75 m u. GOK)

Raum Hambach:

- Quartärer Ton (13E) der Tegelen-Schichten (Pleistozän) (32 – 60; i.M. 50 m u. GOK)

Die vorliegenden umfangreichen Datensätze bodenmechanischer Kennwerte werden statistisch ausgewertet und insbesondere die das Schrumpfverhalten und das Schrumpfpotenzial beschreibenden Indexparameter herausgearbeitet. Die möglichen Auswirkungen einer vorausgegangenen Grundwasserabsenkung an der Entnahmestelle auf die Indexparameter werden dabei besonders berücksichtigt.

Mit den theoretischen Grundlagen nach Abschn. 3 bis 4 und den konkreten Materialdaten nach Abschn. 5 werden in **Abschnitt 6** für unterschiedliche Untergrundmodelle und hydraulische Belastungssituationen die möglichen Auswirkungen eines Wasserentzugs in bindigen Horizonten auf die Tagesoberfläche einschließlich einer vorhandenen Bebauung sowie ihre zeitliche Entwicklung abgeschätzt.

Im **Schlusskapitel 7** werden die wesentlichen Ergebnisse noch einmal zusammengefasst und die aufgeworfenen Fragen zum groß- und kleinräumigen Gefährdungspotenzial durch Schrumpfprozesse in tiefer liegenden Tonhorizonten beantwortet.

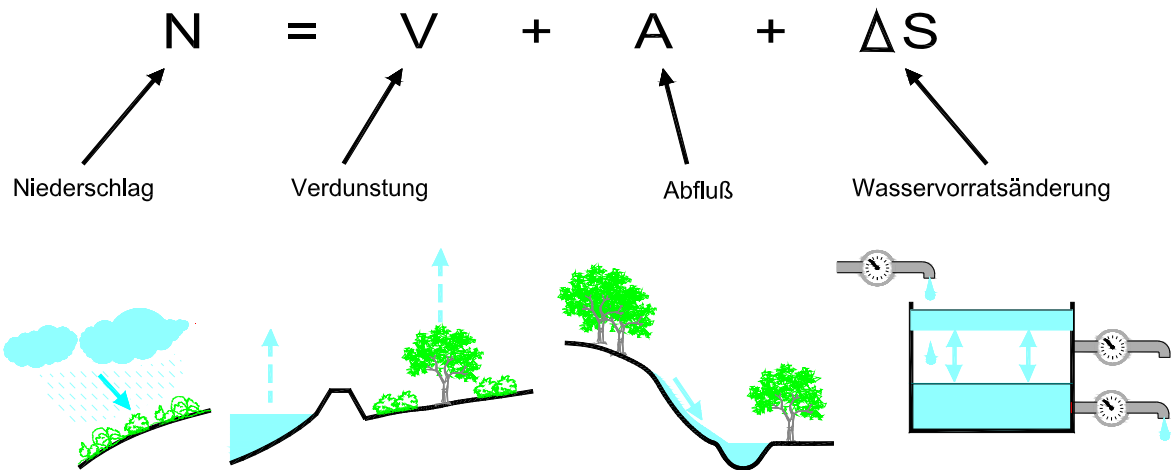
In **Abschnitt 8** werden die verwendete Literatur und Bezugsdokumente zusammengestellt.



3 Theoretische Grundlagen zum Wasserhaushalt

3.1 Natürlicher Wasserhaushalt im Boden

Die hydrogeologische Grundgleichung (allgemein Wasser-Haushaltsgleichung) enthält die wesentlichen Komponenten des Wasserhaushalts:



Die **Verdunstung** lässt sich weiterhin in die **Evapotranspiration**, also die physiologisch regulierte Verdunstung über die Spaltöffnungen der Pflanzen und in die **Evaporation**, also die Verdunstung von Wasseroberflächen und unbewachsenem Boden unterteilen.

Der **Abfluss** wird je nachdem, ob der Prozess auf der Erdoberfläche oder darunter stattfindet, in **Oberflächenabfluss** (auf der Geländeoberfläche), **Zwischenabfluss** (im Boden oberhalb einer stauenden Grenzschicht) und **Grundwasserabfluss** (im Grundwasserbereich) bzw. **Basisabfluss** eingeteilt.

Der wesentliche Prozess für die Aufteilung in **oberirdischen** und **unterirdischen** Abfluss ist die Infiltration, also das Eindringen des Wassers in den Boden. Kann Wasser nicht infiltrieren, entweder weil es z.B. zu stark regnet oder der Boden schon wassergesättigt ist, dann kommt es zu Oberflächenabfluss, wenn die Erdoberfläche geneigt ist.

Nicht alles Wasser ist ständig in Bewegung. Insbesondere der Boden und der Grundwasserspeicher, unter anderem aber auch Blattoberflächen, dienen als Wasserspeicher, die das Wasser halten können und erst zeitlich versetzt wieder abgeben.



Aufbauend auf der Wasserhaushaltsgleichung ergibt sich die Grundwasserneubildung G **langfristig** aus dem Niederschlag N , dem Oberirdischen Abfluss A_o und der Evapotranspiration E :

$$G = N - A_o - E$$

Kurzfristig wird auch die Änderung des Grundwasserstandes und des Wassergehaltes des Bodens (Vorratsänderung) ΔS berücksichtigt:

$$G = N - A_o - E + \Delta S$$

3.2 Gestörter Wasserhaushalt in Böden

Eine Störung des natürlichen Wasserhaushaltes nach Abschnitt 3.1 kann sich durch künstliche Maßnahmen wie Bodenversiegelungen durch z.B. Überbauungen oder Wasserhaltungsmaßnahmen wie Grundwasserabsenkungen einstellen. Weitere Eingriffe können Dränmaßnahmen oder Maßnahmen zur Grundwasseranreicherung (Versickerung) sein. Eine Bodenversiegelung erhöht den Oberflächenabfluss bei gleichzeitiger Reduktion der Infiltration bzw. der Grundwasserneubildung. Folge ist überwiegend eine Beeinflussung des Bodenwassers nach Art und Menge direkt unterhalb der Versiegelungs- oder Gründungsfläche. Die Grundwasserentnahme stellt eine negative Wasservorratsänderung (Aufbrauch) dar, in deren Folge der Grundwasserspiegel absinkt oder der Grundwasserleiter – wie bei Tagebau-Sümpfungsmaßnahmen - nahezu völlig entleert werden kann. Jede Grundwasserentnahme bzw. –absenkung wirkt sich gleichzeitig auf die unterschiedlichen Arten des Bodenwassers (s. Abschn. 3.3) oberhalb des veränderten freien Grundwasserspiegels aus.

3.3 Erscheinungsformen von Wasser im Boden

Eine Übersicht des Bodenwassers mit den Begriffen nach DIN 4049, T3 zeigt Abb. 3.1.

Abb. 3.2 zeigt die Erscheinungsformen des Wassers in einem Bodenausschnitt.

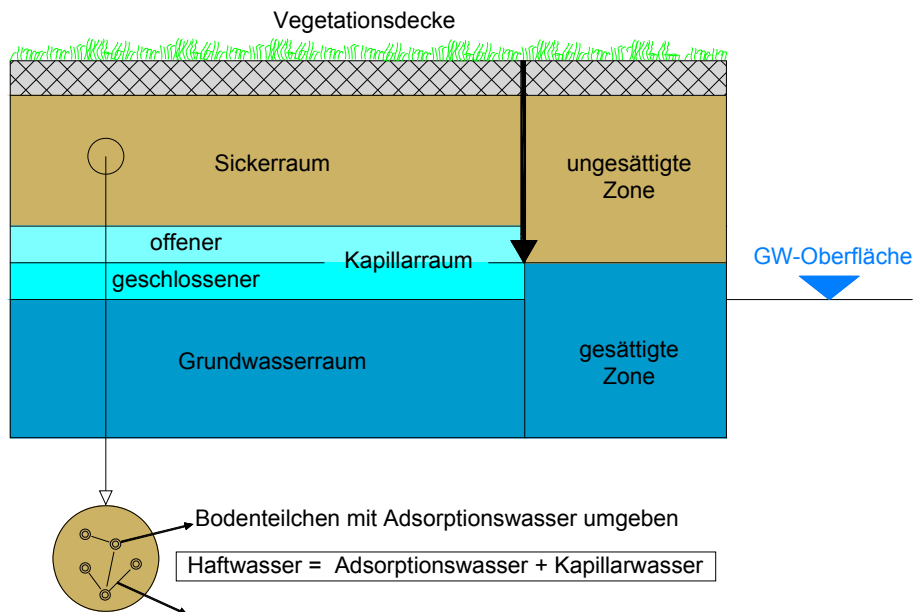


Abb. 3.1: Einteilung des Bodenwassers (aus DÜLLMANN, 2011)

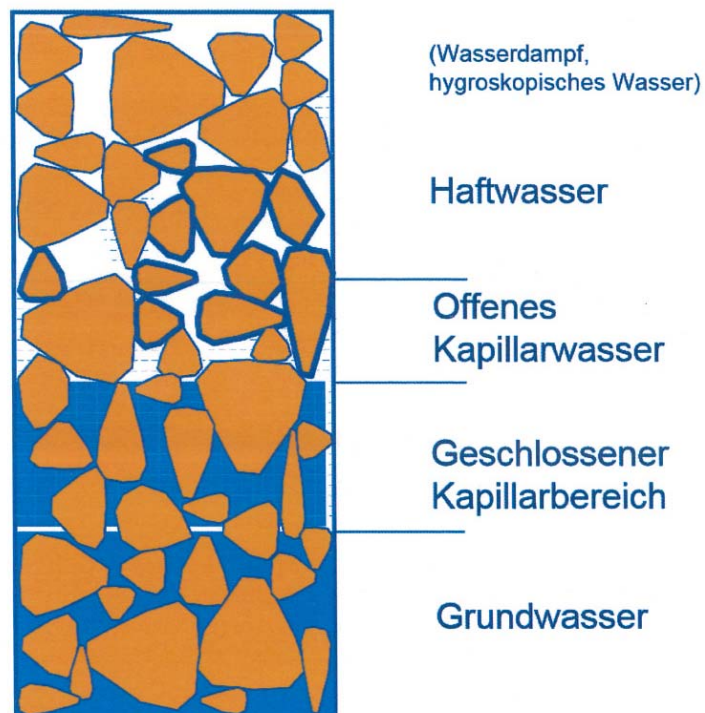


Abb. 3.2: Erscheinungsformen des Wassers

Die Wasserbewegung im Boden wird von der Schwerkraft bzw. Potenzialunterschieden und den hydraulischen Eigenschaften des Bodens beeinflusst. Durch Bindungskräfte zwischen dem Bodenwasser und dem Bodengefüge wird ein Teil entgegen der Schwerkraft als **Haftwasser** zurückgehalten. Die Wechselwirkungen zwischen dem Bodenwasser und dem Bodengefüge beru-



hen 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.

3.3.1 Kapillarwasser

3.3.1.1 Allgemeines

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. Durch die Kohäsionskräfte der Wassermoleküle sowie die Adhäsionskräfte zwischen den Kornoberflächen und der Wassermoleküle bilden sich Menisken aus. Es entstehen Oberflächenspannungen zwischen den Körnern, dem Wasser und der Luft. Die Oberflächenspannungen des Wassers resultieren außerdem in eine kontrahierende Kraft auf die benachbarten Aggregate. 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.

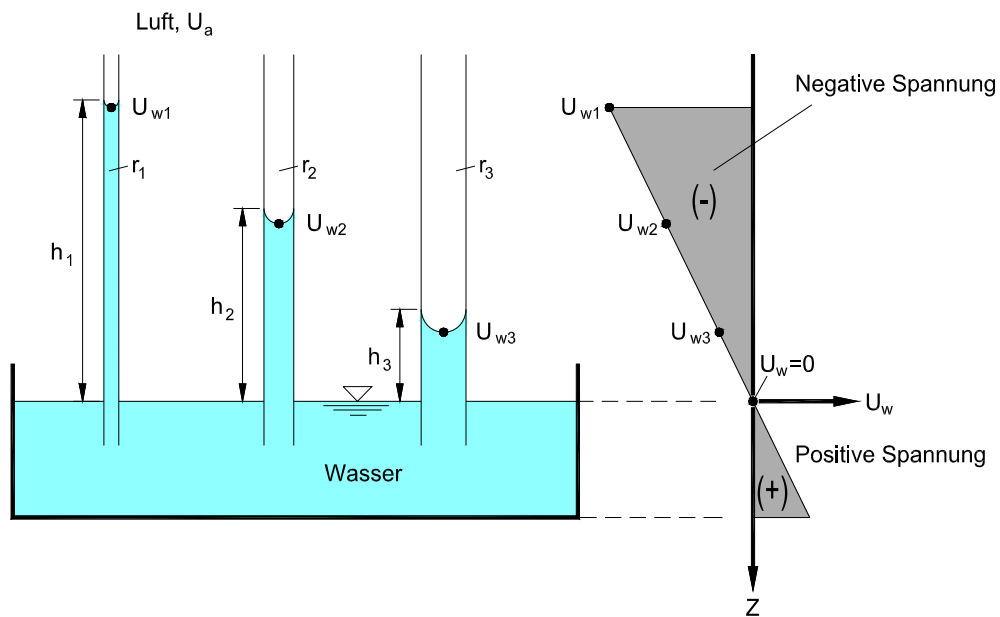


Abb. 3.3: Wasseranstieg in Kapillarröhren verschiedener Durchmesser (LU/LIKOS, 2004).

Die Oberflächenspannung des Wasser T_s (ca. 0,075 N/m) bewirkt einen Anstieg in dem Kapillarrohr mit dem Durchmesser d bis zur kapillaren Steighöhe h_k .

$$h_k = \frac{4 \cdot T_s}{d \cdot \gamma_w} \cdot \cos(\alpha) \cong \frac{0,3}{d} \cdot \cos \alpha \quad (h_k \text{ in cm, wenn } d \text{ in cm})$$

α ist der Benetzungswinkel zwischen Wasser und Rohrwandung, abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit. Da es sich bei Wasser um eine benetzende Flüssigkeit handelt, kann der Benetzungswinkel zum Boden in der Regel mit $\alpha = 0$ angenommen werden (SCHUBERT, 1982).

Bezogen auf einen realen Boden ist anstelle des Durchmessers d ein Äquivalentdurchmesser einzusetzen. Er bezieht sich auf den Durchmesser einer Kreiskapillare, unter deren Meniskus bei vollem Kapillaraufstieg der gleiche Unterdruck vorherrscht wie in einer Bodenprobe. Der Meniskus im Boden muss dabei weder kreisförmig, noch muss die Pore an den Seiten dicht sein.



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

Die Weiten der Poren im Boden wechseln ähnlich wie in einem Rohr veränderlicher Weite (Jamin-Rohr) (s. Abb. 3.4a). Wird das Rohr in Wasser getaucht, ist das Ansteigen des Wassers durch die größten Rohrdurchmesser auf h_{ka} = **aktive kapillare Steighöhe** begrenzt. Wird der Wasserspiegel außerhalb des Rohres abgesenkt, halten die kleinsten Rohrdurchmesser das Wasser bis zu einer Höhe h_{kp} = **passive kapillare Steighöhe** bzw. **kapillare Rückhaltehöhe** zurück.

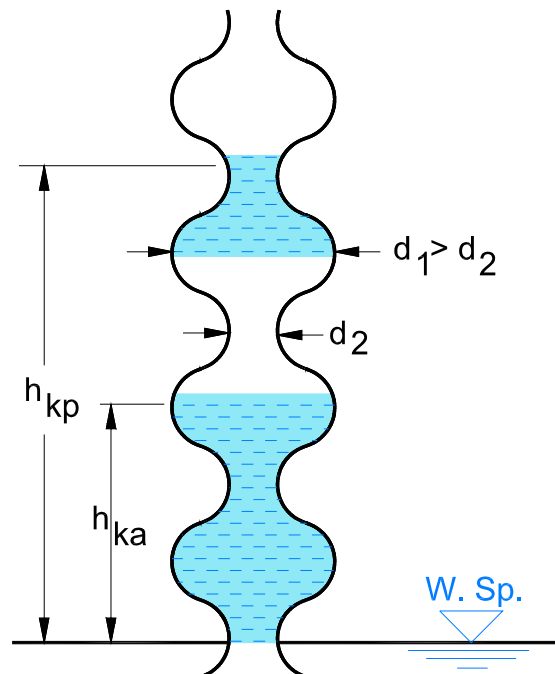


Abb. 3.4a: Aktive und passive kapillare Steighöhe im Jamin-Rohr

Wegen der verschieden großen Porenöffnungen ist der Anstieg an der einen Stelle größer, an der anderen kleiner. Die Verteilung des Wassergehaltes nach Eintritt des Gleichgewichtszustandes ist eine Funktion der Höhe über dem Grundwasserspiegel. Es ist auch von Einfluss, ob das Gleichgewicht durch das Ansteigen des Wassers im ursprünglich trockenen Boden erreicht oder aber der ursprüngliche wassergesättigte Boden durch die Gravitation entwässert wird. In beiden Fällen wirken gleichzeitig Gravitation und Oberflächenspannung. Da die Gravitation eine Massenkraft, die Oberflächenspannung aber eine Flächenkraft darstellt, wird der Gleichgewichtszustand in beiden Fällen unterschiedlich sein (KÉZDI, 1969). Abb. 3.4b zeigt die Verhält-



nisse beispielhaft für einen grobkörnigen Boden bis etwa Grobschluff. Die Kurve A wird nach einer Entwässerung durch die Gravitation entstehen, die Linie B dagegen nach dem kapillaren Aufstieg des Wassers.

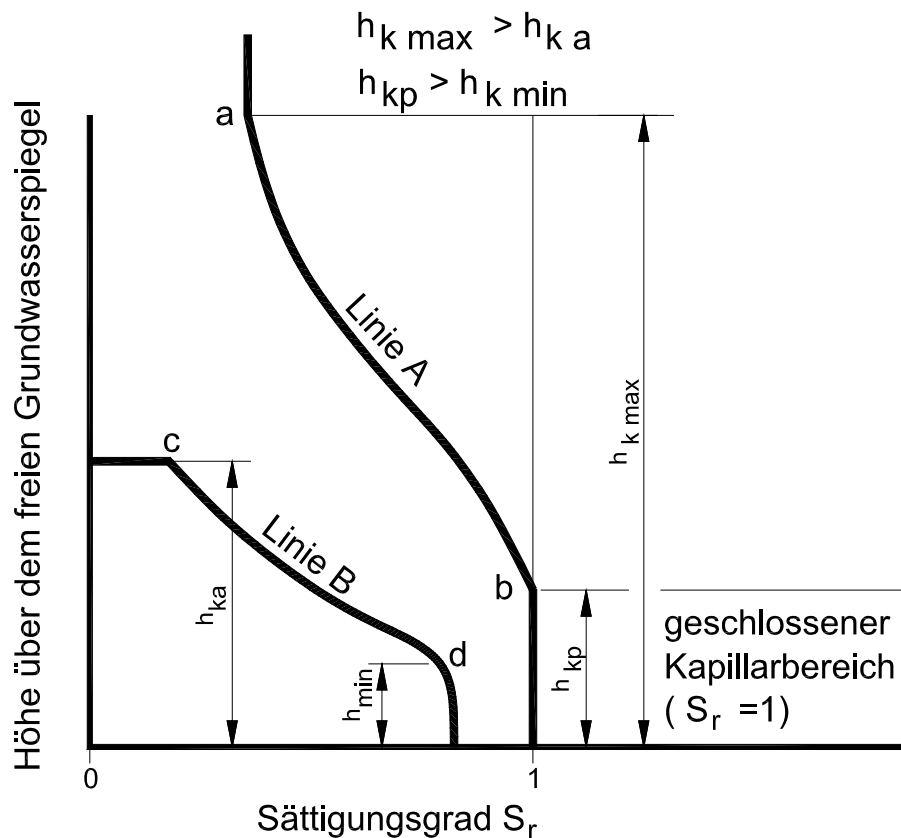


Abb. 3.4b: Verteilung des Sättigungsgrades über dem Grundwasserspiegel
Linie A: Entwässerung durch Gravitation
Linie B: Kapillarer Anstieg
(n. KÉZDI, 1969)

In einem zunächst wassergesättigten Boden stellt sich bei Absenkung des Grundwasserspiegels mit der Zeit ein Gleichgewichtszustand ein mit einer Verteilung des Sättigungsgrades S_r nach Linie A. h_{kp} entspricht darin der Höhe der völlig gesättigten Bodensäule (geschlossener Kapillarsaum). h_{kp} ist wesentlich kleiner als h_{kmax} . Oberhalb von h_{kmax} ist $S_r = \text{const}$ und nur durch adsorbiertes Wasser und nicht zusammenhängendes Wasser in den Porenwinkeln bedingt.

Wird trockener Boden in Wasser gestellt, so steigt in ihm Wasser an (Linie B nach Abb. 3.4b). Der maximale Anstieg reicht bis h_{ka} , die gleichbleibende maximale Wassersättigung bis h_{kmin} . Erfahrungswerte für h_{kp} sind in Tab. 3.1 zusammengestellt: Die aktive kapillare Steighöhe ist um 25 – 50 % kleiner als die passive kapillare Steighöhe.



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

Die kapillare Steighöhe h_k hängt ab von der Größe und Form der Poren, von der Dicke der adsorbierten Wasserhüllen, den Eigenschaften der Flüssigkeit wie Dichte und Viskosität und damit auch von der Temperatur. Die kapillare Steighöhe h_k ist umgekehrt proportional zur Durchlässigkeit k . Bei feinkörnigen Bodenarten ist k klein und h_k groß, bei grobkörnigen umgekehrt.

Die Zugspannung des Porenwassers am Rand des geschlossenen Kapillarsaumes entspricht eine erhöhte Druckspannung im Korngerüst. Sie bewirkt bei Abnahme des Wassergehaltes ein Schrumpfen des Bodens.

3.3.1.2 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.

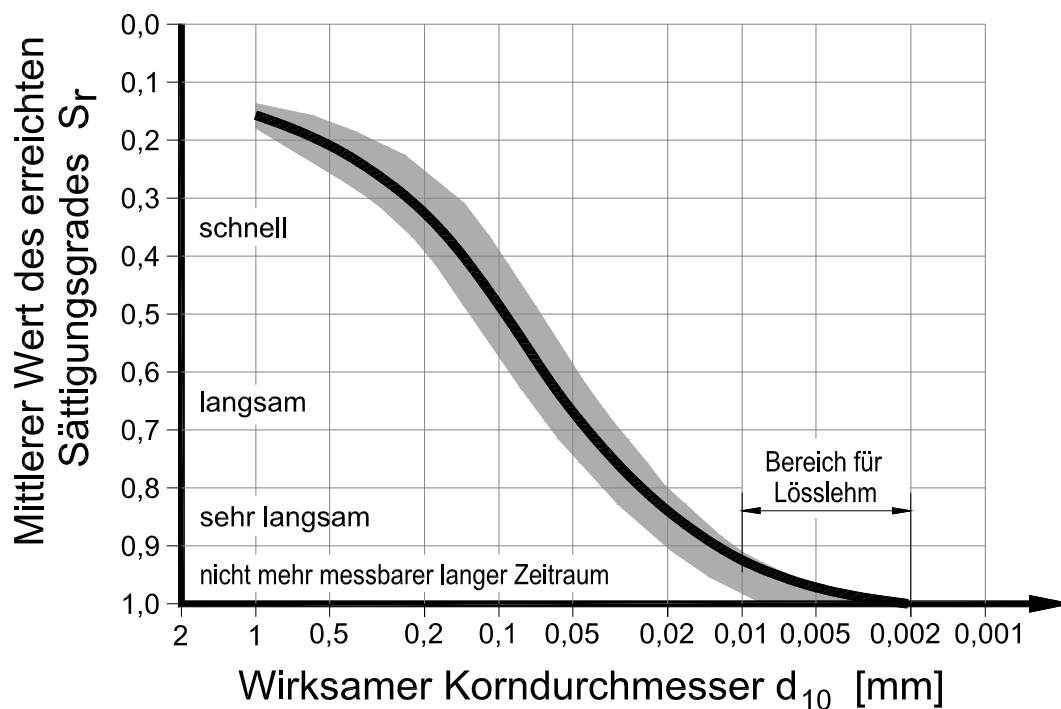


Abb. 3.5: Zusammenhang zwischen Korngröße d_{10} und Sättigungsgrad S_r , der nach einer Entwässerung durch Gravitation im Untergrund entsteht.

Eine Aussage über den zeitlichen Verlauf der Absenkung des Grundwasserspiegels bei senkrechter Entwässerung ist über die Formelansätze nach KÉZDI (1969) möglich. Abb. 3.6 zeigt schematisch einen solchen Entwässerungsvorgang.

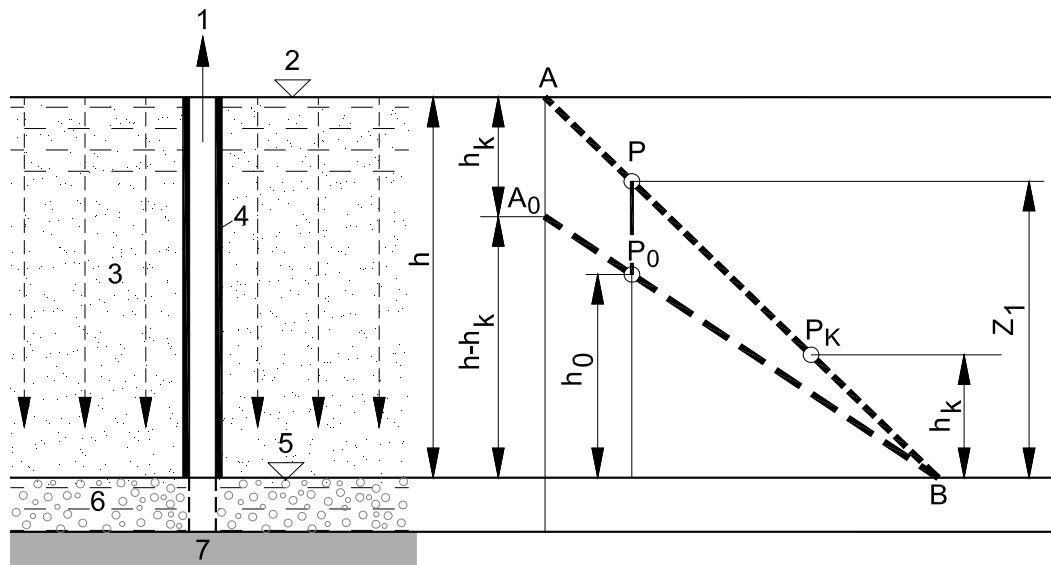


Abb. 3.6: Darstellung eines Entwässerungsvorganges
1 Wasserentnahme; 2 ursprünglicher Grundwasserspiegel; 3 Sand; 4 Futterrohr;
5 abgesenkter Grundwasserspiegel; 6 Kies; 7 undurchlässige Sohle

Für die Anfangsbedingungen (s. Abschn. 3.6) $z = h$, $t = 0$ gilt für den zeitlichen Verlauf der Entwässerung:

$$t = \frac{h_k \cdot n(1 - S_r)}{k} \left[\ln \frac{h - h_k}{z - h_k} - \frac{z}{h_k} + \frac{h}{h_k} \right]$$

Die Verhältniszahl:

$$D = 100 \frac{h - z}{h - h_k} \quad [\%]$$

gibt den Grad der Entwässerung an.

In Abb. 3.7 ist beispielhaft für einen Feinsand der Entwässerungsgrad D über die Zeit ermittelt (KÉZDI, 1969) worden. Die eingetragene gerade Linie gilt für $h_k = 0$ (grober Boden ohne kapillare Steighöhe). Die Kurve nach o.a. Gleichung verläuft oberhalb dieser Geraden und zeigt die Verzögerung des Entwässerungsvorganges und die Reduzierung des ausfließenden Wassers durch die wirkenden Kapillarkräfte.

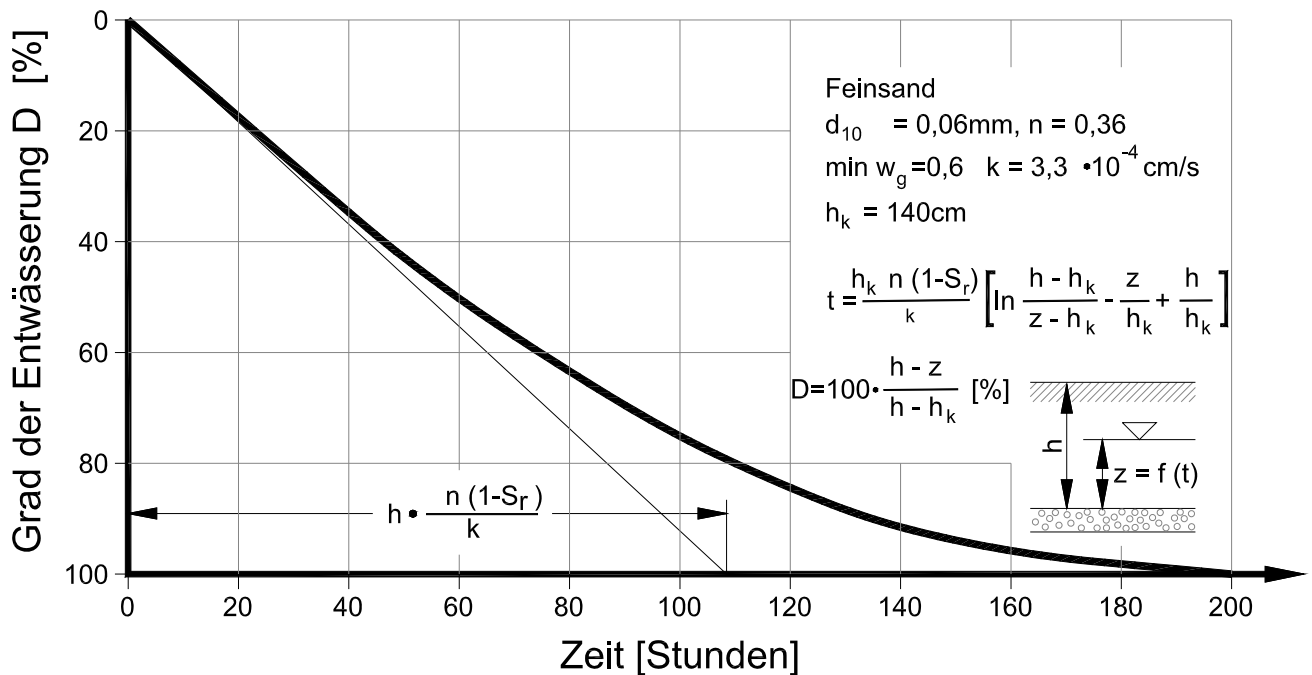


Abb. 3.7: Grad der Entwässerung als Funktion der Zeit (n. KÉZDI, 1969)

3.3.2 Adsorptionswasser

Nach DIN 4047-3:2002 bezeichnet das Adsorptionswasser den Teil des Haftwassers, der an der Oberfläche der festen Bodenteilchen gegen den Einfluss der Schwerkraft durch Adsorptionskräfte und osmotische Kräfte angelagert ist, ohne Menisken zu bilden. Aufgrund der großen elektrischen Oberflächenladungen der Tonminerale sind derartige Wechselwirkungen in feinkörnigen Böden besonders ausgeprägt. Im Vergleich zum Kapillarwasser ist das Adsorptionswasser damit deutlich stärker gebunden (s. Abschn. 3.3.1) und spielt für die vorliegenden Fragestellungen keine Rolle.

3.4 Grundlagen der Wasserbewegung in Böden

3.4.1 Gesättigter Boden

Nach DARCY (1856) besteht in einem gesättigten Boden über einen weiten Gradientenbereich ein linearer Zusammenhang zwischen der durchströmenden Wassermenge Q und dem hydraulischen Gradienten i . Der stoffspezifische k -Wert kann für den eindimensionalen Fall wie folgt dargestellt werden:



$$k = \frac{Q}{A} \cdot \frac{d}{\Delta H} \quad \text{oder} \quad k = v \cdot \frac{d}{\Delta H}$$

mit:

d = Dicke des Bodens [m]

ΔH = Differenz des hydraulischen Potentials [m]

Q = durchströmende Wassermenge [m³/s]

A = durchströmte Fläche [m²]

$v = \frac{Q}{A}$ = Filtergeschwindigkeit [m/s]

Eine Zuordnung von k-Werten für die Lockergesteine der Niederrheinischen Bucht zeigt beispielhaft Abb. 3.8 (aus: DÜLLMANN, 2011).

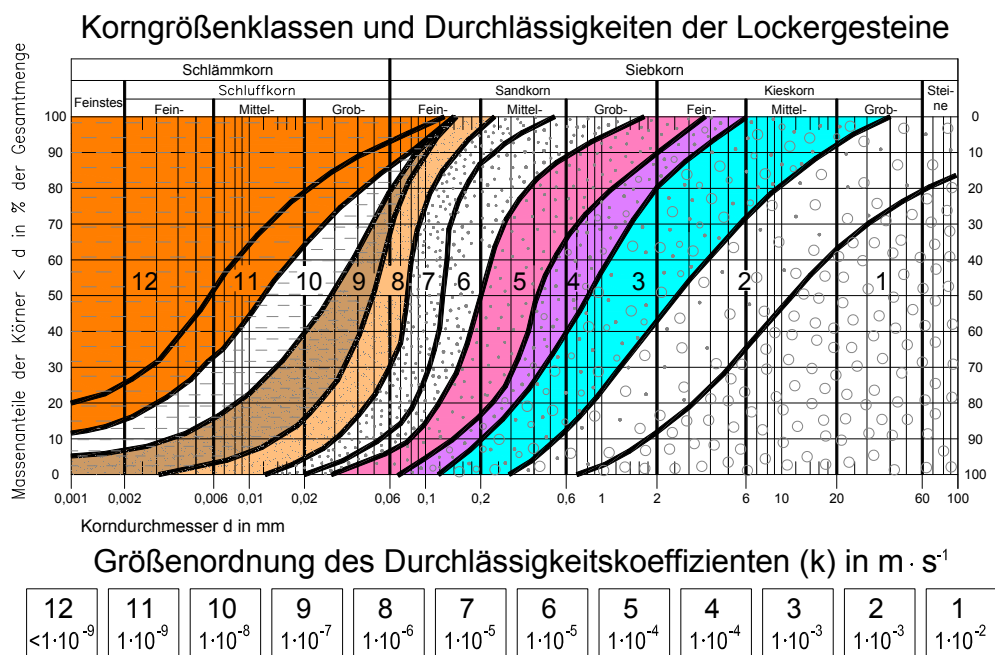


Abb. 3.8: Zusammenhang zwischen Durchlässigkeit und Kornverteilung
(Anwendungsbereich: Hydrogeologie, z.B. im Hydrogeologischen Kartenwerk des Landes NRW, überwiegend bearbeitet vom LIH an der RWTH Aachen)

3.4.2 Ungesättigter Boden unter isothermischen Bedingungen

Die Grundlagen der Wasserbewegung sind u.a. bei MITCHELL/SOGA (2005), LU/LIKOS (2004) und SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL (2002) beschrieben worden. Zum besseren Verständnis der vorliegenden Problemstellung werden die Grundlagen kurz zusammengefasst.



In einem gesättigten Boden können Strömungsvorgänge prinzipiell sowohl in der flüssigen als auch in der gasförmigen Phase auftreten. Von den grundsätzlich möglichen Ursachen für Wasserbewegungen in der **flüssigen Phase** wie:

- hydraulische Gradienten
- Temperaturunterschiede
- chemische Konzentrationsunterschiede (Osmose)
- elektrische Spannungen

ist für die vorliegenden Fragestellungen der hydraulische Gradient als maßgebend anzusehen.

In der gasförmigen Phase (Luftporen) wird Wasser als Wasserdampf bewegt. Ursachen hierfür können konvektive Luftbewegungen oder auch Diffusionsvorgänge infolge von Temperatur- und/oder Feuchteunterschieden sein. Im Vergleich zur Temperatur ist der Einfluss von Feuchtegradienten meist nachrangig.

Nachfolgend wird die Grundlage der Wasserbewegung zunächst unter isothermischen Bedingungen dargestellt. Die gekoppelte Beschreibung der Wasserbewegung in einem ungesättigten Boden infolge von hydraulischen Gradienten und Temperaturgradienten wird in Abschn. 3.4.2 behandelt.

3.4.2.1 Theorie des kapillaren Potentials

Das kapillare Potenzial ist eine Größe, die das Saugvermögen der Böden charakterisiert. Das wiederum ist 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 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 gilt also die Arbeit an, 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 gegen die Kapillarkräfte zu bewegen. Das hydraulische Gesamtpotenzial ψ_H eines Bodens lässt sich wie folgt ausdrücken (DÜLLMANN, 2011):

$$\psi_H = \psi_M + \psi_Z + \psi_P + \psi_s \quad (\text{cm WS})$$



mit den Teilpotenzialen (s.a. Abb. 3.7):

ψ_M = Matrixpotenzial bzw. Saugspannung

ψ_Z = Gravitationspotenzial

ψ_P = Druckpotenzial

ψ_s = osmotisches Potenzial

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).
- Je größer der negative Zahlenwert, desto stärker ist die Saugwirkung.
- Unterhalb und auf der Grundwasser-Oberfläche (GWO) ist $\psi_M = 0$.
- Die Saugspannung (Wasserspannung) ist eine Funktion der Porengrößenverteilung und des Wassergehaltes (s. Abb. 3.7).
- Das Matrixpotenzial umfasst alle durch das Bodensubstrat auf das Wasser ausgeübte Einwirkungen. Von besonderer Bedeutung sind die Adsorptions-, Kohäsions- und Kapillarkräfte.
- 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 ebenfalls null.

Hinsichtlich des **Gravitationspotenzials** ψ_Z ist anzumerken:

- Bewirkt die Abwärtsbewegung des Wassers,
- Die Grundwasser Oberfläche (GWO) ist das Bezugsniveau mit $\psi_Z = 0$,
- Oberhalb der GWO ist ψ_Z **positiv**, unterhalb **negativ**.

Das **Druckpotenzial** ψ_P lässt sich wie folgt beschreiben:

- Hydraulischer Druck, der im GW wirkt und auch Auswirkungen auf das Korngerüst des Bodens hat.
- Da ψ_P nur im GW wirkt, wird der Wert ab GWO bestimmt. Oberhalb und auf der GWO ist $\psi_P = 0$, unterhalb immer **positiv**. Es wird durch den äußeren Wasser- und Luftdruck erzeugt.



Das **osmotische Potenzial** ψ_s ist abhängig von:

- Menge der im Bodenwasser gelösten Salze.

Wegen der Geringfügigkeit kann das osmotische Potenzial häufig vernachlässigt werden. Aus der Betrachtung folgt, dass sich in Böden bei Entzug von Wasser sehr große negative Potentiale (Porenwasserspannungen) aufbauen können. Größe und Richtung der Wasserbewegung sind damit allein von den Potenzialunterschieden abhängig.

3.4.2.2 Potenzialgleichgewicht

Wasser bewegt sich immer vom höheren zum niedrigen Potenzial. Zwischen dem Matrixpotenzial ψ_M und dem Gravitationspotenzial ψ_Z stellt sich ein Potenzialgleichgewicht ein (Abb. 3.9). Durch Störungen (z.B. Verdunstung, Beregnung) verändert sich das Matrixpotential. Bei konstantem Gravitationspotenzial verändert sich die Potenzi summe, 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 (s.a. Abschn. 4). Durch eine rein gravimetrische Entwässerung kann diese Entwässerung nicht bewirkt werden.

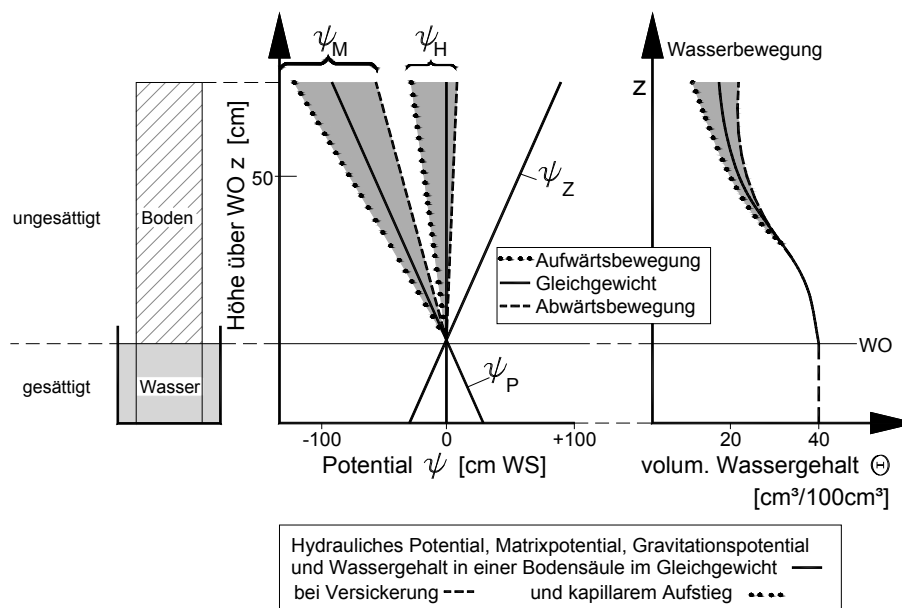


Abb. 3.9: Darstellung des Potenzialgleichgewichtes (SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1998)



3.4.2.3 Saugspannungen 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:

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

Wenn Be- und Entwässerungsverläufe unterschiedlich sind, beschreibt die Kurve eine Hysteresis-Schleife (Abb. 3.11). Die bei der Entwässerung (Desorption) erreichten Wassergehalte (θ_D) bei gegebener Saugspannung sind höher als jene (θ_s), die sich bei Wiederbenetzung (Sorption) bis zu dieser Saugspannung einstellen.

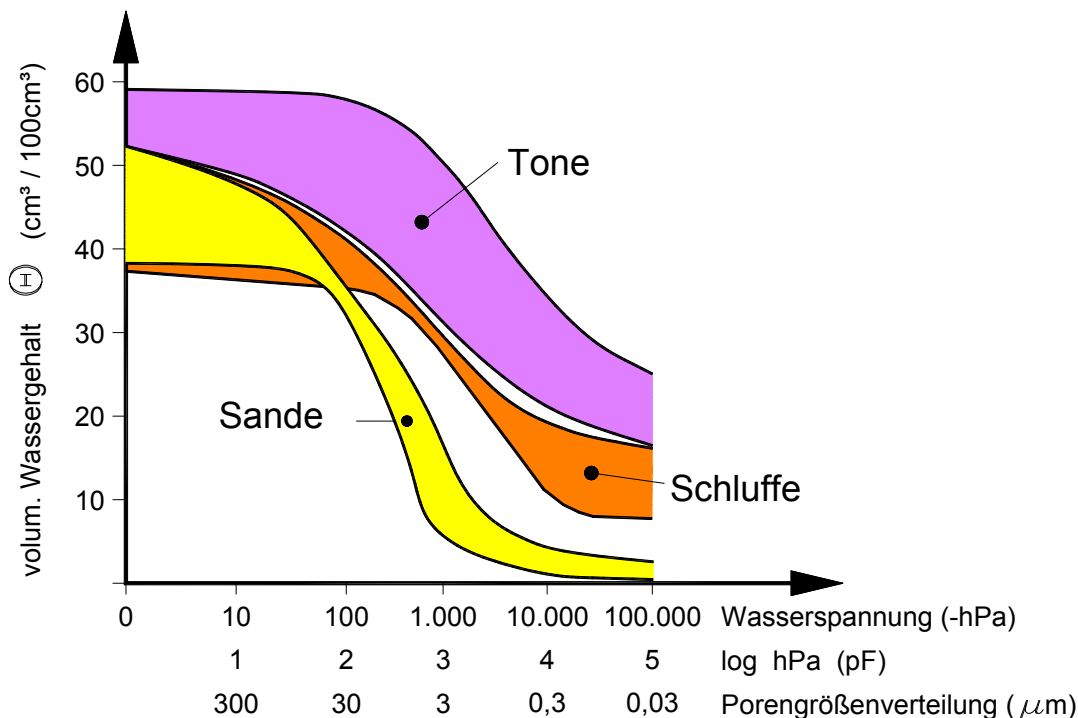


Abb. 3.10: Allgemeiner Verlauf von Bodenwasser-Retentionskurven bzw. Wasserspannungskurven bei Sand-, Schluff- und Tonböden (HARTGE/HORN, 2009)

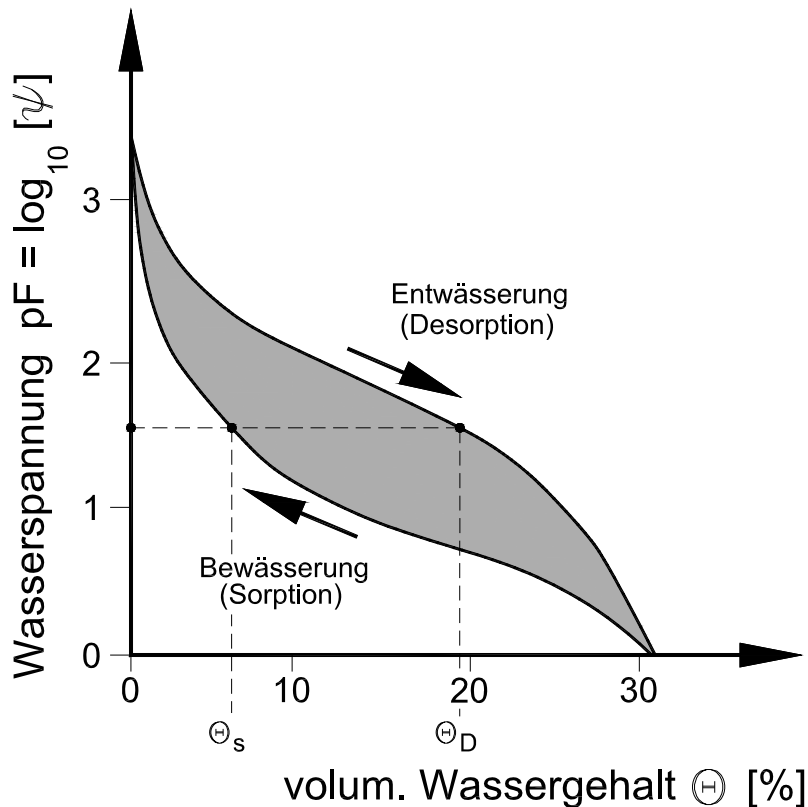


Abb. 3.11: Hysterese-Schleife für einen Sandboden nach SCHEFFER & SCHACHTSCHABEL (1998)

Die Retentionskurve drückt aus, wie viel Arbeit notwendig ist, um dem Boden Wasser zu entziehen. Alle Punkte der Kurve entsprechen Gleichgewichtszuständen zwischen Wasserspannung und Wassergehalt. Die Charakteristik wird oft verwendet, ist aber messtechnisch schwer zu messen (s.a. Abschn. 3.5).

Abb. 3.12 zeigt die Wasserspannungen beispielhaft für einen mittelplastischen Ton in Bezug zur Proctorkurve und zu Teilsättigungsgraden. Die Saugspannungen nehmen von der nassen zur trockenen Seite von 0 auf ca. 2000 kPa zu. Ein relativ trockenes Material reagiert als quasi vorgeschumpftes Material deutlich unempfindlicher auf später aufgezwungene Wassergehalts- bzw. Saugspannungsänderungen (s.a. Abschn. 4.3). Einem teilgesättigten, relativ trockenen Material kann im Vergleich zu einem Material mit hohem Wassergehalt und damit hohem Sättigungsgrad weiteres Wasser nur über eine exponentiell höhere Saugspannung entzogen werden.

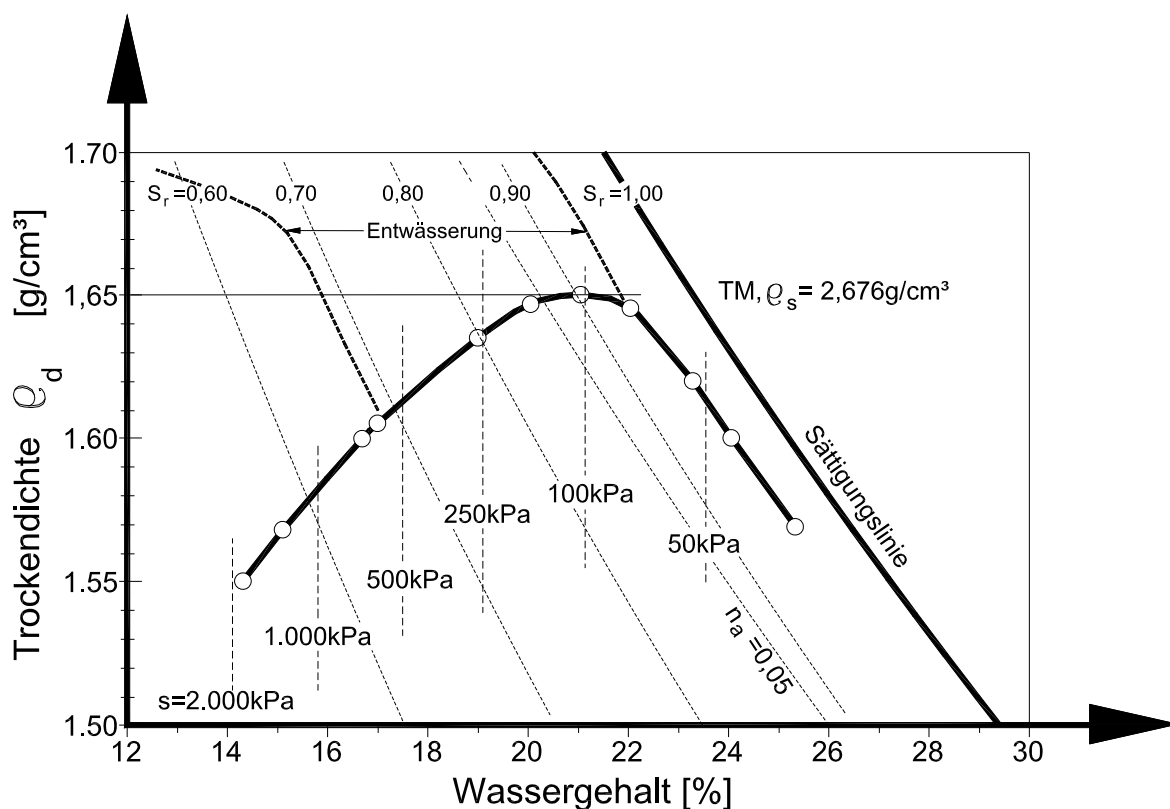


Abb. 3.12: Proctorkurve eines mittelplastischen Tons (TM) mit zugehörigen Sättigungslinien und erforderliche Saugspannungen und Pfade bei Entwässerung (nach ZEH/WITT 2007)

3.4.2.4 Kennwerte der Wasserbindung und der Porengrößenverteilung

Wichtige Kennwerte des Wasser- und Lufthaushaltes von Böden sind:

- Gesamtporenvolumen (GPV),
- Feldkapazität (FK),
- Luftkapazität (LK),
- nutzbare Feldkapazität (nFK),
- permanenter Welkepunkt (PWP).

Es gilt allgemein (Abb. 3.13):

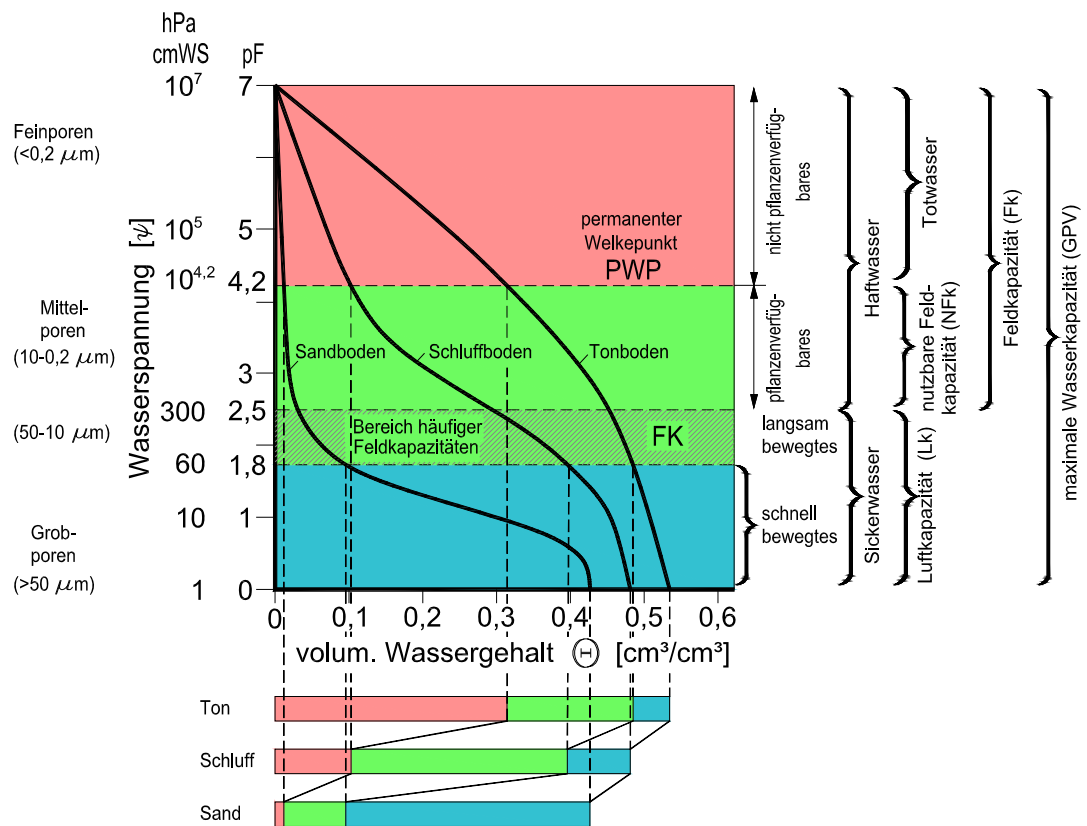


Abb. 3.13: Wasserspannungskurven verschiedener Böden
(SCHEFFER/SCHACHTSCHABEL, 1998)

Gesamtporenvolumen GPV = LK + nFK + PWP (Vol.-% der mm/m)

Feldkapazität K = nFK + PWP

= Wassergehalt als Volumenanteil, der im Boden an seinem Standort in ungestörter Lagerung maximal gegen die Schwerkraft gespeichert werden kann, konventionell angegeben als Wassergehalt 2 – 3 Tage nach vollständiger Sättigung.

Permanenter Welkepunkt PWP = Wassergehalt/Totwasser bei pF = 4,2

Nutzbare Feldkapazität nFK = für Pflanzen verfügbare Wassermenge

Luftkapazität LK = volumetrischer Luftgehalt bei der Feldkapazität



3.4.2.5 Beziehung zwischen Saugspannung ψ und Partialdruck des Wasserdampfes im Boden

Nach EDLEFSEN/ANDERSON (1943) besteht – aufbauend auf der KELVIN-Gleichung - zwischen Saugspannung ψ und dem Partialdruck p des Wasserdampfes im Boden folgender thermodynamischer Zusammenhang:

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

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/ ρ_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:

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

Wenn die KELVIN'sche Gleichung für eine Temperatur 20° C und 1J = 1 Nm ausgewertet wird, erhält man folgenden genaueren Zusammenhang:

$$\psi = 135288 \cdot \ln (RH) \quad [\text{kPa}] \quad \text{oder}$$

$$\psi = 135288 \cdot \ln (RH) \cdot 10 \quad [\text{cm WS}]$$



Luft mit RH-Werten von 90 bzw. 50 % übt damit im Kontakt zu einem feinkörnigen Boden eine Saugspannung ψ im pF-Bereich 5 bzw. 6 aus und führt analog zu dem Schrumpfversuch nach DIN 18122 (s. Abschn. 4.4.1) zu einer Entwässerung (Trocknung).

Die Feuchtespeicherfunktion gibt den Ausgleichswassergehalt w an, der sich bei gegebener Saugspannung ψ des kapillaren Porenwassers bzw. gegebener Luftfeuchtigkeit RH einstellt. Saugspannung ψ und relative Feuchte RH lassen sich über die KELVIN-Gleichung ineinander umrechnen. Für den Wassergehalt w gilt:

$$w = \frac{146}{(1 + (8 \cdot 10^{-8} \cdot \psi)^{1,6})^{0,375}}$$

Für eine Referenztemperatur von 20° C bzw. 293,15 K ergibt sich damit beispielsweise die Kurve nach Abb. 3.14.

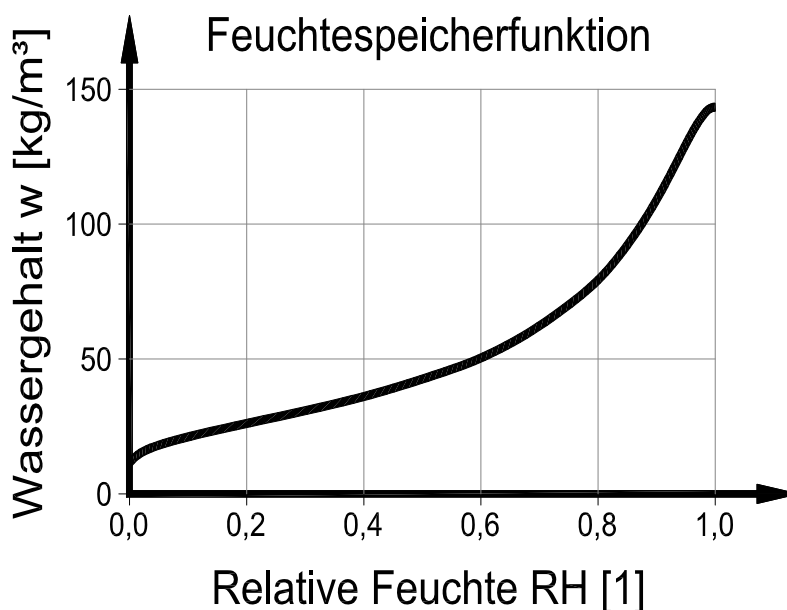


Abb. 3.14: Feuchtespeicherfunktion $w = f(RH)$, $T = 20^\circ \text{C}$

3.4.3 Ungesättigter Boden unter anisothermen Bedingungen

In der gasförmigen Phase wird Wasser als Wasserdampf bewegt. Diese Bewegung kann durch eine konvektive Luftbewegung oder auch durch Diffusionsvorgänge verursacht werden. Konvek-



onsströmungen können z.B. in sehr durchlässigen Dränschichten auftreten. Maßgebende Ursachen für einen diffusiven Wasserdampftransport sind Temperatur- und Feuchtegradienten. Im Vergleich zur Temperatur ist der Einfluss von Feuchtegradienten allerdings meist nachrangig. 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. An den Wasserdampftransport ist ein Wärmetransport gekoppelt, der der Verdampfungswärme des Wassers (latente Wärme) entspricht. Die Verdampfungswärme wird am Ort der Kondensation freigesetzt.

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 Temperatur- und Feuchtegradienten kommen kann (s.a. Abschn. 6). Hierzu zählen auch Temperaturunterschiede, die in Sonderfällen im Kontakt von nicht ausreichend isolierten Gründungssohlen zum gewachsenen Boden auftreten können (z.B. Kühlräume, Heizräume, Brennöfen).

Im Boden selbst nimmt aber der Einfluss von Temperaturgradienten mit zunehmender Tiefe deutlich ab. Die Temperatur ist dabei dem Quadrat der Tiefe umgekehrt proportional. Ist z.B. die tägliche Temperaturschwankung in einer Tiefe von 1 Dezimeter 25°C , dann reduziert sich diese in 5 Dezimeter Tiefe auf $25/5^2 = 1^{\circ}\text{C}$.

Abb. 3.15 zeigt einen typischen Jahresgang durch Temperaturprofile im Februar und August. Im Oberbodenbereich sind typische Tageszwickel angedeutet.

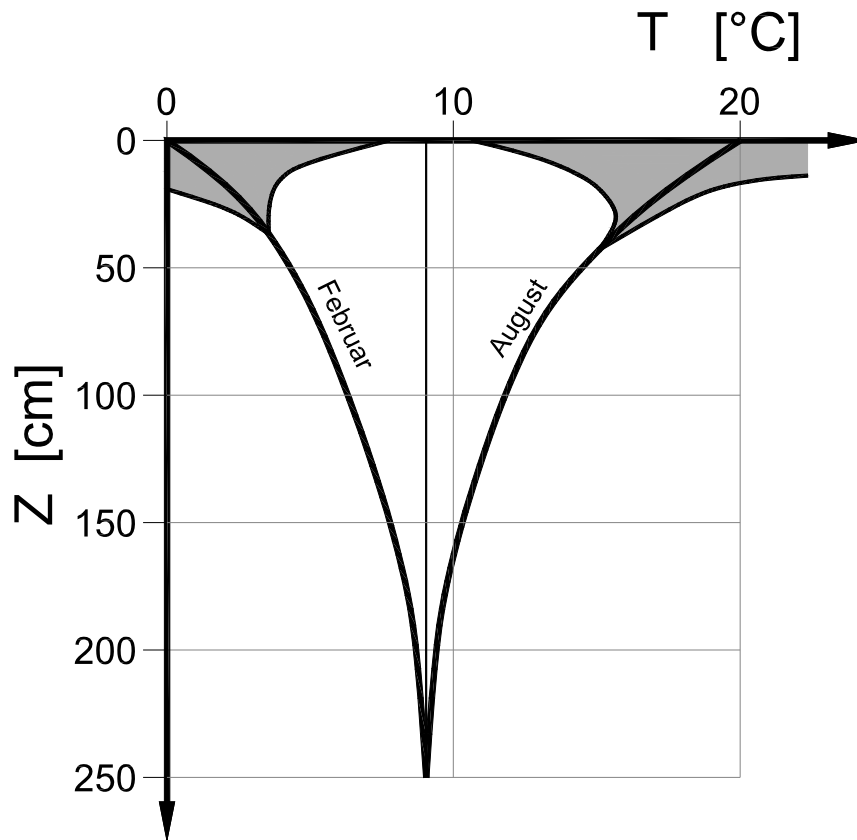


Abb. 3.15: Charakteristische Temperaturprofile eines Bodens im Februar und August (nach RICHTER, 1986)

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.

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. Diese Modellvorstellung ist auch auf den Porenraum übertragbar. Der Sättigungsdampfdruck der verdampften Teilchen, der gegen die Porenwandung ausgeübt wird, hängt nur von der Temperatur selbst ab, nicht vom Volumen. **Bei z.B. einem durch eine Grundwasserabsenkung in einem Grundwasserleiter unter einer bindigen Zwischenschicht (s.a. Abschn. 6) 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. die relative Luftfeuchte**



(RH) im Porenraum kann mit ~ 100 % angenommen werden. Aus der Gleichung für die Saugspannung nach Abschn. 3.4.2.5 folgt aber daraus, dass die Saugspannung ψ gegen Null geht und damit eine Entwässerung einer überlagernden Tonschicht aufgrund von Saugspannungen ausgeschlossen werden kann.

Andere Verhältnisse ergeben sich, wenn **offene Systeme** betrachtet werden, auf die z.B. ein temperaturinduzierter Differenzdruck einwirkt und in dessen Folge eine konvektive Porenluftströmung entsteht. Bei permanenter Zuführung von ungesättigter Porenluft von außen und Abführung von aufgesättigter Porenluft wird auf eine wassergesättigte feinkörnige Kontakt-Bodenschicht eine Saugspannung übertragen, die zu einem Wasserentzug führen kann. SCHÖPE et al. (2001) beschreiben diese Situation am Beispiel der konvektiven Luftströmung in der Entwässerungsschicht und Gasdränschicht über bzw. unter einer Tondichtung einer Haldendeponie. Hierbei handelt es sich um eine gesonderte Konstellation, die auf normale Baugrundverhältnisse nicht übertragbar ist.

3.4.4 Wasser- und Luftleitfähigkeit für ungesättigte Bedingungen

Bei einem wassergesättigten Boden ist der gesamte Porenraum mit Wasser ausgefüllt. Für die Wasserbewegung im Porenraum ist der wassergefüllte Porenanteil n_w bzw. der Sättigungsgrad S_r entscheidend. Mit abnehmendem Sättigungsgrad nimmt die Durchlässigkeit ebenfalls ab, da der für die Durchströmung verfügbare Porenraum zunehmend von Luft eingenommen wird. Schließlich wird die Residualsättigung $S_{r,min}$ erreicht, bei der keine Wasserbewegung mehr stattfindet. Gravitations- und Matrixpotenzial gleichen einander aus. Abb. 3.16 zeigt die Verhältnisse für unterschiedliche Böden in Abhängigkeit von der Wasserspannung ψ (cm WS) nach HARTGE/HORN (2009). Mit zunehmender Feinkörnigkeit steigt die Bindung des Wassers an die Bodenmatrix an.

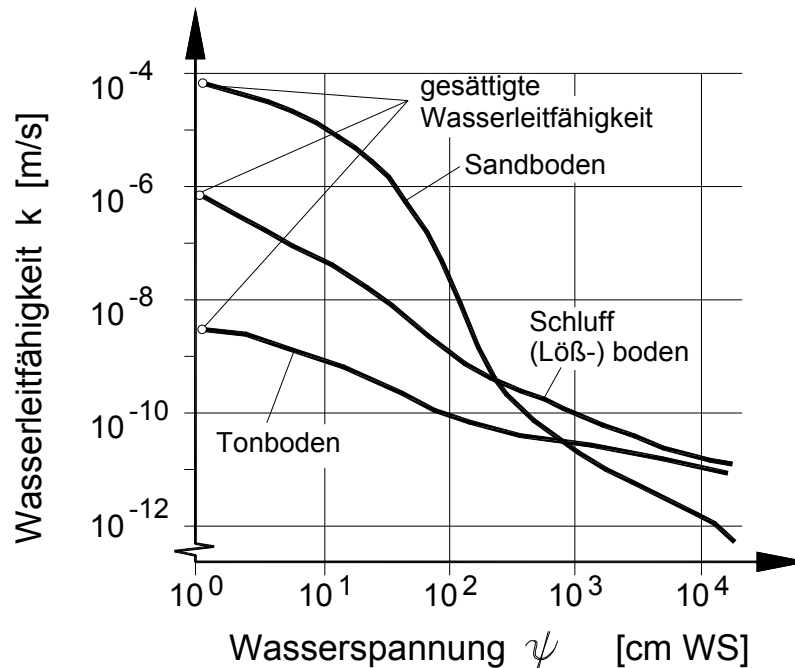


Abb. 3.16: Wasserleitfähigkeit $k = f(\psi)$ für verschiedene Bodenarten (HARTGE/HORN, 2009)

In vergleichbarer Weise nimmt die Luftdurchlässigkeit k_a eines zunächst trockenen Bodens bei zunehmender Wassersättigung ab. Sande, die gleichzeitig von Wasser und Luft durchströmt werden (Zweiphasenströmung) zeigen z.B. folgende relative Durchlässigkeiten k für Wasser (Index w) und Luft (Index a) (s. Abb. 3.17):

$$\begin{aligned}
 k_{w,r}(S_r) &= k_w(S_r) / k_w(S_r = 1) && \text{und} \\
 k_{a,r}(S_a) &= k_w(S_a) / k_w(S_a = 1) && \text{mit:} \\
 S_a &= \text{Grad der Luftsättigung} \\
 S_r &= \text{Grad an Wassersättigung}
 \end{aligned}$$

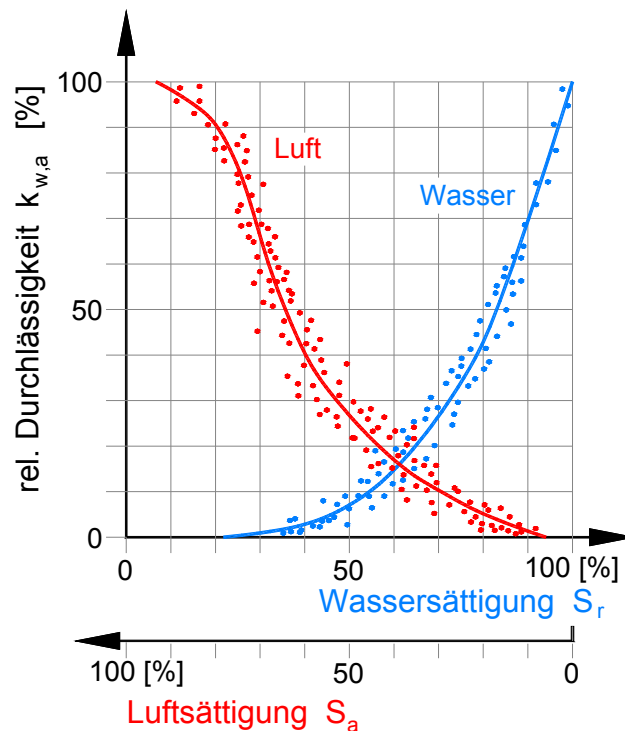


Abb. 3.17: Relative Durchlässigkeiten für Luft und Wasser für Sand bei Zweiphasenströmungen

Für teilgesättigte Böden gilt angenähert nach KÈZDI (1976):

$$k = k_r \left(\frac{S_r - S_{r \min}}{1 - S_{r \min}} \right)^3 \quad \text{mit :}$$

k_r = Durchlässigkeitsbeiwert des wassergesättigten Bodens,

S_r = Sättigungsgrad,

$S_{r \min}$ = Grenzwert der Sättigung, unter dem keine Wasserströmung mehr eintritt.

Die Luftdurchlässigkeit lässt sich für mittlere Bodentemperaturen mit $k_a \sim 70 \cdot k_r$ angeben. Bei $S_r > \sim 80\%$ ist Luftbewegung im Boden nur noch durch Verdrängung von Wasser möglich.

Bei kleinerem Sättigungsgrad S_r stört das Wasser in den engeren Poren und Porenzwickeln den Luftstrom nur geringfügig, die Luftdurchlässigkeit geht zunächst nur unwesentlich zurück. Andererseits behindern schon geringe Luftanteile im Boden die Wasserströmung entscheidend, weil die Luft die großen Poren blockiert.



Die Verhältnisse bei der Zweiphasenströmung nach Abb. 3.13 lassen sich nicht direkt auf Einphasenströmungen übertragen.

3.5 Methoden zur Ermittlung der Saugspannungs-Wassergehalts-Charakteristik

Im Gegensatz zur Ermittlung des Wassergehaltes gibt es für die Wasserspannung kein Standardverfahren, das man für Messungen beliebiger Größen anwenden kann. Die pF-Werte erstrecken sich über einen Bereich von 0 bis etwa 7 (10^0 bis 10^7 cm Wassersäule). Zur experimentellen Bestimmung des gesamten Spektrums sind mehrere Verfahren notwendig. In Abb. 3.18 sind die verschiedenen Verfahren zusammengestellt.

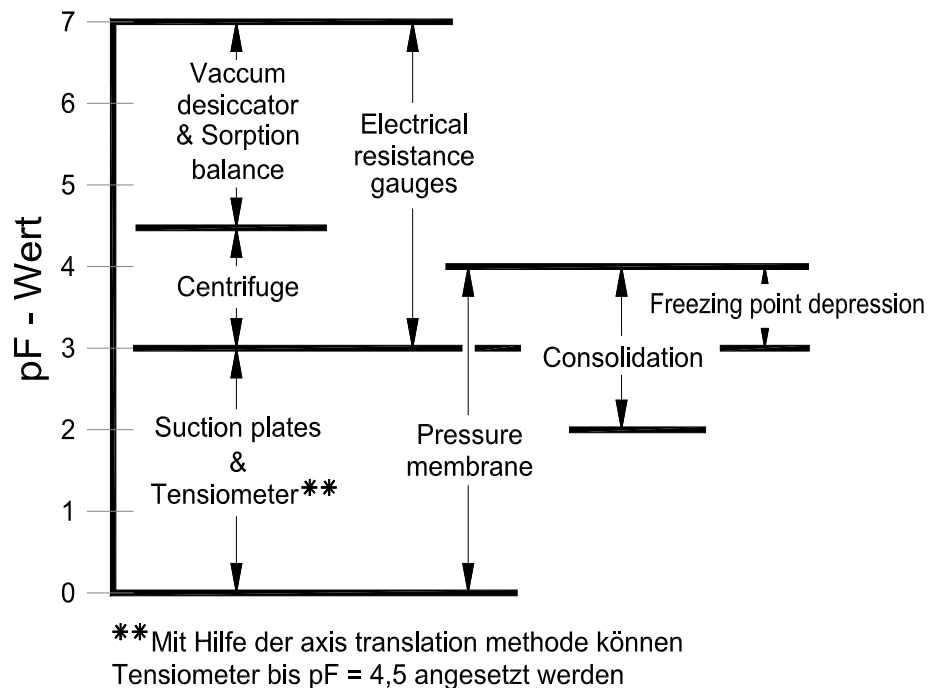


Abb. 3.18: Methoden zur Bestimmung der Wasserspannung in porösen Materialien



4 Theoretische Grundlagen zum Schrumpfverhalten von Böden

4.1 Ursachen und Mechanismen des Schrumpfens

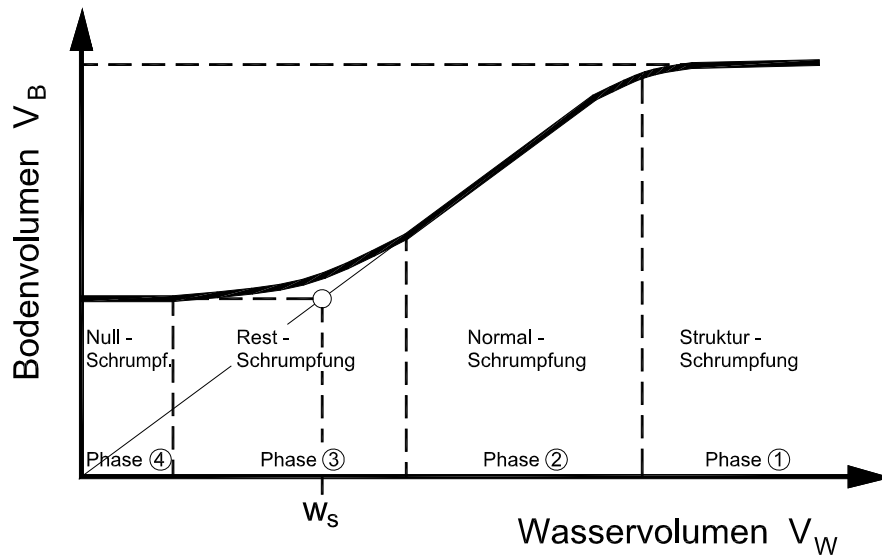
Schrumpfprozesse entstehen bei zunehmender Entwässerung (bzw. Wasserspannung) eines Bodens. Das Bodenmaterial schrumpft infolge von Zugkräften durch die nach innen gekrümmten Wassermenisken zwischen den Bodenteilchen. Je feinkörniger ein Material ist, desto höher ist das mögliche Schrumpfmaß.

4.2 Schrumpfphasen feinkörniger Böden

Zum Verständnis des Schrumpfverhaltens bindiger Böden werden nachfolgend die einzelnen Phasen der Entwässerung und die damit verbundenen Volumenänderungen erläutert (s. Abb. 4.1). Ausgegangen wird zunächst von einem wassergesättigten Boden, der erstmalig einem Wasserentzug ausgesetzt ist. In der **ersten Phase** kommt es – falls vorhanden – zu einer Entleerung grober Poren. Damit sind i.d.R. nur vernachlässigbare Volumenänderungen verbunden. Die wesentliche Phase ist die der Normalschrumpfung (**Phase 2**), in der der Wasserverlust zu einer gleich großen Volumenabnahme und damit Zunahme der Trockendichte führt. Die Bodenteilchen rücken merklich zusammen bei gleichzeitig kleiner werdenden Porenradien.

Der Übergang in **Phase 3** (Restschrumpfung) ist gleichbedeutend mit dem Übergang in den teilgesättigten Zustand. Die Volumenabnahme an Wasser bzw. des Bodenvolumens ist nicht mehr linear. Ein weiterer Übergang erfolgt in **Phase 4**, wenn die Tonaggregate nicht mehr weiter zusammenrücken können, obwohl noch Restwasser abgegeben werden kann. Abb. 4.1 zeigt im Bereich der Restschrumpfung (Phase 3) den Punkt, der die im standardisierten Schrumpfversuch (s.a. Abschn. 4.4.1) ermittelte Schrumpfgrenze w_s definiert.

Bei einer Wiederbefeuchtung/Wiederaufsättigung ist die Reversibilität des Ausgangszustandes nicht mehr gegeben. In der Regel führt ein Schrumpfvorgang zu einer nachhaltigen Bodenverdichtung, die nur durch mechanische Bearbeitung rückgängig gemacht werden kann.



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 Porosität 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) feinkörniger Böden



4.3 Beziehung zwischen Schrumpfkurve und Entwässerungskurven (qualitativ)

In Abb. 4.2 ist qualitativ eine Schrumpfkurve typischen Entwässerungskurven gegenübergestellt. Für eine Entwässerung bei hohen Wassergehalten und geringen Trockendichten sind relativ geringe Saugspannungen erforderlich. Sie sind in jedem Fall deutlich höher als sie bei einer gravimetrischen Entwässerung mittels Schwerkraft-Brunnen erzeugt werden. Für eine weitere Entwässerung bei entsprechender Volumenabnahme der Probe nimmt die erforderliche Saugspannung exponentiell zu. Im Bereich der Schrumpfgrenze w_s wirkt bereits eine Saugspannung ψ von pF 4 bis 5 bzw. 1.000 bis 10.000 kPa. Um eine weitere Entwässerung zu bewirken, muss eine entsprechend höhere Saugspannung einwirken.

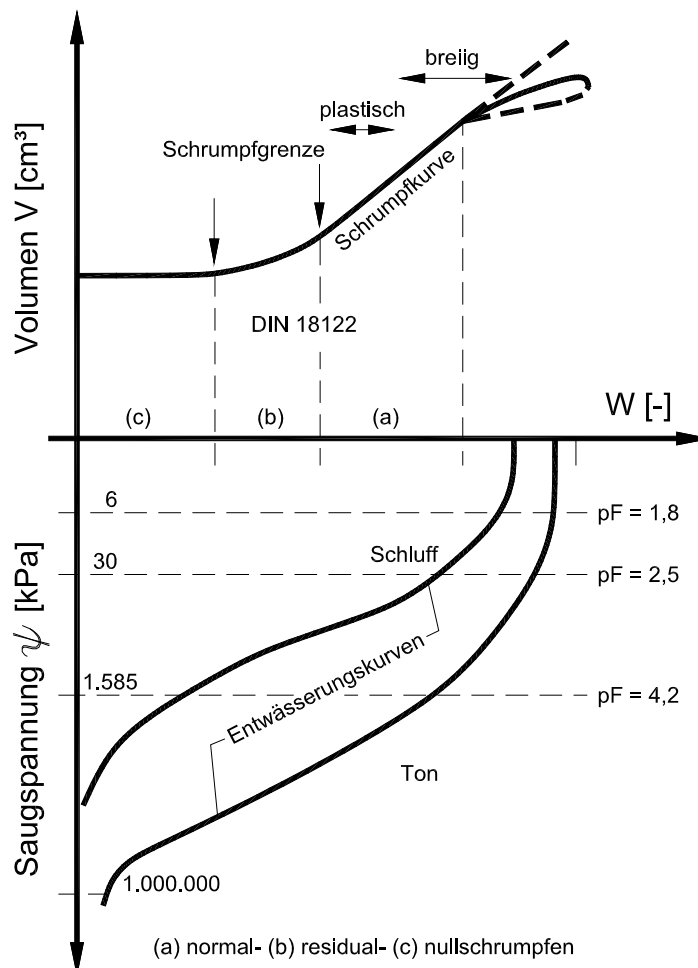


Abb. 4.2: Qualitativer Verlauf der Schrumpfkurve mit typischen Entwässerungskurven (WITT, ZEH, 2004)



4.4 Definition von Indexparametern

4.4.1 Wassergehalt an der Schrumpfgrenze w_s

Die Schrumpfgrenze w_s wird an einem aufbereiteten, mit 1,1-fachem Wassergehalt an der Fließgrenze w_L eingestellten Boden (SCHULTZE/MUHS, 1967) bestimmt. Der Versuchskörper wird langsam an der Luft getrocknet, in beliebigen Zeitabständen gewogen und das Volumen durch Ausmessen bestimmt. Die Auswertung erfolgt in einem Diagramm nach Abb. 4.3.

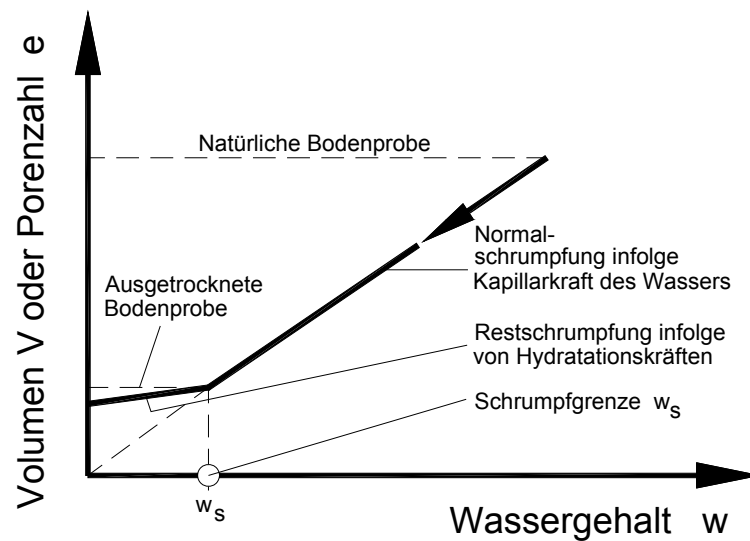


Abb. 4.3 Bestimmung der Schrumpfgrenze nach DIN 18122, T2.

Unter der Voraussetzung, dass die Restschrumpfung (s. Abb. 4.2) zwischen w_s und $w = 0$ (völlige Trocknung) vernachlässigbar klein und das Ausgangsmaterial wassergesättigt ist, gilt:

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

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)

Näherungsweise kann die Schrumpfgrenze w_s nach KRABBE (1958) auch über folgende Beziehung abgeschätzt werden:



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

w_L = Wassergehalt an der Fließgrenze [1]

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

w_P = Wassergehalt an der Ausrollgrenze [1]

Die dargestellten Abhängigkeiten gelten für aufbereitete Böden und Bodenproben ohne externe Belastung. Eine zusätzliche Belastung von Böden vor Einsetzen des Schrumpfvorganges kann nach neueren Untersuchungen zu einer kleineren Schrumpfgrenze führen (SRIDHARAN/RAO, (1971), VOGT et al. (2013)).

4.4.2 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)

Das Schrumpfmaß ε_V ist bei natürlichen tonmineralischen Materialien i.d.R. anisotrop. Normal zur Schichtung ist die Schrumpfung meist größer als parallel zur Schichtung.

Die **lineare Schrumpfung** ε_L beträgt dann 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.

Eine andere Umrechnung vom dreidimensionalen auf das eindimensionale Schrumpfmaß ist nach DEMBERG (1979) über folgende Gleichung möglich:

$$\varepsilon_L = \left(1 - 3 \sqrt{\frac{100}{V_d + 100}} \right) \cdot 100 \quad [\%]$$



Die Schrumpfgrenze w_s und das Schrumpffmaß ε_v dienen zur Beurteilung von Tonböden im Hinblick auf Volumenabnahmen bei Reduzierung des Wassergehaltes und daraus resultierend:

- das Entstehen von Setzungen und Schäden von flach gegründeten Gebäuden. Die Schrumpfkurve nach Abb. 4.3 kann zur Abschätzung der möglichen Setzungen herangezogen werden,
- Charakterisierung des Baugrundes, z.B. nach Tab. 4.1, als unmittelbarer Gründungsbo-

Tab.: 4.1: Zusammenhang zwischen Volumenschrumpffmaß ε_v , Baugrundbeschaffenheit und Schrumpffgefahr (SCHEIDIG, 1937)

Schrumpffmaß ε_v [%]	Baugrundbeschaffenheit	Schrumpffgefahr
< 5	gut	gering
5 – 10	mittel	mittel
>10 - 15	schlecht	hoch
>15	sehr schlecht	sehr hoch

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):

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

w_s = Wassergehalt an der Schrumpfgrenze nach Abschn. 4.3.1 [1]

ρ_s = Rohdichte des Bodens [g/cm³]

w = Ausgangswassergehalt des Bodens [1]

berechnet werden.

Aus diesem Formelansatz für gesättigte oder annähernd gesättigte ($S_r \sim \geq 0,95$) Bedingungen folgt, dass mit zunehmender Annäherung des natürlichen Wassergehaltes an die materialspezifische Schrumpfgrenze w_s das Schrumpffmaß ε_v und daraus abgeleitet ε_L abnehmen. Für nur teilgesättigte Materialien ($S_r \ll 1$) gilt dieser Formelansatz nicht.



Die Schrumpfung kann qualitativ näherungsweise auch über die Schrumpfungszahl $S = w - w_s$ abgeschätzt werden (GUDEHUS, 1981). Diese Abschätzung ist jedoch von der in Tab. 4.1 zu unterscheiden, in der das Schrumpfmaß ε_v als Bezugsgröße verwendet wird. Bei Verwendung der Schrumpfungszahl S müssen die in Tab. 4.1 angegebenen Schrumpfmaße ε_v reduziert werden (Faktor ca. 2/3).

Der Schrumpfindex $I_s = w_L - w_s$ wird in Verbindung mit dem Tongehalt eines Materials auch zur Abschätzung der Quellneigung und Charakterisierung der Tonminerale in der Tonfraktion verwendet und ist vergleichbar mit dem Ansatz von SKEMPTON (s. Abschn. 5.4.2.4, dort Abb. 5.4), bei dem die Plastizitätszahl $I_p = w_L - w_p$ zum Tongehalt ins Verhältnis gesetzt wird.

5 Verhältnisse im konkreten Untersuchungsraum

5.1 Auswahlkriterien

Für die Auswahl bestimmter Bodenhorizonte waren folgende Kriterien entscheidend:

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

5.2 Räumliche Einordnung

Die Lage der Aufschlusspunkte bzw. Herkunftsorte der Proben sind im Lageplan der Abb. 5.1 grob eingetragen.

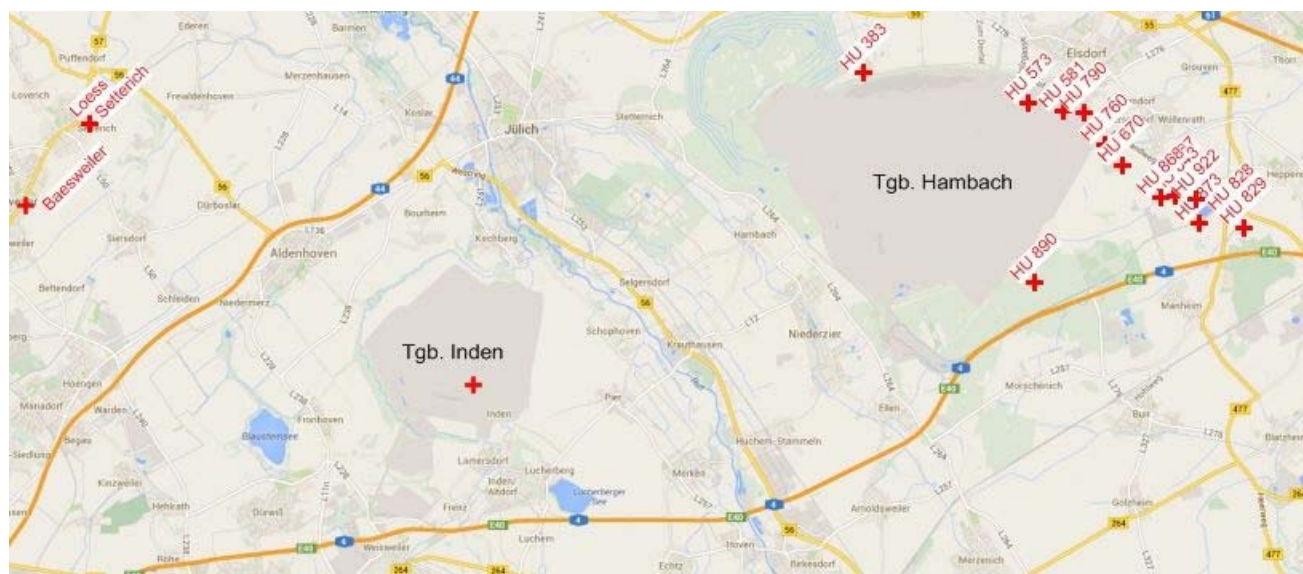


Abb. 5.1: Lage der Gewinnungsstellen für repräsentatives Bodenmaterial

5.3 Geologische Zuordnung, Grundwassersituation

Der **Quartäre Lösslehm** (Holozän) aus dem Raum Setterich steht in ca. 6 m Mächtigkeit an der Oberfläche über sandig kiesigen Terrassenablagerungen an. Das Material wurde mittels Entnahmestützen in Bohrungen weitgehend ungestört entnommen. Zusätzlich wurde gestörtes Material in ca. 2 m Tiefe für Untersuchungen zum Verdichtungs- und Schrumpfverhalten in einem Schurf gewonnen. Die Lösslehm-Decke steht nicht in Kontakt zu dem freien Grundwasserspiegel (Abstand > 10 m) in den unterlagernden Terrassenablagerungen. Das Grundwasser im oberen Stockwerk ist nur leicht säumpfungsbeeinflusst (0 – 2 m).

Der Lösslehm aus dem Bereich Baesweiler steht in einer Mächtigkeit von ca. 11 m an. Das geologische Profil ist sehr detailliert in Abb. 5.1a aufgenommen worden. Abb. 5.1b zeigt einen Aufschluss über das gesamte Lössprofil. Nach unten folgen die Sande und Kiese der älteren Hauptterrasse der Maas. Die untere Lösszone (9 – 10 m) liegt im Bereich des in ca. 12 m Tiefe anstehenden GW-Spiegels bzw. Kapillarsaumes und ist fast gesättigt. Im Gegensatz zu dem Aufschluss Setterich liegt damit in Baesweiler zumindest zeitweise ein Grundwasserkontakt vor. Die Profilaufnahme und die Ergebnisse der in 1 m-Abständen ermittelten Materialkennwerte datieren von 1978 und wurden im Rahmen eines Forschungsprojektes gewonnen (Archiv GB GmbH).

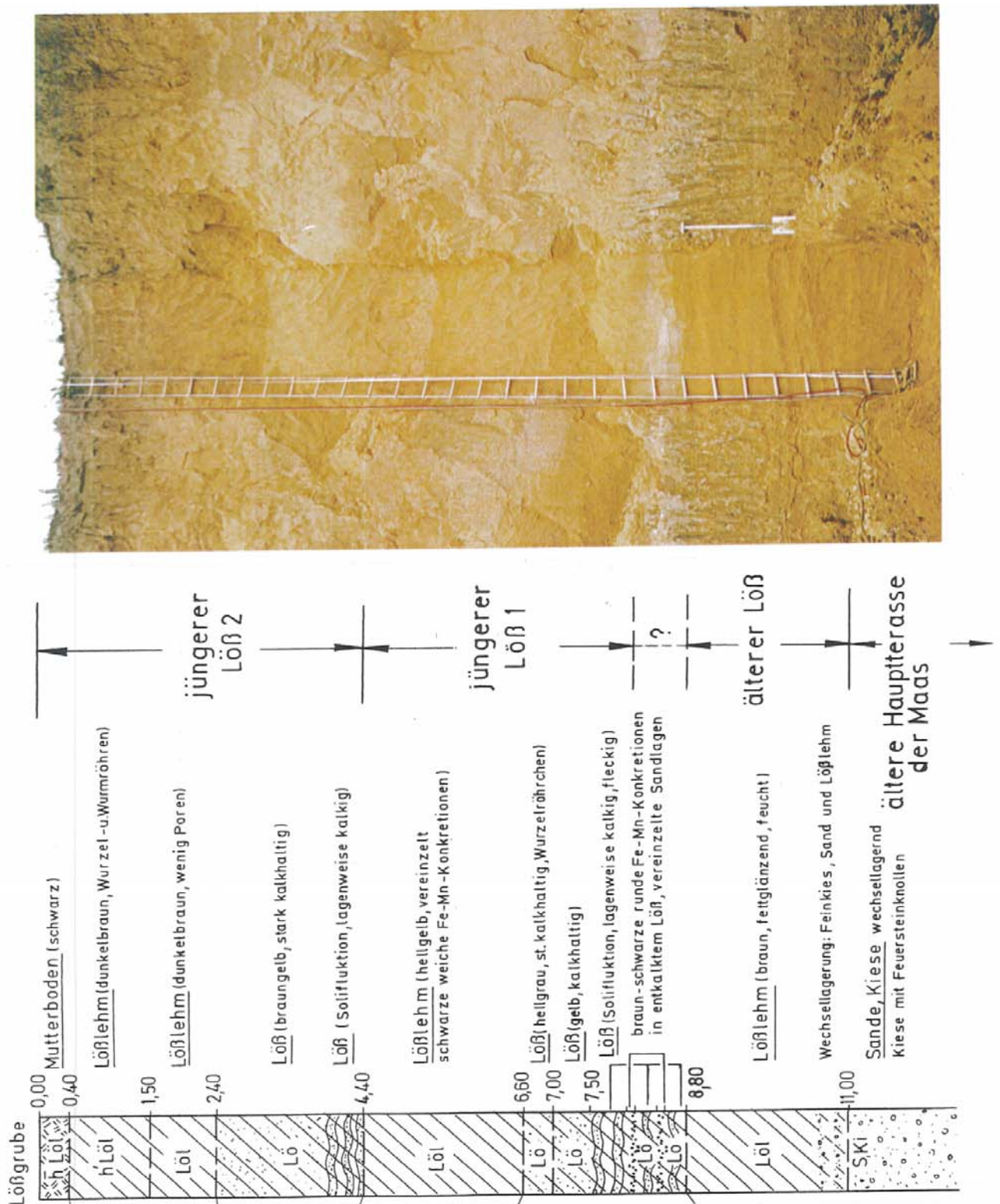


Abb. 5.1a: Lössprofil im Aufschluss

Abb. 5.1b: Aufschluss Ziegeleigrube Baesweiler



Bei dem **Tegelen-Ton** aus dem Umfeld des Tagebaus Hambach handelt es sich um den Horizont 13E des geohydrologischen Normalprofils und gehört noch zu den quartären Ablagerungen (Pleistozän). Die Daten stammen aus unterschiedlichen Bohrungen und lassen sich Teufenbereichen zwischen 32 bis 60 m, i.M. ca. 50 m u. GOK zuordnen. Die Daten stammen aus der Datenbank von RWE Power und wurden von dieser freundlicherweise für diese Studie zur Verfügung gestellt. Die Daten stammen von 13 Bohrungen aus den Bereichen Sittarter Hof, Heppendorf, Elsdorf, Morschenich und Giesendorf, wo schon vor 1960 Grundwasserabsenkungen stattgefunden haben, die den Tegelen-Ton direkt beeinflusst haben können. Die Bohrungen und labortechnische Auswertungen von Tonproben wurden zwischen 1993 und 2007 von RWE Power ausgeführt und decken damit eine Zeitspanne von 35 bis 55 Jahren nach der großräumigen Grundwasserabsenkung ab.

Eine Bohrung aus dem Bereich Morschenich, bei der das Grundwasser in Bezug auf den Tegelen-Ton noch unbeeinflusst war, wurde zusätzlich in die Auswertung mit einbezogen. Dort, wo die Datendichte es zuließ, wurde auch eine teufenabhängige Auswertung zwischen Ober- und Unter-kante Tonhorizont angestrebt.

Der **Indener-Ton** (Horizont 7A) gehört in das Tertiär (Miozän) und wurde aus einer freiliegenden Böschung im Tagebau Inden gewonnen. Der Ton steht im Liegenden des dort abgebauten mächtigen Kohleflözes in einer Mächtigkeit von ca. 6,5 m an und wird von dem geringmächtigen Flöz Garzweiler (6E) unterlagert. Der Ton 7A wurde und wird im Sonderbetrieb gewonnen und als Grundmaterial für den Dichtungsbau nach vorheriger mechanischer Aufbereitung verwendet. Die im Rahmen der vorliegenden Untersuchung verwendeten Daten stammen aus einer vom Unterzeichnenden imitierten und betreuten Dipl.-Arbeit (HILPÜSCH, 1990) an der RWTH Aachen. Diese Arbeit hat sich speziell auch mit der Schrumpffproblematik eines hochplastischen Tones (TA) beschäftigt. Da die Daten von 1990 stammen, die Sumpfungmaßnahmen aber bereits vor 1960 begonnen haben, liegt auch bei diesem Tonhorizont eine Liegezeit von mindestens ca. 30 Jahren nach der großräumigen Grundwasserabsenkung vor.

5.4 Auswertung bodenphysikalischer Kennwerte

Die Einzeldaten sind in Anl. 1 getrennt für die einzelnen Bodenhorizonte dokumentiert. Nachfolgend erfolgt eine statistische Auswertung der Daten und daraus abgeleitet eine bodenphysikalische Charakterisierung getrennt für die unterschiedlichen ausgewählten Geologischen Einheiten.



5.4.1 Gesamtauswertung

In Tab. 5.1 sind die statistischen Kennzahlen auf der Grundlage der in Anl. 1 dokumentierten Einzelergebnisse zusammengestellt worden. Angegeben sind: Stichprobengröße n , Mittelwert \bar{x} , Standardabweichung s und Variationskoeffizient $v = \frac{s}{\bar{x}}$. In den Bereich $\bar{x} \pm s$ fallen bei Annahme einer Normalverteilung ca. 2/3 der vorhandenen Messwerte.



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	%	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 (7)	4,3 (2,4)	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 (0,8)	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



5.4.2 Einzelauswertung Lösslehm

5.4.2.1 Kornverteilung

Setterich

In Abb. 5.2a ist das Körnungsband mit Mittelwertslinie für den Aufschluss Setterich dargestellt.

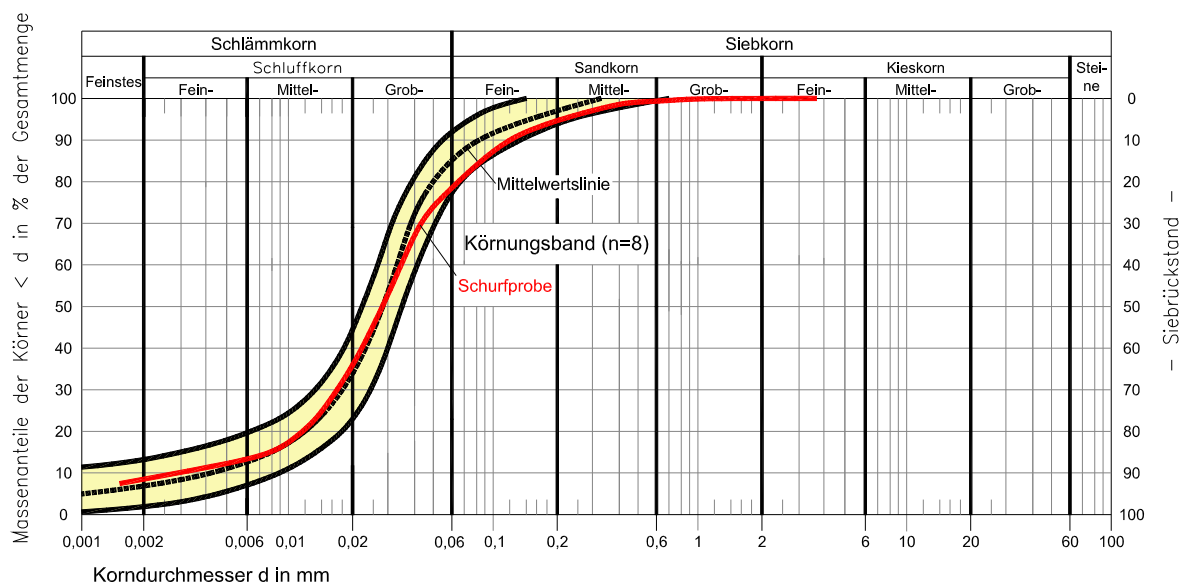


Abb. 5.2a: Körnungsband Lösslehm (Setterich)

Baesweiler

Das in Abb. 5.2b angegebene Band beinhaltet die Kornverteilungen aller Proben aus 1 bis 10 m Tiefe. Insgesamt zeigt sich mit zunehmender Tiefe eine Abnahme des Tongehaltes von 13 auf ca. 5 % bei gleichzeitiger Zunahme des Sandgehaltes von 3 auf 22 %.

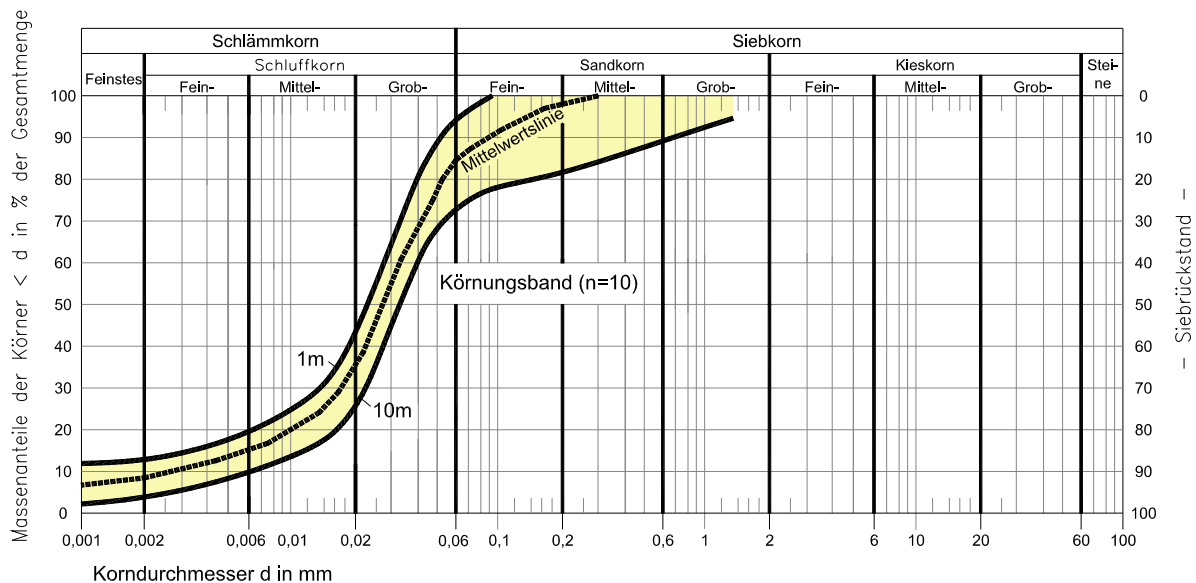


Abb. 5.2b: Kornverteilungsband der Proben aus 1 m – 10 m Tiefe (Baesweiler)

Im Mittel handelt es sich um einen schwach tonigen, schwach feinsandigen Schluff, der sich sehr gut in das von KAHL (1972) für den Lösslehm bzw. den Rheinischen Schluff auf der Grundlage von 430 Einzelproben ermittelte Körnungsband einpasst.

5.4.2.2 Atterberg'sche Grenzwassergehalte, Konsistenzzahlen

Setterich

Die Wassergehalte w_L an der Fließgrenze liegen zwischen 27 und 37 %, i.M. bei 29 %. Die Werte für die Ausrollgrenze w_P streuen zwischen 17 und 21 % bei einem Mittelwert von 19 %. Die mittlere Plastizitätszahl liegt bei $I_P = 10$ %. Diese Werte sind nahezu identisch mit den Mittelwerten, die KAHL (1972) an einer sehr großen Stichprobe ($n = 360$ Einzelwerte) für den Rheinischen Schluff (Lösslehm) ermittelt hat. Nach Abb. 5.3 lässt sich der Lösslehm über das Casagrande-Diagramm als leicht plastischer Ton (TL) eingruppiieren. Alle Werte liegen über der A-Linie. Die Konsistenzwerte liegen im steifen - halbfesten Bereich, die Wassergehalte i.M. bei 18,5 %, deren Streuungen zwischen 15,9 und 21,2%.

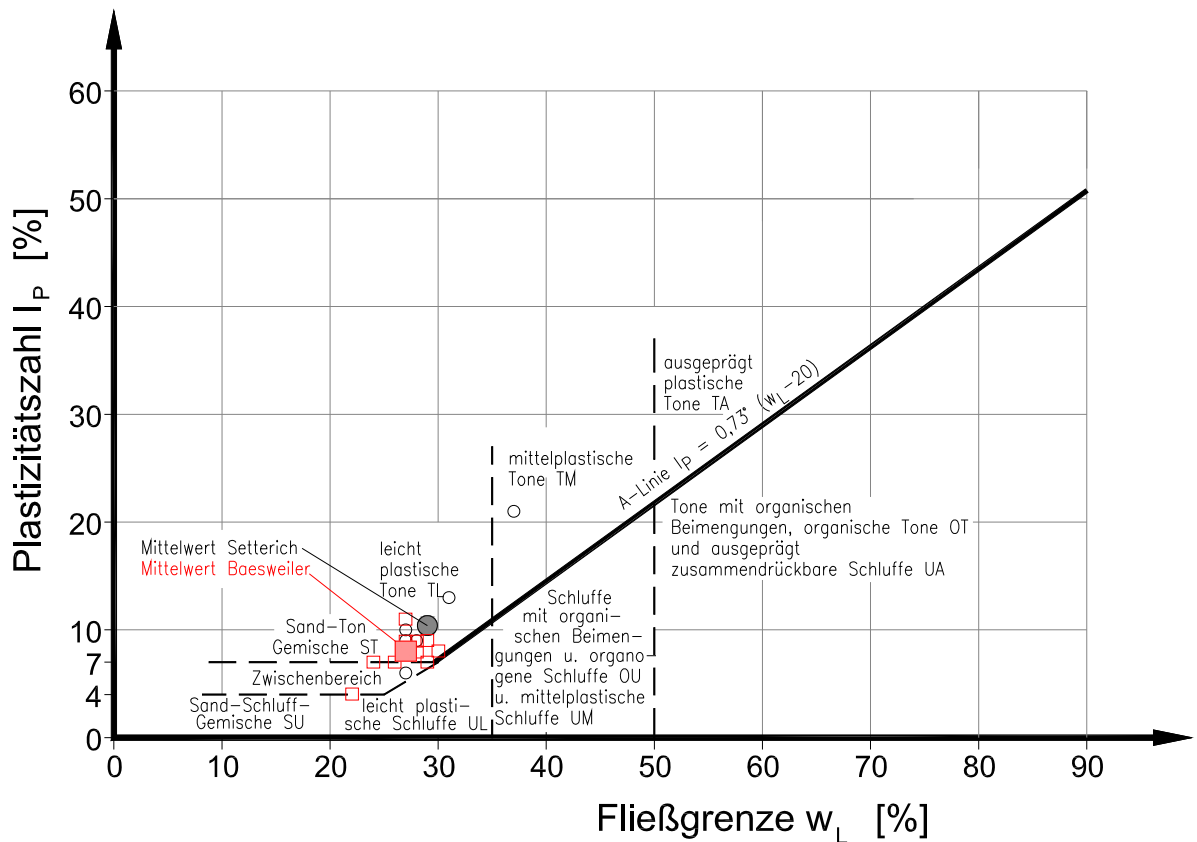


Abb. 5.3: Casagrande-Diagramm Lösslehm (Setterich O; Baesweiler □)

Baesweiler

Für den Aufschluss Baesweiler ergeben sich vergleichbare Grenzwassergehalte, auch die Lage des Mittelwertes im Plastizitätsdiagramm (Abb. 5.3) ist ähnlich. Lediglich die Konsistenzzahlen streuen stärker bei einem insgesamt auch höheren Mittelwert von $\bar{I}_c = 1,22$. Die beiden unteren Messwerte im Kapillarsaumbereich des Grundwassers liegen wegen der rel. hohen Sättigung nur im weichen bis steifen Bereich.

5.4.2.3 Trockendichten, Porenzahlen und Sättigungsgrade

Setterich

Die Trockendichten ρ_d liegen zwischen 1,371 und 1,753 g/cm³, i.M. bei 1,607 g/cm³.

Die Porenzahlen e berechnen sich zwischen $e = 0,54$ und $0,98$ %, der Mittelwert zu $0,694$. In Verbindung mit dem Wassergehalt w ergeben sich Sättigungsgrade S_r zwischen $0,59$ bis $0,86$, i.M. von $0,74$, d.h. der Lösslehm liegt nur teilgesättigt vor. Der Mittelwert nach KAHL (1972) liegt bei



0,78 bei einer Spannweite R der Einzelwerte zwischen 0,46 und 1,0. Proben im Bereich der Wassersättigung sind in der Stichprobe KAHL nur sehr untergeordnet (< 5 %) vertreten, d.h. es ist im Verbreitungsgebiet relativ selten von einem Grundwasseranschluss der Lösslehmdecke auszugehen.

Baesweiler

Die Werte der Trockendichte streuen insgesamt in einem relativ engen Bereich bei einem gegenüber Setterich geringfügig höheren Mittelwert von $\bar{\rho}_d = 1,66 \text{ g/cm}^3$. Entsprechend niedriger ist die mittlere Porenzahl mit $\bar{e} = 0,62$. Der mittlere Sättigungsgrad von $\bar{S}_r = 0,77$ wird stark von den beiden Werten im unteren Profildbereich mit GW-Kontakt beeinflusst.

5.4.2.4 Mineralchemische Charakterisierung

Setterich

Von dem Lösslehm liegen zwei Enslin-Wassergehalte w_E vor, die mit einem Mittelwert von 52 % bereits auf ein inaktives Verhalten der Tonminerale hinweisen.

Trägt man die Plastizitätszahlen I_p über den Tongehalt auf (s. Abb. 5.4) ergeben sich rechnerisch Aktivitätszahlen I_A nach SKEMPTON, die im aktiven bis sehr aktiven Bereich liegen, obwohl der Schluff keine aktiven Tonminerale enthält. Das SKEMPTON-Diagramm ist deshalb für leichtplastische Tone wenig aussagefähig.

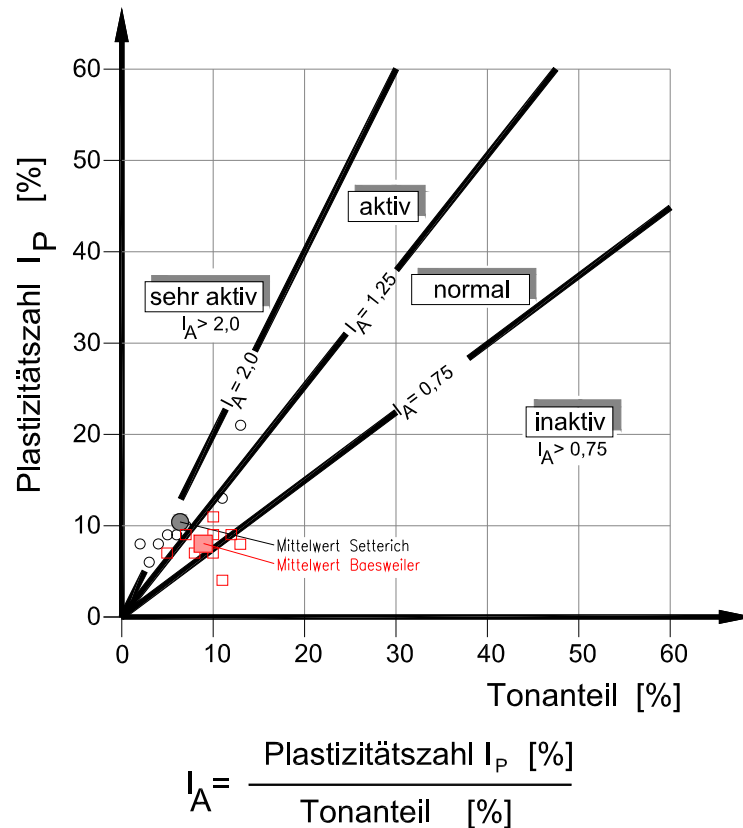


Abb. 5.4: Aktivitätskarte nach SKEMPTON – Lösslehm (Setterich O; Baesweiler □)

Baesweiler

Der Mittelwert der Stichprobe ist in Abb. 5.4 zusätzlich eingetragen. Die Lage entspricht etwa der Stichprobe Setterich, jedoch jetzt im „normalen“ Bereich

5.4.2.5 Parameter zur Beschreibung von Schrumpfverhalten und Schrumpfpotenzial

Setterich

Die Schrumpfgrenze w_s wurde an drei Proben nach DIN 18122, T2 i.M. mit 18,4 % ermittelt, bei sehr kleinen Streuungen zwischen 18,2 und 18,6 %.

Die über den Ansatz von KRABBE berechneten Werte ($n = 8$) liegen zwischen 12,0 und 19 %, i.M. bei 16 % und damit unter den direkt im Versuch bestimmten Werten.



Die Schrumpfgrenze w_s liegt damit i.M. nur geringfügig unter dem Wassergehalt an der Ausrollgrenze, dies ist aber ein Charakteristikum leicht plastischer Tone (TL). Mit zunehmender Bindigkeit bzw. zunehmendem Tongehalt wird der Abstand größer.

Nimmt man die Differenz zwischen den berechneten Schrumpfgrenzen und dem natürlichen Wassergehalt: $S = w_s - w$ als Orientierungswert für die Schrumpfung bzw. das Restschrumpfpotenzial, ergeben sich Werte ($n = 8$) zwischen 0 und 10 %, bei einem Mittelwert von 2,5 %. Der Maximalwert wurde dabei auf dem oberen Meter des Bodenprofils ermittelt und dürfte besonders stark durch bodenbildende Faktoren (Austrocknungs-/Durchfeuchtungs-Wechsel, Frost-/Tauwechsel) beeinflusst sein. Ohne diesen Extremwert (Ausreißer) reduziert sich der Mittelwert auf weniger als 1 %.

Baesweiler

Laborativ ermittelte Werte für die Schrumpfgrenze liegen nicht vor. Die nach dem Ansatz von KRABBE berechneten Werte liegen zwischen 14 und 21 % bei einem Mittelwert von ca. 17 %.

Dieser Mittelwert liegt ca. 2 % unter dem Mittelwert der Ausrollgrenze und ca. 1 % über dem w_s -Wert Setterich.

Die Schrumpfszahl S als Indikator für das Schrumpfpotenzial liegt im Vergleich zu Setterich noch niedriger, bei der Hälfte der Werte ($n = 5$) liegt der natürliche Wassergehalt im Restschrumpfungsbereich unterhalb der rechnerischen Schrumpfgrenze.

5.4.2.6 Volumetrische und lineare Schrumpfung

Die Abschätzung des Schrumpfmaßes ε_v über den Formelansatz nach Abschn. 4.4.2 ist im vorliegenden Fall nicht anwendbar, da der Lösslehm als oberste Deckschicht nicht im gesättigten, sondern nur im teilgesättigten Zustand vorliegt und außerdem durch bodenbildende Prozesse in seiner Struktur verändert ist.

Wertet man die vom Unterzeichnenden im Rahmen eines aktuellen Forschungsprojektes gewonnenen Daten an teilgesättigten Lösslehmproben mit unterschiedlichen Trockendichten und Einbauwassergehalten (s. Anl. 1) aus, ergibt sich der in Abb. 5.5 dargestellte Zusammenhang zwischen der Volumenschrumpfung ε_v und dem Wassergehalt w der Probe bei teilgesättigten Bedin-



gungen. Die Versuchspunkte können näherungsweise durch eine Gerade ausgeglichen werden. Aus der Neigung der Geraden lassen sich folgende Beziehungen ableiten:

$$\Delta \varepsilon_v \cong 0,51 \cdot \Delta w [\%] \quad \text{und:}$$

$$\Delta \varepsilon_L \cong 0,17 \cdot \Delta w [\%]$$



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

Bei einer Schichtmächtigkeit von einem Meter (Beispiel) würde danach - eine durchgehende Abtrocknung um 1 Wassergehaltsprozent vorausgesetzt - eine lineare Schumpfung (Dickenreduzierung) um 0,17 %, d.h. um 1,7 mm eintreten können.



Das mittlere volumetrische Schrumpfmaß ε_v bis zur völligen Abtrocknung – abgeleitet aus Versuchen - liegt für den vorliegenden mittleren Wassergehalt von 18,6 % i.M. bei $\bar{\varepsilon}_v = 5,2$ %, das lineare Schrumpfmaß bei $\bar{\varepsilon}_L = 1,7\%$. Da der natürliche Wassergehalt bereits im Bereich des Wassergehaltes an der Schrumpfgrenze liegt, handelt es sich bei den ε_v - und ε_L -Werten lediglich um Restschrumpfungen entsprechend Definition in Abb. 4.1. Diese Eigenschaft ist nach HARTGE/HORN (1999) typisch für terrestrische Böden, die außerhalb des Wirkungsbereiches des Grundwassers liegen bzw. bei denen das Bodenwasser keine dominante Rolle einnimmt. Mit dem in Tab. 4. dargestellten Zusammenhang lässt sich für den untersuchten Lösslehm insgesamt noch eine gute Baugrundbeschaffenheit und eine geringe Schrumpfgefahr ableiten.

5.4.2.7 Wasserspannung ψ als Funktion des volumetrischen Wassergehaltes Θ

Für den Lösslehm liegt eine Saugspannungskurve vor, die für etwa mittlere Lagerungsverhältnisse gültig ist (Abb. 5.6). Der zunächst senkrechte Verlauf sagt aus, dass eine Entwässerung überhaupt erst bei Überschreitung einer bestimmten Wasserspannung, in Abb. 5.6 bei $\psi_m \sim -10$ kPa ($pF = 2$) stattfindet. Das Wasser steht dann trotz Wassersättigung des Bodens unter Wasserspannung bzw. trotz Wasserspannung ist der Boden wassergesättigt (HARTGE/HORN, 1999), Im Bereich der Schrumpfgrenze (θ_s) liegt der pF-Wert bei 3,0 ($\psi_m = 100$ kPa).

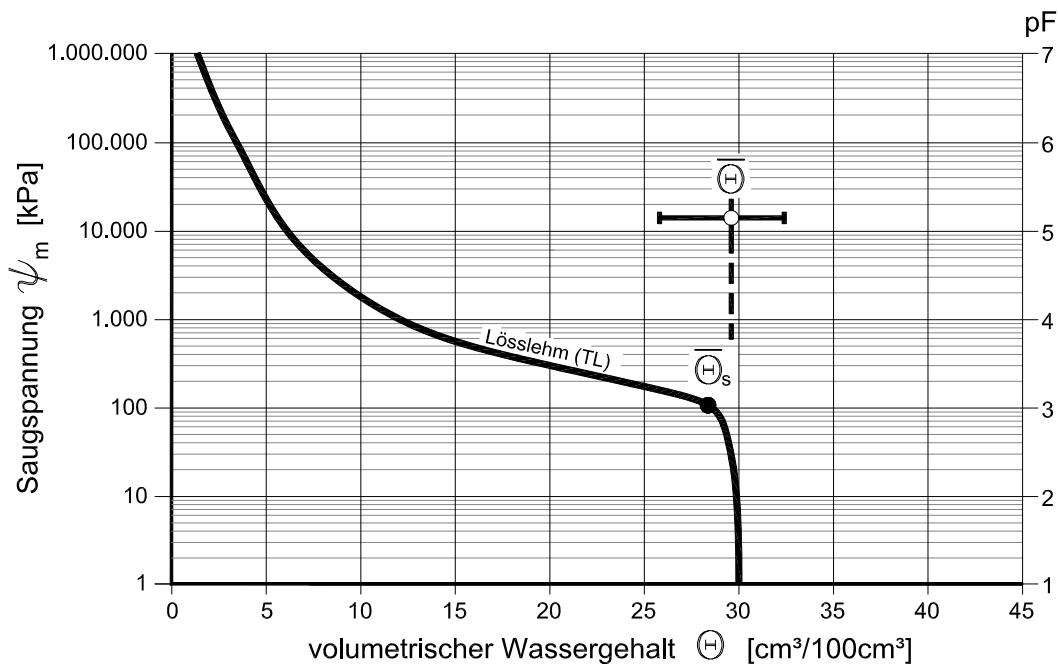


Abb. 5.6: Entwässerungskurve für den Lösslehm (Setterich)



5.4.3 Einzelauswertung Tegelen-Ton (Raum Hambach)

5.4.3.1 Kornverteilung

Das Körnungsband von insgesamt 49 Proben ist in Abb. 5.7 dargestellt.

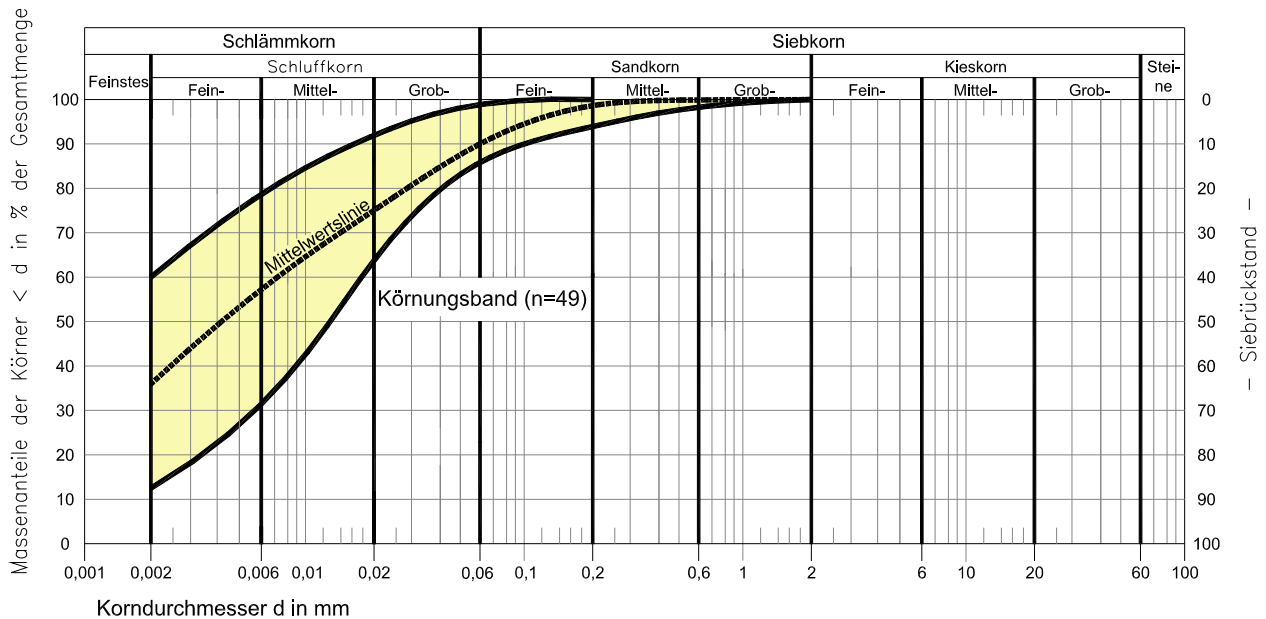


Abb. 5.7: Körnungsband Tegelen-Ton (n = 49)

Das Band fällt relativ breit aus und beschreibt i.M. einen stark tonigen, schwach feinsandigen Schluff.

5.4.3.2 Grenzwassergehalte, Konsistenzzahlen

Die Eintragung der Versuchspunkte in das Casagrande-Diagramm zeigt Abb. 5.8. Die Bandbreite reicht von den leichtplastischen (TL) bis zu den hochplastischen Tonen (TA). Der Mittelwert und der 2 x s-Bereich (2/3 der Messwerte) beschreiben jedoch einen mittlplastischen Ton (TM). Entsprechend dem relativ niedrigen Organikanteil ($\overline{V_{Gl}} = 5,1 \%$, $R = 2,0$ bis $8,0 \%$) liegen die Versuchspunkte oberhalb der A-Linie.

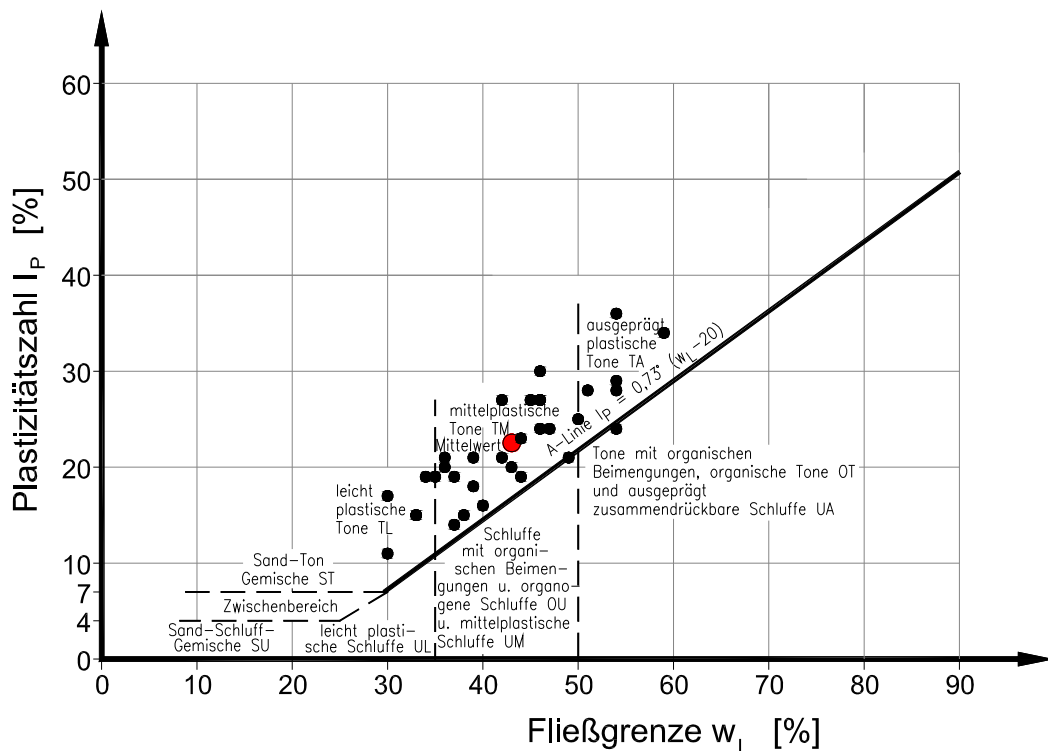


Abb. 5.8: Casagrande-Diagramm; Tegelen-Ton

In Verbindung mit den natürlichen Wassergehalten, die relativ weit zwischen 14,0 und 32,0 % streuen, Mittelwert $\bar{w} = 23,1$ %, berechnen sich Konsistenzwerte zwischen 0,32 und 1,25 bei einem Mittelwert $\bar{I}_c = 0,86$. Dieser Wert charakterisiert eine überwiegend steife Zustandsform ($I_c = 0,75 - 1,0$). Wertet man die beiden Werte mit 0,32 und 0,36 (breiig) als Ausreißer (s. Anh. 1 u. 2), erhöht sich der Mittelwert auf $\bar{I}_c = 0,89$.

5.4.3.3 Mineralchemische Charakterisierung

Von dem Tegelen-Ton liegen keine Bestimmungen des ENSLIN-Wassergehaltes w_E vor. Die Lage der Versuchspunkte in der Aktivitätskarte nach SKEMPTON (Abb. 5.9) weist das Material als insgesamt inaktiv aus.

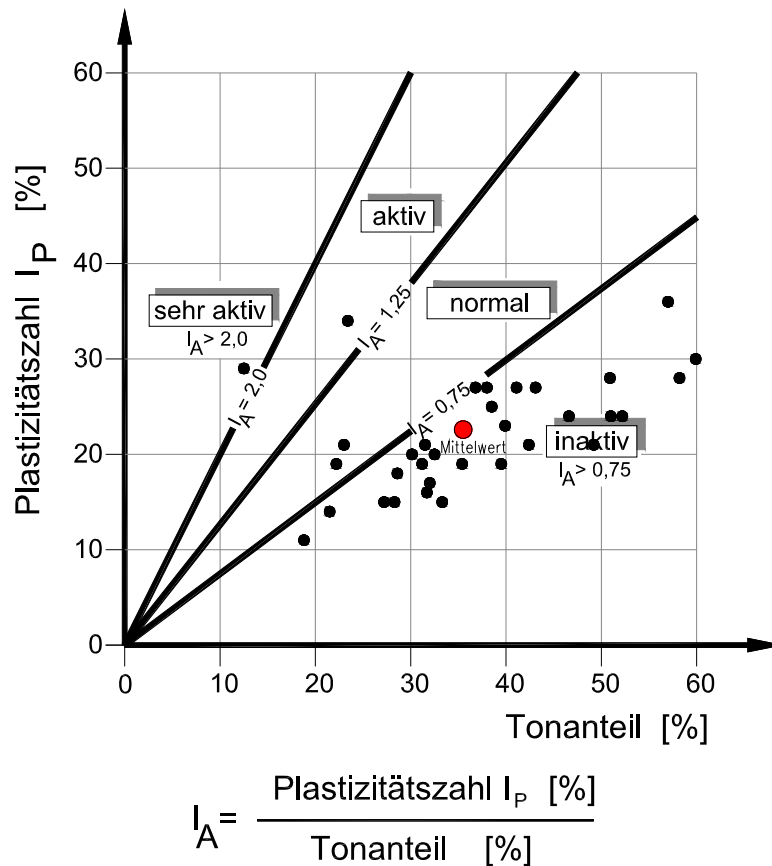


Abb. 5.9: Aktivitätskarte nach SKEMPTON (n = 33); Tegelen-Ton (Hambach)

5.4.3.4 Trockendichte, Porenzahl, Sättigungsgrad

Die Trockendichten liegen zwischen 1,37 und 1,89 g/cm³, bei einem Mittelwert $\bar{\rho}_d = 1,63 \text{ g/cm}^3$. Mit Rohdichten ρ_s zwischen 2,51 und 2,74 g/cm³ (i.M. 2,66 g/cm³) berechnen sich Porenzahlen e zwischen 0,39 und 0,95, i.M. $\bar{e} = 0,64$.

Die aus den Parametern ρ_s , ρ_d und w berechneten Sättigungsgrade S der Gesamtstichprobe variieren zwischen 0,83 und 1,03, der Mittelwert liegt relativ hoch bei $S_r = 0,95$ und charakterisiert eine nahezu vollständige Sättigung.



5.4.3.5 Parameter zur Beschreibung von Schrumpfverhalten und Schrumpfpotenzial

Direkte labormäßige Ermittlungen der Schrumpfgrenze w_s liegen nicht vor. Die über den Ansatz nach KRABBE ermittelten Werte ($n = 33$) liegen zwischen 8 und 24 %, bei einem Mittelwert von 15 %. Die Schrumpfgrenze liegt damit i.M. ca. 5 % unter der Ausrollgrenze w_p .

Der Wert $S = w_s - w$ als Orientierungswert für das Schrumpfpotenzial liegt zwischen 0 und 18 %, i. M. bei ca. 8 %. Im Vergleich zum Lösslehm ist dieser Wert deutlich höher.

5.4.3.6 Volumetrische und lineare Schrumpfung

Wegen der weitgehenden Sättigung der Gesamtstichprobe ist die Anwendung der Beziehung nach Abschn. 4.4.2:

$$\varepsilon_v = 1 - \frac{1 + \bar{w}_s \cdot \bar{\rho}_s}{1 + w \cdot \bar{\rho}_s} \quad [1]$$

zulässig. Die darüber berechneten ε_v -Werte liegen zwischen 2 und 26 %, i.M. bei 13,4 %. Die mittlere lineare Schrumpfung ε_L liegt bei 4,5 % und ist damit gegenüber dem Lösslehm ebenfalls deutlich erhöht. Die Funktion $\varepsilon_v = f(w_s, w, \rho_s)$ ist in Abb. 5.10 dargestellt.

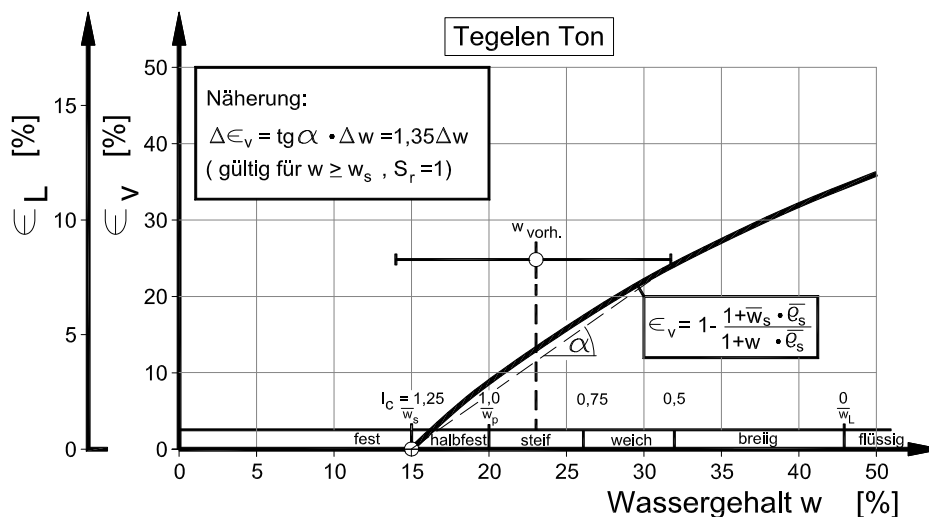


Abb. 5.10: Beziehung zwischen der Volumenschrumpfung ε_v , der linearen Schrumpfung ε_L und dem Wassergehalt w für weitgehend wassergesättigte Proben des Tegelen-Tons (Hambach)



Bestimmt man die mittlere Steigung der Sekante in Abb. 5.10 zwischen $w = w_s$ und w_{max} mit dem Winkel α gegen die Abszisse, ergeben sich folgende Beziehungen (gültig für $w \geq w_s$!):

$$\begin{aligned} \Delta \varepsilon_v &= \tan \alpha \cdot \Delta w &= 1,35 \cdot \Delta w & \text{ und mit } \varepsilon_L = \frac{\varepsilon_v}{3} : \\ \Delta \varepsilon_L & &= 0,45 \cdot \Delta w & \end{aligned}$$

Aus der Beziehung folgt, dass eine gesättigte Schicht von 1 m Stärke bei einer gleichmäßigen Reduzierung des Wassergehaltes um 1 % eine Reduzierung der Dicke um 4,5 mm/m erfahren würde. Gegenüber dem ungesättigten Lösslehm liegt dieser Wert um den Faktor 3 höher. Bei größeren Schichtmächtigkeiten und stärkerer Abtrocknung können sich deutlich größere Gesamtverformungen einstellen.

Bei Anwendung der Kriterien nach Tab. 5.2 ergibt sich eine hohe Schrumpff Gefahr und eine Beurteilung als schlechter Baugrund.

5.4.3.7 Wasserspannung ψ als Funktion des volumetrischen Wassergehaltes θ

Da von dem Tegelen-Ton keine Entwässerungskurve vorliegt, wird nachfolgend eine Vergleichskurve herangezogen, die für einen TM-Ton mit i.M. vergleichbaren bodenphysikalischen Kennwerten ermittelt wurde (s. Abb. 5.11). Eine spürbare Entwässerung ist danach erst ab Saugspannungen > 100 kPa (pF 3) zu erwarten, das Material weist kaum Grobporen auf. Im Bereich der Schrumpfgrenze w_s liegt die Wasserspannung bei 1.000 kPa bzw. pF 4.

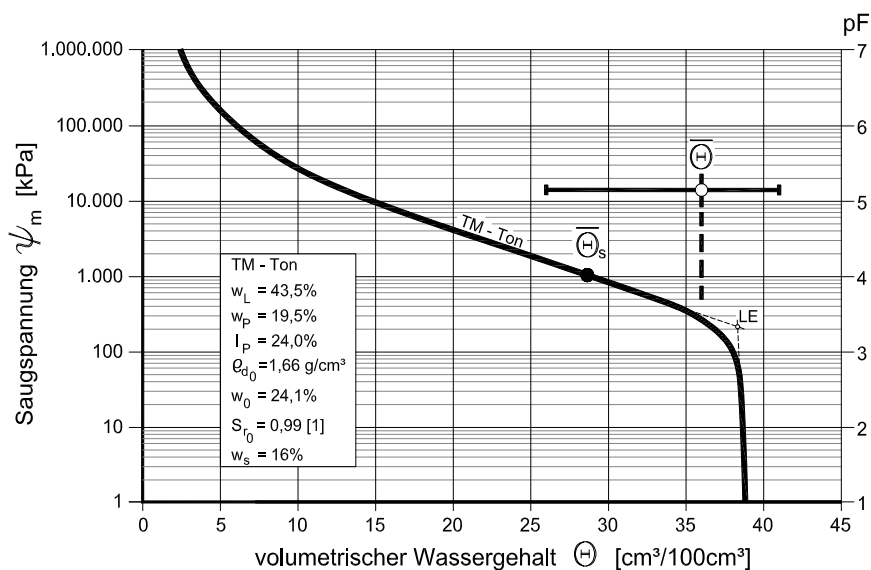


Abb. 5.11: Entwässerungskurve für einen mittelplastischen Vergleichsboden (TM)



5.4.4 Detailauswertung Tegelen-Ton (Raum Hambach)

In Tab. 5.3 wurden mit den Einzeldaten der Anl. 1 Bohrungen ausgewählt, in denen aus dem Tonhorizont mehrere Proben (≥ 4) vorliegen und eine teufenmäßige Zuordnung (oben, unten) zulassen. Die Bohrungen HU-581, HU-828 und HU-829 erfüllen diese Bedingungen. Gleichzeitig handelt es sich um Bohrungen, die erst mindestens 33 – 48 Jahre nach erfolgter GW-Absenkung abgeteuft und beprobt worden sind. Zum Vergleich ist mit HU-890 eine Bohrung mit Labordaten gegenübergestellt, die nicht von einer GW-Absenkung betroffen ist. Alle Probenentnahmen konzentrieren sich auf den Teufenbereich 46,5 – 52,0 m u. GOK

Tab. 5.3: Kenndaten ausgewählter Bohrungen und Materialproben

Bohrung	Datum	Ort	Teufe m u. GOK	Kennwerte					Grundwasser
				w [-]	w _L [1]	w _P [1]	S _r [1]	T [%]	
HU-581	1993	Elsdorf	46,4 – 46,6	0,24	0,54	0,30	0,938	51,1	abgesenkt vor 1960 $\Delta t \geq 33$ a
			47,8 – 48,0	0,25	0,35	0,16	1,01	31,2	
			49,0 – 50,0	0,28	0,51	0,23	0,998	58,2	
			54,0 – 54,4	0,24	0,40	0,24	1,00	31,7	
			Mittelwerte	0,224	0,45	0,23	0,99	43,0	
HU-828	2003	Heppendorf	47,0 – 47,3	0,24	0,46	0,19	0,869	28,6	abgesenkt vor 1960 $\Delta t \geq 43$ a
			47,3 – 47,7	0,21	0,38	0,21	0,898	31,2	
			47,7 – 48,0	0,27	0,50	0,25	0,877	38,5	
			48,0 – 48,4	0,21	0,36	0,15	0,945	23,0	
			48,4 – 48,8	0,19	0,46	0,19	0,91	38,1	
Mittelwerte	0,238	0,43	0,20	0,90	32,0				
HU-829	2008	Tgb. Hambach	47,8 – 48,0	0,30	0,37	0,23	0,873	21,5	abgesenkt vor 1960 $\Delta t \geq 48$ a
			48,1 – 48,3	0,31	0,37	0,18	0,868	22,2	
			49,4 – 49,8	0,16	0,33	0,18	0,984	36,8	
			51,0 – 51,6	0,18	0,45	0,18	0,94	43,1	
			Mittelwerte	0,238	0,38	0,19	0,92	31,0	
HU-890	2009	Morschenich	51 – 51,8	0,28	0,38	0,23	0,98	28,0	unbeeinflusst

Unter Berücksichtigung der statistischen Messzahlen der Gesamtstichprobe nach Tab. 1 lassen sich für die auswertbaren Einzelbohrungen keine signifikanten Unterschiede über die Schichthöhe ablesen.

Vereinzelt treten zwar niedrige Wassergehalte (< 20 %) auf, diese sind andererseits aber mit relativ hohen Sättigungsgraden verknüpft. Die Streubreite bzw. der Variationskoeffizient der kleinen Stichprobe (n = 4 bzw. 5) muss zwangsläufig größer sein als die der Gesamtstichprobe.



Aus den vorliegenden Daten ergeben sich damit keine Hinweise auf Veränderungen, die durch die veränderten GW-Verhältnisse verursacht sein könnten. Auch die Kennwerte der unbeeinflussten Bohrung HU-890 liefern hierfür keinen Hinweis. Der Einzelwert für den Wassergehalt von 28 % ist zwar relativ hoch, er wurde aber in den drei anderen Vergleichsbohrungen der Tab. 5.3 in Einzelabschnitten ebenfalls erreicht oder sogar überschritten. Für eine Absicherung der Aussage wäre eine größere Probenzahl aus Bereichen ohne Grundwassereinfluss wünschenswert.

5.4.5 Einzelauswertung Indener-Ton (7A)

5.4.5.1 Kornverteilung

Das Körnungsband von 52 Proben ist in Abb. 5.12 dargestellt. Im Mittel handelt es sich um einen schwach feinsandigen, stark schluffigen Ton. Der Tongehalt schwankt dabei stark zwischen 33 und 65 %.

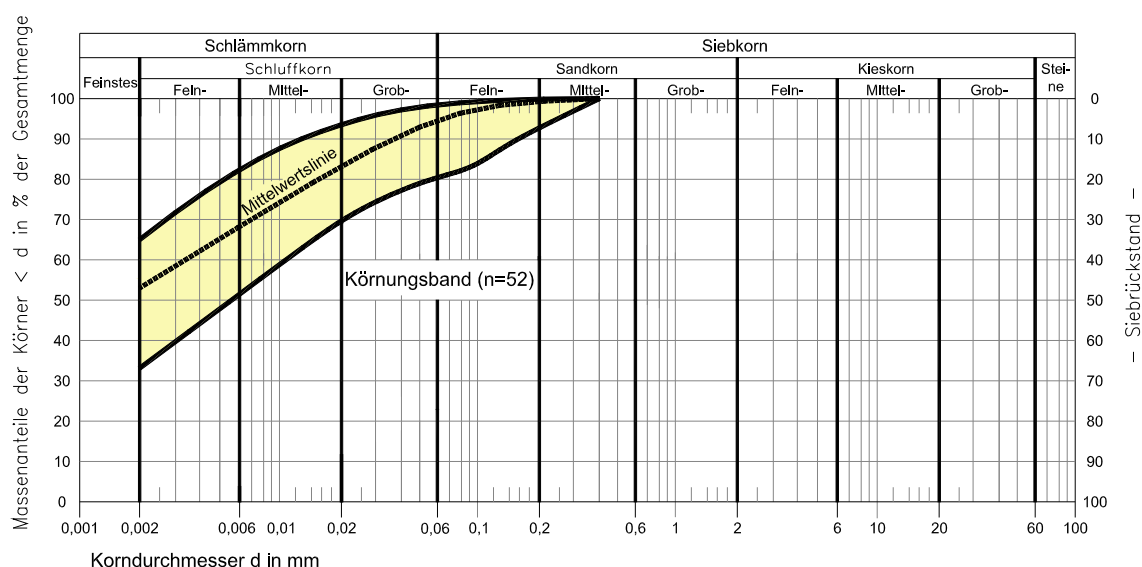


Abb. 5.12: Körnungsband Indener-Ton (n = 52)

5.4.5.2 Grenzwassergehalte, Konsistenzahlen

Die Lage der Versuchspunkte im CASAGRANDE-Diagramm zeigt Abb. 5.13

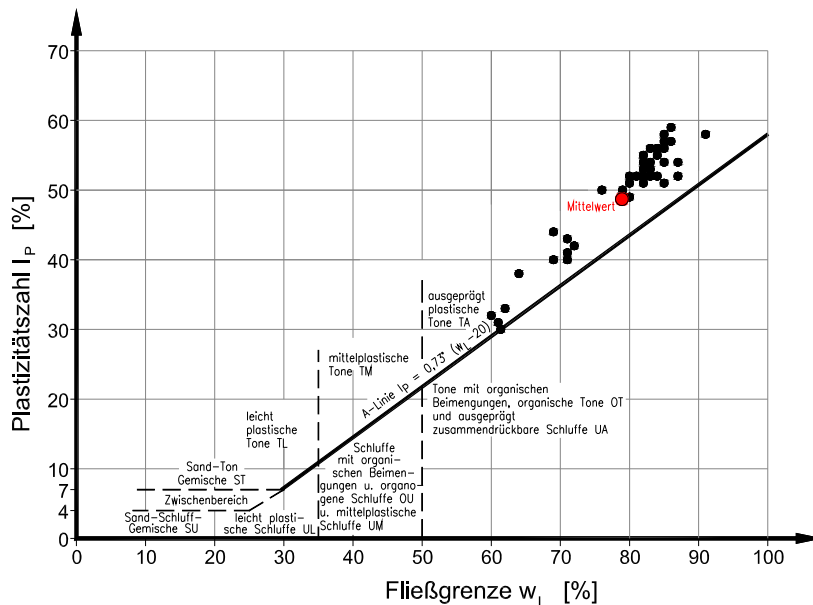


Abb. 5.13: CASAGRANDE-Diagramm – Indener-Ton

Die Mehrzahl der Versuchswerte liegt oberhalb der A-Linie im Bereich $w_L > 50\%$. Der Ton wird danach als hochplastisch (TA) eingeordnet. Die Lage oberhalb der A-Linie überrascht zunächst, weil der durch Glühen bei 550° ermittelte Organikgehalt i.M. bei $15,7\%$ liegt, bei Einzelwerten zwischen 13 und 19% . Nach HILPÜSCH (1990) haben zusätzliche Untersuchungen mit $H_2 O_2$ (Nassoxydation) deutlich niedrigere Werte zwischen 7 und 11% ergeben. Untersuchungen mittels IR-Absorption reduzierten die Werte (gesamt) auf $4,5$ bis $7,0\%$, i.M. $5,5\%$. Der große Unterschied zwischen Glühen bei 550° und $H_2 O_2$ -Behandlung deutet auf eine Verfälschung durch Kristallwasserverluste bei der verwendeten Glüh-temperatur hin.

In Verbindung mit natürlichen Wassergehalten zwischen 30 und 38% (i.M. $34,1\%$) ergeben sich Konsistenzzahlen zwischen $0,82$ und $1,0$, i.M. von $0,91$. Das Material steht damit durchgehend im oberen steifen Konsistenzbereich an. Der Variationskoeffizient V ist niedriger als 20% und weist das Material insgesamt als sehr homogen aus.

5.4.5.3 Mineralchemische Charakterisierung

Der Indener-Ton ist nach der Lage im SKEMPTON-Diagramm (Abb. 5.14) als „normal“ zu klassifizieren. Es gibt keine Hinweise auf eine Dominanz quellfähiger Minerale in der Tonfraktion.

Nach den Untersuchungen von HILPÜSCH (1990) kann von folgendem Mineralspektrum ausgegangen werden: Quarz, Kaolinit, Illit und Pyrit sowie nur untergeordnet dreischichtiges Wech-



sellagerungsmineral. Die Bestimmung des Enslin-Wassergehaltes w_E an 52 Einzelproben lieferte Werte zwischen 62 und 99 %, bei einem Mittelwert von 87 %. Auch diese Werte bestätigen die weitgehende Inaktivität des Materials.

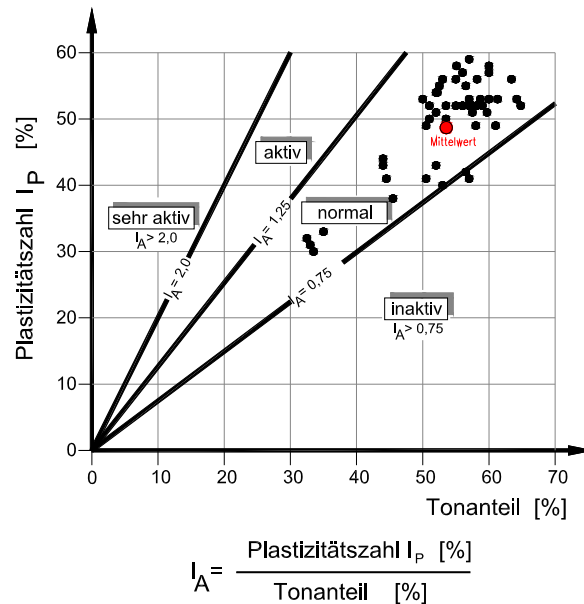


Abb. 5.14: Aktivitätsdiagramm nach SKEMPTON; Indener-Ton

5.4.5.4 Trockendichte, Porenzahl, Sättigungsgrad

Bedingt durch die niedrigere Rohdichte (i.M. $2,57 \text{ g/cm}^3$) und den höheren Wassergehalt (i.M. 34,1 %) liegt die Trockendichte ρ_d i.M. nur bei $1,36 \text{ g/cm}^3$ bei Einzelwerten zwischen $1,30$ und $1,42 \text{ g/cm}^3$. Der niedrige Variationskoeffizient von nur 2,3 % spricht ebenfalls für die Homogenität des Indener-Tones. Entsprechend der niedrigen Trockendichte steigen die Porenzahlen e i.M. auf 0,9 an. Der mittlere Sättigungsgrad von 0,98 weist das Material als quasi wassergesättigt aus.

5.4.5.5 Parameter zur Beschreibung von: Schrumpfverhalten und Schrumpfpotenzial

Für das Indener Material liegt in einer überdurchschnittlich großen Stichprobe ($n = 52$) sowohl nach dem Formelansatz KRABBE berechnete wie auch nach DIN 18122, T2 versuchstechnisch ermittelte Werte für die Schrumpfgrenze vor. Die nach KRABBE berechneten Werte liegen zwischen $w_s = 12$ und 24 %, i.M. bei $17,2$ %.



Die direkt im Versuch ermittelten Werte ($n = 52$) weisen einen Mittelwert von $\overline{w_s} = 19,3 \%$ auf, bei Einzelwerten zwischen 15 und 23 %. Die Schrumpfgrenzen-Werte liegen damit i.M. um mehr als 10 Wassergehalts-% unter der Ausrollgrenze. Die Schrumpfungszahl S als Orientierungswert für das Schrumpfpotenzial, bezogen auf den natürlichen Wassergehalt, liegen zwischen 11 und 24 %, i.M. bei 16,8 %. Im Vergleich zum Lösslehm liegt dieser Wert um den Faktor ca. 7, gegenüber dem Tegelen-Ton um den Faktor 2 höher, i.W. bedingt durch die höheren natürlichen Wassergehalte.

5.4.5.6 Volumetrische und lineare Schrumpfung

Die berechneten Werte für ε_v liegen zwischen 14 und 31 %, bei einem Mittelwert von 23 % und die mittlere lineare Schrumpfung ε_L bei Abtrocknung vom mittleren Wassergehalt $\overline{w} = 34,1$ von ca. 7,5 %. Bei Anwendung der Kriterien nach Tab. 5.2 würden sich damit eine sehr hohe Schrumpff Gefahr und eine sehr schlechte Baugrundbeschaffenheit unter der Voraussetzung einer direkten Interaktion zwischen Bauwerk und tonigem Baugrund und einer entsprechenden Abtrocknung ergeben.

Bei inkrementeller Schreibweise lassen sich für die Sekante nach Abb. 5.15 an die dargestellt Kurve im Wassergehaltsbereich w_s bis w_{max} folgende Relationen angeben:

$$\Delta\varepsilon_v = 1,3 \cdot \Delta w \quad \text{und mit } \varepsilon_L :$$
$$\Delta\varepsilon_v = 0,45 \cdot \Delta w$$

Diese Werte entsprechen etwa denen, die auch für den Tegelen-Ton ermittelt wurden.

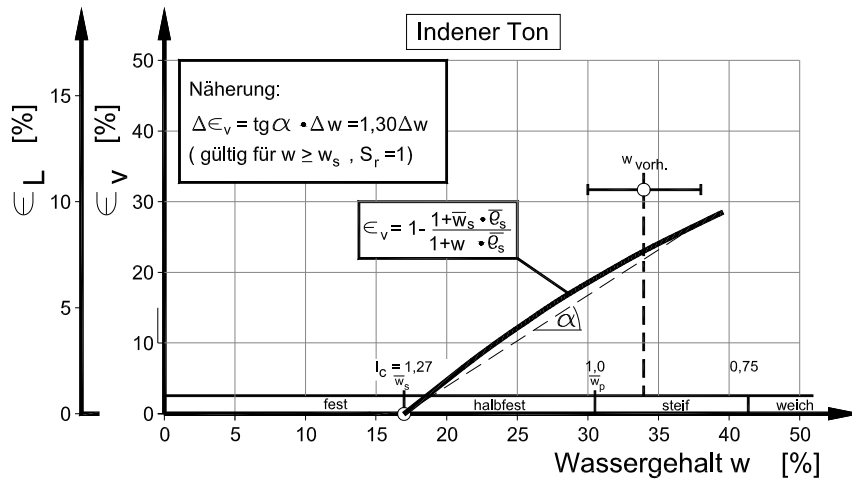


Abb. 5.15: Beziehung zwischen der Volumenschrumpfung ϵ_v , der linearen Schrumpfung ϵ_L und dem Wassergehalt w für weitgehend wassergesättigte Proben des Indener-Tons (Tgb. Inden)

5.4.5.7 Saugspannung ψ als Funktion des volumetrischen Wassergehaltes θ

Nach vorliegenden Archivunterlagen (GB) wurde eine Wasserspannungskurve an aufbereitetem Indener-Ton bestimmt. Die Probe wurde proctorverdichtet hergestellt mit einer Trockendichte $\rho_{d0} = 1,35 \text{ g/cm}^3$, $w_0 = 0,36$, $\theta_0 = 0,49$. Das Ergebnis ist in Abb. 5.16 dargestellt.

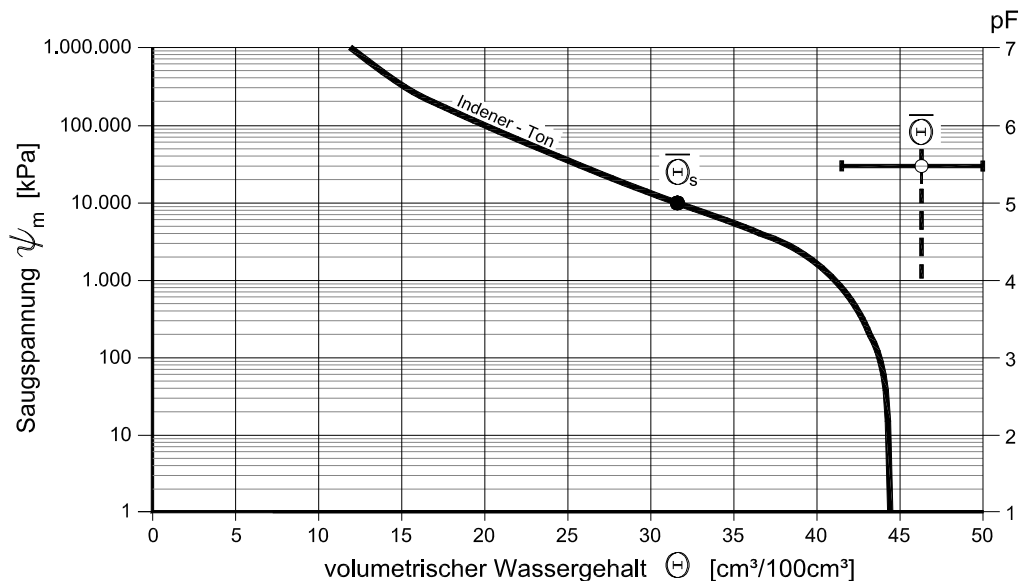


Abb. 5.16 Entwässerungskurve für einen aufbereiteten, proctorverdichteten Indener-Ton



Eine Entwässerung ist, wie bereits beim Tegelen-Ton festgestellt wurde, erst ab einer Saugspannung ≥ 100 kPa (pF 3) festzustellen. Im Bereich der Schrumpfgrenze \bar{w}_s liegt die Wasserspannung bereits bei ca. 10.000 kPa bzw. pF 5. Damit ist in der Anfangsphase ein ähnliches Verhalten wie bei dem Tegelen-Ton gegeben.

5.4.6 Zusammenfassende Bewertung der Materialkenndaten

Die drei ausgewählten feinkörnigen Bodenhorizonte aus dem Rheinischen Braunkohlenrevier decken den Bereich TL – TA im CASAGRANDE-Diagramm ab und reichen granulometrisch vom Schluff über einen stark tonigen Schluff bis zu einem stark schluffigen Ton (Abb. 5.16 und 5.17).

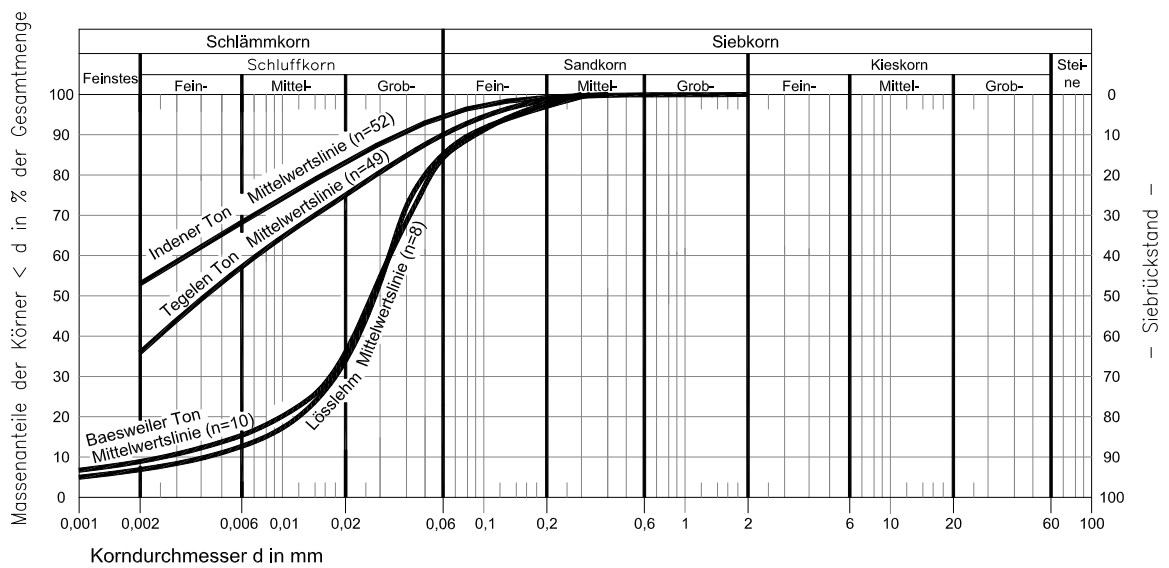


Abb. 5.17: Mittelwertslinien der untersuchten Horizonte

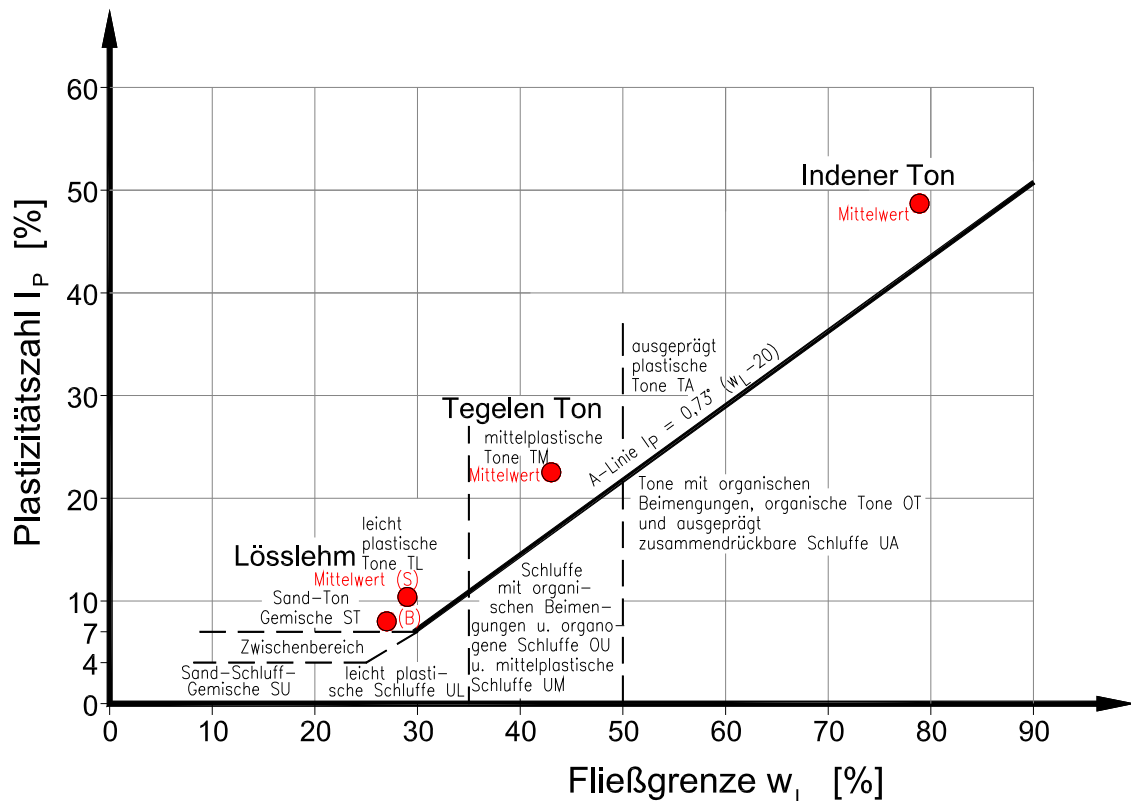


Abb. 5.18: Plastizitätsdiagramm mit Eintragung der Mittelwerte

Alle Böden sind inaktiv in Bezug auf den Mineralbestand und als „nicht organisch“ anzusprechen.

Während die Lösslehmdecken insgesamt im ungesättigten bzw. teilgesättigten Bereich liegen ($S_r < 1,0$), sind die tiefer liegenden Ton-Horizonte bei statistischer Betrachtung nahezu wasser gesättigt ($S_r \sim 1,0$).

Trotz unterschiedlicher Kornverteilungen und plastischer Eigenschaften liegen die versuchs-technisch ermittelten und die aus den Grenzwassergehalten berechneten mittleren Schrumpfgrenzen mit Werten zwischen 15 und 19 % (s. Tab. 5.1) relativ eng zusammen. Betrachtet man die Schrumpfszahl $S = w - w_s$ als Indikator für das Schrumpfpotenzial, ergaben sich jedoch deutliche Unterschiede. \bar{S} nimmt von ca. 1- 2 % beim Lösslehm (TL) auf 8 % beim Tegelen-Ton (TM) und ca. 17 % beim Indener-Ton zu.

Die gleiche Tendenz ist auch bei den volumetrischen und den daraus abgeleiteten linearen Schrumpfmaßen ε_v bzw. ε_L zu erkennen. Die mittlere Volumenschrumpfung ε_v nimmt von 5,2 % (Lösslehm) über 13,5 % (Tegelen-Ton) auf 22 % (Indener-Ton) zu bei einer theoretischen Abtrocknung vom mittleren Wassergehalt auf $w = 0$, also bei völliger Abtrocknung. Die lineare



Schrumpfung kann mit einem Drittel dieser Werte angesetzt werden, also mit 1,7 % (TL), 4,5 % (TM) und 7,5 % (TA).

Bei der inkrementellen Auswertung der Schrumpfkurven in der Form $\Delta\varepsilon_v = \alpha \cdot \Delta w$ ergeben sich für die beiden nahezu wassergesättigten Tone keine erkennbaren Unterschiede. Der Faktor α liegt einheitlich bei etwa 1,3 und liefert für die eindimensionale Längenänderung die Beziehung:

$$\Delta\varepsilon_L \approx 0,45 \cdot \Delta w.$$

Im Vergleich dazu fällt diese Beziehung für den nur teilgesättigten Lösslehm wesentlich günstiger aus:

$$\Delta\varepsilon_L \approx 0,17 \cdot \Delta w.$$

Die Werte unterscheiden sich um den Faktor 2,6.

Eine aufgeprägte Saugspannung führt bei dem anfänglich gesättigten Lösslehm bereits bei einem pF-Wert von 2,0 bzw. einer Saugspannung von 10 kPa zu einer beginnenden Entwässerung, bei den Tonen erhöht sich dieser Wert auf etwa pF 3 oder 100 kPa. Im Bereich der Schrumpfgrenze erhöhen sich die Werte auf etwa pF 3,0 (TL), pF 4 (TM) und pF 5 (TA). Dieses Ergebnis steht in Übereinstimmung mit DIN 19682-5, in die der Zusammenhang zwischen Saugspannung und Schrumpfgrenze (s. Tab. 5.3) aufgenommen wurde. Danach nimmt bei gleichem Feuchtezustand unterschiedlicher Böden die für eine weitere Entwässerung erforderliche Saugspannung gleichsinnig mit dem steigenden Tongehalt zu, d.h. mit zunehmender Feinkörnigkeit (Tongehalt) nimmt der Widerstand gegen eine Entwässerung zu.



Tab. 5.4: Konsistenz bindiger Böden, Konsistenzgrenzen und zugehörige Bodenfeuchte

Konsistenzbereich bindiger Böden		Bodenmerkmale bei geringer und mittlerer Rohdichten, trocken ¹⁾		pF-Bereich in lg hPa ²⁾	Feuchtezustand des Bodens	
Kurzzeichen	Benennung	Zustand bindiger Proben (Massenanteil an Ton > 17 %)	Zustand nichtbindiger Proben (Massenanteil an Ton ≤ 17 %)		Benennung	Kurzzeichen
ko1	fest (hart)	nicht ausrollbar und knetbar, da Bodenfarbe dunkelt bei Wasserzugabe	staubig; helle Bodenfarbe stark nach	> 4,0	trocken	feu1
Schrumpfgrenze (siehe auch DIN 18122-1)						
ko2	halbfest (bröckelig)	noch ausrollbar, aber nicht knetbar, da bröckelnd beim Ausrollen auf 3 mm Dicke		4,0 bis > 2,7	schwach feucht	feu2
Ausrollgrenze (siehe auch DIN 18122-1)						
ko3	steif (-plastisch)	ausrollbar auf 3 mm Dicke ohne zu zerbröckeln. schwer knet- und eindrückbar Bodenfarbe dunkelt bei Wasserzugabe	Finger werden etwas feucht; auch durch Klopfen am Bohrer kein Wasseraustritt aus den Poren; Wasserzugabe stark nach	2,7 bis > 2,1	feuchte	feu3
ko4	weich (-plastisch)	weich, ausrollbar bis auf < 3 mm Dicke leicht eindrückbar optimal knetbar	Finger werden deutlich feucht, durch Klopfen wahrnehmbarer Wasseraustritt	2,1 bis > 1,4	sehr feucht	feu4
ko5	breiig (-plastisch)	quillt beim Pressen in der Faust zwischen den Fingern hindurch ausrollbar kaum knetbar, da zu weich	durch Klopfen deutlicher Wasseraustritt, Probe zerfließt, oft Kernverlust	1,4 bis > 0	nass	feu5
Fließgrenze (siehe auch DIN 18122-1)						
ko6	zähflüssig	nicht ausroll- und knetbar, da fließend	Kernverlust	0	stark nass	feu6
¹⁾ Bei hoher Rohdichte im nassen und feuchten Bereich höhere Konsistenz: ²⁾ Mit abnehmenden Tongehalt nimmt bei gleichem Feuchtezustand des Bodens im Allgemeinen die Saugspannung ab:						
ANMERKUNG: Die Saugspannung des Bodenwassers in lg hPa entspricht lg mbar.						



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

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

Nachfolgend werden einige Grundfälle behandelt, die in Abb. 6.1a und 6.1b schematisch für die **Oberseite** einer oberflächennahen Tonschicht dargestellt sind. Fall O 1 behandelt eine einseitige Entwässerung (Verdunstung) ohne Deckschicht, ohne und mit Versiegelung (Bebauung, Verkehrsflächen). Fall O 2 ist wie Fall O 1, jedoch mit einer überlagernden Deckschicht.

Für die Fälle O 1 und O 2 können unterschiedliche Grundwassersituationen an der **Unterseite** der Tonschicht angenommen und mit diesen kombiniert werden. Diese Fälle (GW 1 – GW 3) sind in Abb. 6.2 schematisch für natürliche Ausgangsbedingungen dargestellt. In Fällen einer bergbaubedingten längerfristigen GW-Absenkung können sich je nach Ausgangssituation die Fälle verändern. Situation GW1 kann in GW 2 oder GW 3 übergehen.

Oberseite

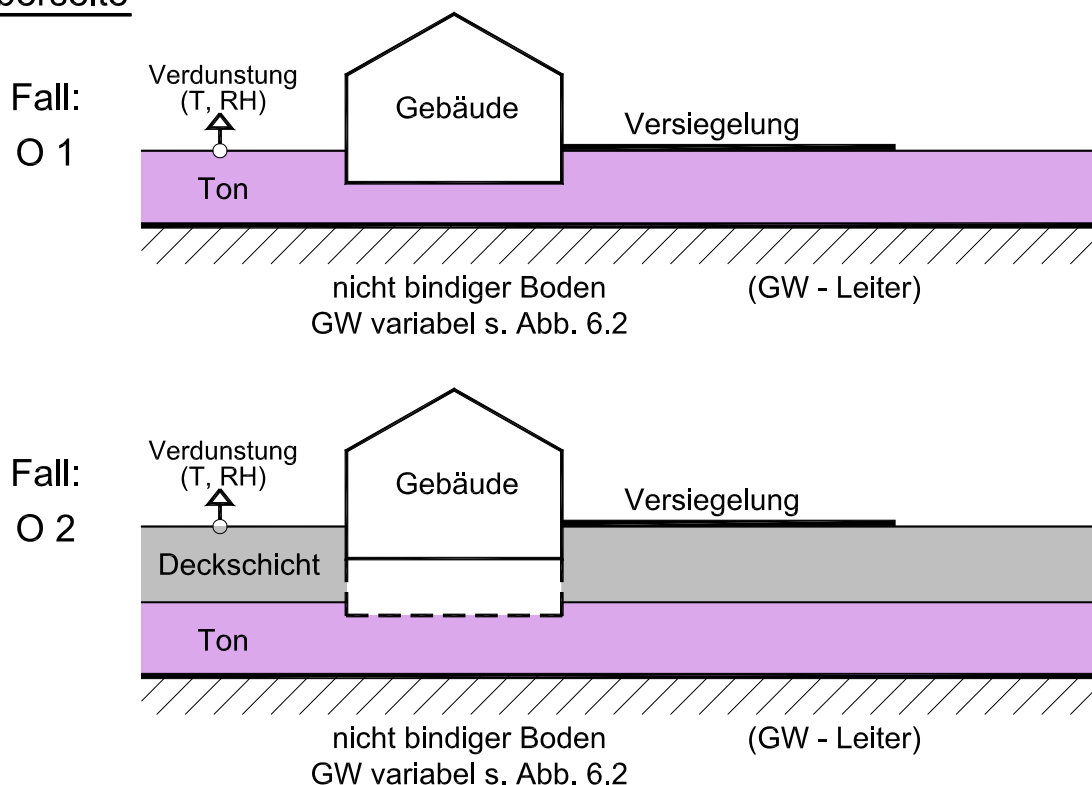


Abb. 6.1: Randbedingungen für den Schrumpfvorgang bei natürlicher Lagerung, ohne und mit Versiegelung der Oberfläche



Unterkante

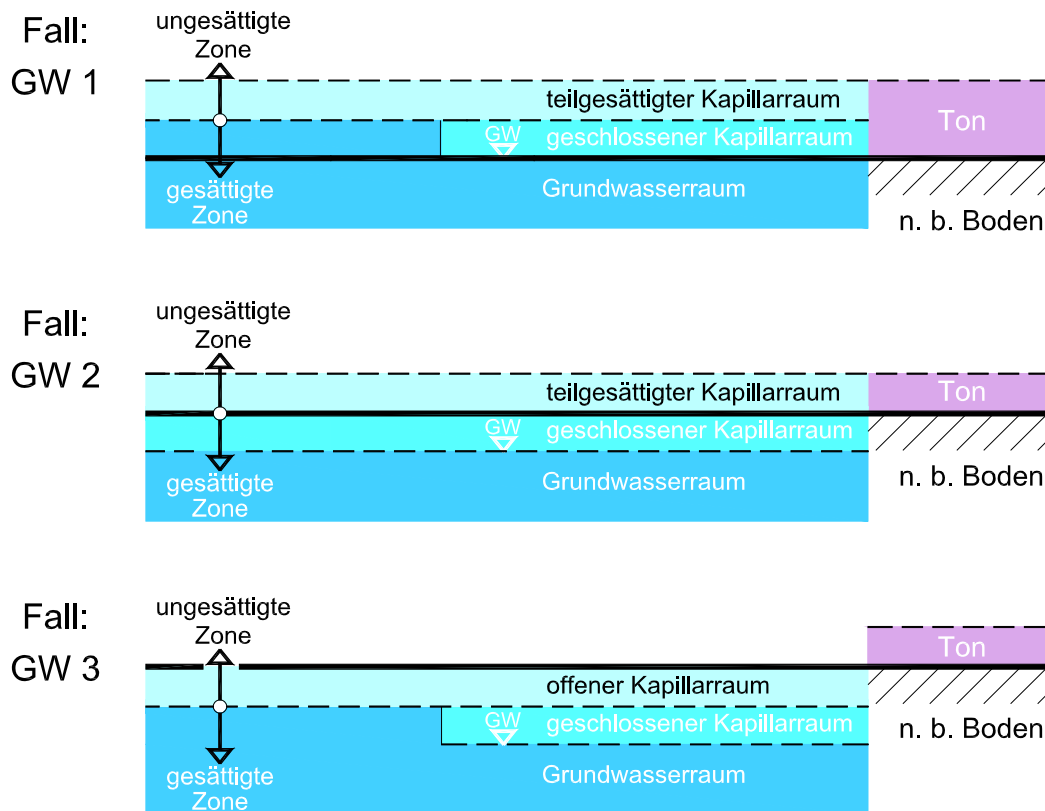


Abb. 6.2 GW-Situationen an der Unterseite einer Tonschicht ohne und mit GW-Absenkung

6.1.1 Verhältnisse an der Oberseite des Mehrschichtsystems

6.1.1.1 Einflussgrößen auf das Schrumpfverhalten und mögliche Bodenverformungen

Natürliche Randbedingungen

Aus den vorangestellten thermodynamischen und bodenmechanischen Zusammenhängen wird die maßgebende Rolle des Bodenwassers im Hinblick auf Veränderungen der Bodeneigenschaften deutlich. Bei der Analyse von Mehrschichtsystemen an der Geländeoberfläche nimmt der Baugrund aktiv an den Veränderungen der natürlichen Gegebenheiten (jahreszeitliche Klimaschwankungen, langfristige lokale aber auch globale klimatische Schwankungen) aktiv teil. Baugrundverformungen sind immer eine Reaktion auf ein Ungleichgewicht der auf das Bodenwasser wirkenden Kräfte. Jeder Boden reagiert darauf, in Abhängigkeit von seiner Porenstruktur



und mineralogischen Zusammensetzung jedoch unterschiedlich. Jede Veränderung des Bodenwasserhaushaltes führt zu einer Änderung des Spannung-Verformungsverhaltens. Dieses wird durch folgende Faktoren bestimmt:

- Wasserzufuhr
- Wasserentzug (Wasserabfuhr oder Verdunstung)
- Belastung oder Entlastung des Bodens.

Veränderte natürliche Gegebenheiten

Ursachen hierfür können sein:

- Klimatische Veränderungen, i.W.
 - Jahreszeitliche Veränderungen im Wasserhaushalt der oberen Bodenzone (aktive Zone) bis ca. 1,5 m.
- Veränderungen durch Vegetation, i.W. durch:
 - Wurzelwachstum von Bäumen. Hier kann die „aktive Zone“ deutlich tiefer reichen.
 - Bei gemäßigttem Klima kann in Trockenperioden die Einflusstiefe für Wurzeln von Laubbäumen bis zu 6 m betragen.
 - Ein Einfluss von Bäumen auf den Bodenwasserhaushalt ist auch noch in größeren Abständen gegeben (z.B. bei Pappeln, Eichen, Weiden: bis zu 10 – 15 m).
- Anthropogene Veränderungen, wie:
 - Flächenversiegelungen/Flächenüberdachungen.
 - Maßnahmen zur Grundwasserhaltung (s. a. Abschn. 6.3), Dränmaßnahmen
 - Künstliche Wärmezufuhr (z.B. Heizkanäle, Heizungsräume).
 - Veränderung des Wasserhaushaltes durch Be- und Entlastung.
 - Wasserzuführung (Versickerung), Leitungsleckagen.

Unterschiedliches Schrumpfverhalten und Schrumpfpotenzial bindiger Böden

Für den Schrumpfprozess bzw. die Schrumpfgefährdung einer oberflächennahen Tonschicht spielen folgende Einflussgrößen eine Rolle:

- Wassergehalt des Bodens im natürlichen Zustand relativ zu dem materialspezifischen Schrumpf-Wassergehalt w_s - ausgedrückt durch die Schrumpfszahl S und das Schrumpfmaß ε_v bzw. ε_L (s.a. Abschn. 4.4.2). S und ε sind damit Indikatoren für das Schrumpfpo-



tenzial. Für den anstehenden Lösslehm (= leicht plastischer Ton nach DIN 18196) ist die Schrumpfzahl 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 (s.a. Abschn.5.4).
- 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 Saugspannung an, um dem Boden Wasser zu entziehen.

6.1.1.2 Auslösemechanismen für Bodenbewegungen (Setzungen) - Interaktion Boden/Bauwerk

Aus der Veränderung des oberflächennahen Wasserhaushaltes resultieren bei bindigen Böden immer Änderungen des Bodenvolumens und daraus zwangsläufig Vertikalbewegungen, die sich auf eine Bauwerkskonstruktion auswirken können. Gleichmäßige und flächenhaft auftretende Setzungen, selbst bei großen Absolutbeträgen, sind i.d.R. unschädlich. Kleinräumige unregelmäßige Setzungen bzw. Setzungsunterschiede können dagegen zu Bauwerkschäden führen.

Als Parameter, die die Verformung des Bauwerks beschreiben, dienen allgemein der Setzungsunterschied, die Winkelverdrehung und die relative Durchbiegung (Abb. 6.3).

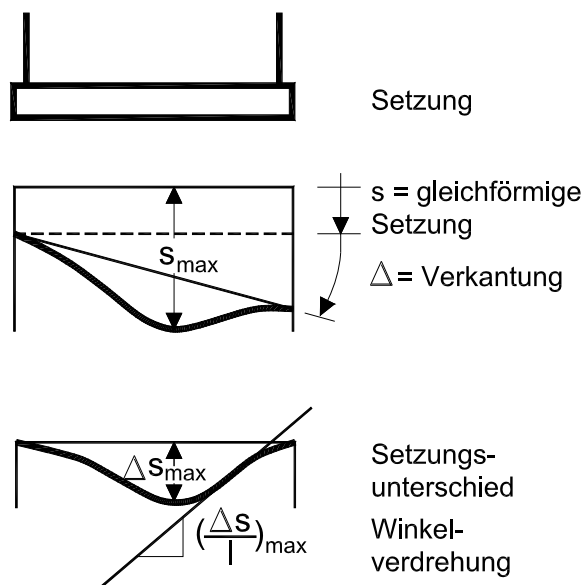


Abb. 6.3: Parameter zur Beschreibung von Verformungen durch Setzungen (SOMMER, 1978)

Ab welchem Grenzwert der o.a. Verformungen eine Rissbildung mit welcher Intensität und welchem Verlauf auftritt, hängt i.W. von den statischen Systemeigenschaften des Bauwerks, der Gründungskonstruktion, der Art der Baugrundbewegung und einer ggfs. durch belastungsabhängige Verformungen bereits eingetretene Vorbeanspruchung ab. Gemeinhin wird bei einer Muldenlage als Grenzwert für eine Winkelverdrehung ein Grenzwert von $> 1/500$ angegeben. Unterschiede im Setzungsverhalten bei Wasserentzug können sich dabei auch infolge petrographischer Unterschiede und Unterschiede in der horizontalen Wassergehaltsverteilung und Schichtmächtigkeit einstellen. Unterschiedliche vertikale Baugrundbewegungen entstehen auch dann, wenn bei lateral homogenen bindigen Bodenschichten sich der Wasserentzug nicht auf die ganze Fläche bezieht (s.a. Abb. 6.4).

Auch Deckschichten über einem schrumpfanfälligen Tonhorizont können auf sehr unterschiedliche Weise Schrumpfvorgänge beeinflussen. Nach Untersuchungen von PLACZEK (1982) kann für die Fälle O1 und O2 nach Abb. 6.1 ohne GW-Ausschluss nach unten folgendes abgeleitet werden:

- Der Schrumpfvorgang in dem bindigen Bodenhorizont (Ton) hängt ausschließlich von dem Wechselspiel zwischen den Kapillarkräften in diesem und denen in der Deckschicht ab.



- Deckschichten mit geringer Kapillarität verzögern bzw. verhindern das Schrumpfen von bindigen Böden; Deckschichten mit großer Kapillarität und damit hohen Saugspannungen (s. Abschn.3.4.2.4) begünstigen dagegen den Schrumpfvorgang.
- Stark bindige Bodenschichten ohne eine Deckschicht (s. Abb. 6.1, Fall O1 und ohne GW-Anbindung nach unten (Fall GW3)) stellen somit die ungünstigste Ausgangssituation dar.
- Mit zunehmender Deckschichtstärke oder Gründungstiefe setzen Schrumpfvorgänge nicht nur später ein, sondern sie laufen auch langsamer ab.

6.1.1.3 Beispiele für oberflächennahe Wechselwirkungen

Wasserentzug neben einer Gebäudegründung

Bodenverformungen sind nur durch den Aufbau bzw. Abbau von Saugspannungen möglich. Diese Vorgänge sind stets mit Bodenwasserbewegungen verbunden, die nach dem Potenzialkonzept (s. Abschn. 3.4.2.1) immer in Bereiche niedriger Energie erfolgen. Dieser Vorgang im Bereich einer Gebäudegründung wird beispielhaft in Abb. 6.4 verdeutlicht. In dem Beispiel wird ein tiefliegender GW-Spiegel in einem unterlagernden Sand/Kies-Horizont angenommen, d.h. ein Wassernachschub von unten in die tonige Deckschicht ist nicht vorhanden. Dieses Beispiel entspricht der Kombination der Fälle O 2 mit GW 3. Der stark bindige Gründungsboden ist von einer bindigen Deckschicht überlagert.

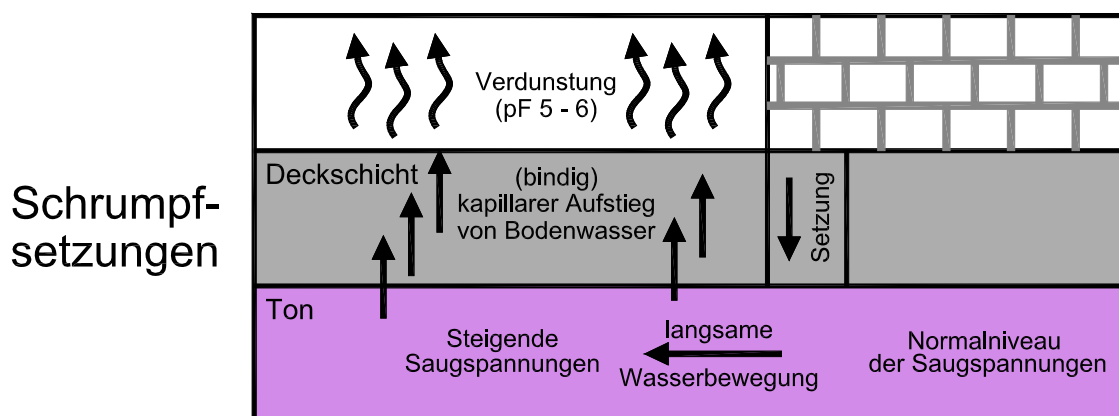


Abb. 6.4: Mechanismus der Bodenverformung bei Wasserentzug (BACHMANN, 1998)



In langen Trockenwetterphasen mit hoher Temperatur wird dem Boden im Nahbereich des Gebäudes durch Verdunstung an der Oberfläche (pF 5 - 6) Wasser entzogen und es können Saugspannungen erheblicher Größenordnung entstehen. In Abb. 6.5 ist ein schematisches Beispiel für die Austrocknung eines unbewachsenen Lössbodens bei hoher potenzieller Evaporati-on anhand der Wasserspannungs- und pF-Profile zu verschiedenen Zeiten gegeben.

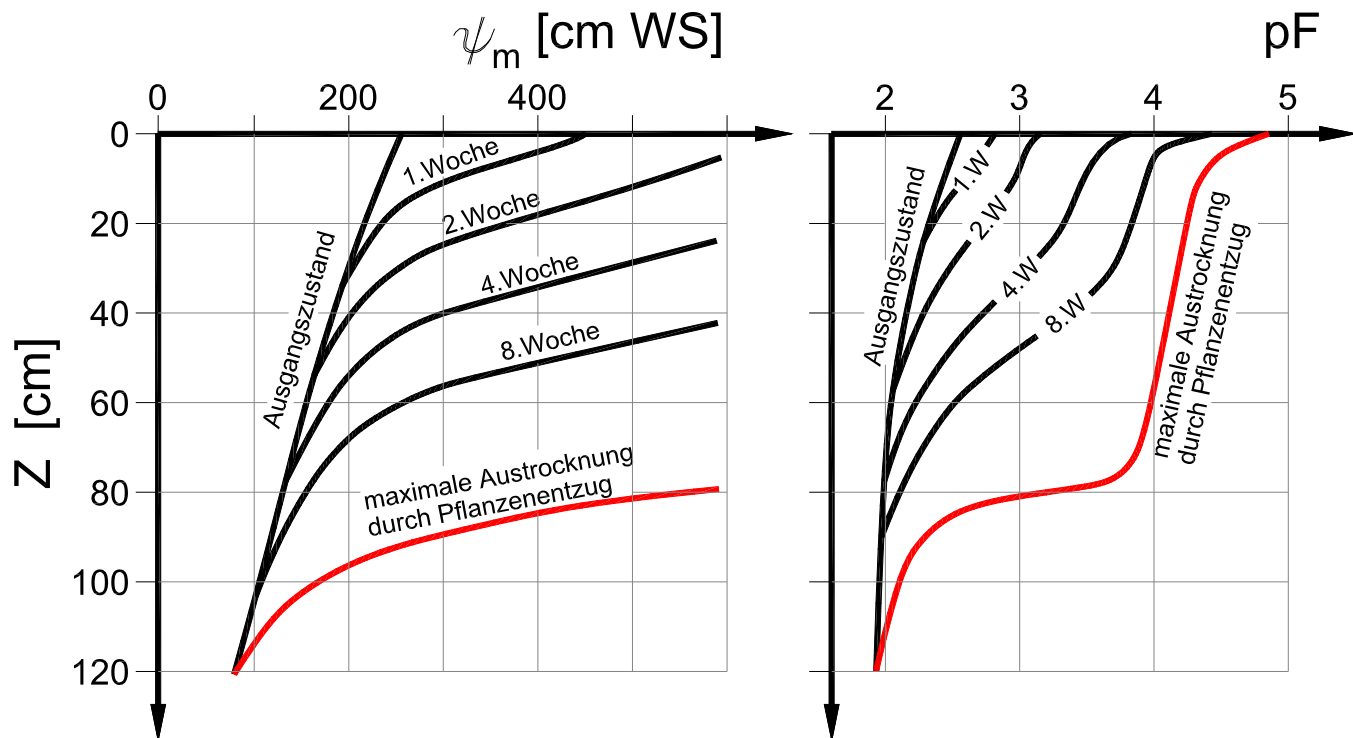


Abb. 6.5: Langfristiger Austrocknungsvorgang bei einem unbewachsenen Lössboden (RICHTER, 1986)

Würden zusätzlich Pflanzen auf dem Boden wachsen, wird der Vorgang beschleunigt und vor allem schneller auf größere Tiefen übergreifen. Der Ausgangszustand in Abb. 6.5 kennzeichnet etwa den Zustand maximaler Bodenfeuchte (Quasigleichgewicht in der Nähe der Feldkapazität, bei einem Abstand Bodenoberfläche zur GWO von ≈ 2 m). Die rote Linie dagegen beschreibt etwa den Zustand maximaler Austrocknung bei zusätzlichem Wasserentzug durch Pflanzen im Sommer mit pF-Werten nahe der Oberfläche $\cong 5$ ($\cong 95$ % RH der Luft).

Das Gebäude auf oder in dem Tonhorizont verhindert andererseits im überbauten Bereich die natürliche Verdunstung oder auch das Eindringen von Niederschlägen. Im Untergrund der nicht versiegelten Fläche entstehen zwangsläufig Saugspannungsunterschiede (s. Abb. 6.4) und in deren Folge ein Feuchtfluss. Dieser erfasst im vorliegenden Beispiel die äußeren Gebäudeteile



zuerst und kann folglich zu einer Sattellage führen. Eine Rückführung von Feuchtigkeit bei späterer Niederschlags-Infiltration führt zwar zu einem Abbau von Saugspannungen, jedoch nie zu der Wiederherstellung des Ausgangszustandes. Der oben beschriebene Vorgang kann sich in der Nutzungsphase eines Objektes zu nicht vorhersehbaren Zeitpunkten einstellen und auch mehrmals wiederholen, bis das Schrumpfpotenzial ausgeschöpft ist ($S = 0$ bzw. $w = w_s$). Dieser Punkt ist erreicht, wenn eine stabile Bodenmatrix besteht und die Bodenpartikel nicht mehr näher aneinanderrücken können.

Würde man die Fälle O 2 mit GW 1 oder GW 2 kombinieren, würde von der Oberseite her zwar mit den gleichen Einwirkungen zu rechnen sein, durch die Möglichkeit eines Grundwassernachschubs vor allem bei hoch liegendem GW-Spiegel (Fall GW 1 oder GW 2) relativ zur Gründungsebene würde aber ein kritischer Anstieg von Saugspannungen in der Tonschicht weitgehend verhindert. Verhindert oder zumindest sehr stark eingeschränkt würde auch der horizontale Feuchtefluss von innen nach außen, wie in Abb. 6.3 dargestellt.

Wasserentzug über eine belüftete horizontale Zwischenschicht bei einer Bodenversiegelung

Bei Vorliegen einer Bodenversiegelung durch Bebauung (Gebäude, Plätze, Wege etc.) werden Teilbereiche dem Niederschlag und der an Ort und Stelle befindlichen Grundwasserneubildung entzogen. Besteht lediglich eine Flächenüberdachung oder ist z.B. unter einer versiegelten Fläche die Deckschicht als grobkörnige Trag- oder Polsterschicht in Kontakt zu einer unterlagernden wasserhaltigen Tonschicht (s. Abb. 5.1) ausgebildet, kann diese durch Verdunstung (s.a. Abschn. 3.4.3) permanent Wasser entzogen werden. In beiden Fällen erfolgt eine lokale Veränderung der Wassergehaltsverteilung mit der Folge einer Bodensenkung.

Einfluss von Vegetation

Ein unmittelbarer Einfluss auf den Wasserhaushalt ist auch durch Pflanzenwurzeln, vornehmlich des Baumbestandes, gegeben. BODEN/DRISCOLL (1987) stellten im Nahbereich von Bäumen ein permanentes Wassergehaltsdefizit im Tonboden fest (Abb. 6.6), das bis 4 m unter GOK reichte.

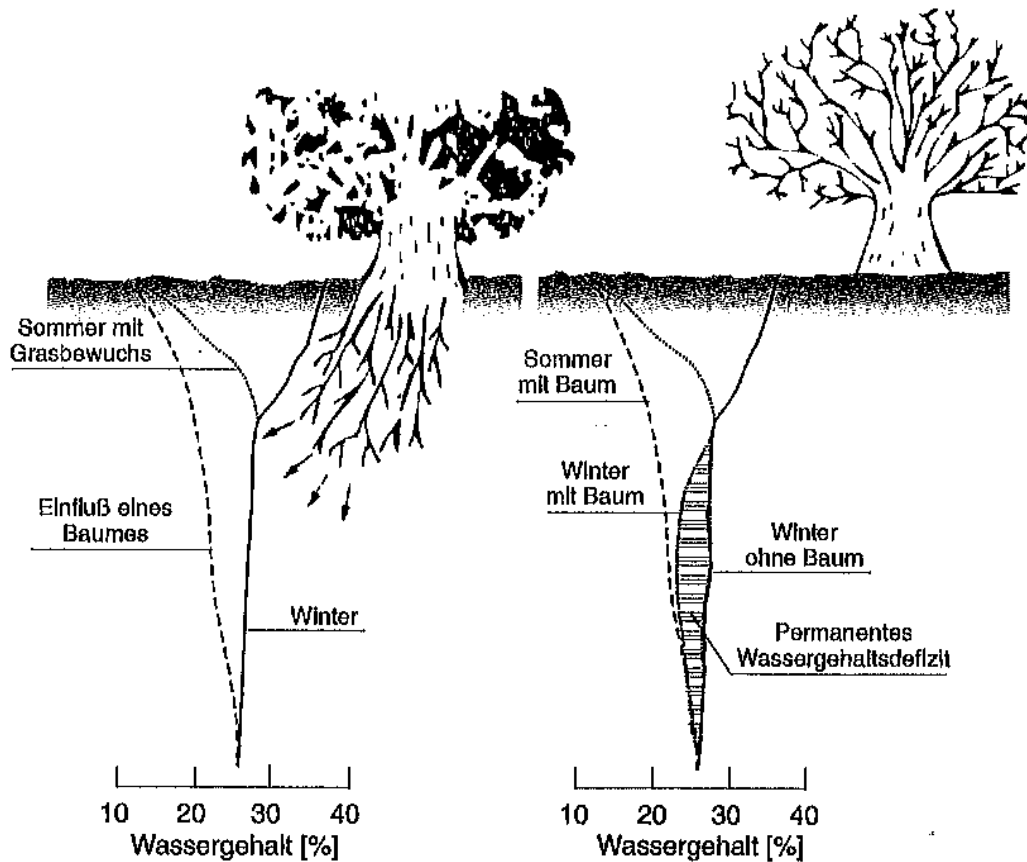


Abb. 6.6: Einfluss eines Baumes auf den Bodenwassergehalt bei Tonböden (BODEN/DRISCOLL, 1987)

6.1.2 Verhältnisse an der Unterseite einer oberflächennahen Tonschicht

Für die in Abb. 6.2 dargestellten Fälle ergeben sich für natürliche und durch GW-Absenkungsmaßnahmen beeinflusste Bedingungen unterschiedliche Bewertungen.

6.1.2.1 Natürliche Ausgangsbedingungen

Im Falle GW1 nach Abb. 6.2 reicht die gesättigte Zone (GW + geschlossenes Kapillarwasser) bis in den Tonhorizont hinein, darüber befindet sich die ungesättigte oder teilgesättigte Zone der überlagernden Tonschicht. Ob im Falle einer Einwirkung an der Oberseite der Tonschicht nach Abschn. 6.2.2 (Abb. 6.3) eine Interaktion zwischen von oben wirkenden Saugspannungen und dem unten verfügbaren Porenwasser stattfindet, hängt wesentlich von der Dicke der Tonschicht bzw. deren Restmächtigkeit unter einem Gebäudefundament ab. Kann mit einem kapillaren



Nachschub von unten gerechnet werden, kann dies zu einer Verhinderung oder zumindest zu einer Verlangsamung und Reduzierung des Schrumpfmaßes führen. Mit zunehmendem Abstand der gesättigten Zone relativ zur unteren Begrenzung des Tonhorizontes im natürlichen Ausgangszustandes (Fälle GW2 und GW3) geht diese positive Auswirkung auf die Saugspannungsverhältnisse in der oberen Tonschicht verloren.

6.1.2.2 Veränderte GW-Verhältnisse

Im Falle der Absenkung der Grundwasseroberfläche stellen sich in Abhängigkeit von der natürlichen Ausgangssituation unterschiedliche Bedingungen bzw. Auswirkungen ein.

Bei der Situation GW1 liegen quasi halbgespannte Verhältnisse vor, der GW-Spiegel und der gesättigte Kapillarsaum liegen in der feinkörnigen Deckschicht. Bei einer Druckentspannung und Absenkung des GW-Spiegels durch Sumpfungsmaßnahmen im unterlagernden GW-Leiter bleibt die Sättigung der bindigen Deckschicht erhalten (s. Entwässerungscharakteristik nach Abb. 3.5), solange weder von unten oder oben entsprechend größere Saugspannungen einwirken.

Von unten können solche Saugspannungen ausgeschlossen werden, weil die obere grobkörnige Bodenzone des unterlagernden GW-Leiters zwar nur teilgesättigt ist, die Wasserdampfsättigung der Porenluft in der ungesättigten Bodenzone nach Abschn. 3.4.3 jedoch mit 100 % Luftfeuchtigkeit angenommen werden kann und damit keine Saugspannungen auf den Ton der Deckschicht ausgeübt werden. Im Falle einer Absenkung des Grundwasserspiegels von Fall GW 2 oder GW 3 ausgehend, ergeben sich ebenfalls keine ungünstigeren Verhältnisse.

Ob Saugspannungen von oben eine Entwässerung bewirken können, hängt ausschließlich von der Mächtigkeit der Deckschicht bzw. der Restmächtigkeit unter Gebäudefundamenten ab. Wenn, wie in Abschn. 6.1.2.1 beschrieben, ein hoher natürlicher Ausgangswasserspiegel bei von oben einwirkenden Saugspannungen (s. Abb. 6.3 oben und 6.5) einen ausreichenden Kapillarwasser-Nachschub von unten sicherstellt, kann dieser Nachschub infolge einer GW-Absenkung verlorengehen und Schrumpfsetzungen bewirken.



6.1.3 Rechnerische Abschätzung der schrumpfungsbedingten Bodenverformungen

Wie aus den vorigen Abschnitten folgt, ist ein Feuchtefluss im ungesättigten Boden ein sehr komplexer Vorgang. Um die mit einem Feuchtefluss infolge Abtrocknung einhergehenden Verformungen beschreiben oder sogar quantifizieren zu können, müssten alle Einflussfaktoren, ihre möglichen zeitlichen Veränderungen und ihre Abhängigkeiten untereinander in einem mathematischen Rechenmodell mit unüberschaubaren Gleichungssystemen zusammengeführt werden. Dies ist nach derzeitigem Kenntnisstand noch nicht möglich. Ein sehr vereinfachter, aber nach meiner Auffassung wenig praktikabler Ansatz zur Abschätzung von Schrumpfsetzungen wurde von PLACZEK (1982) entwickelt, er eignet sich eher zur nachträglichen Erklärung von Schrumpfsetzungen, wenn Wassergehaltsbestimmungen vorher/nachher vorliegen.

6.1.4 Zusammenfassende Bewertung und 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 nach Abschn. 5 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 dürften diese durch Schrumpfprozesse hervorgerufenen Setzungen im oberflächennahen Bereich danach eher eine untergeordnete Rolle spielen, 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 (s. Abb. 6.4) 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

6.2.1 Allgemeine Angaben zur Hydrogeologie

Die im Rheinischen Braunkohlenrevier vertretenen wasserstauenden Tonhorizonte und Braunkohlenflöze 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. Die Grundwasserabsenkung breitet sich parabelförmig von den Sumpfungsbrunnen aus und geht mit zunehmender Entfernung zum Abbau in eine Druckentspannung über (ZIEGLER et al., 2007)

6.2.2 Oberes Grundwasserstockwerk

Beispielhaft wird nachfolgend die Situation im Bereich des Tagebaus Hambach (s.a. Abschn. 5.4.3 und 5.4.4) betrachtet. Der Schichtaufbau ist mit den Daten nach Anl. 1.2 (Mittelwerte) schematisch in Abb. 6.6 dargestellt.

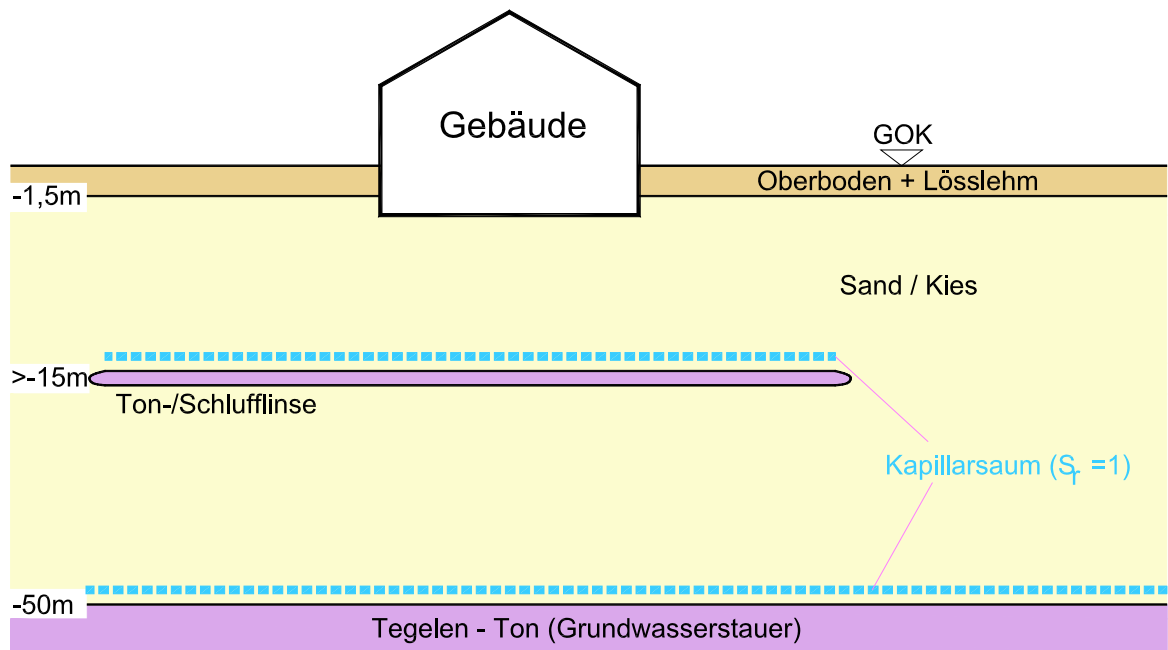


Abb. 6.6: Schichtenaufbau (schematisch) oberes Grundwasserstockwerk im Raum Hambach

Unter einer Lösslehmdecke (einschließlich humoser Oberboden) von i.M. 1,5 m Mächtigkeit stehen nach Abschn. 5.3 bis in Teufen von 32 – 60 m u. GOK, i.M. bis ca. 48,5 m u. GOK, sandig-kiesige Sedimente der Jüngerer Hauptterrasse (Horizont 16 nach SCHNEIDER/THIELE) an. Bildungsbedingt sind diese überwiegend nicht bindigen Ablagerungen sehr inhomogen zusammengesetzt, es dominieren nach den ausgewerteten Aufschlussbohrungen ($n = 10$) jedoch Sande. Vereinzelt sind in den Bohrsäulen dünne Schluffbänder in Stärken von 0,1 bis 1,8 m eingeschaltet, die sich auf den Teufenbereich $> 16,0$ bis 39,0 m u. GOK verteilen. Lediglich in einer Bohrung (U 667) wurde ein mächtigeres Schluffband von 3,9 m Stärke in einer Tiefe von ca. 30 m erbohrt. Über die laterale Verbreitung der einzelnen Schluffbänder sind keine gesicherten Aussagen möglich. Es ist jedoch unter Beachtung der Banddicke im Verhältnis zur Gesamtmächtigkeit der Terrassenablagerungen eher von einer jeweils lateral begrenzten Schlufflinse (s.a. Abb. 6.6) auszugehen. Diese Einschätzung wird auch durch direkte Beobachtungen in freigeschnittenen Tagebauböschungen bestätigt. Das obere GW-Stockwerk wird nach unten von dem Tegelen-Ton (BE) als GW-Stauer abgeschlossen bzw. begrenzt.



6.2.2.1 Auswirkungen der Sumpfungsmaßnahmen und der Grundwasserneubildung

Nachfolgend werden ausschließlich Bodenverformungen (Setzungen) betrachtet, die auf mögliche Wassergehaltsabnahmen und dadurch induzierte Schrumpffphänomene in den Schlufflinsen und der Liegenden Tonschicht im Zuge der Sumpfungsmaßnahmen zurückgehen können. Mit der Grundwasserabsenkung und/oder Druckentspannung einhergehenden Konsolidationssetzungen durch Erhöhung der effektiven Spannungen bleiben unberücksichtigt (s. hierzu: SCHAEFER, 2004, ZIEGLER et al., 2007).

Bei den Auswirkungen einer Grundwassersenkung im oberen Stockwerk ist nicht davon auszugehen, dass der ursprünglich wassergefüllte Horizont vollständig entleert werden kann. Diesem worst case Fall stehen folgende Phänomene entgegen:

- Grundwasserneubildung (s. Abschn.3.1)
- Stauwasser und geschlossener Kapillarwassersaum oberhalb von Schlufflinsen und der Liegenden Tonschicht (s.a. Abschn.3.3.1)
- Sättigung der Porenluft ($RH = 1$) in der teilgesättigten Bodenzone (s.a. Abschn. 3.4.2 u. 3.4.3)

Grundwasserneubildung

Unabhängig von der Art und Intensität von Sumpfungsmaßnahmen im oberen Grundwasserstockwerk ist mit einer ständigen Grundwasserneubildung zu rechnen. Mit den allgemeinen Ausführungen zur Wasserhaushaltsgleichung nach Abschn. 3.1 kann gefolgert werden, dass die Grundwasserneubildung im betrachteten Untersuchungsraum immer einen positiven Wert annimmt.

Die absolute Größe hängt dabei in sehr starkem Maße von der jeweiligen Landnutzung (z.B. landwirtschaftliche Nutzung) und dem Versiegelungsgrad ab. Als minimale Grundwasserneubildung für die Ruhrscholle wird von BOGENA et al. (2005) z.B. 150 mm/a für Langzeitbetrachtungen angegeben.

Kapillarwassersaum

Mit den Erkenntnissen nach Abschn. 3.3.1 ist immer davon auszugehen, dass oberhalb von stauenden Horizonten sich Stauwasser und ein wassergesättigter Kapillarsaum einstellt, dessen Höhe ausschließlich von der Kornverteilung der im unmittelbaren Kontakt anstehenden Terrasensedimente abhängt (s. Tab. 3.1). Als Folge dieser Wassersättigung wird auf die angrenzen-



de bindige Bodenschicht keine Saugspannung ψ übertragen, die zu einer Wassergehaltsänderung und in deren Folge zu Schrumpferscheinungen führen könnte.

Sättigung der Porenluft bei teilgesättigten Bedingungen

In der teilgesättigten Bodenzone oberhalb des geschlossenen Kapillarsaumes (s.o.) ist wegen der weitgehenden Temperaturkonstanz und wegen des Fehlens einer konvektiven Luftbewegung oder von Diffusionsvorgängen (s.a. Abschn. 3.4.3) von einer vollständigen Sättigung der Dampfphase, d.h. von einer relativen Luftfeuchte (RH) im Porenraum von 100 % auszugehen. Daraus folgt, dass auch an der Unterseite von bindigen Zwischenschichten keine Saugspannung ψ wirksam wird, die eine Wassergehaltsabnahme bewirken könnte. Eine Ausnahme vom Regelfall kann allenfalls im freigeschnittenen Randbereich (Tagebauböschung) angenommen werden. Diese Zone dürfte jedoch deutlich kleiner ausfallen als der vorhandene Sicherheitsabstand einer Bebauung zum Tagebaurand, der bis minimal 100 m und maximal 350 m (1/2 bis 1 x max. Tagebauteufe) angesetzt werden kann.

6.2.3 Tiefere Grundwasserstockwerke

Die Entspannung des unter dem Tegelen-Ton folgenden Grundwasserstocks hat selbst bei Teilsättigung des Porenraums aber Vollsättigung der Porenluft (RH = 1!) ebenfalls keine negativen Auswirkungen auf die Tondeckschicht. Hier gilt die gleiche Einschätzung wie für die in die Terrassenablagerungen (s. Abschn. 6.4.2) eingeschalteten Schlufflagen bzw. -linsen.

6.2.4 Zusammenfassende Bewertung und 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 Zusammenfassende Bewertung und Beantwortung von Fragen zum klein- und großräumigen Gefährdungspotenzial für Gebäude durch Schrumpfprozesse infolge Wasserentzug

Aufbauend auf den theoretischen Grundlagen zu:

- Wasserhaushalt in Böden,
- Erscheinungsformen von Wasser und Böden,
- Wasserbewegung in gesättigten und ungesättigten Böden,
- Schrumpfverhalten von Böden und auslösende Mechanismen

und einer bodenphysikalischen Charakterisierung von ausgewählten Bodentypen (TL, TM, TA) wurden für unterschiedliche Untergrund-, hydraulische und thermodynamische Belastungssituation deren Auswirkungen auf die Tagesoberfläche und eine Bebauung abgeschätzt. Die Ergebnisse werden nachfolgend noch einmal zusammengefasst.

7.1 Oberflächennahe Mehrschichtsysteme

In einem Ton als oberflächennaher Gründungsboden sind grundsätzlich als Folge von durch Wassergehaltsänderungen hervorgerufene Feuchtebewegungen und Schrumpfprozesse Setzungserscheinungen und in der Folge Bauwerksschäden möglich. Besonders komplex sind die Vorgänge, wenn sie durch Verdunstungsprozesse von der Oberfläche aus initiiert werden. Solche möglichen Setzungen und Setzungsunterschiede sind jedoch standort- und bauwerksspezifisch und gehen i.d.R. nicht auf bergbauliche Aktivitäten zurück. Für den Bereich des Rheinischen Braunkohlenreviers dürften diese Setzungsphänomene zudem nur eine untergeordnete Rolle spielen, weil die obere natürliche bindige Bodenschicht überwiegend aus Lösslehm besteht, der nach den vorliegenden repräsentativen Auswertungen nur über ein relativ niedriges Schrumpfpotenzial verfügt.

Ungünstige Bedingungen können im Einzelfall gegeben sein, wenn ein ursprünglich hoher Grundwasserspiegel, der mit seinem Kapillarsaum bis in den bindigen oberen Bodenhorizont oder sogar bis in die Gründungsebene reicht und dadurch eine von oben einwirkende kritische Saugspannung im Gründungsbereich bisher ein Schrumpfen verhindert hat, abgesenkt wird. Die Entwässerung der unteren Bodenzone selbst verursacht dagegen keine Saugspannungen, in deren Folge sich der Boden **lastunabhängig** senkt.



7.2 Tiefliegende Mehrschichtsysteme

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 ausgeschlossen. Eine Ausnahme bilden lediglich Randbereiche in Nähe der Tagebauböschungen, 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. Durch Wasserentzug bedingte kritische Bodenverformungen auf Gebäude sind deshalb auszuschließen.

7.3 Beantwortung von Einzelfragen

Die nachfolgenden Fragen wurden von der Anrufungsstelle direkt gestellt bzw. ergeben sich indirekt aus der Stellungnahme des Netzwerkes Bergbaugeschädigter e.V. vom 15.07.2012 (s. Abschn. 1).

7.3.1 Wodurch können Wassergehaltsänderungen im Baugrund überhaupt verursacht werden?

Veränderung der natürlichen Gegebenheiten. Hierzu gehören insbesondere:

- Klimatische Veränderungen, i.W.
 - Jahreszeitlich und langfristig bedingte Veränderungen im Wasserhaushalt, vor allem der oberen Bodenzone (aktive Zone) bis ca. 1,5 m.
- Veränderungen durch Vegetation, i.W. durch:
 - Wurzelwachstum von Bäumen. Hier kann die „aktive Zone“ deutlich tiefer reichen.
 - Ein Einfluss von Bäumen auf den Bodenwasserhaushalt ist auch noch in größeren Abständen gegeben (z.B. bei Pappeln, Eichen, Weiden: bis zu 10 – 15 m).
- Anthropogene Veränderungen, wie:
 - Flächenversiegelungen/Flächenüberdachungen.



- Maßnahmen zur Grundwasserhaltung (z.B. Sumpfungen)
- Künstliche Wärmezufuhr (z.B. Heizkanäle, Heizungsräume).
- Veränderung des Wasserhaushaltes durch Be- und Entlastung.
- Versickerungen (kontrolliert, unkontrolliert).

7.3.2 Wie wirkt sich eine Änderung des Wassergehalts auf Böden aller Art aus?

Infolge einer zunehmenden Entwässerung bzw. Erhöhung der Wasserspannungen entstehen in jedem Boden Zugkräfte, die - einen in Abhängigkeit von der Bodenart - Schrumpfprozess einleiten können. Im Bereich der Normalschrumpfung und Vollsättigung kann der Wasserverlust ΔW mit einer gleichgroßen Volumenabnahme ΔV gleichgesetzt werden. Mit der Volumenabnahme nimmt das Porenvolumen ab, die Trockendichte dagegen zu. Bei einer Wiederbefeuchtung/Wiederaufsättigung ist die Reversibilität des Ausgangszustandes i.d.R. nicht mehr gegeben. Bautechnisch relevante Schrumpfprozesse sind ausschließlich auf bindige Böden beschränkt (Tone, Schluffe), wobei die Schrumpfneigung mit zunehmender Bindigkeit, ausgedrückt über den Tongehalt und die Plastizitätszahl, ansteigt ($TL < TM < TA$). Die Schrumpfneigung bzw. das Schrumpfpotenzial kann qualitativ näherungsweise über die Schrumpffzahl $S = w - w_s$ abgeschätzt werden (mit: w = natürlicher Wassergehalt, w_s = Wassergehalt an der Schrumpfgrenze). Für den an der Oberfläche anstehenden Lösslehm ist das Schrumpfpotenzial als sehr gering einzuschätzen.

7.3.3 In welcher Größenordnung und in welcher Zeitschiene verlaufen Schrumpfprozesse infolge von Sumpfungsmaßnahmen?

Wie die vorangegangenen Ausführungen gezeigt haben, sind sumpfungsbedingte Schrumpfprozesse auf wenige Sonderfälle bei oberflächennahen Mehrschichtsystemen beschränkt, sie sind also eher die Ausnahme als die Regel. Wegen der vielen Einflussgrößen auf diesen möglichen Schrumpfvorgang (z.B. Ausgangswassergehalt relativ zur Schrumpfgrenze, Schichtmächtigkeit, induzierte Saugspannung, Saugspannungs- Wassergehaltscharakteristik) ist eine Aussage über Größenordnungen und die zeitliche Entwicklung solcher Setzungen generell nicht möglich. Da sie überwiegend von der Oberseite einer bindigen Deckschicht ausgehen, sind in der Regel eher ungleichmäßige Setzungen zu erwarten, die zu Gebäudeschäden führen können. Dies ist jeweils im Einzelfall zu klären. Im Rheinischen Braunkohlenrevier sind zudem hinsichtlich der Schrumpfpematik in oberflächennahen bindigen Deckschichten bei den anstehenden Lösslehmen eher



günstige Bedingungen gegeben im Vergleich zu Regionen mit mittel- oder hochplastischen Tonen. Nach eigenen umfangreichen Erfahrungen sind Bauwerksschäden, die durch von der GOK ausgehende Feuchtebewegung und Schrumpfprozesse bei einer nicht angepassten Gründung verursacht werden, sehr viel häufiger. Diese Bauschäden sind dann standort- und bauwerksspezifisch und gehen i.d.R. nicht auf bergbauliche Aktivitäten zurück, obwohl die Rissmuster häufig vergleichbare Verläufe zeigen.

7.3.4 Gibt es eine Zeitschiene, in der typischerweise Schäden aus fehlerhafter Gründung bzw. bauphysikalische Mängel nach Errichtung eines Hauses auftreten können?

Bei einer fehlerhaften oder falsch bemessenen Gründung – ob Flächen- oder Tiefgründung – kommt es zwangsläufig zu einer Überbeanspruchung des Baugrundes. Folge dieser Überbeanspruchung sind i.d.R. Bauwerkssetzungen, die in ihrem zeitlichen Verlauf und in ihrem absoluten Betrag vom Grad der Überbeanspruchung und dem Zeit-Setzungsverhalten der beanspruchten Bodenschicht abhängen. Nur in Extremfällen tritt sofortiges Bruchversagen auf. Entsprechend der Konsolidationstheorie (s.a. Abschn. 7.3.7) von TERZAGHI, (1954) können diese lastabhängigen Setzungen bei stark bindigen Böden (Tone) über mehrere Jahre bis zu Jahrzehnten andauern. Bei nichtbindigen oder nur schwach bindigen Böden sind diese Konsolidationsvorgänge dagegen zu einem großen Teil bereits als sog. Rohbausetzungen während der Bauphase abgeklungen. Aus dieser Überlegung folgt bereits, dass eine Zeitschiene nicht allgemein definiert werden kann. Hinzu kommt, dass ein Gebäude in Abhängigkeit von der Konstruktion bzw. Bauwerkssteifigkeit unterschiedlich auf Baugrundverformungen reagiert. Statisch bestimmte Systeme können Baugrundverformungen besser aufnehmen als z.B. hochgradig unbestimmte Systeme. Ein weiteres Problem ist, dass Bauwerke bei nicht ausreichend bemessener Gründung zwar Verformungen erleiden, diese aber noch nicht sofort zu erkennbaren Rissbildungen führen müssen. Ein solches extrem vorbeanspruchtes System kann dann zu einem beliebigen späteren Zeitpunkt infolge relativ kleiner Einwirkungen (z.B. Umbaumaßnahmen an der Konstruktion, Erschütterungen) in einen statischen Zustand überführt werden, der zu erkennbaren Rissbildungen führt. Zu der Entstehung von Setzungsdifferenzen bei bereits lange bestehenden Gebäuden können auch Be- und Entlastungen von Nachbarbereichen, die sich auf den bestehenden Baugrund unter den Fundamenten auswirken, beitragen, genauso wie die Entwässerung anfälliger Schichten (auch temporär, z.B. mittels Vakuumpumpen) oder die Zuführung von Wasser, z.B. über defekte Grund- oder Versorgungsleitungen mit einer damit verbundenen Konsistenzverschlechterung.



Von den Schäden aus fehlerhaften oder nicht ausreichend bemessenen Gründungen sind solche mit konstruktivem oder bauphysikalischem Hintergrund zu unterscheiden. Hierzu gehören insbesondere überkritische Temperaturverformungen in der Außenschale eines Gebäudes, die konstruktiv nicht durch entsprechende Dehnfugen aufgenommen werden können oder keine konstruktive Trennung von Baukörpern (z.B. Anbauten) mit unterschiedlichem Setzungsverhalten oder sonstige Eingriffe in das statische System. Ein häufig vorkommendes Problem sind auch langfristig verlaufende Nachsetzungsphänomene in nicht ausreichend verdichteten oder ungeeigneten Arbeitsraumverfüllungen neben selbst setzungsfreien Gebäuden.

7.3.5 Gibt es Erkenntnisse über das Zusammenwirken von sumpfbedingten Schrumpfprozessen mit anderweitigen Ursachen – z.B. fehlerhafter Gründung, nicht tragfähiger Baugrund, etc.?

Ein solches Zusammenwirken kann in Einzelfällen tatsächlich gegeben sein und ist mit dem in Abschn. 7.3.4 genannten Beispiel beschrieben. Bei einer nachträglichen Entwässerung anfälliger Bodenschichten unter einer Gebäudegründung und daraus resultierenden Setzungen ist aber deutlich zu unterscheiden zwischen lastabhängigen Konsolidationssetzungen infolge Wegfalls des Auftriebs (s. Abschn. 7.37) und möglichen Schrumpfverformungen, die nur unter besonderen hydraulischen Randbedingungen (s. Abschn. 7.3.3 und 7.3.6) in Einzelfällen zusätzlich hinzukommen können. Für eine Versachlichung der Diskussion in konkreten Schadensfällen erscheint es wichtig zu sein, eine Entkoppelung der Begriffe: Ton im Untergrund – Sumpfung – Schrumpfung – Setzungsschaden vorzunehmen. Setzungsschäden durch lastunabhängiges Schrumpfen infolge sumpfbedingtem Wasserentzug dürften auch in Zukunft auf wenige Ausnahmefälle beschränkt sein.

7.3.6 Muss die Schrumpfung durch bergbaulich verursachte Wasserverluste in Tonen bzw. tonigen Böden (Schluffe) berücksichtigt werden?

Wie bereits in Abschn. 7.3.3 ausgeführt wurde, sind sumpfbedingte Schrumpfprozesse auf wenige Sonderfälle oberflächennaher, stark bindiger Bodenschichten beschränkt, bei denen infolge einer Sumpfung in oder unter der Gründungsebene Saugspannungen und in deren Folge Schrumpfprozesse eingeleitet werden können. Dieser mögliche Effekt ist bei einer Schadensanalyse 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. Auch bis zu ca. 50 Jahren nach erfolgter Sümpfung zeigen z.B. Proben des Tegelen-Tons aus dem Raum Hambach in den bodenphysikalischen Kennwerten keine signifikanten Veränderungen, die durch die veränderten GW-Verhältnisse hätten verursacht sein können.

7.3.7 Existieren zu der Entwässerung von tonigen Böden veröffentlichte Erkenntnisse, insbesondere zu den jeweiligen Zeitabläufen einer Entwässerung in Abhängigkeit von Tongehalten und Tonmächtigkeit ?

Diese Frage kann uneingeschränkt mit ja beantwortet werden, soweit Setzungserscheinungen ausschließlich infolge von **Belastungsänderungen** behandelt werden. **Konsolidation** oder **Konsolidierung** bezeichnet dabei die zeitlich verzögerte Zusammendrückung von Böden infolge einer Lasterhöhung. Ursache der zeitlichen Verzögerung ist die durch sehr niedrige k-Werte ($< 1 \cdot 10^{-8}$ m/s) behinderte Fließbewegung des ausgepressten Porenwassers in feinkörnigen Böden. Entsprechend der Konsolidierungstheorie von TERZAGHI (1954), nach der die Konsolidierungszeit mit dem Quadrat der Schichtdicke eingeht, können Setzungen je nach Mächtigkeit der betrachteten bindigen Schichten und des k-Wertes mehrere Jahrzehnte dauern (s.a. ZIEGLER et al., 2007). Diese mit dem Konsolidierungsverhalten von bindigen Böden bei Lasterhöhung (im vorliegenden Fall Erhöhung der effektiven Normalspannung durch Wegfall des Auftriebs infolge Grundwasserabsenkung) in Zusammenhang stehenden Setzungen haben aber nichts gemein mit den **lastunabhängigen Baugrundverformungen**, die auf Schrumpfprozesse zurückgeführt werden können. Deshalb sind die Gesetzmäßigkeiten der Konsolidationstheorie auf das hier im Mittelpunkt stehende Problem auch nicht anwendbar.

Aachen, 31.01.2014

(Prof. Dr.-Ing. H. Düllmann)



8 Literaturverzeichnis

- BACHMANN (1998) – Bodenverformungen infolge Wassergehaltsänderungen als Schadensursache bei Bauwerken auf Ton. Untersuchungen an historischen Bauwerken im südöstlichen Niedersachsen. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik der TU Braunschweig (IGB – TUBS), Heft Nr. 58.
- BIRLE (2011) – Geohydraulische Eigenschaften verdichteter Tone unter besonderer Berücksichtigung des ungesättigten Zustandes. Dissertation TU München.
- BODEN/DRISCOLL (1987) – House Foundations. A Review of the Effect of Clay Soil Volume Change on Design and Performance. Municipal Engineer 4, S. 181 - 313.
- BOGENA/HERBST/HAKE/KUNKEL/MONTZKA/PÜTZ/VERECKEN/WENDLAND (2005) – MOSYRUR, Water balance analysis in the Rur basin. Schriften des Forschungszentrums Jülich, Reihe Umwelt, Band 52.
- DEMBERG (1979) – Zur Bestimmung der Schrumpfgrenze. Mitteilung der Wiss. Einrichtung Bodenmechanik und Grundbau, Hochschule der Bundeswehr, Heft 2, München.
- DOBROWOLSKI (2008) – Quellverhalten teilgesättigter bindiger Böden mit mittlerem Quellpotenzial. Veröffentlichung des Fachgebietes Bodenmechanik und Grundbau der TU Kaiserslautern, Heft 13.
- DÜLLMANN (2010) – Langzeitbeständigkeit mineralischer Deponieabdichtungen. LANUV - Fachbericht Nr. 25, Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW.
- DÜLLMANN (2011) – Bodenuntersuchungen für bautechnische Zwecke. Mitteilung zur Ingenieurgeologie und Hydrogeologie, Lehrstuhl für Ingenieurgeologie und Hydrogeologie der RWTH Aachen. Heft 101: Geotechnisches Laborpraktikum.
- EDLEFSEN/ANDERSON (1943) – The Thermodynamics of Soil Moisture, Hilgardia, No. 16.
- GUDEHUS (1981) – Bodenmechanik. Enke Verlag, Stuttgart.



GRASSHOFF/SIEDEK/FLOSS (1982) – Handbuch Erd- und Grundbau, Teil 1: Boden und Fels, Gründung, Stützbauwerke, Werner Verlag.

Grundbau-Taschenbuch (1990) – Hrsg. U. Smolczyk, Teil 1. Verlag Ernst & Sohn, Berlin.

HARTGE/HORN (1999) – Einführung in die Bodenphysik, 3. überarbeitete Auflage, Enke-Verlag, Stuttgart.

HEIBROCK. (1996) – Zur Rissbildung durch Austrocknung in mineralischen Abdichtungsschichten an der Basis von Deponien. Schriftenreihe des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik an der Ruhr-Universität Bochum, Heft 26.

HENNING, KASBOHM (Hrsg.) (1998) - Tone in der Geotechnik und Baupraxis. Berichte der Deutschen Ton- und Tonmineralgruppe e.V. – DGGT. Jahrestagung Greifswald.

HORN (1968) – Gebäudeschäden durch Veränderung des Grundwasserspiegels. Die Wasserwirtschaft, Heft 10, S. 295 – 298.

KAHL (1972) – Geologie und Bodenmechanik des Rheinischen Schlufts. Mitteilungen des Institutes VBG der RWTH Aachen, Heft 54.

KÉZDI (1969) – Handbuch der Bodenmechanik. VEB Verlag für Bauwesen, Berlin.

KRABBE (1958) – Über die Schrumpfung bindiger Böden. Mitteilungen der Hannoverschen Versuchsanstalt für Grundbau und Wasserbau. Franzius-Institut TU Hannover, Heft 13.

LIPPMANN (1969) – Messungen von Bodenbewegungen infolge zeitlicher Schwankungen des Wasserhaushaltes. Dissertation, Berlin.

LU & LIKOS (2004) – Unsaturated soil mechanics, Wiley & Sons Verlag, Inc.

MITCHELL/SOGA (2005) – Fundamentals of soil behavior, Wiley & Sons Verlag, Inc.



- PLACZEK (1982) – Untersuchungen über das Schwindverhalten bindiger Böden bei der Trocknung unter natürlichen Randbedingungen. Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Universität Essen-GHS, Band 3.
- PRINZ (1974) – Gebäudeschäden in Tonböden infolge Austrocknung. Vorträge der Deutschen Baugrundtagung in Frankfurt der DGEG, S. 23-38.
- PRINZ, STRAUSS (2011) – Ingenieurgeologie. Spektrum-Verlag.
- RICHTER (1986) – Der Boden als Reaktor; Modelle für Prozesse in Böden. Enke-Verlag, Stuttgart.
- SCHAEFER (2006) – Bodenbewegungen infolge Sümpfungen des Rheinischen Braunkohlenbergbaus. Kratzsch (Hrsg.): Bergschadenkunde. 4. Auflage, Anh. 25, S. 874 – 880.
- SCHEIDIG (1937) – Baugrund und Bauwerk. Das Bauwerk 11, S. 109.
- SCHNEIDER/THIELE (1965) – Geohydrologie des Erftgebietes. Düsseldorf; Ministerium für Ernährung Landwirtschaft und Forsten, NRW.
- SCHUBERT (1982) – Kapillarität im porösen Feststoffsystemen. Springer Verlag, Berlin.
- SOMMER (1978) – Messungen, Berechnungen und Konstruktionen bei der Gründung Frankfurter Hochhäuser. Bauingenieur Heft 53, S. 205 – 211.
- SRIDHARAN/RAO (1971) – Effective Stress Theory of Shrinkage Phenomena. Canadian Geotechnical Journal, Vol. 8, No. 4.
- SPACKELER/MARX (1927) – Bergschadenähnliche Beschädigungen an Gebäuden in bergbaufreien Gebieten. Berg- und Hüttenmännische Zeitschrift, Nr. 39, S. 1409 – 1417 und S. 1457 – 1461.
- TERZAGHI (1954) – Theoretische Bodenmechanik. Springer-Verlag, Berlin



- VOGT/BIRLE/HEYER/ETZ (2013) – Entwicklung einer neuen Versuchstechnik zur Bestimmung der Grenze zwischen halbfestem und festem Boden. Bericht der Bundesanstalt für Straßenwesen (BASt). Heft S 80.
- WENDLING (2004) – Untersuchungen zur Entstehung von Austrocknungsrisse in mineralischen Deponieabdichtungen. Veröffentlichungen des Fachgebietes Bodenmechanik und Grundbau der TU Kaiserslautern, Heft 10.
- WITTE (2003) – Veränderung des Festigkeits- und Verformungsverhaltens bei bindigen Böden aufgrund von Porenwasserspannungen. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik TU Braunschweig (IGB – TUBS), Heft Nr. 73.
- WITT/ZEH (2004) – Maßnahmen gegen Trockenrisse in mineralischen Abdichtungen. Vertiefungsseminar „Zeitgemäße Deponietechnik“ . Universität Stuttgart.
- ZEH (2007) – Die Zugfestigkeit bindiger Böden als Kriterium der Rissgefährdung mineralischer Oberflächenabdichtungen. Dissertation, Bauhaus-Universität Weimar.
- ZIEGLER/GIESE/SCHAEFER/FORKEL (2007) – Prognose sumpfbewindeter Bodenbewegungen im Rheinischen Braunkohlenrevier. Geotechnik 30, Nr. 1, S. 48 – 54.

Setterich																							
Probennummer	Messwerte												Rechenwerte										
	Entnahmetiefe	Geol. Bezeichnung	Dichte	Korndichte	Wassergehalt	Glühverlust	Tongehalt	Schluffgehalt	Sand- Kiesgehalt	Gesamt	Fließgrenze	Ausrollgrenze	Trockendichte	Porenzahl	Sättigungsgrad	Vol. Wassergehalt	Plastizitätszahl	Konsistenzzahl	Schrumpfgrenze	Schrumpfzahl	Schrumpfmaß	Aktivitätszahl	
	t		ρ	ρ _s	w _n	V _{gl}	T	U	S+G		w _L	w _P	ρ _d	e	S _r	Θ	I _p	I _c	w _s	S	ε _v	I _A	
	[m]		[g/cm³]	[g/cm³]	[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[-]	[g/cm³]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
1	0,93	Löss	1,66	2,71	0,21		13,00	75,00	12,00	100,0	0,37	0,17	1,370	0,977	0,588	0,291	0,21	0,78	0,12	0,10	0,17	1,59	
2	1,73	Löss	1,87	2,71	0,19		11,00	79,00	10,00	100,0	0,31	0,18	1,577	0,718	0,698	0,292	0,13	0,98	0,15	0,04	0,06	1,18	
3	2,53	Löss	2,04	2,70	0,16		4,00	83,00	13,00	100,0	0,28	0,20	1,757	0,537	0,799	0,279	0,08	1,57	0,18	-0,02	-0,05	1,88	
4	3,33	Löss	1,83	2,71	0,17		3,00	85,00	12,00	100,0	0,27	0,21	1,563	0,733	0,621	0,263	0,06	1,58	0,19	-0,02	-0,04	2,13	
5	4,13	Löss	1,89	2,71	0,20		5,00	86,00	9,00	100,0	0,27	0,18	1,573	0,723	0,749	0,315	0,09	0,76	0,16	0,04	0,08	1,76	
6	4,93	Löss	1,97	2,71	0,17		6,00	74,00	20,00	100,0	0,28	0,19	1,675	0,617	0,764	0,292	0,09	1,14	0,16	0,01	0,02	1,55	
7	5,73	Löss	1,96	2,71	0,19		2,00	79,00	19,00	100,0	0,27	0,20	1,652	0,641	0,800	0,312	0,08	1,12	0,18	0,01	0,02	3,75	
8	6,53	Löss	2,01	2,71	0,19		7,00	68,00	25,00	100,0	0,27	0,17	1,686	0,607	0,857	0,324	0,10	0,77	0,15	0,05	0,08	1,39	
Anzahl			8	8	8		8	8	8		8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8	8,00	
Mittelwert			1,90	2,71	0,18		6,38	78,63	15,00		0,29	0,19	1,607	0,694	0,734	0,296	0,10	1,09	0,16	0,02	0,04	1,90	
Standartabw.			0,12	0,00	0,02		3,85	6,12	5,66		0,04	0,01	0,117	0,133	0,093	0,020	0,05	0,34	0,02	0,04	0,07	0,80	
Var.- Koeffizient			0,06	0,00	0,09		0,60	0,08	0,38		0,13	0,08	0,073	0,192	0,126	0,068	0,45	0,31	0,15	1,62	1,64	0,42	
X max			2,04	2,71	0,21		13,00	86,00	25,00		0,37	0,21	1,757	0,977	0,857	0,324	0,21	1,58	0,19	0,10	0,17	3,75	
X min			1,66	2,70	0,16		2,00	68,00	9,00		0,27	0,17	1,370	0,537	0,588	0,263	0,06	0,76	0,12	-0,02	-0,05	1,18	
Spanne R			0,38	0,01	0,05		11,00	18,00	16,00		0,11	0,04	0,386	0,440	0,269	0,061	0,14	0,82	0,07	0,12	0,21	2,57	
Klassenweite			0,13	0,00	0,02		3,89	6,36	5,66		0,04	0,01	0,140	0,160	0,100	0,020	0,05	0,29	0,03	0,04	0,08	0,91	

Anlage 1.1
Lösslehm

Projekt-Nr.: 13.207

Baesweiler																							
Probennummer	Messwerte												Rechenwerte										
	Entnahmetiefe	Geol. Bezeichnung	Dichte	Korndichte	Wassergehalt	Glühverlust	Tongehalt	Schluffgehalt	Sand- Kiesgehalt	Gesamt	Fließgrenze	Ausrollgrenze	Trockendichte	Porenzahl	Sättigungsgrad	Vol. Wassergehalt	Plastizitätszahl	Konsistenzzahl	Schrumpfgrenze	Schrumpfzahl	Schrumpfmaß	Aktivitätszahl	
	t		ρ	ρ _s	w _n	V _{gl}	T	U	S+G		w _L	w _P	ρ _d	e	S _r	Θ	I _p	I _c	w _s	S	ε _v	I _A	
	[m]		[g/cm³]	[g/cm³]	[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[-]	[g/cm³]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
1	1,00	Löss	2,00	2,69	0,20		12,00	85,00	3,00	100,0	0,28	0,19	1,669	0,611	0,871	0,331	0,09	0,89	0,17	0,03	0,06	0,73	
2	2,00	Löss	1,93	2,69	0,17		13,00	79,00	8,00	100,0	0,28	0,21	1,644	0,636	0,736	0,286	0,08	1,41	0,19	-0,01	-0,02	0,60	
3	3,00	Löss	1,94	2,68	0,15		11,00	75,00	14,00	100,0	0,22	0,17	1,693	0,583	0,671	0,247	0,04	1,64	0,16	-0,02	-0,03	0,40	
4	4,00	Löss	1,98	2,69	0,15		10,00	78,00	12,00	100,0	0,27	0,19	1,716	0,568	0,730	0,264	0,09	1,40	0,17	-0,01	-0,02	0,86	
5	5,00	Löss	1,91	2,69	0,15		13,00	80,00	7,00	100,0	0,30	0,23	1,655	0,625	0,663	0,255	0,08	1,92	0,21	-0,05	-0,10	0,60	
6	6,00	Löss	1,93	2,69	0,17		8,00	77,00	15,00	100,0	0,29	0,21	1,655	0,625	0,714	0,275	0,07	1,62	0,19	-0,03	-0,05	0,93	
7	7,00	Löss	1,94	2,69	0,16		5,00	81,00	14,00	100,0	0,24	0,17	1,671	0,610	0,710	0,269	0,07	1,19	0,16	0,00	0,01	1,36	
8	8,00	Löss	1,96	2,70	0,19		7,00	77,00	16,00	100,0	0,29	0,19	1,647	0,639	0,802	0,313	0,09	1,04	0,17	0,02	0,03	1,33	
9	9,00	Löss	1,99	2,69	0,22		5,00	73,00	22,00	100,0	0,27	0,16	1,637	0,644	0,903	0,353	0,11	0,52	0,14	0,08	0,14	2,20	
10	10,00	Löss	2,02	2,69	0,22		5,00	83,00	12,00	100,0	0,26	0,20	1,654	0,626	0,950	0,366	0,07	0,63	0,18	0,04	0,07	1,36	
Anzahl			10	10	10		10	10	10		10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10,00	
Mittelwert			1,96	2,69	0,18		8,90	78,80	12,30		0,27	0,19	1,664	0,617	0,775	0,296	0,08	1,23	0,17	0,01	0,01	1,04	
Standartabw.			0,04	0,00	0,03		3,31	3,61	5,31		0,02	0,02	0,024	0,025	0,101	0,042	0,02	0,46	0,02	0,04	0,07	0,53	
Var.- Koeffizient			0,02	0,00	0,15		0,37	0,05	0,43		0,09	0,10	0,015	0,040	0,130	0,142	0,22	0,37	0,12	6,96	9,14	0,52	
X max			2,02	2,70	0,22		13,00	85,00	22,00		0,30	0,23	1,716	0,644	0,950	0,366	0,11	1,92	0,21	0,08	0,14	2,20	
X min			1,91	2,68	0,15		5,00	73,00	3,00		0,22	0,16	1,637	0,568	0,663	0,247	0,04	0,52	0,14	-0,05	-0,10	0,40	
Spanne R			0,11	0,02	0,08		8,00	12,00	19,00		0,09	0,06	0,079	0,076	0,287	0,118	0,07	1,40	0,07	0,13	0,24	1,80	
Klassenweite			0,04	0,01	0,02		2,53	3,79	6,01		0,03	0,02	0,030	0,020	0,090	0,040	0,02	0,44	0,02	0,04	0,07	0,57	

Probennummer	Messwerte												Rechenwerte									
	Entnahmetiefe	Geol. Bezeichnung	Dichte	Korndichte	Wassergehalt	Glühlverlust	Tongehalt	Schluffgehalt	Sand- Kiesgehalt	Gesamt	Fließgrenze	Ausrollgrenze	Trockendichte	Porenzahl	Sättigungsgrad	Vol. Wassergehalt	Plastizitätszahl	Konsistenzzahl	Schrumpfgrenze	Schrumpfzahl	Schrumpfmaß	Aktivitätszahl
	t		ρ	ρ_s	w_n	V_{gl}	T	U	S+G		w_L	w_P	ρ_d	e	S_r	θ	I_p	I_c	w_s	S	ϵ_v	I_A
[m]		[g/cm ³]	[g/cm ³]	[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[-]	[g/cm ³]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]
38580	59,00	13E	2,01	2,66	0,24	0,03	30,14	62,19	7,66	100,0	0,36	0,16	1,621	0,641	0,996	0,389	0,20	0,60	0,11	0,13	0,21	0,664
34505	54,35	13E	1,95	2,66	0,28	0,05	58,20	37,60	4,20	100,0	0,51	0,23	1,523	0,746	0,998	0,427	0,28	0,82	0,16	0,12	0,18	0,481
34226	50,00	13E	2,05	2,74	0,24	0,05	31,70	53,60	14,70	100,0	0,40	0,24	1,653	0,657	1,000	0,397	0,16	1,00	0,20	0,04	0,07	0,505
36983	49,60	13E					46,30	48,20	5,50	100,0												
36971	45,50	13E					43,00	44,10	12,90	100,0												
37868	56,90	13E	2,13	2,70	0,19	0,08	52,20	46,60	1,20	100,0	0,46	0,22	1,790	0,508	1,009	0,340	0,24	1,13	0,16	0,03	0,05	0,460
37395	58,00	13E	2,02	2,71	0,23	0,05	41,10	46,80	12,00	99,9	0,46	0,19	1,642	0,650	0,959	0,378	0,27	0,85	0,12	0,11	0,18	0,657
37394	57,70	13E	2,07	2,61	0,17	0,05	32,00	42,50	25,50	100,0	0,30	0,13	1,769	0,475	0,934	0,301	0,17	0,76	0,09	0,08	0,15	0,531
37393	56,70	13E	2,06	2,59	0,20	0,08	57,00	32,80	10,30	100,1	0,54	0,18	1,717	0,509	1,018	0,343	0,36	0,94	0,09	0,11	0,19	0,632
36979	48,00	13E					37,50	56,80	5,70	100,0												
36978	47,80	13E					12,70	86,60	0,70	100,0												
36977	47,60	13E					55,10	41,00	3,90	100,0												
36980	48,70	13E					33,40	61,00	5,60	100,0												
36362	48,80	13E	2,02	2,63	0,19	0,04	38,10	53,90	7,90	99,9	0,46	0,19	1,697	0,549	0,910	0,323	0,27	1,00	0,12	0,07	0,12	0,709
36976	46,90	13E					33,80	51,80	14,40	100,0												
36975	46,60	13E					54,90	42,70	2,40	100,0												
34227	53,60	13E	1,98	2,70	0,24	0,05	51,10	48,40	0,50	100,0	0,54	0,30	1,597	0,691	0,938	0,383	0,24	1,25	0,24	0,00		0,470
33906	32,50	13E	2,03		0,27		23,40	66,40	10,20	100,0	0,59	0,25	1,598			0,432	0,34	0,94	0,17	0,11		1,453
36361	48,40	13E	1,95	2,51	0,21		23,00	62,90	14,00	99,9	0,36	0,15	1,612	0,557	0,945	0,338	0,21	0,71	0,10	0,11	0,18	0,913
37932	48,00	13E	1,81	2,67	0,30	0,05	21,50	67,80	10,80	100,1	0,37	0,23	1,392	0,918	0,873	0,418	0,14	0,50	0,20	0,11	0,16	0,651
36981	49,00	13E					42,30	52,60	5,10	100,0												
36360	48,00	13E	1,83	2,59	0,27	0,07	38,50	59,20	2,30	100,0	0,50	0,25	1,441	0,797	0,877	0,389	0,25	0,92	0,19	0,08	0,13	0,649
33907	33,50	13E	2,07	2,70	0,21	0,05	12,50	73,30	14,20	100,0	0,54	0,25	1,711	0,578	0,981	0,359	0,29	1,14	0,18	0,03	0,06	2,320
34151	44,85	13E	1,96	2,69	0,27	0,05	50,90	47,50	1,60	100,0	0,54	0,26	1,543	0,743	0,978	0,417	0,28	0,96	0,19	0,08	0,12	0,550
36972	45,80	13E					39,30	44,40	16,30	100,0												
36358	47,30	13E	1,91	2,68	0,24		28,60	66,00	5,20	99,8	0,39	0,21	1,540	0,740	0,869	0,370	0,18	0,83	0,17	0,08	0,12	0,629
37933	48,30	13E	1,79	2,67	0,31		22,20	70,90	6,90	100,0	0,37	0,18	1,366	0,954	0,868	0,424	0,19	0,32	0,13	0,18	0,26	0,856
34393	52,00	13E	1,98	2,62	0,25	0,05	31,20	63,20	5,60	100,0	0,35	0,16	1,584	0,654	1,001	0,396	0,19	0,53	0,11	0,14	0,22	0,609
36359	47,70	13E	2,00	2,65	0,20	0,04	39,90	57,70	2,40	100,0	0,44	0,21	1,667	0,590	0,898	0,333	0,23	1,04	0,15	0,05	0,08	0,576
35235	36,82	13E					23,20	65,60	11,20	100,0												
35236	37,50	13E					25,30	47,00	27,60	99,9												
36608	55,00	13E					43,30	46,80	9,90	100,0												
37848	51,65	13E	1,99	2,66	0,18	0,04	43,10	53,90	2,90	99,9	0,45	0,18	1,686	0,577	0,829	0,304	0,27	1,00	0,11	0,07	0,12	0,626
36658	55,80	13E	2,02	2,69	0,22		31,50	53,40	15,10	100,0	0,42	0,21	1,656	0,625	0,947	0,364	0,21	0,95	0,16	0,06	0,11	0,667
37481	55,40	13E	2,12	2,67	0,19	0,07	59,90	29,20	11,00	100,1	0,46	0,16	1,782	0,499	1,017	0,338	0,30	0,90	0,09	0,11	0,19	0,501
37884	57,30	13E	2,16	2,64	0,14	0,05	42,40	43,10	14,50	100,0	0,39	0,18	1,895	0,393	0,940	0,265	0,21	1,19	0,13	0,01	0,02	0,495
36209	48,00	13E	1,94	2,65	0,26	0,02	18,80	81,00	0,20	100,0	0,30	0,19	1,540	0,721	0,955	0,400	0,11	0,36	0,16	0,10	0,15	0,585
36839	33,55	13E	2,01	2,64	0,25	0,07	49,20	48,90	1,90	100,0	0,49	0,28	1,608	0,642	1,028	0,402	0,21	1,14	0,23	0,02	0,04	0,427
36320	51,80	13E	1,91	2,70	0,27	0,06	46,60	53,10	0,20	99,9	0,47	0,23	1,504	0,795	0,917	0,406	0,24	0,83	0,17	0,10	0,16	0,515
34725	53,00	13E	1,94	2,67	0,28	0,04	28,30	71,50	0,20	100,0	0,38	0,23	1,516	0,762	0,982	0,424	0,15	0,67	0,19	0,09	0,13	0,530
37483	57,40	13E	1,93	2,63	0,24	0,05	33,30	58,10	8,60	100,0	0,33	0,18	1,556	0,690	0,915	0,374	0,15	0,60	0,14	0,10	0,16	0,450
35906	48,60	13E	1,92	2,69	0,32	0,07	35,40	61,70	2,80	99,9	0,44	0,25	1,455	0,849	1,013	0,465	0,19	0,63	0,20	0,12	0,17	0,537
33908	33,60	13E																				
37571	50,80	13E	2,11	2,63	0,16	0,04	27,20	41,60	31,10	99,9	0,33	0,18	1,819	0,446	0,944	0,291	0,15	1,13	0,14	0,02	0,03	0,551
35898	49,80	13E	2,12	2,60	0,16		36,80	50,70	12,90	100,4	0,42	0,15	1,828	0,423	0,984	0,292	0,27	0,96	0,08	0,08	0,14	0,734
37482	56,00	13E	2,09	2,62	0,19	0,03	39,50	47,80	12,80	100,1	0,34	0,15	1,756	0,492	1,012	0,334	0,19	0,79	0,10	0,09	0,15	0,481
36659	56,30	13E	1,98	2,71	0,25		32,50	50,30	17,20	100,0	0,43	0,23	1,584	0,711	0,953	0,396	0,20	0,90	0,18	0,07	0,11	0,615
36974	46,40	13E					20,80	66,30	12,90	100,0												
33916	38,20	13E					13,40	75,70	10,90	100,0												
36969	45,20	13E					29,50	38,70	31,80	100,0												
Anzahl	50		33	32	33	26	49	49	49		33	33	33	32	32	33	33	33	33	33	31	33
Mittelwert	48,784		2,00	2,66	0,23	0,05	35,95	54,55	9,50		0,43	0,21	1,626	0,643	0,953	0,370	0,22	0,86	0,15	0,08	0,13	0,668
Standartabw.	6,860		0,09	0,05	0,05	0,02	12,21	12,30	7,75		0,08	0,04	0,128	0,140	0,053	0,048	0,06	0,23	0,04	0,04	0,06	0,350
Var.- Koeffizient	0,141		0,05	0,02	0,20	0,29	0,34	0,23	0,82		0,18	0,20	0,079	0,218	0,055	0,130	0,26	0,27	0,28	0,49	0,43	0,524
X max	59,00		2,16	2,74	0,32	0,08	59,90	86,60	31,80		0,59	0,30	1,895	0,954	1,028	0,465	0,36	1,25	0,24	0,18	0,26	2,320
X min	32,50		1,79	2,51	0,14	0,02	12,50	29,20	0,20		0,30	0,13	1,366	0,393	0,829	0,265	0,11	0,32	0,08	0,00	0,02	0,427
Spanne R	26,50		0,37	0,23	0,18	0,06	47,40	57,40	31,60		0,29	0,17	0,528	0,561	0,199	0,200	0,25	0,93	0,16	0,18	0,24	1,893
Klassenweite	3,75		0,06	0,04	0,03	0,01	6,77	8,20	4,51		0,05	0,03	0,090	0,100	0,040	0,030	0,04	0,16	0,03	0,03	0,04	0,330

Anlage 1.2
Tegelen-Ton

Projekt-Nr.: 13.207

Probennummer	Messwerte														Rechenwerte										
	Ennahmetiefe	Geol. Bezeichnung	Dichte	Korndichte	Wassergehalt	Glühverlust	Tongehalt	Schluffgehalt	Sand- Kiesgehalt	Gesamt	Fließgrenze	Schrumpfgrenze	Ausrollgrenze	Enslinwert	Trockendichte	Porenzahl	Sättigungsgrad	Vol. Wassergehalt	Plastizitätszahl	Konsistenzzahl	Schrumpfgrenze	Schrumpfszahl	Schrumpfmaß	Aktivitätszahl	
	t		ρ	ρ_s	w_n	V_{gl}	T	U	S+G		w_L	w_s	w_p	w_E	ρ_d	e	S_r	Θ	I_p	I_c	w_s	S	ϵ_v	I_A	
[m]		[g/cm ³]	[g/cm ³]	[-]	[-]	[%]	[%]	[%]	[%]	[-]	[-]	[-]	[-]	[g/cm ³]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	[-]	
1		7A	1,85	2,60	0,32	0,14	45,50	42,50	12,00	100,0	0,64	0,17	0,27	0,91	1,398	0,858	0,976	0,450	0,38	0,85	0,17	0,15	0,21	0,829	
2		7A	1,84	2,59	0,32	0,14	44,50	43,00	12,50	100,0	0,71	0,17	0,29	0,90	1,392	0,862	0,968	0,448	0,41	0,93	0,19	0,13	0,19	0,926	
3		7A	1,86	2,61	0,33	0,13	44,00	44,00	12,00	100,0	0,71	0,17	0,27	0,90	1,401	0,860	0,993	0,459	0,43	0,88	0,17	0,16	0,23	0,980	
4		7A	1,84	2,60	0,33	0,13	44,00	45,00	11,00	100,0	0,69	0,17	0,25	0,91	1,384	0,878	0,967	0,452	0,44	0,83	0,14	0,19	0,26	0,993	
5		7A	1,79	2,54	0,33	0,17	35,00	63,80	1,20	100,0	0,62	0,22	0,30	0,90	1,346	0,888	0,941	0,443	0,33	0,90	0,21	0,11	0,16	0,936	
6		7A	1,78	2,53	0,34	0,17	32,50	66,00	1,50	100,0	0,60	0,22	0,28	0,89	1,332	0,903	0,941	0,446	0,32	0,82	0,20	0,14	0,19	0,980	
7		7A	1,79	2,53	0,35	0,17	33,50	65,30	1,20	100,0	0,62	0,22	0,32	0,89	1,326	0,910	0,964	0,460	0,30	0,90	0,24	0,11	0,14	0,899	
8		7A	1,79	2,54	0,35	0,17	33,00	66,00	1,00	100,0	0,61	0,23	0,30	0,90	1,327	0,912	0,972	0,464	0,31	0,84	0,22	0,13	0,17	0,950	
9		7A	1,84	2,60	0,34	0,16	59,00	40,50	0,50	100,0	0,82	0,16	0,30	0,96	1,374	0,891	0,991	0,467	0,52	0,91	0,17	0,17	0,24	0,881	
10		7A	1,80	2,57	0,34	0,16	58,00	41,20	0,80	100,0	0,80	0,15	0,31	0,94	1,341	0,919	0,961	0,460	0,49	0,94	0,19	0,15	0,21	0,841	
11		7A	1,82	2,59	0,35	0,14	53,50	45,90	0,60	100,0	0,76	0,18	0,26	0,89	1,348	0,920	0,977	0,468	0,50	0,83	0,14	0,21	0,29	0,936	
12		7A	1,83	2,57	0,35	0,16	56,00	43,50	0,50	100,0	0,84	0,17	0,33	0,99	1,350	0,906	1,006	0,478	0,52	0,95	0,20	0,16	0,21	0,920	
13		7A	1,87	2,57	0,34	0,16	56,00	43,20	0,80	100,0	0,83	0,17	0,31	0,96	1,393	0,844	1,033	0,473	0,52	0,94	0,18	0,16	0,22	0,923	
14		7A	1,84	2,58	0,35	0,15	52,50	46,70	0,80	100,0	0,84	0,18	0,29	0,95	1,359	0,897	1,009	0,477	0,55	0,89	0,15	0,20	0,27	1,051	
15		7A	1,83	2,57	0,33	0,15	58,20	41,40	0,40	100,0	0,85	0,16	0,29	0,92	1,370	0,877	0,976	0,456	0,56	0,93	0,15	0,18	0,25	0,959	
16		7A	1,82	2,57	0,34	0,16	57,00	42,60	0,40	100,0	0,86	0,17	0,27	0,98	1,362	0,889	0,970	0,457	0,59	0,89	0,12	0,21	0,30	1,038	
17		7A	1,79	2,60	0,38	0,14	52,00	47,30	0,70	100,0	0,85	0,16	0,33	0,88	1,297	1,003	0,979	0,490	0,51	0,91	0,20	0,18	0,23	0,989	
18		7A	1,82	2,57	0,38	0,16	60,00	39,50	0,50	100,0	0,91	0,17	0,33	0,97	1,315	0,955	1,023	0,500	0,58	0,92	0,19	0,19	0,25	0,959	
19		7A	1,88	2,60	0,36	0,13	53,50	45,90	0,60	100,0	0,85	0,17	0,31	0,92	1,385	0,876	1,067	0,498	0,54	0,91	0,18	0,18	0,25	1,008	
20		7A	1,79	2,57	0,33	0,16	57,00	42,30	0,70	100,0	0,87	0,16	0,33	0,90	1,342	0,917	0,935	0,447	0,54	0,99	0,19	0,14	0,19	0,951	
21		7A	1,80	2,55	0,35	0,15	53,00	46,40	0,60	100,0	0,83	0,17	0,26	0,96	1,330	0,918	0,978	0,468	0,56	0,84	0,12	0,23	0,31	1,066	
22		7A	1,82	2,54	0,35	0,15	56,00	43,60	0,40	100,0	0,85	0,15	0,29	0,94	1,351	0,881	1,003	0,470	0,57	0,89	0,15	0,20	0,27	1,012	
23		7A	1,83	2,60	0,34	0,15	52,00	47,40	0,60	100,0	0,82	0,17	0,28	0,95	1,370	0,898	0,974	0,461	0,54	0,89	0,14	0,19	0,27	1,036	
24		7A	1,80	2,59	0,36	0,15	55,00	44,70	0,30	100,0	0,85	0,16	0,29	0,96	1,327	0,950	0,974	0,474	0,56	0,89	0,16	0,20	0,27	1,015	
25		7A	1,82	2,59	0,36	0,16	55,00	44,70	0,30	100,0	0,84	0,18	0,32	0,94	1,343	0,931	0,995	0,480	0,52	0,93	0,19	0,17	0,22	0,943	
26		7A	1,82	2,58	0,35	0,16	56,00	43,50	0,50	100,0	0,83	0,18	0,31	0,93	1,351	0,910	0,978	0,466	0,52	0,94	0,18	0,16	0,22	0,922	
27		7A	1,78	2,57	0,35	0,16	50,00	49,20	0,80	100,0	0,82	0,18	0,29	0,93	1,313	0,956	0,947	0,463	0,53	0,89	0,16	0,19	0,26	1,054	
28		7A	1,82	2,59	0,35	0,16	51,00	48,30	0,70	100,0	0,80	0,18	0,29	0,91	1,353	0,912	0,985	0,470	0,52	0,88	0,16	0,19	0,26	1,012	
29		7A	1,79	2,56	0,35	0,17	59,50	40,10	0,40	100,0	0,86	0,20	0,29	0,81	1,325	0,928	0,966	0,465	0,57	0,89	0,15	0,20	0,27	0,952	
30		7A	1,80	2,58	0,35	0,16	57,50	42,20	0,30	100,0	0,87	0,18	0,35	0,83	1,330	0,942	0,959	0,465	0,52	1,00	0,22	0,13	0,18	0,909	
31		7A	1,79	2,56	0,37	0,19	56,50	43,40	0,10	100,0	0,82	0,17	0,27	0,81	1,303	0,966	0,984	0,483	0,55	0,82	0,13	0,24	0,31	0,975	
32		7A	1,78	2,58	0,37	0,16	60,00	39,60	0,40	100,0	0,83	0,16	0,29	0,85	1,305	0,975	0,971	0,479	0,53	0,86	0,16	0,21	0,27	0,885	
33		7A	1,80	2,57	0,38	0,16	52,20	47,20	0,60	100,0	0,83	0,17	0,29	0,72	1,312	0,961	1,004	0,492	0,54	0,84	0,15	0,22	0,29	1,039	
34		7A	1,79	2,52	0,35	0,16	59,70	39,90	0,40	100,0	0,82	0,17	0,30	0,79	1,323	0,908	0,980	0,466	0,51	0,90	0,17	0,18	0,24	0,860	
35		7A	1,84	2,57	0,34	0,16	61,30	38,20	0,50	100,0	0,83	0,18	0,30	0,79	1,372	0,871	0,995	0,463	0,53	0,94	0,17	0,17	0,23	0,862	
36		7A	1,83	2,60	0,35	0,16	55,10	44,60	0,30	100,0	0,85	0,17	0,28	0,73	1,353	0,921	0,984	0,472	0,58	0,87	0,13	0,22	0,30	1,048	
37		7A	1,85	2,59	0,35	0,16	63,40	36,40	0,20	100,0	0,84	0,18	0,29	0,80	1,369	0,894	1,018	0,480	0,56	0,88	0,15	0,21	0,28	0,881	
38		7A	1,81	2,58	0,38	0,19	57,50	43,10	0,40	101,0	0,80	0,17	0,30	0,79	1,315	0,958	1,015	0,497	0,51	0,84	0,17	0,21	0,27	0,879	
39		7A	1,84	2,55	0,33	0,15	57,00	42,40	0,60	100,0	0,82	0,16	0,28	0,87	1,386	0,839	1,000	0,456	0,53	0,91	0,15	0,18	0,25	0,933	
40		7A	1,86	2,56	0,32	0,16	58,70	40,80	0,50	100,0	0,83	0,17	0,29	0,95	1,410	0,817	1,007	0,453	0,53	0,95	0,16	0,16	0,23	0,906	
41		7A	1,86	2,58	0,33	0,14	59,80	39,70	0,50	100,0	0,81	0,19	0,29	1,00	1,400	0,845	0,997	0,457	0,52	0,93	0,16	0,17	0,23	0,866	
42		7A	1,88	2,56	0,33	0,15	61,00	38,40	0,60	100,0	0,80	0,19	0,31	0,95	1,417	0,802	1,039	0,463	0,49	0,97	0,19	0,13	0,19	0,798	
43		7A	1,85	2,53	0,33	0,16	64,20	35,20	0,60	100,0	0,83	0,17	0,30	0,96	1,386	0,826	1,018	0,460	0,53	0,94	0,17	0,16	0,22	0,824	
44		7A	1,78	2,54	0,33	0,16	64,80	34,30	0,90	100,0	0,84	0,18	0,32	0,94	1,337	0,901	0,943	0,447	0,52	0,97	0,19	0,15	0,20	0,801	
45		7A	1,83	2,60	0,31	0,13	52,00	47,50	0,50	100,0	0,71	0,21	0,29	0,99	1,394	0,866	0,929	0,431	0,43	0,94	0,18	0,13	0,19	0,820	
46		7A	1,82	2,59	0,30	0,14	50,50	49,00	0,50	100,0	0,71	0,21	0,30	0,99	1,396	0,855	0,919	0,424	0,41	0,99	0,20	0,11	0,15	0,810	
47		7A	1,83	2,61	0,30	0,14	50,50	49,00	0,50	100,0	0,80	0,21	0,30	0,99	1,404	0,856	0,922	0,425	0,49	1,00	0,18	0,12	0,18	0,972	
48		7A	1,81	2,60	0,30	0,14	51,00	48,50	0,50	100,0	0,79	0,20	0,29	0,99	1,399	0,858	0,900	0,415	0,50	0,98	0,16	0,13	0,20	0,982	
49		7A	1,82	2,55	0,34	0,17	53,00	25,30	21,70	100,0	0,69	0,20	0,29	0,95	1,356	0,881	0,986	0,462	0,40	0,87	0,19	0,15	0,21	0,749	
50		7A	1,82	2,56	0,34	0,17	53,00	27,30	19,20	99,5	0,71	0,20	0,31	0,95	1,362	0,880	0,979	0,458	0,40	0,94	0,21	0,12	0,17	0,747	
51		7A	1,81	2,56	0,33	0,18	57,00	26,40	16,60	100,0	0,72	0,21	0,30	0,92	1,354	0,888	0,959	0,451</							

Anlage 1.3
Indener Ton
Projekt-Nr.: 13.207

Tegelen Ton (Datengrundlage: RWE Power)

