VERÖFFENTLICHUNGEN

des Fachgebietes Bodenmechanik und Grundbau
der Technischen Universität Kaiserslautern

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. C. Vrettos

Heft 13

QUELLVERHALTEN TEILGESÄTTIGTER BINDIGER BÖDEN MIT MITTLEREM QUELLPOTENTIAL

von

Markus Dobrowolsky

KAISERSLAUTERN 2008

Vom Fachbereich
Architektur / Raum- und Umweltplanung / Bauingenieurwesen
der Technischen Universität Kaiserslautern

zur
Verleihung des akademischen Grades
DOKTOR-INGENIEUR (Dr.-Ing.)
genehmigte

DISSERTATION

D 386

Tag der Einreichung:	27. Juni 2007
Tag der mündlichen Prüfung:	06. Dezember 2007

Dekanin:	Prof. Dr. habil. Gabi Troeger-Weiß
Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. habil. C. Vrettos
	Prof. Dr.-Ing. habil. H. Meißner
	Prof. Dr.-Ing. habil. I. Herle, Technische Universität Dresden

Autor dieses Heftes ist

Markus Dobrowolsky

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Bodenmechanik und Grundbau
der Technischen Universität Kaiserslautern

Vorwort des Herausgebers

Volumenänderungen beeinflussen das Materialverhalten von Böden entscheidend und wirken sich somit nennenswert auf z. B. das Tragverhalten von Stützkonstruktionen oder auch Pfählen aus. Unabhängig von der Bodenart können durch Scherbeanspruchungen eine Dilatation oder Kontraktanz oder durch Normalspannungen auch Kompressionen entstehen. Für feinkörnige Böden (Ton, Schluff) existieren zahlreiche weitere Ursachen für Volumenänderungen. Diese sind das Kriechen, die Konsolidierung, die Alterung sowie bei Änderung des Wassergehaltes das Quellen und Schrumpfen des Bodens. Es können dabei sowohl physikalische als auch chemische Prozesse wirksam sein.

Im Rahmen der vorliegenden Dissertation konzentriert sich Herr Dobrowolsky überwiegend auf das osmotische Quellen und damit auf das physikalische Phänomen der Volumenvergrößerung durch Adsorption von Wasser an den Bodenpartikeln. Für seine Experimente verwendete er zwei selbst entwickelte aufwändige Oedometergeräte. Für den verwendeten Kaolinit werden aus den Versuchsergebnissen geschlossene Beziehungen für die größte isotrope Schwellspannung sowie die volumetrische Schwelldeformation als Funktion der isotropen Spannung hergeleitet. Beide Größen hängen sowohl von der Porenzahl als auch vom Sättigungsgrad ab.

Zusätzlich zu den experimentellen Untersuchungen, wird eine numerische Simulation der Versuche mit Hilfe eines allgemeinen FEM-Programms präsentiert. Das entwickelte Stoffmodell wird dort mittels einer eigenen Subroutine implementiert. Anschließend wird als praktisches Beispiel ein Element einer Pfahl-Plattengründung, die infolge Befeuchtung des Bodens durch das entstehende Quellen beansprucht wird, numerisch untersucht.

Das Quellverhalten teilgesättigter bindiger Böden ist ein komplexes Thema, zu dem die vorliegende Dissertation einen nennenswerten Beitrag liefert.

Ein wesentlicher Teil der Forschungsarbeit wurde durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft finanziert. Dieser Unterstützung sei an dieser Stelle gedankt.

C. Vrettos

Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet für Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Kaiserslautern. Mein herzlicher Dank gilt dem ehemaligen Leiter des Fachgebietes, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Meißner, der die Anregung und Themenstellung zu der vorliegenden Dissertation gab. Für die stets sehr gute Betreuung meiner Arbeit bis zu seinem Ausscheiden als Leiter des Fachgebietes und die Übernahme des ersten Korreferates bedanke ich mich im Besonderen. Im März 2004 übernahm Herr Prof. Dr.-Ing. habil. Christos Vrettos die Fachgebietsleitung und auch die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit. Für die unkomplizierte Annahme meiner Betreuung, die stets wohlwollenden und hilfreichen Unterstützungen sowie für die Übernahme des Referates danke ich Ihm ganz besonders herzlich.

Mein spezieller Dank gilt auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle, Technische Universität Dresden, für das Interesse an meiner Arbeit und die Übernahme des zweiten Korreferates. Herrn Prof. Dr.-Ing. K. Wassermann danke ich ebenfalls für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission.

Für die labortechnischen Hilfestellungen sowie für die Durchführung der im Rahmen meiner Arbeit umgesetzten Laborversuche danke ich den studentischen Hilfskräften, den Laboranten und insbesondere dem Laborleiter Herrn Ronald Günther. Allen Kollegen und Kolleginnen am Fachgebiet Bodenmechanik und Grundbau sei ebenso gedankt für Ihre vielfältigen Unterstützungen. Nicht zuletzt möchte ich meinen Eltern in besonderer Weise für Ihre Unterstützung bei meinem beruflichen Werdegang danken.

Markus Dobrowolsky

Inhaltsverzeichnis

Seite

Notation x

Kurzfassung xv

Abstract xvii

1 Einleitung und Problemstellung 1

2 Literaturübersicht 3

3 Theoretische Grundlagen 5

3.1 Definitionen und Begriffe 5
3.1.1 Ton und Tonminerale 5
3.1.2 Quellen und Schwellen 6
3.1.2.1 Intrakristallines Quellen 7
3.1.2.2 Osmotisches Quellen 8
3.1.2.3 Mechanisches Quellen 8
3.1.3 Schrumpfen 8
3.2 Wechselwirkung zwischen Wasser und der Bodenmatrix 10
3.3 Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannungen 13
3.3.1 Einfluss des Materials 14
3.3.2 Einfluss der Porenzahl 16
3.3.3 Hysteresis in der pF - Kurve 17
3.3.4 Verfahren zur Bestimmung der Wasserspannungen 19
3.3.5 Analytische Beschreibung von pF-Kurven 21
3.4 Feuchtetransport in teilgesättigten Böden unter isothermen Bedingungen 25
3.5 Konzept der effektiven Spannungen 26
3.5.1 Die allgemeine Spannungsgleichung 26
3.5.2 Die erweiterte Spannungsgleichung 27
3.6 Theoretische Grundlagen zum Spannungs- Dehnungsverhalten 28
3.6.1 Isotrop linearelastisches Materialverhalten 28
3.6.2 Invariantenbeschreibung 30
3.6.3 Linear elastisches ideal plastisches Materialverhalten 32
3.6.3.1 Grenzbedingung 33
3.6.3.2 Fließregel 35

3.6.4 Vorhandene Modelle für das Quellen 37
3.6.4.1 Eindimensionale Formulierung des Quellverhaltens 37
3.6.4.2 Dreidimensionale Formulierung des Quellverhaltens 39
3.7 Eigene Stoffansätze zum Quellen 45

4 Ermittlung der bodenphysikalischen und mechanischen Eigenschaften des Versuchsmaterials 48

4.1 Beschreibung und Klassifizierung des Versuchsmaterials 48
4.2 Triaxiales und oedometrisches Kompressionsverhalten 52
4.2.1 Triaxialversuche 52
4.2.1.1 Probenherstellung und Versuchsdurchführung 52
4.2.1.2 Auswertung der Versuchsergebnisse 53
4.2.2 Oedometrische Kompressionsversuche 55
4.2.2.1 Versuchsapparatur und Versuchsdurchführung 55
4.2.2.2 Auswertung der Versuchsergebnisse 56
4.3 pF - Kurve des Versuchsmaterials 57
4.3.1 Tensiometermethode 57
4.3.1.1 Versuchsapparatur 57
4.3.1.2 Versuchsdurchführung 58
4.3.1.3 Auswertung der Messergebnisse 59
4.3.2 „Axis-Translation“ - Methode im Drucktopf mit Keramikplatte 61
4.3.2.1 Versuchsapparatur 61
4.3.2.2 Versuchsdurchführung 62
4.3.2.3 Auswertung der Messergebnisse 63
4.3.3 Vakuum - Austrocknungs - Methode 64
4.3.3.1 Versuchsapparatur 64
4.3.3.2 Versuchsdurchführung 66
4.3.3.3 Auswertung der Messergebnisse 66
4.3.4 Anpassung der mathematischen Formulierung 69

5 Experimentelle Untersuchungen zum Quellverhalten 72

5.1 Vorversuche 72
5.1.1 Vorversuchsserie 1: Quellversuche in einem konvent. Triaxialgerät 72
5.1.2 Vorversuchsserie 2: Quellversuche mit allseitiger Bewässerung 81
5.1.3 Vorversuchsserie 3: Schrumpfversuche 83
5.1.4 Erkenntnisse aus den Vorversuchsserien 89
5.2 Hauptversuche 90
5.2.1 Serie 1: Quelldruckversuche 90
5.2.1.1 Versuchsapparatur 90
5.2.1.2 Versuchsdurchführung 91
5.2.1.3 Auswertung der Messergebnisse 93

5.2.2 Serie 2: Einaxiale Quelldruck - Quelldehnungsversuche 98
5.2.2.1 Versuchsapparatur 98
5.2.2.2 Versuchsdurchführung 100
5.2.2.3 Auswertung der Messergebnisse 101
5.2.3 Serie 3: Triaxiale Quelldruck - Quelldehnungsversuche 116
5.2.3.1 Versuchsapparatur 116
5.2.3.2 Versuchsdurchführung 118
5.2.3.3 Auswertung der Messergebnisse 119
5.2.3.4 Überprüfung der Ergebnisse aus Serie 2 mittels Oedometer B 129
5.2.3.5 Anisotroper Quelldehnungsversuch im Oedometer B 132
5.3 Allgemeiner Überblick der benötigten Versuche und Parameter für eine numerische Quellanalyse 135
5.3.1 Quelldruck - Quelldehnungsverhalten 135
5.3.2 Wassertransport 136

6 Numerischen Simulationen 137

6.1 Beschreibung des eingesetzten FE – Programms 137
6.2 Konstitutive Beziehungen 138
6.3 Die Benutzerroutine UMAT 144
6.4 Simulation der einaxialen Quelldruck - Dehnungsversuche aus Serie 2 148
6.4.1 Geometrie und FEM - Modell 148
6.4.2 Materialeigenschaften 149
6.4.3 Berechnungsablauf und Belastungsgeschichte 150
6.4.4 Ergebnisse und Diskussion 151
6.5 Simulation der triaxialen Quelldruck - Dehnungsversuche aus Serie 3 159
6.5.1 Geometrie und FEM - Modell 159
6.5.2 Materialeigenschaften 159
6.5.3 Berechnungsablauf und Belastungsgeschichte 159
6.5.4 Ergebnisse und Diskussion 160
6.6 Randwertproblem axialsymmetrische Pfahl - Plattengründung 167
6.6.1 Problemstellung 167
6.6.2 Geometrie und FEM - Modell 168
6.6.3 Modellierung des Kontaktverhaltens zwischen Boden und Bauwerk 169
6.6.4 Eingehende Parameter und Beziehungen 172
6.6.5 Berechnungsablauf und Belastungsgeschichte 174
6.6.6 Ergebnisse und Diskussion 175

7 Zusammenfassung und Ausblick 190

8 Literaturverzeichnis 193

Notation

Lateinische Buchstaben

a,b	Variablen der Approximation für das einaxiale Quelldruckdehnungsverhalten
A,B,C	Parameterwerte im Quellgesetz nach Wittke (2003)
a_1, a_2, a_3	Parameter zur Beschreibung der pF-Kurve nach dem modifizierten VG-Modell [-]
AC	H_2SO_4 - Lösungskonzentration [%]
C (ψ)	Faktor zur Beschreibung der pF-Kurve nach Fredlund & Xing (1994) [-]
c	Kohäsion [kPa]
c,d	Variabeln der Approximation für das dreiaxiale Quelldruckdehnungsverhalten
C_C	Kompressionsbeiwert [-]
C_S	Schwellbeiwert [-]
d	Durchmesser [cm] oder [m]
d_0	Ausgangsdurchmesser [cm]
$[D^{el}]$	elastische Stoffmatrix
E	Elastizitätsmodul [kPa]
[E]	Green - Lagrange´scher Deformationstensor
e	Porenzahl [-]
e_0	Anfangsporenzahl [-]
E_c	Schwellbeiwert [MPa]
e_{ij}	Komponente des deviatorischen Dehnungstensors
$F(\sigma)$	Grenzbedingung
g	Erdbeschleunigung [m/sec²]
G	Schubmodul [MPa]
G_k	Elastische Steifigkeit im Schermodell [kPa]
h	Bezugsniveau über einer freien Wasseroberfläche [cm]
h_0	Ausgangshöhe [cm]
h_c	kapillare Steighöhe [cm]
I	Einheitsmatrix
i	hydraulischer Gradient [-]
II_e	zweite Invariante des Dehnungstensors
III_e	dritte Invariante des Dehnungstensors

III_s	dritte Invariante des Spannungstensors
II_s	zweite Invariante des Spannungstensors
I_P	Plastizitätszahl [-]
I_σ	erste Dehnungsinvariante
I_σ	erste Spannungsinvariante
$I_{\sigma 0}$	erste Invariante des Anfangspannungszustandes
I_ε^{SW}	erste Quelldehnungsinvariante
I_σ^{SW}	erste Invariante des Quelldruckes
$I_{\sigma,max}^{SW}$	erste Invariante des maximalen Quelldruckes bei Volumenkonstanz
K	Kompressionsmodul [MPa]
K_0	Ruhedruckbeiwert [-]
K_0^{SW}	Seitendruckbeiwert für Quellen [-]
K_f	gesättigte Wasserleitfähigkeit [m/sec]
k_f	Durchlässigkeitsbeiwert [m/sec]
K_q	Quellverformungsparameter [-]
k_s	Verhältnis der ungesättigten zur gesättigten Wasserleitfähigkeit [-]
K_u	ungesättigte hydraulische Wasserleitfähigkeit [m/sec]
$K_{z,q}$	Grob´scher Quellparameter [-]
l_i, m_i, n_i	Richtungskosinus
L, l	Länge [m]
m	Parameter zur Beschreibung der pF-Kurve nach van Genuchten (1980) [-]
M_w :	Molare Masse von Wasser [kg/kmol]
n	Parameter zur Beschreibung der pF-Kurve nach van Genuchten (1980) [-]
$\tilde{p}$	Sohlnormalspannung [kPa]
p	mechanische Vertikalbelastung auf die Fundamentoberkante [kPa]
p_a	atmosphärischer Luftdruck [kPa]
pF	der dekadische Logarithmus der Wasserspannung [-]
q	Feuchtefluss [m/sec]
q_b	Pfahlspitzendruck [kPa]
Q	Quellmodul [kPa]
R	Universelle Gaskonstante [J/mol·°K]
R_b	Pfahlfußwiderstand [kN]
RH	relative Luftfeuchte [-]

R_p	Konsolidierverhältnis [-]
r	Radius der Kapillare [cm]
r_σ	Parameter zur Beschreibung des Materialverhaltens in der deviatorischen Spannungsebene [-]
s_{ij}	Komponente des deviatorischen Spannungstensors
S_r	Sättigungsgrad [-]
$S_{r,0}$	Anfangssättigungsgrad [-]
$S_{r,\infty}$	Endsättigungsgrad [-]
T	Temperatur bzw. absolute Temperatur [°C] bzw. [K]
[T]	Cauchy´scher Spannungstensor
t	Zeit [sec] , [h] oder [d]
T_s	Oberflächenspannung des Wassers [N/m]
u_a	Porenluftdruck [kPa]
u_w	Porenwasserdruck [kPa]
V_0	Anfangsvolumen [cm³]
V_{Gl}	Glühverlust [cm³]
w	gravimetrischer Wassergehalt [%]
w_0	Ausgangswassergehalt [%]
w_A	Wasseraufnahmevermögen nach Enslin - Neff [%]
w_L	Fließgrenze [%]
w_{opt}	Wassergehalt für ρ_{Pr} [%]
w_P	Ausrollgrenze [%]
w_{Pr}	optimaler Wassergehalt [%]
w_{q0}	Wassergehalt beim Spannungszustand $\sigma_q = 0$ [%]
w_s	Schrumpfgrenze [%]
w_{sat}	Wassergehalt bei voller Sättigung [%]
Δp	Druckdifferenz [kPa]
ΔV	Volumenänderung [cm³]

Griechische Buchstaben

α	Benetzungswinkel [°]
α_σ	LODE-Winkel [°]
γ_w	Wichte des Wassers [kN/m³]
$\Delta\gamma^{el}$, $\Delta\gamma^{pl}$	elastische sowie plastische Relativverschiebung im Schermodell [m]
δ_{ij}	Kronecker - Symbol [-]
χ	Faktor zur Berechnung der effektiven Spannungen in teilsättigen Böden [-]
ε	Dehnung [%]
ε_a	axiale Dehnung [%]
ε_r	radiale Dehnung [%]
ε^{SN}	Schrumpfdehnung [%]
ε_v	volumetrische Dehnung [%]
ε_v^q,ε_v^{SW}	volumetrische Quelldehnung [%]
ε_z	Vertikaldehnung [%]
ε_z^q,ε_z^{SW}	vertikale Quelldehnung [%]
$\{\varepsilon\}$	Dehnungsvektor
η_q	Quellzeitparameter [-]
φ	Reibungswinkel [°]
φ_s	Winkel der Gesamtscherfestigkeit [°]
λ	BC-Parameter: Porenverteilungsindex
μ	Reibungskoeffizient [-]
ν	Poissonzahl [-]
ν_w	Partielles molekulares Volumen vom Porenwasserdampf
Θ	dimensionsloser Wassergehalt [-]
θ	Volumetrischer Wassergehalt [cm³/cm³]
θ_r	Volumetrischer Restwassergehalt [cm³/cm³]
θ_s	Volumetrischer Sättigungswassergehalt [cm³/cm³]
θ_0	Initialer volumetrischer Wassergehalt [cm³/cm³]
ρ_d	Trockendichte [g/cm³]
ρ_{Pr}	Proctordichte [g/cm³]

ρ_s	Korndichte [g/cm³]
ρ_w	Dichte des Wassers [g/cm³]
σ	Totale Spannung [kPa]
σ'	Effektive Spannung [kPa]
σ_a	Axialspannung [kPa]
σ_c	Mindestspannung [kPa]
σ_f	Grenzspannung [kPa]
σ_{r0}	radialer Anfangspannungszustand [kPa]
σ_r^{SW}	radialer Quelldruck [kPa]
σ_v	Vorlastspannung [kPa]
σ_z	Vertikalspannung [kPa]
σ_{z0}	vertikaler Anfangspannungszustand [kPa]
$\sigma_{z,q0}$	Vertikalspannung über der kein Quellen mehr stattfindet [kPa]
σ_z^{SW}	vertikaler Quelldruck [kPa]
$\sigma_{z,max}^{SW}$	maximaler, vertikaler Quelldruck [kPa]
$\sigma_\perp$	Totale Kontaktspannung zwischen zwei Kontaktflächen [kPa]
$\{\sigma\}$	Spannungsvektor
$\{\sigma_{q0}\}$	Spannungsvektor über dem kein Quellen mehr stattfindet [kPa]
τ	Scherspannung [kPa]
τ_{Peak}	kritische Scherspannung [kPa]
ω	normierter, dimensionsloser Wassergehalt [-]
ψ	Wasserspannung [cm] oder [kPa]
ψ_0	Bezugssaugspannung [cm] oder [kPa]
ψ_b	Saugspannung am Lufteintrittspunkt [cm] oder [kPa]
ψ_g	Gaspotential [cm] oder [kPa]
ψ_H	Hydraulisches Potential [cm] oder [kPa]
ψ_m	Matrixsaugspannung [cm] oder [kPa]
ψ_o	Osmotisches Potential [cm] oder [kPa]
ψ_r	Residualsaugspannung [cm] oder [kPa]
ψ_z	Gravitationspotential [cm] oder [kPa]
ψ_Ω	Auflastpotential [cm] oder [kPa]

Kurzfassung

Die Arbeit beschäftigt sich mit der Bestimmung der Zwangsbeanspruchungen und mit den daraus resultierenden Verformungen auf geotechnische Bauwerke infolge Quellen von teilgesättigten, bindigen Böden. Zur Ermittlung eines Quellgesetzes zur Beschreibung dieses Volumenänderungsverhaltens wurden zwei spezielle Oedometergeräte entwickelt. Mittels eines modifizierten Oedometers können radiale und axiale Quelldrücke getrennt voneinander gemessen sowie axiale Dehnungen zugelassen werden. Die axialen Spannungen werden über eine Kraftmessdose ermittelt während die radialen über Dehnungsmessstreifen, die an der Außenfläche des Oedometerringes befestigt sind, bestimmt werden. Mit Hilfe dieser Dehnungsmessstreifen wird die Radialverformung des Ringes gemessen. Daraus wird die Ringkraft und somit der Radialdruck, der auf der Probe wirkt, ermittelt. Ein anderes Oedometergerät, welches bis auf den Oedometerring baugleich zu dem bereits erwähnten ist, wurde speziell für die vorliegende Problematik entwickelt. In der Innenseite des Oedometerringes ist eine Membran angebracht, über die kontrolliert Radialdrücke erzeugt und gemessen werden können. Der Raum zwischen dem Ring und der Membran ist mit einem Fluid gefüllt. Durch Regulierung des im Reservoir befindlichen Fluidvolumens kann die Radialdehnung gesteuert werden. Somit ist dieses modifizierte Oedometergerät mit einem triaxialen Apparat vergleichbar.

Es wurden umfangreiche Untersuchungen in den o. g. Geräten an einem quellfähigen Boden durchgeführt. Dabei wurden der Anfangs- und der Endsättigungsgrad sowie die Porenzahl variiert. Aus den Versuchen ergab sich, dass das Quellverhalten als nichtlinear elastisch angesehen werden kann. Anhand dieser Ergebnisse sind Approximationen für das eindimensionale sowie das dreidimensionale Quellverhalten aufgestellt und in den FEM - Code ABAQUS mittels einer Subroutine implementiert worden.

In der numerischen Simulation werden die elastischen Quelldeformationen mit den mechanischen Deformationen aus äußerer Belastung und Eigengewicht überlagert. Für die mechanische Beanspruchung ist eine linear elastische - ideal plastische Spannungsdehnungsbeziehung angenommen mit einer Grenzfunktion nach Drucker - Prager. Es ist bekannt, dass dieses Materialgesetz nur bedingt geeignet ist zur Beschreibung des Materialverhaltens teilgesättigter, bindiger Böden. Es ist jedoch relativ einfach zu handhaben und adäquat genug um zu demonstrieren, dass die implementierten Quellbeziehungen mit

einem Großteil der existierenden mechanischen Spannungsdehnungsbeziehungen verwendet werden können.

Zur Überprüfung der Güte der in ABAQUS eingegebenen und implementierten Beziehungen werden exemplarisch verschiedene experimentelle Ergebnisse nachgerechnet und mit den Simulationen verglichen. Die Rückrechnung der entwickelten Zusammenhänge zeigt, dass die Variation des Quellmoduls für alle variierten Parameterwerte zu einer sehr guten Übereinstimmung in den Ergebnissen führt.

Abschließend wird anhand eines praxisorientierten Berechnungsbeispiels aus der Geotechnik bestehend aus einer Pfahl-Platten Einheit die Anwendungsmöglichkeit des aufgestellten und implementierten Quellmodells für die Praxis dargestellt.

Abstract

This thesis deals with the determination of the constraints and the resulting deformations on geotechnical structures caused by swelling of unsaturated cohesive soils. To determine the swelling relationship that describes this volume change behaviour two oedometer devices have been developed. By means of a modified oedometer apparatus it is possible to measure the swelling pressure both in the radial and the axial direction. The axial pressure is measured by a load cell while the radial pressure is obtained via strain gauges mounted on the outer surface of the oedometer ring. By means of these strain gauges the radial deformation of the ring is measured, from which the radial force and the radial pressure exerted on the sample is determined. Another oedometer apparatus, that is similar to the one mentioned before, has been developed especially for the present study. The oedometer ring is fitted inside with a membrane through which radial pressure is exerted under controlled conditions. The space between the ring and the membrane is filled with a fluid. The adjustment of the fluid volume in the reservoir allows the control of the radial strain. Thus, this oedometer device is comparable to a triaxial apparatus.

Detailed investigations have been carried out using this equipment on soils with swelling potential. The initial and the final degree of saturation as well as the void ratio have been varied. From the results it has been identified that the swelling behaviour may be regarded as nonlinear elastic. Based on these experimental results approximate expressions have been derived for the one-dimensional and the three-dimensional swelling behaviour. They have been subsequently implemented in the FEM code ABAQUS via a subroutine interface.

In the numerical simulation the elastic swelling deformations are superimposed to the mechanical deformations due to external loads and self-weight. For the mechanical deformations a linear elastic – ideal plastic stress-strain relationship with a Drucker-Prager yield criterion is adopted. It is well-known that the suitability of this material model to describe the material behaviour of unsaturated cohesive soils is limited. Nevertheless, the model is simple to handle and sufficiently adequate to demonstrate that the implemented swelling relationships may be used in connection with the majority of the available mechanical stress-strain relationships.

In order to check the accuracy of the relationships implemented into ABAQUS various tests have been numerically simulated. The back-calculation of the developed relationships shows, that the variation of the swelling modulus leads for all parameters investigated to very good agreement with the results.

Finally, the applicability of the derived and implemented swelling model in geotechnical engineering is demonstrated on a practical situation of a piled-raft unit in unsaturated soil.

1 Einleitung und Problemstellung

In der Natur auftretende Böden befinden sich überwiegend im Zustand der Sättigung bzw. Teilsättigung. Für geotechnische Fragestellungen sind aus diesem Grund gekoppelte Deformations- und Strömungsprozesse von Korngerüst und Porenfluid bzw. Porenluft von großer Wichtigkeit.

Grundsätzlich versteht man unter dem Begriff Teilsättigung einen Zustand, bei dem der Porenraum eines porösen Feststoffkörpers, hier Boden, sowohl mit einer Flüssigkeit, in diesem Fall Porenwasser, als auch mit einem Gas, in diesem Zusammenhang Porenluft, gefüllt ist. In der Bodenmechanik wird dieser Zustand in der Regel durch den Sättigungsgrad erfasst.

Sättigt ein quellfähiger, teilgesättigter Boden infolge Wasserzutritt auf einen höheren Sättigungsgrad auf, so nimmt der Bodenkörper infolge Quellen an Volumen zu. Dementsprechend verliert auch solch ein Boden infolge Austrocknung an Volumen.

Das Quellen von teilgesättigten, bindigen Böden kann zu hohen Quelldrücken und zu großen, quellbedingten Deformationen von geotechnischen Bauwerken führen. Die Beherrschung dieser Quellproblematik bei geotechnischen Bauwerken hat hinsichtlich hoher Sicherheits- und Gebrauchstauglichkeitsanforderungen, wie zum Beispiel beim Ausbau des Infrastrukturnetzes, eine große Relevanz, vgl. von Wolffersdorff & Heidkamp (2005).

Bei konventionellen Nachweisen werden derartige Einflüsse kaum bzw. gar nicht betrachtet. Somit besteht Bedarf an der Entwicklung geeigneter Quellgesetze, welche in allgemeine Finite Elemente Programme implementiert werden und somit in der Praxis zum Einsatz kommen können.

Die vorliegende Arbeit beschäftigt sich mit den Zwangsbeanspruchungen auf geotechnische Tragwerke infolge Feuchteänderungen im Baugrund. Speziell für die vorliegende Problematik sind zwei Oedometergeräte entwickelt worden in denen die umfangreichen Experimente zur Bestimmung des Quellverhaltens eines quellfähigen Bodens durchgeführt worden sind.

Die Ziele der durchgeführten Untersuchungen bestehen darin, das Volumenänderungsverhalten sowie die Spannungsänderung infolge Quellen eines teilgesättigten, bindigen Bodens in Abhängigkeit von der Sättigung und der Porenzahl zu quantifizieren.

Zur Berechnung des Wassertransportes in einem Boden werden die Transportkenngrößen benötigt. Hierzu bedarf es u. a. der Bestimmung der hydraulischen Beziehungen, welche anhand von weiteren Experimenten bestimmt und approximiert werden.

Der Einfluss der quellbedingten Zwänge auf geotechnische Bauwerke, als Konsequenz der instationären Feuchteausbreitung in einem quellenfähigen bindigen Boden, werden mittels der Finite Element Methode analysiert.

Die Untersuchung des Volumenänderungsverhaltens infolge Quellen wird im Rahmen eines Teilprojektes der DFG-Forschergruppe „Mechanik teilgesättigter Böden“ durchgeführt.

2 Literaturübersicht

Verschiedene Forschungsarbeiten handeln von der Prognose der Effekte auf geotechnische Strukturen infolge des Quellphänomens, wie zum Beispiel von Wolffersdorff & Heidkamp (2005), Heidkamp & Katz (2004) und Wittke (2003). Alle diese Arbeiten beziehen sich auf quellfähigen Fels bzw. verfestigte Tonsteine und basieren auf den Stoffgesetzen für das Quellen von Grob (1972) bzw. Kiehl (1990). Grob (1972) formulierte für die Beziehung zwischen quellbedingten Spannungen und Dehnungen ein eindimensionales Quellgesetz, näher beschrieben in Abschnitt 3.6.4.1 dieser Arbeit. Grundlage für diese Formulierung waren Ergebnisse von Quellversuchen an Gestein nach Huder & Amberg (1970).

Das dreidimensionale Quellgesetz nach Kiehl (1990) baut auf der eindimensionalen Formulierung von Grob (1972) auf, vergleiche Abschnitt 3.6.4.2. Es ermöglicht die Quelldehnungen und die Quelldrücke im Raum sowie deren zeitliche Entwicklung zu beschreiben. Dieses dreidimensionale Quellgesetz basiert auf multiaxialen Quellversuchen in einem wahren Triaxialgerät, die von Pregl et al. (1980) ende der siebziger Jahre an Tongesteinen durchgeführt wurden. Kiehl (1990) kam zu dem Ergebnis, dass die in verschiedene Richtungen auftretenden Quelldehnungen annähernd nur von der Normalspannung in der jeweiligen Richtung beeinflusst werden.

Zusätzlich wurde von Gattermann (1998) ein normierter dimensionsloser Wassergehalt als Parameter eingeführt und er hat nachgewiesen, dass die Quelldrücke sowie die Quelldehnungen mit zunehmender Sättigung ansteigen. Diesen Ansatz hat Wittke (2003) übernommen und für teilgesättigte Zustände von anhydrithaltigem Gestein weiterentwickelt, näher erläutert in Abschnitt 3.6.4.2.

Diese Stoffgesetze wurden jedoch hauptsächlich für isotrop quellendes Gestein entwickelt. Die Gültigkeit der genannten Gesetze sowie die darin getroffenen Annahmen müssen für quellfähige, bindige Böden überprüft und modifiziert werden. Des Weiteren sind keine teilgesättigten Anfangs- und Endzustände für quellfähigen, bindigen Boden betrachtet und enthalten. Detaillierte, weiterführende Untersuchungen hierzu werden in dieser Arbeit in Kapitel 5 aufgeführt.

Eine zweckmäßige Methode zur Untersuchung von quellfähigem Material ist der Oedometerversuch. In der Literatur lassen sich verschiedene Arbeiten finden, die sich zum größten Teil auf die axiale Quellhebung und den daraus resultierenden Quelldruck konzentrieren.

Hier sind zu nennen Solomon (2002), Gadre & Chandrasekaran (1994), Katti & Katti (1994), Richards (1979, 1984), Gudehus et. al. (2003) und Gens & Alonso (1992). Weitere Forschungsarbeiten, wie zum Beispiel Komine & Ogata (1999), Steiger (1993) und Pregl et al. (1980), beschäftigen sich ebenso mit Quellversuchen an quellfähigem Ton und Fels. Diese Arbeiten konzentrieren sich auf triaxiale Untersuchungen an einem quellfähigen Material.

Systematische Untersuchungen zu Zwangsbeanspruchungen für beliebige Spannungs-Verformungszustände unter Berücksichtigung teilgesättigter Zustände mit variablen Wassergehalten bzw. Sättigungen und Porenzahlen fehlen bisher und sollen hier aufgeführt werden.

Die Untersuchungsergebnisse werden durch einen Quellansatz approximiert und in ein numerisches Programm implementiert. Hierdurch wird die Berechnung von praxisrelevanten Randwertproblemen, wie z.B. Pfahlgründungen in quellfähigen Böden, möglich.

3 Theoretische Grundlagen

Es werden zur Erreichung der zuvor genannten Ziele zahlreiche theoretische Grundlagen benötigt, welche in diesem Kapitel zusammengestellt sind.

3.1 Definitionen und Begriffe

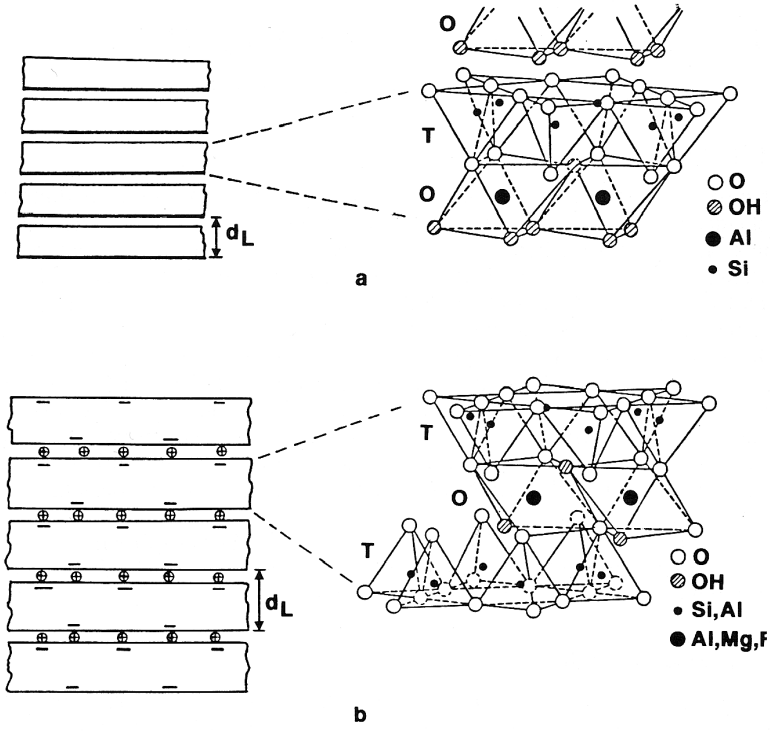
3.1.1 Ton und Tonminerale

Im bautechnischen Sinne versteht man unter Ton ein sehr feinkörniges Sediment mit einer Korngröße $d \leq 2$ µm (0,002mm), das im Wesentlichen aus Tonmineralien besteht. Diese sind vor allem Kaolinit, Smektit und Illit. Als Nebenkomponenten können unter anderen Feldspat, Quarz, Carbonat, organische Substanzen und Oxide auftreten. Aus mineralogischer Sicht gehören die tonigen Minerale zu den Schichtsilikaten. Sie sind durch eine blättchenartige Form gekennzeichnet, die für die typischen Eigenschaften der Tonminerale, wie z.B. Plastizität oder Quellen, ursächlich ist.

Ihre Grundstruktur besteht aus Tetraedern und Oktaedern, die in Schichten angeordnet sind. Die so entstandene Struktur der Teilchen wird auch Plättchenstruktur genannt.

Die Tetraeder haben ein Siliziumzentralkation, siehe Abb. 3.1-1, und an den vier Ecken Sauerstoffanionen. Drei von diesen werden jeweils mit benachbarten Tetraedern geteilt und bilden somit Schichten in Form eines hexagonalen Flächenmusters. Bei den Oktaedern kann das Zentralkation entweder Aluminium oder Magnesium sein, an den sechs Ecken können entweder Sauerstoff- oder Hydroxilanionen angeordnet sein, die mit benachbarten Oktaedern geteilt werden, so dass annähernd eine engste Kugelpackung entsteht. Da die Abmessungen der Tetraeder- und der Oktaederschichten fast gleich und ihre Symmetrien ähnlich sind, lassen sich diese Schichten leicht miteinander verbinden, indem das vierte Sauerstoffanion eines Tetraeders mit einem Oktaeder geteilt wird. Dadurch können sich, wie in Abb. 3.1-1 dargestellt, entweder Doppelschicht- (Tetraeder-Oktaeder) oder Dreifachschichtstrukturen bilden (Tetraeder-Oktaeder-Tetraeder).

Zweischichtminerale sind Kaolinminerale (Kaolinit, Halloysit) und Serpentinminerale, zu den Dreischichtmineralen zählen die Smektite (Montmorillonit, Beidellit, etc.), Illit, Vermiculit und Chlorit.



d_L= Schichtabstand
O= Oktaederschicht
T= Tetraederschicht

a Zweischichtminerale
b Dreischichtminerale

Abb. 3.1-1 Struktur der Tonminerale (Hiltmann & Sribrny 1998).

3.1.2 Quellen und Schwellen

In der deutschsprachigen, ingenieurgeologischen Literatur werden für die Beschreibung der Volumenzunahme bindiger Böden bei Wasserzugabe, häufig ohne weitere Unterscheidung, die Begriffe „Quellen“ und „Schwellen“ benutzt. Dagegen wird in der englischen Fachliteratur nur der Begriff „swelling“ verwendet. Um Missverständnisse zu vermeiden wird in der vorliegenden Arbeit die von Pimentel (1996) empfohlene Definition verwendet. Demnach bedeutet „Quellen“ die Volumenzunahme von Ton infolge Wasseraufnahme ohne Änderung der mineralischen Grundstruktur und „Schwellen“ die Volumenzunahme, bei der eine mineralische Umwandlung von Anhydrit in Gips stattfindet. Beide Prozesse gleichen sich zwar hinsichtlich der Volumenänderung, in den Mechanismen unterscheiden sie sich aber: Quellen ist ein physikalischer Prozess, Schwellen dagegen ein chemischer.

In der Bodenmechanik wiederum wird Schwellen beschrieben als Volumenzunahme infolge Kornentspannung, osmotischem Druck und Expansion von Gasblasen nach Entlastung. Quellen wird in der Bodenmechanik allgemein als Volumenzunahme infolge Wasseraufnahme bezeichnet.

Die hier betrachteten Untersuchungen beschränken sich auf das Quellen teilgesättigter und gesättigter Tone infolge Durchströmung von entmineralisiertem Wasser.

Es wird unterschieden zwischen drei verschiedenen Wasserarten in Tonpartikeln, siehe Abb. 3.1-2, und somit auch drei Arten von „Quellen“:

- Intrakristallines Quellen
- Osmotisches Quellen
- Mechanisches Quellen

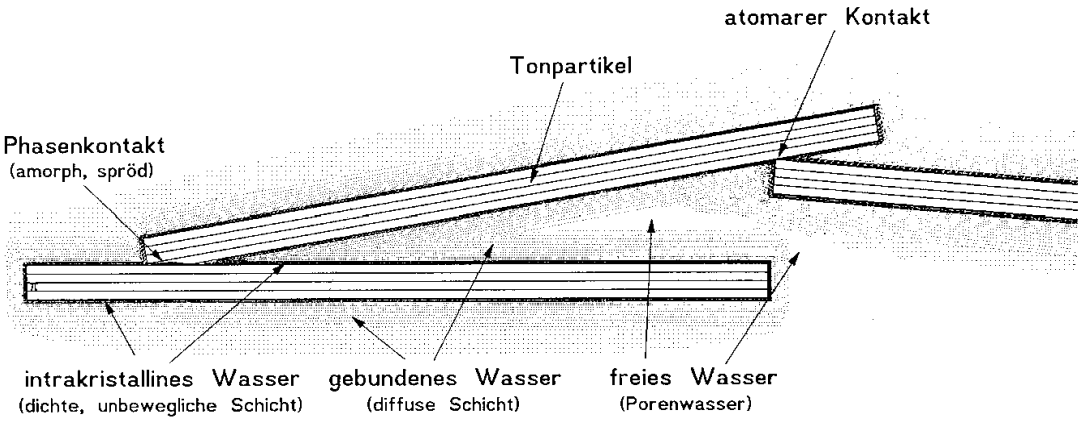


Abb. 3.1-2 Tonpartikel und Wasserarten (Pimentel 1996).

3.1.2.1 Intrakristallines Quellen

Eine Eigenschaft der Tonminerale besteht darin, dass die Zentralkationen der Tetraeder und Oktaeder durch andere Kationen, meist von niedrigerer Valenz, ausgetauscht werden können. Das Defizit an positiver Ladung bzw. der Überschuss an negativer Ladung zusammen mit der negativen Ladungskonzentration der Schichtoberfläche verursachen das Anlagern von Kationen mit bis zu vier Wassermolekularschichten an der Oberfläche der Elementarschichten. Diese Art der Anlagerung von Wassermolekülen wird intrakristallines Quellen genannt, das so angelagerte Wasser wird als intrakristallines Wasser bezeichnet. Das Kristallwasser wird in den Bodenkörnern chemisch gebunden. Die Volumenzunahme ist dabei erheblich.

Der Abstand zwischen den Schichten erhöht sich bis zu 220 %. Bei Verformungsbehinderung können die Quelldrücke mehr als 100 MPa betragen.

Die intrakristalline Quellung lässt sich nur unter sehr hoher Temperatur rückgängig machen. Sie wird im Folgenden nicht separat behandelt.

3.1.2.2 Osmotisches Quellen

Bei Zufuhr von Wasser werden Kationen und Wasserdipole um die Tonpartikel in Form einer diffusen Schicht, auch Hydrathülle genannt, angelagert. Diese Anlagerung wird als osmotisches Quellen bezeichnet und das angelagerte Wasser als Adsorptionswasser. Das Adsorptionswasser umhüllt die Bodenteilchen, ohne dass Menisken entstehen. Der Vorgang ist stark von der Ionenkonzentration abhängig. Zusätzlich hängt die osmotische Quellung eines Tonminerals stark von der Ladungsverteilung ab, welche von der Form und Größe der Partikel mitbestimmt wird: Je blättchenartiger die Form, desto größer ist die Fläche pro Volumeneinheit, an der sich Wassermoleküle anlagern können. Daher kann die spezifische innere Oberfläche eines Tonminerals als Hinweis auf seine osmotische Quellfähigkeit dienen.

Osmotische Quellung kann grundsätzlich durch Druck wieder rückgängig gemacht werden und spielt deshalb bei geotechnischen Eingriffen eine wesentliche Rolle. In dieser Arbeit wird hauptsächlich dieses osmotische Quellen untersucht.

3.1.2.3 Mechanisches Quellen

Aufgrund der geringen Wasserdurchlässigkeit kommt es bei gesättigten tonigen Böden infolge Be- oder Entlastung zu lang anhaltenden und zyklischen Porenüber- oder Porenunterdrücken. Die Dissipation dieser Porendruckunterschiede erfolgt i.d.R. durch ein Auspressen bzw. Ansaugen von Wasser, verbunden mit Volumenab- bzw. Volumenzunahme. Der erste Fall wird in der Bodenmechanik als Konsolidation bezeichnet. Da es sich im zweiten Fall um eine Volumenzunahme handelt, spricht man auch von Quellen. Allerdings hat dieses Quellen rein mechanische Ursachen, es wird daher als mechanisches Quellen bezeichnet. Der Betrag des mechanischen Quellens entfällt bei gesättigten Tonen.

3.1.3 Schrumpfen

Schrumpfprozesse bei zunehmender Entwässerung (bzw. Wasserspannung) führen zu einer Abnahme an Porenvolumen, in erster Linie von größeren, instabileren Poren. Der mit Wasser gefüllte Porenanteil wird immer kleiner (Teilsättigung) oder gleich (Vollsättigung) dem Gesamtporenanteil sein.

Bodenmaterial schrumpft infolge von Zugkräften durch die nach innen gekrümmten Wassermenisken zwischen den Bodenteilchen. Daraus resultiert eine Verdichtung solange die Bodenteilchen die Möglichkeit haben, sich einander zu nähern. Je feinkörniger ein Material ist, desto höher ist das Ausmaß der Schrumpfung.

Die entstehende Schrumpfkurve bei der Entwässerung eines Bodens wird gekennzeichnet durch zwei deutlich voneinander zu unterscheidenden Abschnitten, siehe Abb. 3.1-3. Ein erster Abschnitt bis zur so genannten Schrumpfgrenze wird als Normalschrumpfbereich bezeichnet. Der darauf folgende zweite Abschnitt wird als Restschrumpfen bezeichnet. Im Normalschrumpfbereich erfolgt im Rahmen der Wassergehaltsabnahme eine große Volumenverringerung verbunden mit einer signifikanten Zunahme der Raumdichte bei annähernder Aufrechterhaltung der Sättigung.

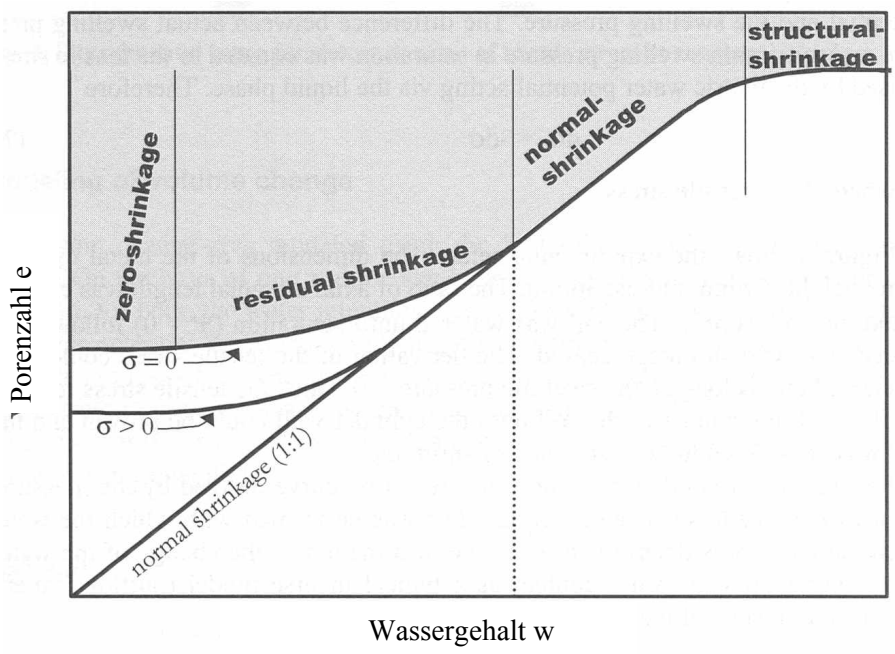


Abb. 3.1-3 Schematisierte Abhängigkeit von Porenzahl und Feuchtigkeitsquotient bei unbehinderter Austrocknung eines bindigen Bodens (Baumgartl 2003).

Der Übergang in den Restschrumpfbereich an der Schrumpfgrenze erfolgt relativ abrupt. Dieser unvermittelte Wechsel lässt sich nicht mit den übrigen wassergehaltsabhängigen Verläufen wie zum Beispiel dem Verlauf der Saugspannung und der effektiven Spannung erklären, da deren Verlauf eher stetig ist. In diesem Bereich können sich die einzelnen Körner nicht weiter nähern, da sie sich bereits berühren und die Hydratationshüllen durch die vorhandenen Kräfte nicht verdrängbar sind. Dadurch wird die Volumenänderung in diesem Bereich bei weiterer Austrocknung geringer. Zur trockenen Seite hin steigen die Saugspannungswerte stark an und auch die daraus resultierenden Korngerüstspannungen wachsen erheblich. Der Einfluss der effektiven Spannungen bleibt aber mit abnehmender Wässersättigung hinter dem Einfluss der Saugspannungen zurück, da diese nur im abnehmenden Wasservolumenanteil wirksam sind.

Schrumpfungen führen zu einer Festigkeitszunahme, die durch die Menisken bedingt ist. Im teilgesättigten Zustand krümmen sich die Menisken immer stärker infolge deren Rückweichung im Porenraum. Die Anteile der Saugspannung auf die Druckfestigkeit eines Materials gehen jedoch für einen Boden mit einem Wassergehalt gegen Null eigentlich verloren. In vielen kohäsiven Materialien bilden sich jedoch bei vollkommener Trocknung aus den Lösungsinhalten des verdampften Porenwassers Materialbrücken zwischen den Körnern, die ihrerseits eine hohe Festigkeit hervorrufen können.

3.2 Wechselwirkung zwischen Wasser und der Bodenmatrix

Das Porensystem und die Porenwasserspannungen bestimmen maßgebend die bodenphysikalischen und bodenmechanischen Eigenschaften. Zur Berechnung von Spannungs- und Bruchzuständen ist deswegen die Beziehung zwischen dem Wassergehalt und den Wasserspannungen ein ausschlaggebender Faktor. Des Weiteren werden die hydraulischen Beziehungen zur Berechnung des Wassertransportes im Bodenkörper benötigt.

Die Kapillarität beschreibt als Oberbegriff das durch die Grenzflächenspannung verursachte Verhalten von Flüssigkeiten. Der Einfluss dieser Kapillarität wird im Allgemeinen immer größer, je kleiner die Poren werden. Durch die Kohäsionskräfte der Wassermoleküle sowie der Adhäsionskräfte zwischen der Kornoberfläche 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 Model zur Bestimmung der Wasserspannungen und der anziehenden Kräfte in Abhängigkeit der Grenzflächengeometrie ist ein Kapillarmodell mit einem zylindrischen Rohr dessen Querschnitt konstant und zylindrisch ist, siehe Abb. 3.2-1.

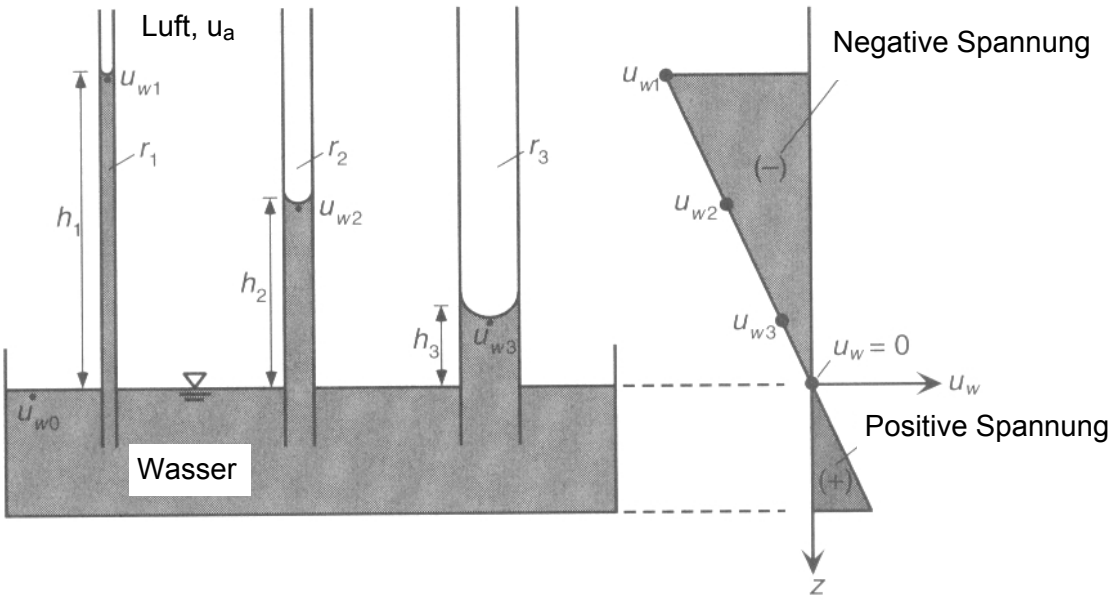


Abb. 3.2-1 Wasseranstieg in Kapillarröhren verschiedener Durchmesser (Lu & Likos 2004).

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

$$h_c = \frac{4 \cdot T_s}{d \cdot \gamma_w} \cdot \cos(\alpha) \qquad (3.2\text{-}1)$$

α ist der Benetzungswinkel zwischen Wasser und Rohrwandung abhängig von der Oberflächenbeschaffenheit. Das Wasser steht im Kapillarrohr unter einer Zugspannung, der so genannten Saugspannung, welche als Differenz zwischen Luftdruck und Porenwasserdruck definiert ist. Für eine Kapillare mit dem Radius r beträgt nach Lu & Likos (2004) die Druckdifferenz Δp im Inneren der Wasserbrücke, die gleich der Wasserspannung ψ ist, für den Sonderfall von Kugelflächen nach Laplace:

$$\Delta p = \frac{2 \cdot T_s}{r} = \psi_m = (u_a - u_w) \qquad (3.2\text{-}2)$$

mit: Δp : Druckdifferenz

T_s : Oberflächenspannung des Wassers

r : Radius der Kapillare

ψ_m : Matrixsaugspannung

u_a : Luftdruck über dem Meniskus

u_w : Wasserdruck unter dem Meniskus

Die Stärke der Bindung des Wassers kann mit Potentialen beschrieben werden. Das Wasser ist immer bestrebt, einen Ort mit geringst möglichem Gesamtpotential einzunehmen. Das Gesamtpotential ψ ist definiert als die Arbeit, die notwendig ist, um eine Einheitsmenge Wasser von einer freien Wasseroberfläche auf eine bestimmte Höhe in einer Kapillare anzuheben, oder die Arbeit, um aus einem Kapillarsystem einer Bodenmatrix eine Einheitsmenge Wasser zu entziehen:

$$\psi = m \cdot g \cdot h \quad [N \cdot cm] \tag{3.2-3}$$

mit: m: Wassermasse
g : Erdbeschleunigung
h : Bezugsniveau über einer freien Wasseroberfläche

Setzt man für $m \cdot g = 1$ N als Bezugseinheit so erhält man:

$$\psi = h \quad [\text{cm Wassersäule}] \tag{3.2-4}$$

Dieses Gesamtpotential ψ ist durch mehrere Teilpotentiale bestimmt. Eine Unterteilung in Teilpotentiale ist sinnvoll, da es schwierig ist, das Gesamtpotential zu messen. Es gibt verschiedene Messverfahren zur Erfassung der einzelnen Teilpotentiale.

$$\psi = \psi_z + \psi_m + \psi_o + \psi_g + \psi_\Omega \tag{3.2-5}$$

mit: ψ_z: Gravitationspotential
ψ_m: Matrixpotential
ψ_o: Osmotisches Potential
ψ_g: Gaspotential
ψ_Ω: Auflastpotential

Das Gravitationspotential ψ_z entspricht der Arbeit, die verrichtet werden muss, um ein Wasserteilchen zu einer gegebenen Höhe zu transportieren bzw., auf die Bezugseinheit $m \cdot g = 1$ N bezogen, gilt für ein Wasserteilchen im Abstand z oberhalb des Bezugsniveaus:

$$\psi_z = z = g \cdot (h - h_0) \tag{3.2-6}$$

Das Matrixpotential ψ_m beschreibt die Arbeit, die erforderlich ist, um kapillar und adsorptiv gebundenes und durch Korngerüstverformungen unter Druck oder Zug stehendes Wasser in ein gleich hohes Reservoir mit freiem Wasser zu überführen. Der Zahlenwert dieses

Matrixpotentials ohne Vorzeichen wird Wasserspannung genannt. Als Einheit der Wasserspannung wird meist cm Wassersäule angegeben. Aufgrund dessen, dass die ermittelten Werte bei verschiedenen Böden eine sehr große Spanne haben, hat Schofield (1935) die Werte im dekadischen Logarithmus aufgetragen und als pF-Werte definiert:

$$pF = \log\left(\frac{\psi_m}{1\,cm\,WS}\right) \tag{3.2-7}$$

Die Bezeichnung pF ist heute üblich und wird auch in dieser Arbeit verwendet.

Das osmotische Potential ψ_o beschreibt die Arbeit, die erforderlich ist, um reines Wasser in Wasser zu überführen, das die Zusammensetzung des Porenwassers aufweist. Das osmotische Potential ist stark von der Menge der gelösten Salze in der Bodenlösung abhängig. Es spielt somit in Böden mit sehr niedrigem Wassergehalt eine untergeordnete Rolle. Weist das Bodenwasser darüber hinaus eine geringe Salzkonzentration auf, so ist das osmotische Potential vernachlässigbar.

Das Gaspotential ψ_g muss berücksichtigt werden, wenn der Luftdruck im Boden nicht mit dem im gewählten Bezugsniveau übereinstimmt, wie das zum Beispiel bei der „axis translation"-Methode der Fall ist. Da solche Druckunterschiede in den Versuchen nicht herrschen, wird das Gaspotential nicht berücksichtigt.

Das Auflastpotential ψ_Ω ist zu berücksichtigen, wenn durch äußere Einwirkung ein Porenwasserüberdruck entsteht.

3.3 Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannungen

In der Fachliteratur gibt es zahlreiche Bezeichnungen für die Beziehung zwischen dem Wassergehalt und der Wasserspannungen: Wasserretensionskurve, Wasserretensionsfunktion, Wasserspannungskurve, pF-Kurve, pF-Sättigungs- oder pF-Wassergehaltskurve, Wassergehalt-Wasserspannungsbeziehung, Saugspannungs-Sättigungsbeziehung und vieles mehr. Im Nachfolgenden wird der Begriff pF-Kurve verwendet.

Der pF - Kurvenverlauf von fein- und gemischtkörnigen Böden wird von vielen Faktoren beeinflusst und lässt sich deswegen schwer ohne experimentelle Ermittlung prognostizieren.

3.3.1 Einfluss des Materials

Die pF – Kurve hängt materialseitig hauptsächlich von den folgenden Faktoren ab:

- Porenraumgeometrie
- Zusammensetzung der Porenlösung
- Mineralogie der Körner

Der Einfluss der Zusammensetzung der Porenlösung wird in den Untersuchungen vernachlässigt, da entionisiertes Wasser sowie immer das gleiche Probenmaterial verwendet werden. Eine wesentlich bedeutendere Auswirkung auf den Verlauf der pF-Kurven hat die Porenraumgeometrie.

Abb. 3.3-1 zeigt die repräsentativen pF-Kurven für Sande, Schluff und Ton. Diese Abbildung veranschaulicht das allgemeine Verhalten der Kennlinien und ihrer Abhängigkeit von der Bodenart.

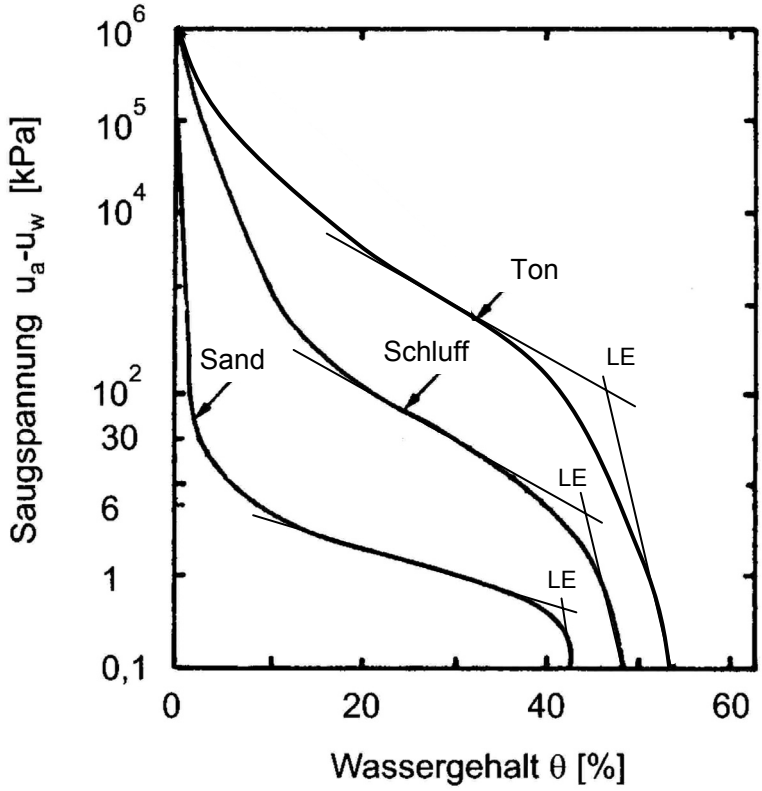


Abb. 3.3-1 pF-Kurven von Sand, Schluff und Ton.

Für sandige Böden ist die Anlagerung von Wasser im hohen Saugspannungsbereich (trockene Seite) im Allgemeinen sehr begrenzt, da die spezifische Oberfläche und Oberflächenaufladungen des Sandes verhältnismäßig klein sind und dadurch nur geringe Adsorptionsvorgänge stattfinden. Die Kapillarität ist der dominierende Saugspannungsmechanismus im mittleren Teil der Kurve,

also über den größten Teil des ungesättigten Wassergehaltsbereiches. Der Bereich endet auf der Seite hoher Sättigung mit einem verhältnismäßig niedrigen Luft-Eintrittspunkt LE, welcher definiert ist als Schnittpunkt der Wendetangente mit der Tangente am auslaufenden Ast der Kurve durch $S_r = 1{,}0$. Dieser Lufteintrittspunkt wird durch die relativ großen Porenkehlen im Sand gesteuert, welche sich zwischen und an den Sandpartikeln bilden. Die Steigungen und die Form der pF-Kurve in diesem mittleren Bereich werden hauptsächlich durch die Porengrößenverteilungen des Materials beeinflusst. Böden mit einer verhältnismäßig engen Porengrößenverteilung werden durch relativ flache pF-Kurven im mittleren Bereich gekennzeichnet.

Schluff kann eine erheblich größere Menge Wasser im hohen Saugspannungsbereich adsorbieren, da die spezifische Oberfläche des Schluffes viel größer ist als die von Sand. Der Luft-Eintrittspunkt liegt auch an einem Wert höherer Saugspannung, welches von den vergleichsweise kleinen Poren herrührt.

Ton hat, infolge seiner sehr hohen inneren spezifischen Oberfläche und der starken Oberflächenladungen, die höchste Wasseraufnahmekapazität. Der Lufteintrittspunkt liegt wiederum höher als bei Schluff, da dessen Poren noch feiner sind.

Wie durch die experimentellen Daten von Likos (2000) in Abb. 3.3-2 veranschaulicht, sind Tonminerale mit sehr hohem Quellvermögen, wie z. B. Smectite, in der Lage, im Bereich hoher Saugspannung, bis zu 20 % ihrer Masse an Wasser an ihre Körner anzulagern bzw. zu adsorbieren. Dadurch entstehen relativ große Saugspannungen über einen breiten Wassergehaltsbereich. Weniger quellende Tonmineralien, wie z. B. Illite und Kaolinite, adsorbieren viel weniger Wasser im hohen Saugspannungsbereich.

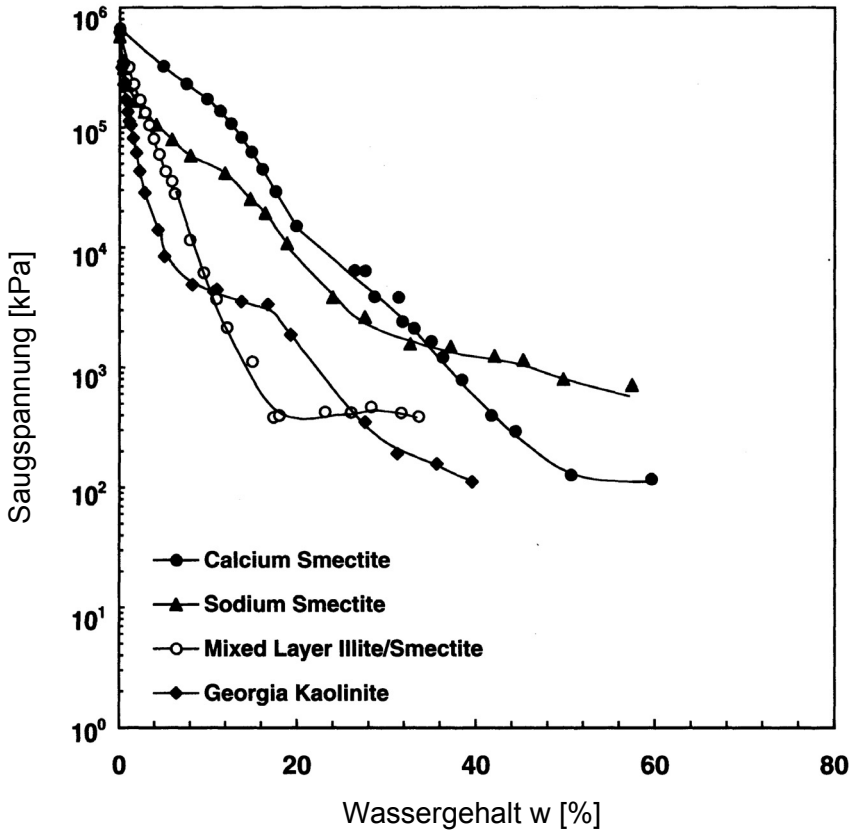


Abb. 3.3-2 Saugspannungswerte von Tonen mit verschiedenen Tonmineralien (Likos 2000).

3.3.2 Einfluss der Porenzahl

Die Dichte bzw. die Porenzahl eines Bodengemischs ist ein entscheidender Einflussparameter auf den Verlauf der pF-Kurve. Eine Änderung der Porengrößenverteilung infolge äußerer Last oder hydraulischer Einwirkungen verändert die pF-Kurve. Je kleiner der Porenraum, desto höher ist die Kapillarspannung. Dieses Phänomen ist anhand des Kapillarmodells mit Kapillarröhren verschiedener Durchmesser in Abb. 3.2-1 veranschaulicht.

Tombolato et al. (2005) haben Saugspannungsmessungen an einem aufsättigenden Kaolinton durchgeführt. Die Ergebnisse dieser Versuchsreihen sowie die Approximation dieser Ergebnisse in Abhängigkeit von dem Sättigungsgrad und der Porenzahl sind in Abb. 3.3-3 dargestellt. Bei dichterem Boden tritt bei gleicher Sättigung eine viel höhere Matrixspannung auf.

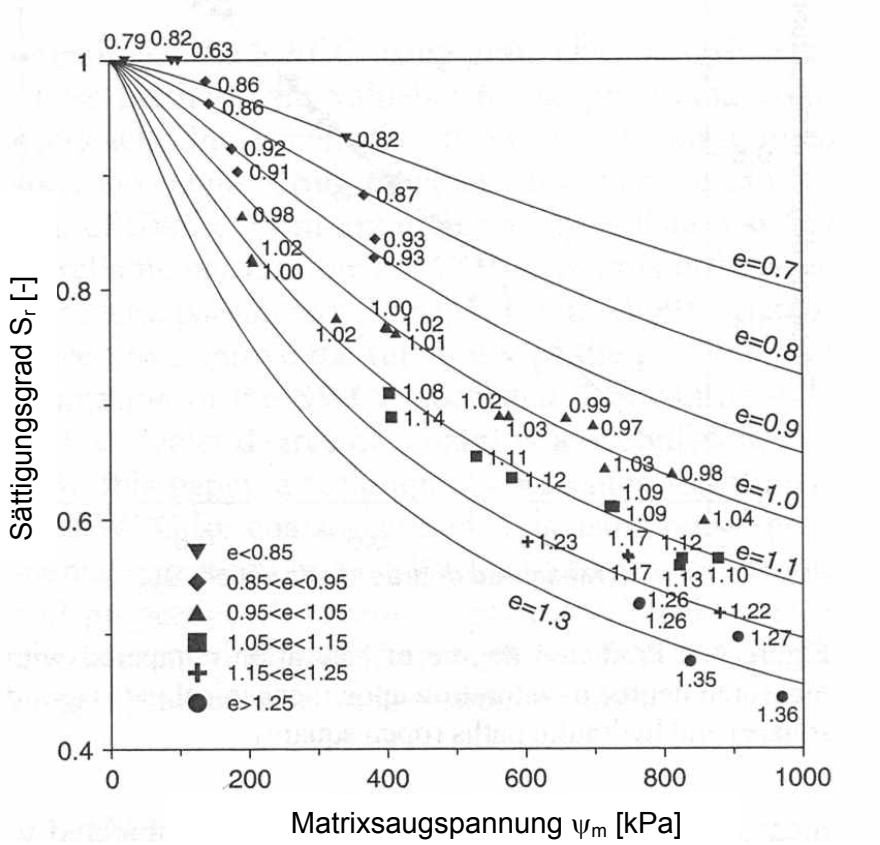


Abb. 3.3-3 Messwerte und Approximation der Saugspannung eines Kaolintones in Abhängigkeit von der Porenzahl (Tombolato et al. 2005).

3.3.3 Hysteresis in der pF-Kurve

Die Tatsache, dass bei gleichen Werten der Porenwasserdruckhöhe der Sättigungsgrad oder der Wassergehalt während eines Entwässerungsvorganges größer ist als während der Aufsättigung, wird als Hysterese der pF-Kurve bezeichnet. Die wichtigste Ursache u. a. hierfür ist die Unregelmäßigkeit der Porendurchmesser und der daraus resultierende „Flaschenhals-Effekt“, dargestellt in Abb. 3.3-4:

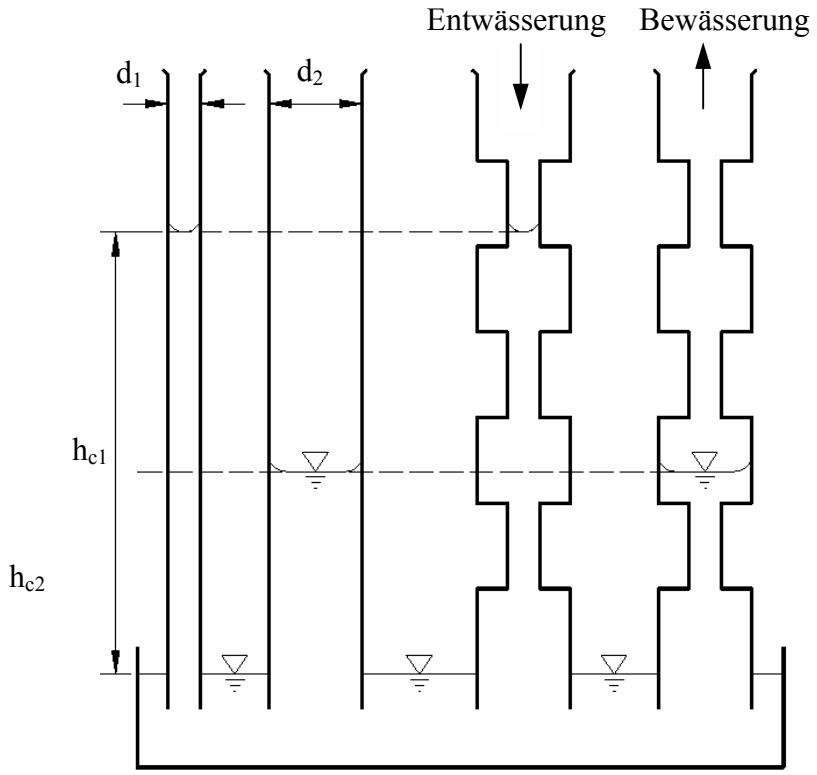


Abb. 3.3-4 Flaschenhals-Effekt zur Erklärung der Hysterese.

Die Abb. 3.3-4 zeigt auf der linken Seite zwei Kapillarrohre mit konstantem Durchmesser d_1 und d_2. Des Weiteren sind rechts zwei Kapillaren mit in Abschnitten verschiedenen Durchmessern abgebildet. Bei einer Entwässerung der zuvor gefüllten Kapillare erweist sich der Abschnitt mit dem Durchmesser d_1 als entwässerbar bis zur Höhe h_{c1}. Bei einer Bewässerung einer zuvor entleerten Kapillare stellt sich jedoch nur die Steighöhe h_{c2} ein, welche dem Durchmesser d_2 entspricht. Unter gleichen Druckverhältnissen ist also das wassergefüllte Volumen in den Kapillaren bei der Be- und Entwässerung sehr unterschiedlich.

Es entstehen somit, wie in Abb. 3.3-5 dargestellt, infolge Be- und Entwässerung verschiedene pF-Kurven. Ausgehend von einer anfangs vorhandenen vollständigen Sättigung ist bei darauf zurückgehender Sättigung die Primärentwässerungskurve zu beobachten. Eine Aufsättigung vom trockenen Zustand bis zur vollen Sättigung resultiert in die Hauptbewässerungskurve. Beginnt eine Ent- bzw. Bewässerung jedoch bei einer unvollständigen Sättigung ergibt sich ein anderer Funktionsverlauf als der der Primärkurven. Unvollständige Zyklen der Ent- und Bewässerung ergeben Kurven, die den Bereich zwischen den beschriebenen Hauptkurven abtasten.

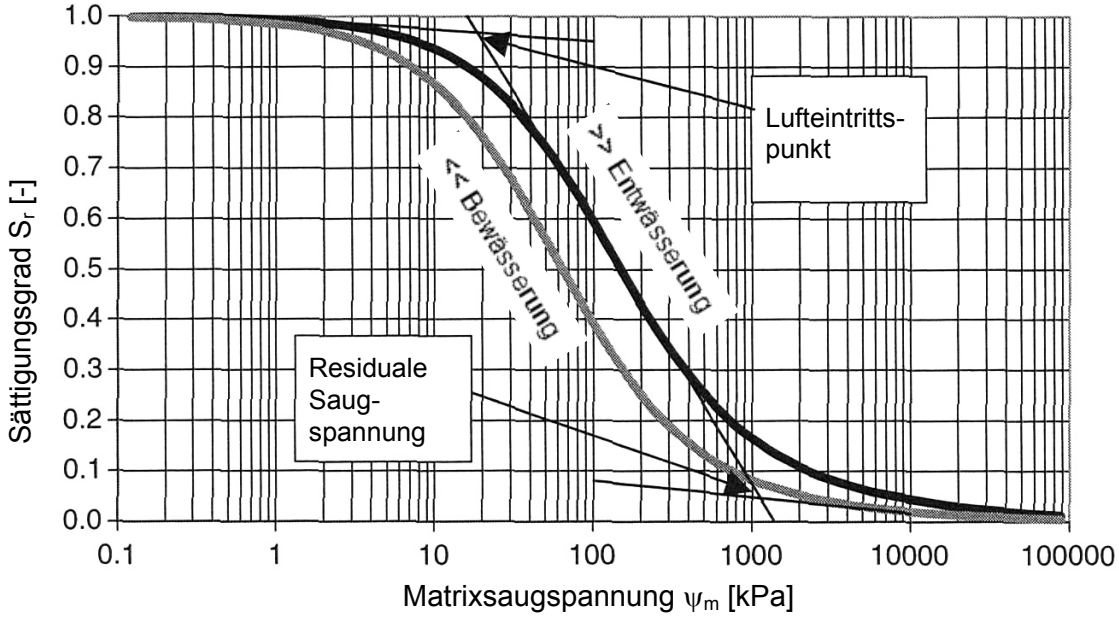


Abb. 3.3-5 Typisierter Verlauf einer pF-Kurve infolge Be- und Entwässerung (Padilla et al. 2005).

3.3.4 Verfahren zur Bestimmung der Wasserspannungen

Es existiert ein breites Spektrum von Messtechniken, die sich sehr in ihrer Komplexität, den Kosten und in ihrem abzudeckenden Messbereich unterscheiden. Die Messtechniken können generell in zwei Kategorien unterteilt werden, je nachdem welche Komponente, die totale Saugspannung (Gesamtpotential) oder nur die Matrixsaugspannung, gemessen wird. In Abb. 3.3-6 sind die gewöhnlichen Messtechniken sowie deren Messbereiche bis pF = 6 aufgeführt. Die in Kapitel 4.3.3 verwendete Vakuum – Austrocknungs – Methode ist jedoch nicht aufgeführt. Theoretisch ist es möglich mit dieser Methode den Messbereich bis pF = 7 zu erfassen.

Techniken zur Bestimmung der Matrixsaugspannung sind die Tensiometermethode, die „axis translation“ - Methode, die Methode mit Wärme- bzw. elektrischen Leitfähigkeitssensoren und die so genannte Kontakt-Filterpapiermethode. Zur direkten Ermittlung der negativen Porenwasserspannungen werden Tensiometer verwendet. Die „axis translation“ - Methode beruht auf der Steuerung der Differenz zwischen dem Porenluftdruck und der Porenwasserspannung. Der zugehörige Wassergehalt wird gemessen, nachdem die Probe infolge des angelegten äußeren Luftdrucks wieder das Gleichgewicht erreicht. Elektrische- bzw. Wärme-Leitfähigkeitssensoren werden zur indirekten Messung der Matrixspannung verwendet, indem die Leitfähigkeit des Bodens mit der Saugspannung korreliert wird. Die Filterpapiermethode mit Kontakt zur Probe beruht auf der Messung des mit dem teilgesättigtem Boden im Gleichgewicht

liegenden Wassergehaltes im Filterpapier. Die indirekte Messung der Saugspannung erfolgt durch die gravimetrische Messung der portierten Feuchtigkeit vom teilgesättigten Boden zum anfänglich trockenen Filterpapier. Der im Filterpapier gemessene Wassergehalt wird dann mit einer vorbestimmten und auf den Typ des verwendeten Filterpapiers bezogenen Kalibrierungskurve korreliert.

Gängige Techniken zur Bestimmung der totalen Saugspannung sind die Feuchtigkeitsmesstechnik, die Feuchtigkeitskontrolltechnik und die Filterpapiermethode ohne Kontakt zur Probe. Feuchtigkeitsmessgeräte sind temperaturgekoppelte Luftfeuchtigkeitsmesser, Hygrometer und Polymer- Resistenz/Kapazitäts- Sensoren. Zu den Feuchtigkeitskontroll-techniken gehören zum Beispiel Feuchtigkeitssteuerung mittels Salz- und Säurelösungen. Die Filterpapiertechnik ohne Kontakt zur Probe ist eine indirekte Methode zur Bestimmung der Feuchtigkeit. Für jede dieser Methoden ist die Kelvin´sche Gleichung zu verwenden, um die gemessenen bzw. gesteuerten Feuchtigkeitswerte in die totale Saugspannung umzurechen:

$$\psi = \frac{2 \cdot T_s \cdot \cos\alpha}{r} = -\frac{R \cdot T}{\nu_w} \cdot \ln(RH) = \frac{-R \cdot T}{M_w \cdot (1/\rho_w)} \cdot \ln(RH) \qquad (3.3\text{-}1)$$

mit: R : Universelle Gaskonstante = 8,31432 (J/mol·K)

T : Absolute Temperatur (K)

ν_w : Partielles molekulares Volumen vom Porenwasserdampf

RH : relative Luftfeuchte (-)

M_w : Molare Masse von Wasser = 18,016 (kg/kmol)

ρ_w : Dichte des Wassers (kg/m³)

Wenn die Kelvin´sche Gleichung für eine Versuchstemperatur von 20°C und 1 J = 1 Nm ausgewertet wird, erhält man folgenden Zusammenhang zwischen der totalen Saugspannung und der relativen Luftfeuchte:

$$\psi = 135288 \cdot \ln(RH) \quad [kPa] \qquad (3.3\text{-}2a)$$

$$\psi = 135288 \cdot \ln(RH) \cdot 10 \quad [cmWS] \qquad (3.3\text{-}2b)$$

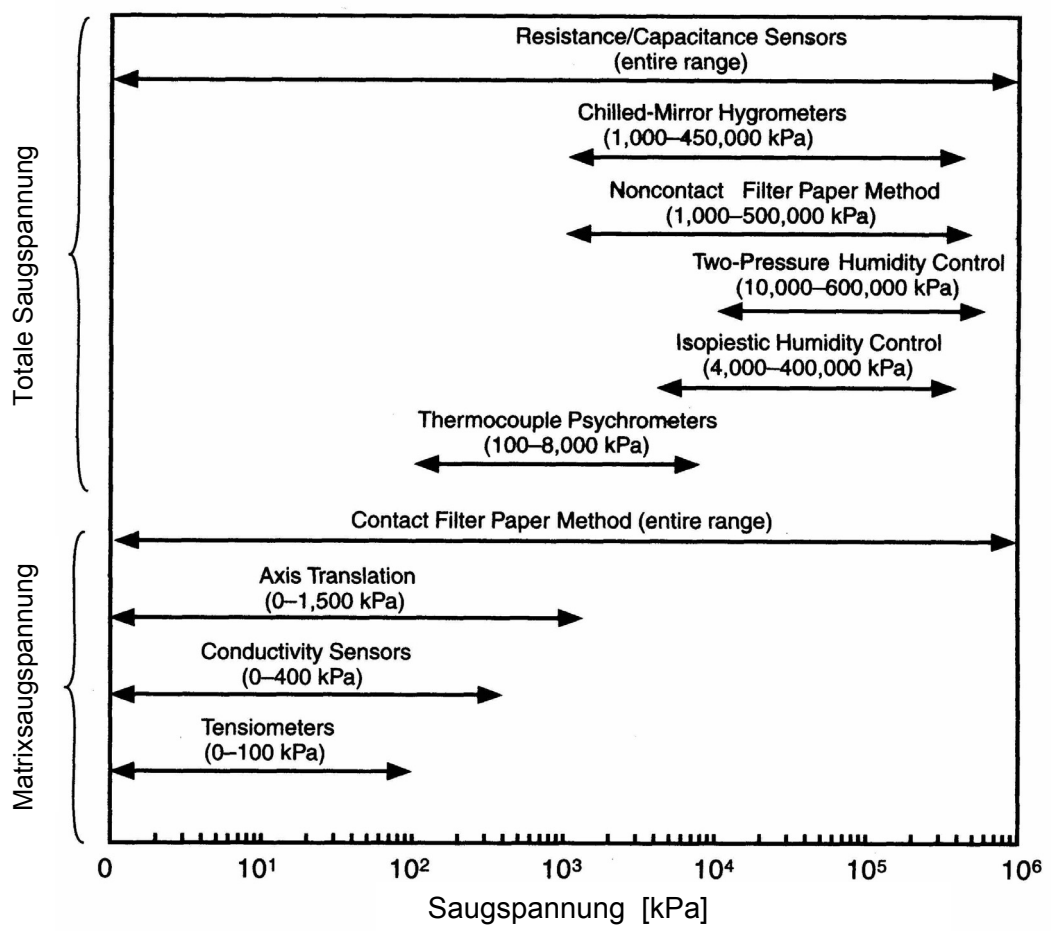


Abb. 3.3-6 Messtechniken und deren Messbereich zur Bestimmung von Saugspannungen (Lu & Likos 2004).

3.3.5 Analytische Beschreibung von pF-Kurven

Es gibt, wie in Kapitel 3.3.4 aufgeführt, zahlreiche Meßmethoden mit denen ausgesuchte Punkte der pF-Kurve ermittelt werden können. Damit sind Stützpunkte der pF-Kurve bekannt, aber nicht die gesamte Kurve. Anhand geeigneter mathematischer Funktionen ist es möglich an beliebigen Punkten im Messbereich den Wassergehalt bzw. den Sättigungsgrad zu bestimmen. Eine Vielzahl hierfür anwendbare, empirische Gleichungen sind in der Fachliteratur beschrieben. Die Abb. 3.3-7 zeigt eine typische pF-Kurve, in der die gebräuchlichsten Modellparameter, wie der volumetrische Residualwassergehalt θ_r, der volumetrische Sättigungswassergehalt θ_s sowie der Lufteintrittsdruck ψ_b, dargestellt sind.

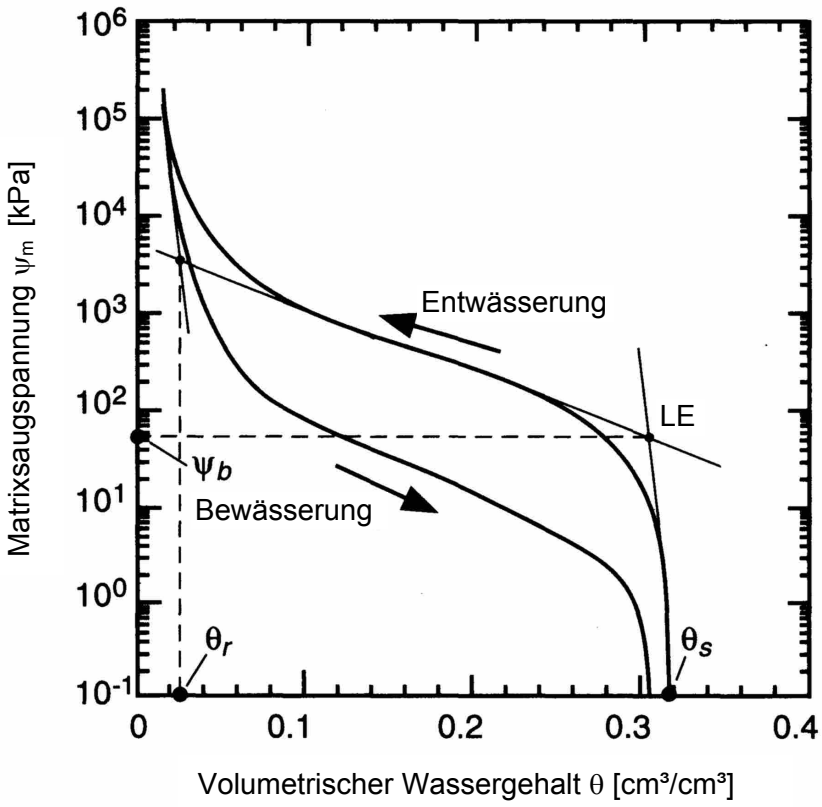


Abb. 3.3-7 Typische Saugspannungs-Kurven mit den Parametern θ_r, θ_s sowie ψ_b (Lu & Likos 2004).

Drei für geotechnische und bodenmechanische Anwendungen geeignete und übliche Modelle sind das Modell von Brooks & Corey (1964), das Modell von van Genuchten (1980) und das Model von Fredlund & Xing (1994).

Das Modell von Brooks & Corey (1964) ist ein älteres, jedoch noch heute sehr bedeutendes Modell zur Beschreibung der pF-Kurve. Es besteht aus zwei Abschnitten, wobei die pF-Kurve bis zum Lufteintrittspunkt LE durch eine Gleichung beschrieben wird und ab dieser Stelle die Sättigung konstant auf 100 % angesetzt wird:

$$\Theta = \begin{cases} \left(\frac{\psi_b}{\psi_m}\right)^{\lambda} & \psi_m \geq \psi_b \\ 1 & \psi_m < \psi_b \end{cases} \qquad (3.3\text{-}3)$$

mit: Θ: dimensionsloser Wassergehalt:

$$\Theta = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \qquad (3.3\text{-}4)$$

mit: θ: volumetrischer Wassergehalt

θ_r: volumetrischer Restwassergehalt

θ_s: volumetrischer Sättigungswassergehalt

ψ_b: Saugspannung am Lufteintrittspunkt

ψ_m: Saugspannung

λ: freier Parameter: Porenverteilungsindex

Das Modell ist eher für relativ grobkörnige Böden geeignet mit vergleichsweise niedrigen und in einer relativ engen Spanne liegender Saugspannung. Das Modell verliert seine Anwendbarkeit ab dem Bereich der residualen Saugspannungen bzw. des Restwassergehaltes.

Das Model von van Genuchten (1980) wird in einer Vielzahl von bodenhydraulischen Arbeiten verwendet. Das van Genuchten - Model hat 3 Parameter α, n und m:

$$\Theta = \left[\frac{1}{1+(\alpha\cdot\psi_m)^n}\right]^m \quad \text{bzw. mit Gl. } (3.3-4): \quad \theta = \theta_r + \frac{(\theta_s-\theta_r)}{\left[1+(\alpha\cdot\psi_m)^n\right]^m} \tag{3.3-5}$$

Der Parameter α hat die invers reziproke Einheit von ψ_m, z.B. ψ_m in cm und α in 1/cm, die Gleichung ist somit dimensionsrein. Der Parameter n steht in Beziehung zu der Porengrößenverteilung des Bodens, und der Parameter m beeinflusst die Gesamtsymmetrie der pF-Kurve. Um eine Vereinfachung der Gleichung durch die Reduzierung der freien Parameter zu erhalten, wird häufig der Parameter m mit dem Parameter n in Beziehung gesetzt:

$$m = 1-\frac{1}{n} \quad ; \; n>1 \tag{3.3-6}$$

Bessere Ergebnisse bei der Modellierung der pF-Kurve werden jedoch erreicht, wenn die Variabeln unabhängig voneinander sind.

Zur Beschreibung der Saugspannung ψ in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad S_r und der Anfangsporenzahl e_0 hat Wendling (2004) das van Genuchten - Modell modifiziert und erweitert:

$$\psi_m = \frac{a_1\cdot\psi_0}{e_0}\cdot\left(\left(\frac{1}{S_r}\right)^{a_2}-1\right)^{a_3} \tag{3.3-7}$$

wobei: a_1, a_2, a_3: Parameter

Die mathematische Form der van Genuchten - Gleichung erlaubt gegenüber dem Brooks & Corey - Modell eine größere Flexibilität über eine breite Spanne von Saugspannungen. Bohne et al. (1982) haben anhand von pF - Daten aus 35 Bodenhorizonten die beiden Modelle von Brooks & Corey (1964), van Genuchten (1980) und andere miteinander verglichen. Dabei zeigte sich, dass sich das van Genuchten - Modell im Vergleich häufiger sehr gut anpassen ließ.

Das Model von Fredlund & Xing (1994) hat eine ähnliche Form wie das van Genuchten - Model:

$$\theta = C(\psi_m) \cdot \theta_r + \left[\frac{1}{\ln\left[e + (\psi_m / r)^n \right]} \right]^m \qquad (3.3\text{-}8)$$

mit ψ_m : Saugspannung in [kPa]

e : Eulersche Zahl

r, n, m : Parameter

$C(\psi_m)$: Korrekturfaktor

Der Korrekturfaktor $C(\psi_m)$ bindet das Model bei einem Wassergehalt von Null an eine vordefinierte Saugspannung von 10^6 [kPa], welches einem Wert pF = 7 entspricht:

$$C(\psi_m) = \left[1 - \frac{\ln(1 + \psi_m / \psi_r)}{\ln(1 + 10^6 / \psi_r)} \right] \qquad (3.3\text{-}9)$$

mit ψ_r: Residuale Saugspannung in [kPa]

Diese Bindung des Modells bei $S_r = 0$ an den Wert pF = 7 ist jedoch nicht für alle Böden zutreffend (z.B. Schluff: pF $\leq$ 6)

Im Allgemeinen beschreibt das Fredlund & Xing - Model den pF- Kurvenverlauf von Böden bis zu einer Saugspannung von pF = 7 jedoch sehr gut. Die Güte des van Genuchten - und des Fredlund & Xing – Models, für Böden mit pF = 7 bei $S_r = 0$, ist vergleichbar.

In dieser Arbeit wird das van Genuchten - Modell in der modifizierten Form nach Wendling (2004) verwendet, da dieses Modell nicht an eine maximale, vordefinierte Saugspannung gebunden ist, und zusammen mit dem Fredlund & Xing - Modell die besten Ergebnisse liefert.

3.4 Feuchtetransport in teilgesättigten Böden unter isothermen Bedingungen

Die eindimensionale isothermische Wasserbewegung wird hervorgerufen durch den Gradienten des hydraulischen Potentials und lautet nach Darcy:

$$q = -K_u \cdot \text{grad}\psi_H \tag{3.4-1}$$

wobei: q : Feuchtefluss [m/sec]

K_u: Ungesättigte hydraulische Wasserleitfähigkeit als Proportionalitätsfaktor [m/sec]

ψ_H: Hydraulisches Potential → im Allg.: $\psi_H = \psi_m + \psi_z + \psi_g = \psi_m + \psi_z$ da $\psi_g = 0$

Einsetzen von $\psi_H = \psi_m + \psi_z$ und unter der Voraussetzung, dass ψ_z mit zunehmendem z sich verringert, erhält man:

$$q_{z,t} = -K_u \cdot \left(\frac{\partial\psi_m + \partial\psi_z}{\partial z} \right) = -K_u \cdot \left(\frac{\partial\psi_m}{\partial z} - 1 \right) \tag{3.4-2}$$

Diese Gleichung kann unter Berücksichtigung von Einflussparametern wie folgt ausgedrückt werden:

$$q_{z,t} = f(\theta, e_0, T) \tag{3.4-3}$$

Die für die Berechnung des Wassertransportes benötigten isothermen Transportkenngrößen, d.h. der Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der ungesättigten zur gesättigten Wasserleitfähigkeit k_s und dem Sättigungsgrad S_r, wird von Wendling (2004) übernommen. Diese Autorin hat an dem Versuchsmaterial, welches auch in dieser Arbeit verwendet wird, siehe Kapitel 4, den Wassertransport für die Entwässerung untersucht. In dieser Arbeit werden zwar hauptsächlich Bewässerungseinflüsse betrachtet, jedoch haben Fredlund & Rahardjo (1993) festgestellt, dass in der $k_s - S_r$ – Beziehung keine Hysterese infolge Be- und Entwässerung auftritt.

Für das Verhältnis der ungesättigten zur gesättigten Wasserleitfähigkeit gilt:

$$k_s = \frac{K_u}{K_f} \tag{3.4-4}$$

mit: K_u: Ungesättigte Wasserleitfähigkeit

K_f: Gesättigte Wasserleitfähigkeit, d.h. $K_{u,max}$ bei $S_{r0} = 1{,}0$

Die Approximation der ungesättigten Wasserleitfähigkeit K_u nach Wendling (2004) ist auf den Maximalwert $K_{u,max}$ der ungesättigten Wasserleitfähigkeit normiert und auf den volumetrischen Wassergehalt θ bezogen:

$$\frac{K_u}{K_{u,max}} = \left(\frac{K_u}{K_{u,max}}\right)_{min} \cdot \exp\left(8,7 \cdot \theta/\theta_0\right) \qquad \text{für } \theta/\theta_0 \le 0,9 \tag{3.4-5}$$

$$\frac{K_u}{K_{u,max}} = 1,2 \cdot 10^{-25} \cdot \exp\left(57,4 \cdot \theta/\theta_0\right) \qquad \text{für } \theta/\theta_0 > 0,9 \tag{3.4-6}$$

wobei

$$\left(\frac{K_u}{K_{u,max}}\right)_{min} = 1,5 \cdot 10^{-6} \cdot \exp\left(-5,5 \cdot \left(1 - \frac{\theta_0}{0,43}\right)\right) \cdot \exp\left(4,0 \cdot \left(1 - \frac{e_0}{0,78}\right)\right) \cdot \exp\left(1,1 \cdot \left(\frac{T}{T_R} - 1\right)\right) \tag{3.4-7}$$

mit: θ: Volumetrischer Wassergehalt

θ_0: Initialer volumetrischer Wassergehalt

T: Temperatur, wobei die Bezugstemperatur T_R = 20 °C

Für den Maximalwert der Wasserleitfähigkeit gilt:

$$K_{u,max} = 1,04 \cdot 10^{-7} \cdot \left(\theta_0 - 0,11\right) \cdot \exp\left(-0,5 \cdot \left(1 - \frac{e_0}{0,78}\right)\right) \cdot \exp\left(2,2 \cdot \left(\frac{T}{T_R} - 1\right)\right) \text{ für } \theta_0 \ge 0,12 \tag{3.4-8}$$

3.5 Das Konzept der effektiven Spannungen

3.5.1 Die allgemeine Spannungsgleichung

Spannungen können im Boden in verschiedene Richtungen und auch auf verschiedene Arten übertragen werden. Es wird hierzu zwischen der Gesamtspannung, der effektiven Spannung und den Neutralspannungen unterschieden. Die größte Bedeutung kommt hier der effektiven Spannung zu. Unter der effektiven Spannung σ´ ist die von Korn zu Korn übertragene Spannung zu verstehen. Die Gesamtspannung σ ist die Spannung, die infolge Gravitation und äußerer Auflast auf die Körner wirkt. Bei wassergesättigten Zuständen werden die Spannungen nicht nur über die Körner als effektive Spannung übertragen, sondern auch über die Wasserphase. Dieser Spannungsanteil, der gleich dem hydrostatischen Druck im Porenraum ist, wird Neutralspannung genannt. Terzaghi (1943) entwickelte hierfür folgenden Zusammenhang:

$$\sigma' = \sigma - u \tag{3.5-1}$$

mit: σ': effektive Spannung

σ: Gesamtpannung

u: Neutralspannung

Voraussetzung für die Gültigkeit dieser Gleichung ist die Inkompressibilität der Bodenkörner.

3.5.2 Die erweiterte Spannungsgleichung

Teilgesättigte Böden werden im Allgemeinen als 3-Phasengemisch angesehen, bestehend aus der Wasserphase, der Gasphase und den Körnern als Festphase.

Da im teilgesättigten Boden die Neutralspannung nicht mehr über den gesamten Porenraum übertragen wird, ist von Bishop (1959) ein Koeffizient definiert worden, der diese Zustandsänderung in der Rechnung beachtet. Die Gleichung von Bishop (1959) gilt als grundlegende Spannungsgleichung für teilgesättigte Zustände und lautet:

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \qquad (3.5\text{-}2)$$

mit: u_w: Porenwasserpotential (Matrixspannung)

u_a: Porenluftdruck

χ: Proportionalitätsfaktor, der dem Sättigungsgrad des Porenraumes entspricht

In der Gleichung werden alle 3 Phasen berücksichtigt. Um den ungesättigten Zustand des Bodens zu beschreiben, wird anstatt des Porenwasserdrucks (Neutralspannung) das Porenwasserpotential u_w eingeführt. Somit wird die in der Gleichung (3.5-1) eingeführte Neutralspannung $u = \chi \cdot u_w$. Es wird in der Regel davon ausgegangen, dass der luftgefüllte Porenraum zur Atmosphäre offen ist. Somit reduziert sich die Gleichung (3.5-2) auf:

$$\sigma' = \sigma - \chi u_w \qquad (3.5\text{-}3)$$

Im trockenen Zustand ist $\chi = 0$ und die effektive Spannung σ' entspricht der Gesamtspannung σ. Im vollkommen wassergesättigten Zustand ist $\chi = 1$ und die Gleichung (3.5-3) geht über in die Terzaghi - Gleichung (3.5-1) für gesättigte Porensysteme.

Kolymbas (1998) zeigt, dass dieses Prinzip der effektiven Spannungen angewendet werden kann, wenn man die Körner als inkompressibel ansieht.

3.6 Theoretische Grundlagen zum Spannungs-Dehnungsverhalten

Zur Beschreibung des konstitutiven Materialverhaltens von Böden kommen heutzutage in der theoretischen Bodenmechanik verschiedene Stoffgesetze zum Einsatz, vgl. Li (2002).

Derzeit wird in der Bodenmechanik für teilgesättigte, quellfähige Böden sehr häufig ein elasto-plastisches konstitutives Modell nach Gens & Alonso (1992) verwendet. Dieses Modell ist eine Erweiterung des Barcelona Basic Modells Alonso et. al. (1990) und wird als Barcelona Expansive Modell bezeichnet. Dieses Materialgesetz kommt in dieser Arbeit jedoch nicht zum Einsatz, da zur Bestimmung der hierfür benötigten Modellparameter grundsätzlich saugspannungskontrollierte Triaxialversuche erforderlich sind. Solche Tests wären für das gewählte Versuchsmaterial – einen Kaolinit - Ton wie in Kapitel 4 beschrieben – mit einer sehr kleinen Durchlässigkeit ungemein zeitintensiv und umfangreich.

Das Hauptaugenmerk der vorliegenden Arbeit liegt auf dem Quellverhalten von bindigen Böden. Aus diesem Grund wird ein gängiges linear elastisches - ideal plastisches Modell verwendet.

Im Allgemeinen wird davon ausgegangen, dass das verwendete Versuchsmaterial ein homogenes Material mit isotroper Verformbarkeit ist. Im Falle von Quellen sind noch zusätzlich zu den elastischen und plastischen Dehnungsanteilen aus mechanischer Belastung auch die Quellverformungen zu berücksichtigen. Dies erfolgt durch additive Überlagerung der elasto-plastischen Verformungen mit den Quellverformungen:

$$d\varepsilon = d\varepsilon^{el} + d\varepsilon^{pl} + d\varepsilon^{SW} \tag{3.6-1}$$

3.6.1 Isotrop linearelastisches Materialverhalten

Zur Beschreibung des isotropen, linear elastischen Materialverhaltens werden zwei Materialkenngrößen, der Elastizitätsmodul E und die Poissonzahl ν, benötigt. Die Beziehung zwischen dem Spannungsvektor {σ} und dem Dehnungsvektor {ε} ist mittels der elastischen Stoffmatrix [D^{el}] wie folgt gegeben:

$$\{\sigma\} = \left[D^{el} \right] \cdot \left\{ \varepsilon^{el} \right\} \tag{3.6-2a}$$

bzw.

$$\left\{ \varepsilon^{el} \right\} = \left[D^{el} \right]^{-1} \cdot \{\sigma\} \tag{3.6-2b}$$

Der Spannungsvektor $\{\sigma\}$ und der Dehnungsvektor $\{\varepsilon\}$ werden in der Bodenmechanik hauptsächlich mit dem symmetrischen Cauchy´schen Spannungstensor [T] und dem symmetrischen Green-Lagrange´schen Deformationstensor [E] beschrieben. Für ein isotropes Material lässt sich jeder symmetrische Tensor in das Hauptachsensystem (HAS) transformieren.

Der Cauchy´che Spannungstensor [T] ist wie folgt definiert:

$$[T] = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{Bmatrix} \quad ; \ \sigma_{ij} = \sigma_{ji} \tag{3.6-3}$$

Der Green-Lagrange´sche Deformationstensor [E] ist analog dazu wie folgt festgelegt:

$$[E] = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{Bmatrix} \quad ; \ \varepsilon_{ij} = \varepsilon_{ji} \tag{3.6-4}$$

Die Elastizitätsmatrix $[D^{el}]$ wird wie folgt beschrieben:

$$\left[D^{el}\right] = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & 1-\nu & \nu & 0 & 0 & 0 \\ \nu & \nu & 1-\nu & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2} \end{bmatrix} \tag{3.6-5}$$

bzw.

$$\left[D^{el}\right]^{-1} = \begin{bmatrix} \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & -\frac{\nu}{E} & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{\nu}{E} & -\frac{\nu}{E} & \frac{1}{E} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{G} \end{bmatrix} \tag{3.6-6}$$

Der Schubmodul G und der Kompressionsmodul K können mit den beiden Materialkenngrößen E und ν nach den beiden Gleichungen (3.6-7) und (3.6-8) berechnet werden:

$$G = \frac{E}{2 \cdot (1 + \nu)} \tag{3.6-7}$$

$$K = \frac{E}{1 - 2\nu} \tag{3.6-8}$$

3.6.2 Invariantenbeschreibung

Zur objektiven Beschreibung des Materialverhaltens wird die Invariantenschreibweise verwendet. Damit ist man unabhängig von dem gewählten Koordinatensystem. Die Abb. 3.6-1 stellt eine Fließfläche im Hauptachsensystem sowie eine Fließkurve in der Deviatorebene dar.

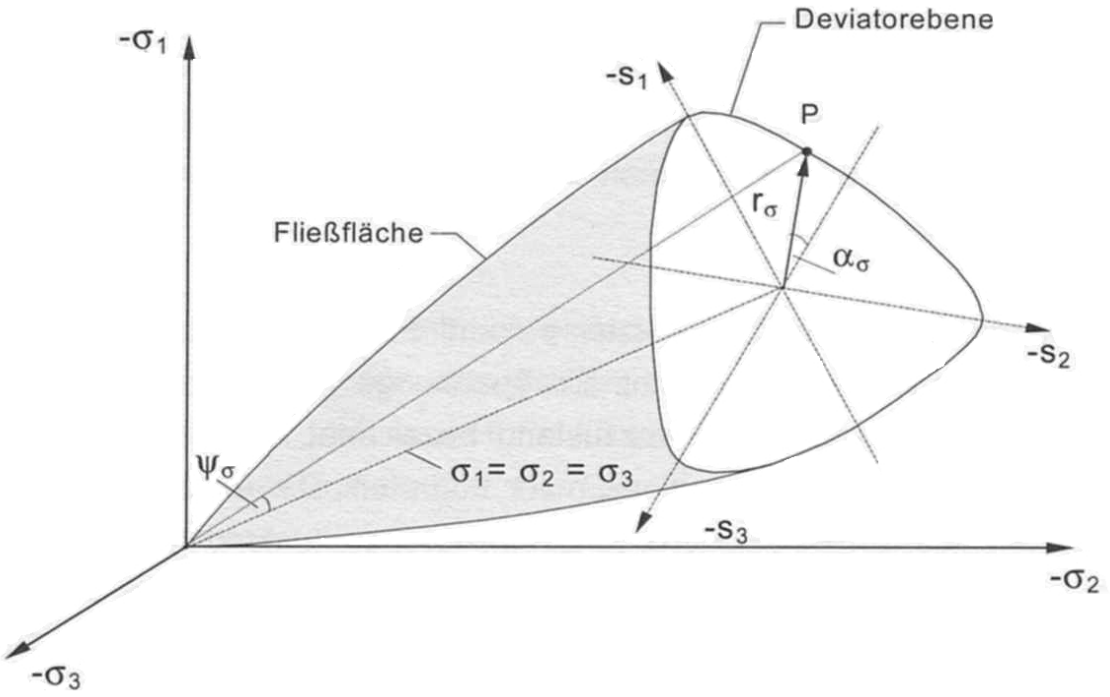


Abb. 3.6-1 Hauptachsensystem mit Fließfläche und Deviatorebene (Meißner 1983).

Die erste Invariante ist definiert als Spur des Tensors [T] bzw. [E], d.h. als die Summe der Diagonalterme:

$$I_\sigma = \mathrm{tr}[T] = \sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33} \tag{3.6-9}$$

$$I_\varepsilon = \mathrm{tr}[E] = \varepsilon_{11} + \varepsilon_{22} + \varepsilon_{33} \tag{3.6-10}$$

Die Ebenen im Hauptachsensystem, deren Flächennormalen parallel zur hydrostatischen Achse sind, werden als Deviatorebenen bezeichnet. Ihr Abstand zum Koordinatenursprung beträgt:

$$r = I_\sigma / \sqrt{3} \quad \text{bzw.} \quad r = I_\varepsilon / \sqrt{3} \tag{3.6-11}$$

Anhand des Kugeltensors lassen sich die Spannungszustände auf der hydrostatischen Achse ($\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$) darstellen. Der Kugeltensor für die Spannungen lautet:

$$\sigma_{ij} = I_\sigma / 3 \cdot \delta_{ij} \quad , \text{ wobei } \delta_{ij}: \text{Kronecker-Delta}: \quad i = j \rightarrow \delta_{ij} = 1 \quad i \neq j \rightarrow \delta_{ij} = 0 \tag{3.6-12}$$

Mit Hilfe des Kugeltensors kann der Green-Lagrange´sche Spannungstensor in einen volumetrischen und einen deviatorischen Anteil aufgeteilt werden. Die Komponenten des deviatorischen Spannungstensors können dann wie folgt bestimmt werden:

$$s_{ij} = \sigma_{ij} - I_\sigma / 3 \cdot \delta_{ij} \tag{3.6-13}$$

In Analogie hierzu gilt für die deviatorischen Anteile des Dehnungstensors:

$$e_{ij} = \varepsilon_{ij} - I_\varepsilon / 3 \cdot \delta_{ij} \tag{3.6-14}$$

Die Lage von Punkten in einer Deviatorebene des Hauptachsensystems relativ zum Durchstoßpunkt der hydrostatischen Achse kann durch die zweite und dritte Invariante beschrieben werden. Diese Invarianten sind für den Spannungstensor im Hauptachsensystem wie folgt festgelegt:

$$II_s = s_{11}^2 + s_{22}^2 + s_{33}^2 \tag{3.6-15}$$

$$III_s = s_{11}^3 + s_{22}^3 + s_{33}^3 \tag{3.6-16}$$

Analog dazu lauten die zweite und dritte Invariante im HAS für den Verformungstensor:

$$II_e = e_{11}^2 + e_{22}^2 + e_{33}^2 \tag{3.6-17}$$

$$III_e = e_{11}^3 + e_{22}^3 + e_{33}^3 \tag{3.6-18}$$

Mit Hilfe der nachfolgenden Beziehungen wird jeder Spannungspunkt P in der Deviatorebene des Spannungsraums beschrieben, siehe Abb. 3.6-1:

$$r_\sigma = II_s^{1/2} \tag{3.6-19}$$

$$\alpha_\sigma = \frac{1}{3} \cdot \arccos\left(\sqrt{6} \cdot \frac{III_s}{II_s^{3/2}} \right) \tag{3.6-20}$$

$$\psi_\sigma = \arctan\left(\frac{I_\sigma}{\sqrt{3} \cdot II_s^{1/2}} \right) \tag{3.6-21}$$

r_σ ist der orthogonale Abstand eines Punkte P von der Raumdiagonalen auf der Deviatorebene. Der Winkel α_σ in der Deviatorebene wird Lode-Winkel genannt. Eine Gerade vom Koordinatenursprung zum Spannungspunkt schließt mit der hydrostatischen Achse den Winkel ψ_σ ein.

3.6.3 Linear elastisches – ideal plastisches Spannungsdehnungsverhalten

Das in Abschnitt 3.6.1 angegebene isotrop linearelastische Materialverhalten setzt voraus, dass sich die Eigenschaften des verwendeten Materials unabhängig von der Größe der Belastung und der Belastungsgeschichte nicht ändern. Diese Beanspruchung eines Materials ist in der Wirklichkeit nicht gegeben. Es treten von Beginn an auch plastische Verformungen ein.

Das plastische Verhalten normalkonsolidierter bindiger Böden und rolliger Böden mit lockerer Lagerung zeigt die Kurve a) in Abb. 3.6-2. Die Arbeitslinie weist keinen deutlichen Peakpunkt auf. Die Dehnungen können theoretisch unendlich groß werden. Bei überkonsolidierten bindigen Böden sowie bei dicht gelagerten rolligen Böden nimmt die Spannung nach Erreichen eines Peakzustandes wieder ab, siehe Kurve c) in Abb. 3.6-2. Dieser Bereich bis zur Residualscherfestigkeit wird als Entfestigungsbereich bezeichnet. Die Kurve b) in der Abbildung stellt den idealisierten Verlauf eines linear elastischen - ideal plastischen Materials dar. Dieses idealisierte Materialverhalten wird in dieser Arbeit verwendet.

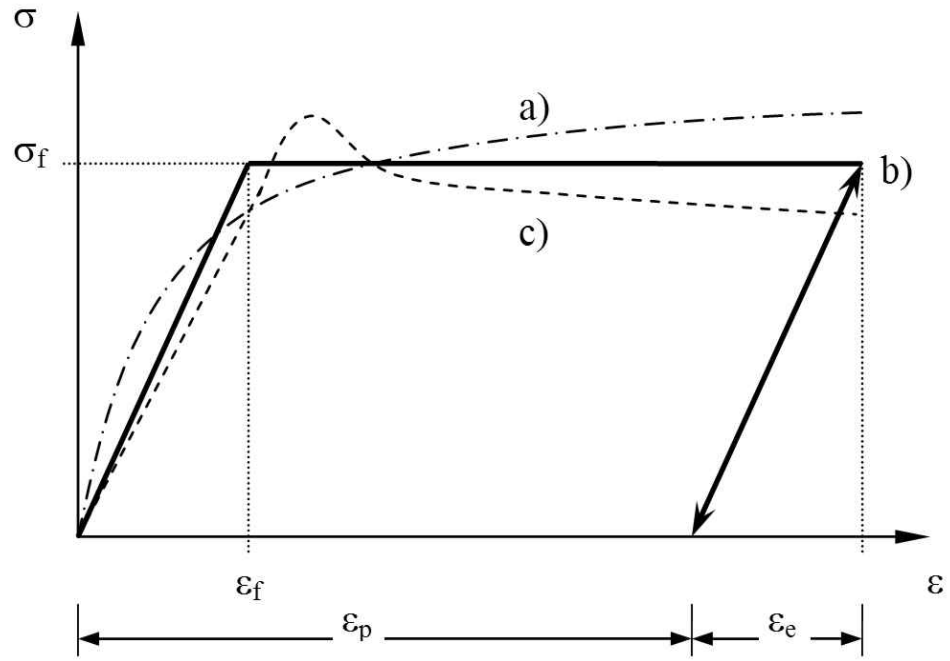


Abb. 3.6-2 Linear elastisches - ideal plastisches Materialverhalten.

Das linear elastische Materialverhalten gilt bis zu einer Grenzspannung σ_f. Der Übergang vom elastischen zum plastischen Zustand wird durch eine Grenzbedingung festgelegt:

$$F(\sigma) = |\sigma| - |\sigma_f| = 0 \tag{3.6-22}$$

Das plastische Fließen findet nach Erreichen der Grenzspannung σ_f für die plastischen Verformungen ε_p, also für $\varepsilon > \varepsilon_f$, statt. Das bedeutet, dass die Fließ- und die Grenzbedingung zusammenfallen.

3.6.3.1 Grenzbedingung

In dem zum Einsatz kommenden Finite Elemente Programm ABAQUS (Hibbit, Karlson & Sorensen Inc. 2002) sind bereits verschiedene, für bodenmechanische Zwecke geeignete, Stoffmodelle implementiert:

- „critical state model“ Cam-Clay
- modifiziertes Mohr - Coulomb
- modifiziertes Drucker - Prager

Auf Grund dessen, dass für die Beschreibung des Quellverhaltens eine Benutzer - Subroutine (User subroutine: UMAT) programmiert werden muss, ist es nicht möglich, ein bereits in ABAQUS implementiertes Stoffgesetz zu verwenden. Es ist erforderlich dieses Materialverhalten auch in die UMAT einzubeziehen.

Da das Hauptaugenmerk der Arbeit auf der Beschreibung des Quellverhaltens liegt, trotzdem aber der Vollständigkeit halber ein elasto - plastisches Stoffmodell implementiert werden soll, wird ein klassisches Stoffmodell nach Drucker - Prager verwendet.

Es ist bekannt, dass das Drucker - Prager - Modell nur bedingt geeignet ist zur Beschreibung des Materialverhaltens des verwendeten Versuchsmaterial. Im Extensionsbereich wird zum Beispiel die Festigkeit des Bodens überschätzt, vgl. Chen & Mizuno (1990). Es ist jedoch rechentechnisch relativ simpel zu handhaben und genügt für die hier betrachteten Spannungszustände.

Die Grenzbedingung stellt für $\varphi \neq 0$ im Hauptspannungsraum einen Kegel dar, siehe Abb. 3.6-3.

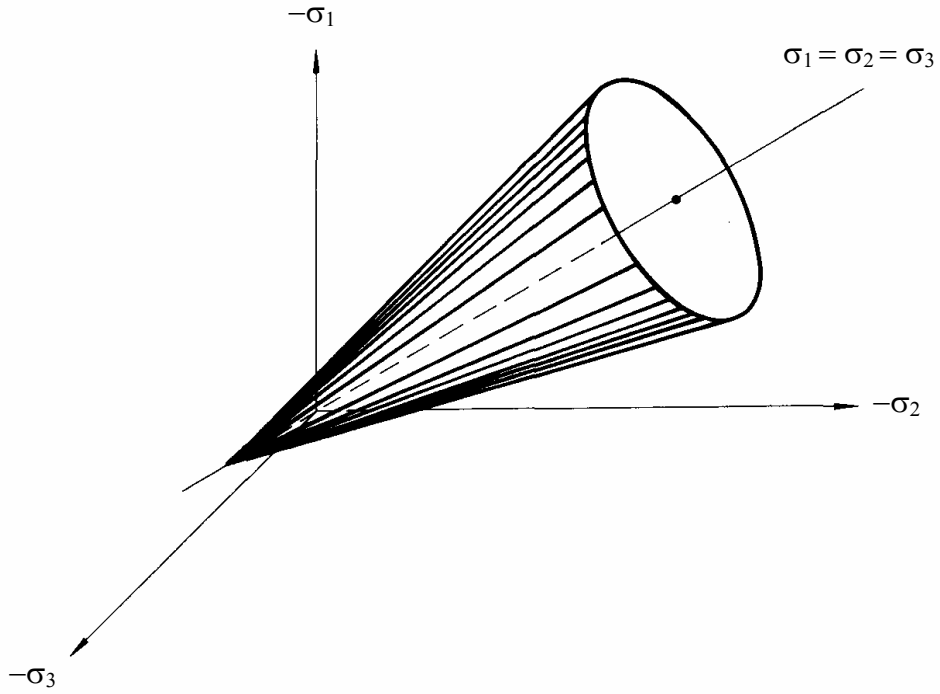


Abb. 3.6-3 Drucker - Prager - Fließbedingung im Hauptachsensystem (Chen & Mizuno 1990).

Die Grenzbedingung nach Drucker - Prager kann mit Hilfe der Spannungsinvarianten wie folgt beschrieben werden:

$$F = \frac{2 \cdot \sin\varphi}{3 - \sin\varphi} I_\sigma + \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot II_s^{1/2} - \frac{6 \cdot c \cdot \cos\varphi}{3 - \sin\varphi} = 0 \qquad (3.6\text{-}23)$$

Hierin sind: φ: Reibungswinkel

c: Kohäsion

Der Reibungswinkel φ und die Kohäsion c des Bodens werden in Triaxial- bzw. Scherversuchen bestimmt. Es werden in dieser Arbeit nur normal konsolidierte Zustände betrachtet (OCR = 1). Des Weiteren wird in den Versuchen abgewartet bis Konsolidierungsvorgänge abgeschlossen und Porenwasserüberdrücke abgebaut sind bevor diese gestartet werden.

Im Spezialfall $\varphi = 0$ ergibt die Drucker - Prager - Grenzfunktion die bekannte Mises´sche Grenzfunktion. Die Mises´sche Grenzfunktion bildet im Hauptspannungsraum einen Zylinder, dessen Achse die Raumhalbierende ist und durch

$$F = \sqrt{\frac{3}{2}} \cdot II_s^{1/2} - 2 \cdot c = 0 \tag{3.6-24}$$

beschrieben wird.

Mit der Grenzbedingung ist festgelegt, ab wann das Fließen beginnt.

3.6.3.2 Fließregel

Der elastische Anteil der Dehnung ε^{el} ist über das Hooksche Gesetz nach Gleichung (3.6-2a) bzw. (3.6-2b) mit den Spannung verknüpft.

Die Fließregel, auch Fließgesetz genannt, beschreibt den Zusammenhang zwischen den plastischen Verzerrungselementen und der Fließfläche. Nach der so genannten Normalitätsbedingung verhält sich der Vektor der plastischen Dehnungsinkremente $d\varepsilon_{ij}^{p}$ stets normal zur Fließfläche. Somit erhält man folgende Fließregel

$$d\varepsilon_{ij}^{p} = d\lambda \cdot \frac{\partial Q}{\partial \sigma_{ij}} \qquad \begin{array}{l} \varepsilon < \varepsilon_f : \ \lambda = 0 \\ \varepsilon \geq \varepsilon_f : \ \lambda > 1 \end{array} \tag{3.6-25}$$

wobei Q das plastische Potential und $d\lambda$ ein Proportionalitätsfaktor, welcher für plastisches Verhalten $\lambda > 1$ und für rein elastisches Verhalten $\lambda = 0$ ist, sind. Wird Q = F gesetzt, handelt es sich um eine assoziierte Fließregel, die für bindige Böden näherungsweise zutreffend ist. Bei der assoziierten Fließregel gilt somit:

$$d\varepsilon_{ij}^{p} = d\lambda \cdot \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}} \qquad \begin{array}{l} \varepsilon < \varepsilon_f : \ \lambda = 0 \\ \varepsilon \geq \varepsilon_f : \ \lambda > 1 \end{array} \tag{3.6-26}$$

Da der Betrag der plastischen Verzerrungsinkremente proportional zur Projektion von $d\sigma$ in Richtung der Normalen auf der Fließfläche ist, besteht für $d\lambda$ folgende mathematische Beziehung:

$$d\lambda = \frac{\partial F}{\partial \sigma} d\sigma \tag{3.6-27}$$

Eine der Annahmen der Plastizitätstheorie ist, dass sich die totalen Dehnungsinkremente additiv aus elastischen und plastischen Anteilen zusammensetzen. Lässt man die quellbedingten Dehnungsinkremente erst einmal außen vor, erhält man aus Gleichung (3.6-1) und (3.6-2a)

$$d\sigma = D^{el} \cdot \left(d\varepsilon - d\varepsilon^{p} \right) \qquad \varepsilon \geq \varepsilon_f \tag{3.6-28}$$

Durch einsetzen von Gleichung (3.6-25) in (3.6-28) ergibt sich

$$d\sigma = D^{el} \cdot d\varepsilon - D^{el} \cdot d\lambda \cdot \frac{\partial F}{\partial \sigma} \qquad \varepsilon \geq \varepsilon_f \tag{3.6-29}$$

Setzt man dσ aus Gleichung (3.6-29) in Gleichung (3.6-27) ein und löst nach dλ auf, erhält man

$$d\lambda = \frac{\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^{T} \cdot D^{el} \cdot d\varepsilon}{\left(\frac{\partial F}{\partial \sigma} \right)^{T} \cdot D^{el} \cdot \frac{\partial F}{\partial \sigma}} \tag{3.6-30}$$

Um zu gewährleisten, dass zu einem Zeitpunkt t + Δt die Grenzbedingung ebenso erfüllt ist wird das Verfahren der implizite Integration verwendet. Wird zum Zeitpunkt t + Δt eine Spannung berechnet die außerhalb der Grenzbedingung nach Drucker - Prager liegt so wird diese mittels einer plastischen Korrektur zurück gebracht auf die Fließfläche. Dies geschieht mit Hilfe der so genannten Newton - Iteration.

Abschließend ist hier zu sagen, dass das Drucker - Prager - Modell ein einfaches linear elastisches, ideal plastisches Stoffgesetz ist, mit dem des Materialverhalten von Böden nur bedingt beschrieben werden kann. Die wesentlichen Unzulänglichkeiten des Modells bei der Anwendung auf Böden sind:

- Keine Unterscheidung zwischen Erst- und Ent- bzw. Wiederbelastung
- Keine spannungsabhängige Steifigkeit
- Keine plastischen Verformungen für Spannungspfade die nicht die Grenzbedingung treffen (z. B. isotrope Belastung)

3.6.4 Vorhandene Modelle für das Quellen

Im Folgenden werden zwei verschiedene Stoffgesetze für das Quellen vorgestellt. Das dreidimensionale Quellgesetz nach Kiehl (1990) baut auf dem eindimensionalen Gesetz nach Grob (1972) auf und ermöglicht die Berechnung von Quellverformungen und Quelldrücken im Raum sowie deren zeitliche Entwicklung. Von Gattermann (1998) wurde zusätzlich ein normierter dimensionsloser Wassergehalt als Parameter eingeführt und es wurde nachgewiesen, dass die Quelldrücke und -dehnungen mit zunehmender Sättigung ansteigen. Wittke (2003) hat diesen Ansatz aufgegriffen und für teilgesättigte Zustände von anhydrithaltigem Gestein weiterentwickelt. Diese Stoffgesetze wurden hauptsächlich für isotrop quellendes Gestein entwickelt. Ihre Gültigkeit für quellfähige, bindige Böden muss überprüft und die Stoffgesetze gegebenenfalls modifiziert werden. Eine detaillierte Untersuchung hierzu wird in Kapitel 5 aufgeführt.

In dieser Arbeit wird das Vorzeichen für die Quelldehnung, d.h. Volumenzunahme infolge Quellen, als positiv definiert.

3.6.4.1 Eindimensionale Formulierung des Quellenverhaltens

Grob (1972) formulierte für die Beziehung zwischen quellbedingten Spannungen und Dehnungen ein eindimensionales Quellgesetz. Grundlage für diese Formulierung waren Ergebnisse von Quellversuchen an Gestein nach Huder & Amberg (1970). Dabei handelte es sich um einaxiale, kraftgesteuerte Mehrstufenversuche an zylindrischen Prüfkörpern aus Gestein die in einem Oedometergerät durchgeführt werden. Zu Beginn wird der Probenkörper mit einer vertikalen Spannung $\sigma_z = \sigma_a$ belastet, Kurve 1 in Abb. 3.6-4. Darauf folgt eine Entlastung auf eine Mindestspannung $\sigma_z = \sigma_c$ und eine erneute Wiederbelastung auf $\sigma_z = \sigma_a$, siehe Kurven 2 und 3 in Abb. 3.6-4. Dann wird der Quellvorgang infolge Bewässerung eingeleitet. Nach einer gewissen Zeit stellt sich unter σ_z eine axiale Quelldehnung ε_z^q ein, Kurve 4 in Abb. 3.6-4. Nachdem keine Dehnungsänderungen mehr auftreten, wird die Probe schrittweise entlastet, wobei bei jeder Laststufe gewartet wird, bis sich die zugehörige Quelldehnung $\varepsilon_{z,k}^q$ einstellt. Diese Entlastung erfolgt in mindestens 5 Schritten bis zur Mindestspannung $\sigma_z = \sigma_c$ und führt zur Kurve 5 in Abb. 3.6-4.

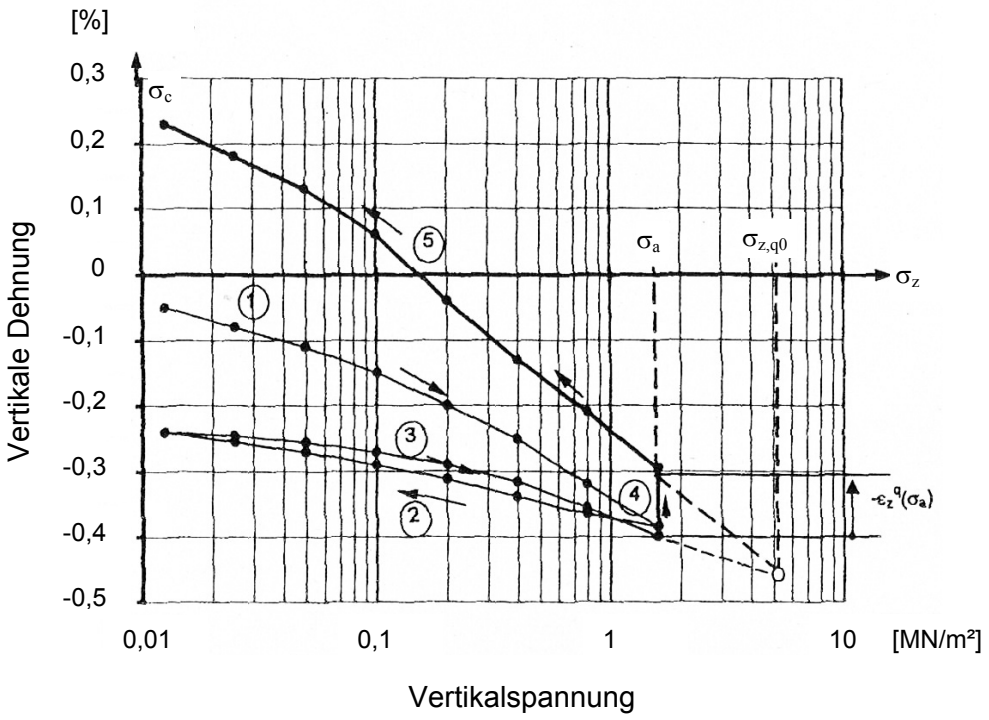


Abb. 3.6-4 Quelldruckdehnungsversuch nach Huder/Amberg, aus (Gattermann 1998).

Die elastischen Dehnungsanteile kann man aus dem Entlastungs-/Wiederbelastungspfad ablesen. Die Quelldehnungen ergeben sich dann aus der Differenz der Gesamtdehnungen und den elastischen Dehnungen.

Verlängert man die Kurven 3 und 5, ergibt der Schnittpunkt eine Abschätzung der Spannung $\sigma_{z,q0}$ oberhalb der kein Quellen mehr eintritt bzw. für die die Quelldehnungen vor dem Versuch bereits abgeklungen sind. Wenn man die quellbedingten Dehnungen zur Zeit $t = \infty$ über die Spannung halblogarithmisch aufträgt, so können die Ergebnisse idealisiert nach Grob (1972) durch eine Gerade nach folgender Gleichung beschrieben werden:

$$\varepsilon_z^q = K_{z,q} \cdot \log\left(\frac{\sigma_z}{\sigma_{z,q0}}\right) \quad ; \quad \sigma_{z,q0} \geq \sigma_z \geq \sigma_c \tag{3.6-31}$$

Dabei ist σ_c eine Mindestspannung, die den Gültigkeitsbereich des Quellgesetzes nach unten hin beschränkt. Der Quellparameter $K_{z,q}$ beschreibt die Steigung der Geraden in Abbildung 3.6-5.

Berücksichtigt man weiterhin, dass die Quelldehnung für $\sigma_z > \sigma_{z,q0}$ gleich Null sind, erhält man des weiteren folgende Gleichungen:

$$\varepsilon_z^q = 0 \quad ; \quad \sigma_z > \sigma_{z,q0} \tag{3.6-32}$$

$$\varepsilon_z^q = K_{z,q} \cdot \log\left(\frac{\sigma_c}{\sigma_{z,q0}}\right) \quad ; \quad \sigma_z < \sigma_c \tag{3.6-33}$$

In Abb. 3.6-5 ist das eindimensionale Quellgesetz von Grob (1972), nach den Gleichungen (3.6-31) bis (3.6-33), dargestellt.

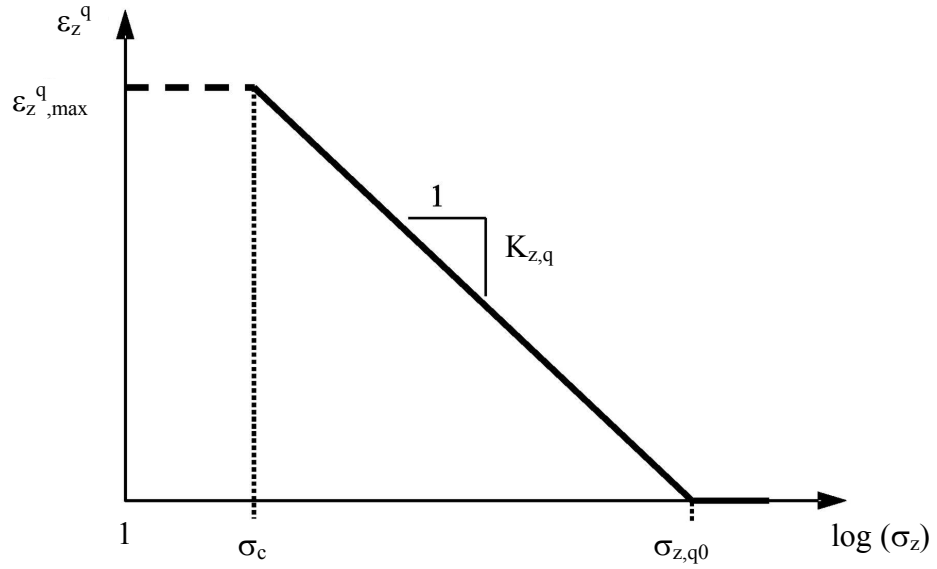


Abb. 3.6-5 Eindimensionales Quelldehnungsmodell nach Grob (1972).

In der Formulierung nach Grob (1972) ist davon ausgegangen, dass der Quellprozess vollständig ($S_r = 1$) zum Zeitpunkt $t = \infty$ abgeschlossen ist.

3.6.4.2 Dreidimensionale Formulierung des Quellenverhaltens

Das von Kiehl (1990) formulierte dreidimensionale Quellgesetz baut auf der eindimensionalen Betrachtung von Grob (1972) auf. Es ermöglicht die Quelldehnungen und die Quelldrücke im Raum sowie deren zeitliche Entwicklung zu beschreiben. Dieses dreidimensionale Quellgesetz basiert auf multiaxialen Quellversuchen in einem wahren Triaxialgerät, die von Pregl et al. (1980) ende der siebziger Jahre an Tongesteinen durchgeführt wurden. Diese Versuchseinrichtung erlaubt, den Quelldruck und die quellbedingten Dehnungen unabhängig in alle drei, senkrecht zueinander stehenden, räumlichen Richtungen (x,y,z) zu messen. Die Versuchsauswertung ergab, dass die Quelldehnung ε_z^q zum Zeitpunkt $t = \infty$ quasi unabhängig von den Randbedingungen in x- und y- Richtung ist. Kiehl (1990) kam zu dem Ergebnis, dass die in verschiedene Richtungen auftretenden Quelldehnungen annähernd nur von der Normalspannung in der jeweiligen Richtung beeinflusst werden.

Kiehl (1990) hat folgende Annahmen getroffen:

1. Die Orientierung der Hauptquelldehnungen ε_i^q (i = 1, 2, 3) ist identisch mit der der Hauptnormalspannungen σ_i.
2. Die Hauptquelldehnungen ε_i^q sind nur von den zugehörigen Hauptnormalspannungen σ_i abhängig.
3. Die Relation zwischen den Hauptquelldehnungen ε_i^q und den Hauptnormalspannungen σ_i kann ebenso durch eine logarithmische Beziehung entsprechend der Beziehung von Grob (1972) formuliert werden.

Diese Annahmen sind jedoch für einen bindigen Boden noch zu überprüfen, vgl. Kapitel 5.2.2 und Kapitel 5.2.3.

Analog zu dem Spannungszustand $\sigma_{z,q0}$ im Quellgesetz nach Grob (1972) wird von Kiehl (1990) ein Ausgangspannungszustand mit dem Spannungsvektor $\{\sigma_{q0}\}$ definiert, der in einem beliebigen kartesischen Koordinatensystem {x,y,z} durch die sechs Tensorkomponenten zum Ausdruck gebracht werden kann:

$$\left\{\sigma_{q0}\right\} = \left\{\sigma_{x0}, \sigma_{y0}, \sigma_{z0}, \tau_{xy0}, \tau_{yz0}, \tau_{zx0}\right\}^T \tag{3.6-34}$$

Der Spannungszustand, der durch Quellen infolge Zutritt von Wasser und/oder Entlastung entsteht, lässt sich durch folgenden Spannungstensor $\{\sigma\}$ beschreiben:

$$\left\{\sigma\right\} = \left\{\sigma_x, \sigma_y, \sigma_z, \tau_{xy}, \tau_{yz}, \tau_{zx}\right\}^T \tag{3.6-35}$$

Die Startbedingung für eine solche Entlastung wird durch folgende Ungleichung beschrieben:

$$\sigma_i \Big/ \sigma_{q0i} < 1 \qquad \text{mit} \quad i = 1,2,3 \tag{3.6-36}$$

Dabei reicht es aus, wenn nur eine Bedingung $i = 1$, $i = 2$ oder $i = 3$ erfüllt ist, vergleiche Annahmen von Kiehl (1990). Die Hauptnormalspannungen σ_1, σ_2 und σ_3 lassen sich durch die Richtungskosinus l_i, m_i, n_i der Winkel zwischen der Richtung von den Hauptnormalspannungen und der Koordinatenachsen x, y und z, siehe Tabelle 3.6-1, errechnen:

$$\sigma_i = l_i^2 \cdot \sigma_x + m_i^2 \cdot \sigma_y + n_i^2 \cdot \sigma_z + 2 \cdot l_i\, n_i \cdot \tau_{xy} + 2 \cdot m_i\, n_i \cdot \tau_{yz} + 2 \cdot n_i\, l_i \cdot \tau_{zx} \tag{3.6-37}$$

Tabelle 3.6-1: Richtungskosinus l_i, m_i, n_i der Winkel zwischen der Richtung der Hauptnormalspannungen und den Koordinatenachsen x, y, z

cos (i, k)		**k**		
		x	y	z
i	Richtung von σ_1	l_1	m_1	n_1
	Richtung von σ_2	l_2	m_2	n_2
	Richtung von σ_3	l_3	m_3	n_3

Die Normalspannungskomponenten σ_{q0i} werden analog zu Gleichung (3.6-37) formuliert. Kiehl (1990) formuliert das dreidimensionale Quellgesetz mit Bezug auf die Zeitabhängigkeit des Quellens als zeitliche Ableitung der Hauptquelldehnungen im Hauptachsensystem, wie folgt:

$$\dot{\varepsilon}_i^q(t) = \frac{1}{\eta_q} \cdot \left[K_q \cdot L_i(t) - \varepsilon_i^q(t) \right] \tag{3.6-38}$$

wobei:

$$\dot{\varepsilon}_i^q(t) = \frac{d\varepsilon_q(t)}{dt} = \frac{\partial \varepsilon_q(t)}{\partial t} \tag{3.6-39}$$

Darin ist η_q der Quellzeitparameter, K_q der Quellverformungsparameter und $\varepsilon_i^q(t)$ sind die bis zum Zeitpunkt in Richtung des globalen Koordinatensystems eingetretenen Quelldehnungen. Für $L_i(t)$ gilt unter Berücksichtigung des Spannungszustandes:

$$L_i(t) = \begin{cases} 0 & ; \ \sigma_{q0i} < \sigma_i \\ \log\left(\sigma_i / \sigma_{q0i} \right) & ; \ \sigma_{q0i} \geq \sigma_i \geq \sigma_c \\ \log\left(\sigma_c / \sigma_{q0i} \right) & ; \ \sigma_i < \sigma_c \end{cases} \tag{3.6-40}$$

Dabei ist σ_c analog zu dem eindimensionalen Quellgesetz von Grob (1972) eine Mindestspannung, bei deren Unterschreitung die quellbedingten Dehnungen unabhängig von den Spannungen sind. Ein Quellen kann wiederum nur stattfinden, wenn $\sigma_i < \sigma_{q0i}$ erfüllt ist.

Wenn man den Gleichgewichtszustand zum Zeitpunkt ($t \rightarrow \infty$) betrachtet, gilt:

$$\dot{\varepsilon}_i^q\left(t \to \infty\right) = 0 \tag{3.6-41}$$

und erhält durch Einsetzen dieser Gleichung und der Definition für $L_i(t)$ in Gleichung (3.6-38) für den Zeitpunkt $(t \to \infty)$ die Beziehungen:

$$\varepsilon_i^q\left(t \to \infty\right) = \begin{cases} 0 & ;\ \sigma_{q0i} < \sigma_i \\ K_q \cdot \log\left(\sigma_i / \sigma_{q0i}\right) & ;\ \sigma_{q0i} \geq \sigma_i \geq \sigma_c \\ K_q \cdot \log\left(\sigma_c / \sigma_{q0i}\right) & ;\ \sigma_i < \sigma_c \end{cases} \tag{3.6-42}$$

Aus diesen Beziehungen für den Gleichgewichtszustand $(t \to \infty)$ ist die Analogie zur eindimensionalen Form der Quelldruckdehnungsbeziehung zu erkennen.

Bezieht man die dreidimensionale Formulierung von Kiehl (1990) wieder auf den eindimensionalen Fall, erhält man die Kurven, die in Abb. 3.6-6 dargestellt sind. Diese Beziehung wird oftmals in der Praxis verwendet, wie z.B. bei von Wolffersdorff et al. (2004).

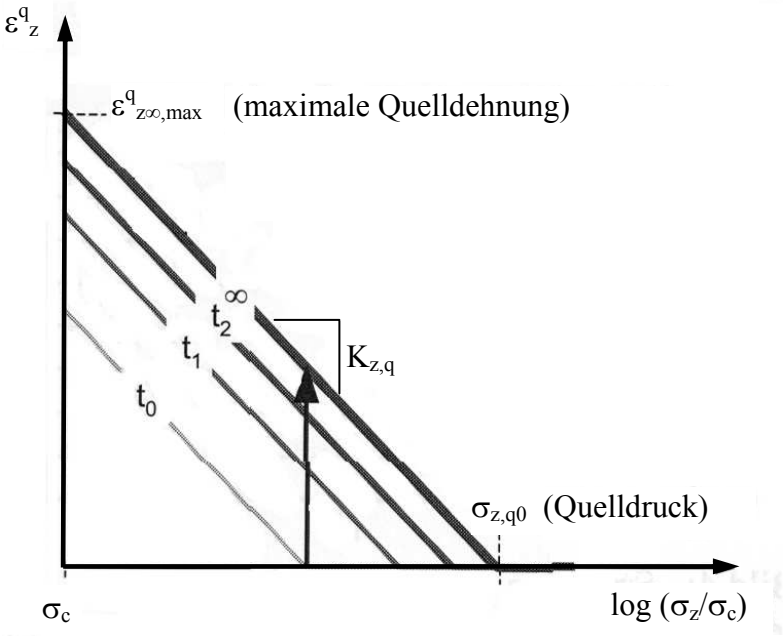


Abb. 3.6-6 Eindimensionales Quelldehnungsmodell mit zeitabhängiger Erweiterung (von Wolffersdorff et al. 2004).

Die volumetrischen Quelldehnungen zum Zeitpunkt $(t \to \infty)$ lassen sich im Spannungsbereich $\sigma_{q0i} \geq \sigma_i \geq \sigma_c$ wie folgt beschreiben und durch die dritte Spannungsinvariante III_σ vereinfachen:

$$\varepsilon_v^q\left(t\to\infty\right)=K_q\cdot\left[\log\left(\frac{\sigma_1}{\sigma_{q01}}\right)+\log\left(\frac{\sigma_2}{\sigma_{q02}}\right)+\log\left(\frac{\sigma_3}{\sigma_{q03}}\right)\right] \tag{3.6-43a}$$

$$\Rightarrow\varepsilon_v^q\left(t\to\infty\right)=K_q\cdot\log\left(\frac{III_\sigma}{\sigma_{q01}\cdot\sigma_{q02}\cdot\sigma_{q03}}\right) \tag{3.6-43b}$$

Die dritte Invariante des Spannungstensors ist als $III_\sigma=\sigma_1\cdot\sigma_2\cdot\sigma_3$ definiert. Für den isotropen Fall ($\sigma_q=\sigma_1=\sigma_2=\sigma_3$ und $\sigma_{q0}=\sigma_{q01}=\sigma_{q02}=\sigma_{q03}$) lassen sich die volumetrischen Quelldehnungen in folgender Form beschreiben:

$$\varepsilon_v^q\left(t\to\infty\right)=3\cdot K_q\cdot\log\left(\frac{\sigma_q}{\sigma_{q0}}\right) \tag{3.6-44}$$

Von Gattermann (1998) und Wittke (2003) wird die Zeitabhängigkeit in dem erläuterten Quellgesetz mit Hilfe eines normierten dimensionslosen Wassergehaltes ω als Parameter berücksichtigt, so dass die zeitliche Entwicklung des Quellens durch die instationäre Berechnung der Wasserausbreitung bestimmt wird.

Gattermann (1998) definiert den dimensionslosen Wassergehalt ω als Bezugsgröße für den Quelldruck und den Quellverformungsparameter wie folgt:

$$\omega=\begin{cases}0 & \text{für}\quad w<w_{q0}\\ \dfrac{w-w_{q0}}{w_{sat}-w_{q0}} & \text{für}\quad w\geq w_{q0}\end{cases} \tag{3.6-45}$$

mit: w: Wassergehalt der Probe

w_{q0}: Wassergehalt der Probe bei $\sigma_q=0$

w_{sat}: Wassergehalt der Probe bei voller Sättigung

Der dimensionslose Wassergehalt ω hat einen Wertebereich von 0 (trocken) bis 1 (gesättigt). Wenn ω den Wert ω = 0 annimmt, stellt sich also kein Quelldruck ein. Bei ω = 1 ist die Probe vollständig gesättigt und es stellt sich der maximale Quelldruck ein.

Mit Hilfe der Gleichung (3.6-45) bestimmt Gattermann (1998) anhand von Quelldruckversuchen eine lineare Abhängigkeit des Quelldrucks vom Wassergehalt:

$$\sigma_q(w)=\omega\cdot\sigma_q(w_{sat})\quad\text{für}\quad 0\leq\omega\leq 1 \tag{3.6-46}$$

Das Quellgesetz mit dem normierten dimensionslosen Wassergehalt ω als Parameter nimmt somit analog zur dreidimensionalen Formulierung von Kiehl (1990) folgende Form an:

$$\varepsilon_i^q(\omega) = K_q(\omega) \cdot \log\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_{q0i}(\omega)}\right) \tag{3.6-47}$$

Der Quellparameter K_q und die σ_{q0i} –Werte sind in Abhängigkeit des dimensionslosen Wassergehaltes ω gesetzt. Für eine Hauptspannungsrichtung stellt sich die Abhängigkeit von ω im linearen Maßstab wie in Abb. 3.6-7 links dar. Danach sind die Verläufe sehr ähnlich und die Kurven verschieben sich auf der Spannungsachse, gemäß Gleichung (3.6-46). In halblogarithmischer Darstellung, wie in Abb. 3.6-7 rechts, ergibt sich ein analoger Verlauf zum Quelldehnungsmodell mit zeitabhängiger Erweiterung von Kiehl (1990).

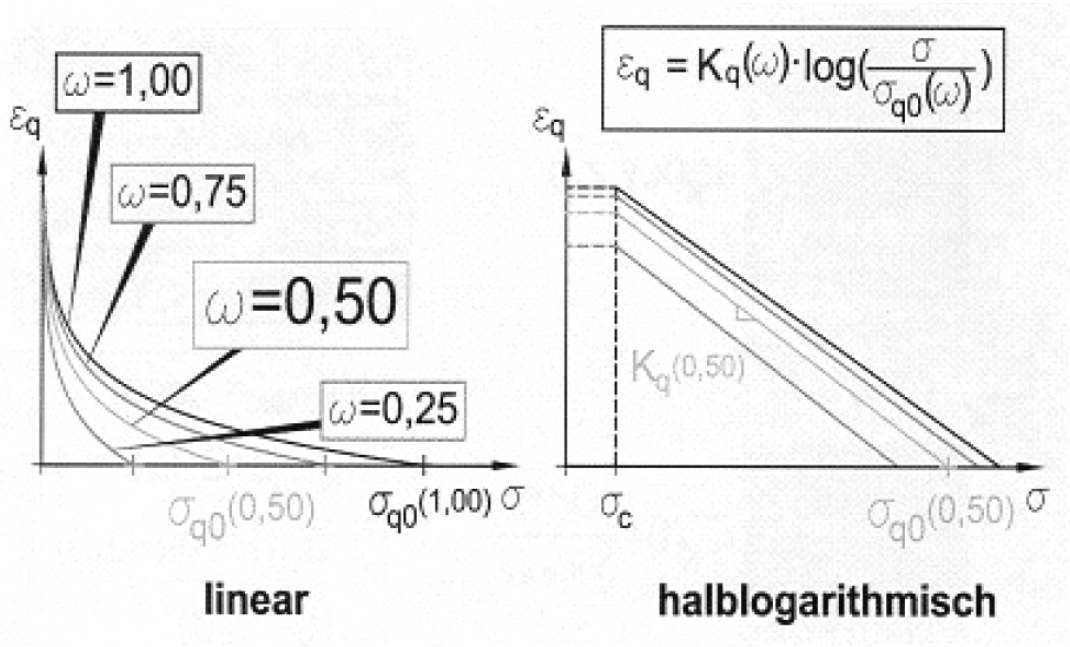


Abb. 3.6-7 Quellgesetz für teilgesättigte Zustände (Wittke & Wittke 2004).

Wittke (2003) gibt die Abhängigkeit der Quellparameter vom dimensionslosen Wassergehalt ω wie folgt an:

$$K_q(\omega) = K_q(\omega = 0) - A \cdot \omega \tag{3.6-48}$$

$$\sigma_{q0i}(\omega) = \sigma_{q0i}(\omega = 1) \cdot \omega \cdot \frac{10^{\frac{B+C\cdot\omega}{K_q(\omega)}}}{10^{\frac{B+C}{K_q(\omega=1)}}} \tag{3.6-49}$$

wobei die Konstanten A, B und C aus Versuchen bestimmt werden.

Die Gültigkeit der in Kapitel 3.6.4 aufgeführten Quellgesetze sowie die darin enthaltenen Annahmen und Ansätze werden bezüglich der Anwendbarkeit auf teilgesättigte bindige Böden überprüft und gegebenenfalls modifiziert, siehe Abschnitt 3.7 und Kapitel 5.

3.7 Eigene Stoffansätze zum Quellen

Es soll ein Quellgesetz entwickelt werden zur Beschreibung des Volumenänderungsverhaltens feinkörniger Böden infolge Feuchteänderungen.

Basierend auf Testergebnissen von Dobrowolsky & Vrettos (2005) wird die in Abb. 3.7-1 in halblogarithmischer Form dargestellte Quelldehungs - Spannungs - Beziehung vorgeschlagen. In der Abbildung ist Quellen mit dem Index SW und Schrumpfen mit dem Index SN bezeichnet.

Die Kurve beschreibt qualitativ die Versuchsergebnisse von Oedometerversuchen unter deviatorischen Anfangsspannungszuständen. In dieser Abbildung wäre die Approximation der Quellergebnisse nach der Quelldehnugsbeziehung von Grob (1972) eine gerade Linie.

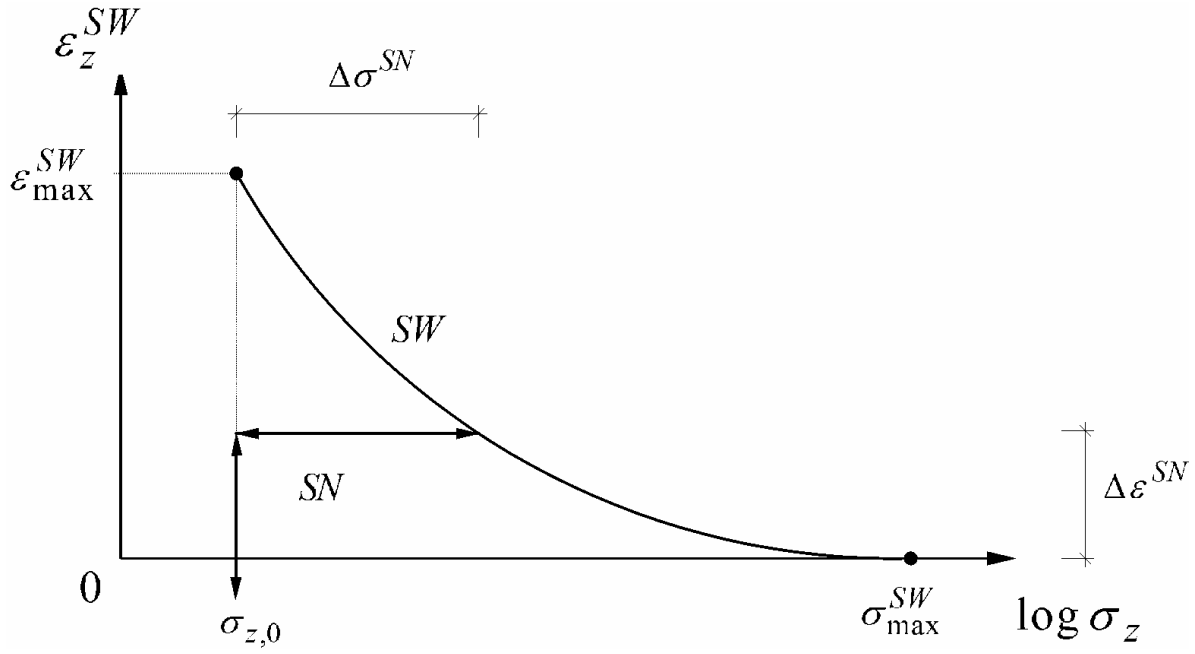


Abb. 3.7-1 Oedometrisches Formänderungsverhalten infolge Quellen und Schrumpfen.

In dieser Arbeit werden nur normalkonsolidierte Ausgangsspannungszustände OCR = 1 untersucht. Durch Quellen werden natürlich auch überkonsolidierte Zustände erreicht, welche

hier jedoch nicht näher betrachtet werden. In den Versuchen wird abgewartet bis Konsolidierungsvorgänge abgeschlossen und Porenwasserüberdrücke abgebaut sind bevor diese gestartet werden. Kriechvorgänge infolge äußerer Auflast und/oder Quellen werden hier nicht betrachtet.

Die nichtlineare Kurve SW in Abb. 3.7-1 beschreibt den Zusammenhang zwischen der vertikalen Quelldehnung ε_z^{SW} und der Vertikalspannung σ_z. Der Schnittpunkt dieser Kurve mit der σ_z - Achse resultiert in dem Wert $\sigma_{z,max}^{SW}$. Dieser Wert beschreibt den maximalen Quelldruck bei behinderter Verformung, der von der Probe in Abhängigkeit von den Parametern Porenzahl und Sättigungsgrad ausgeht. Gleichzeitig ist $\sigma_{z,max}^{SW}$ der Grenzwert der vertikalen Spannung, ab der kein Quellen mehr stattfinden kann. Bei größeren Spannungen als $\sigma_{z,max}^{SW}$ tritt keine Quellverformung mehr auf.

Mit σ_{z0} wird der Anfangsspannungszustand zu Beginn des Quellvorgangs bezeichnet. Mit diesem Anfangsspannungszustand wird die Probe beaufschlagt, um Imperfektionen infolge Einbau zu eleminieren. Als Arbeitshypothese wird eingeführt, dass die Kurve SW unabhängig von der Anfangsspannung σ_{z0} bzw. bei räumlichen Spannungszuständen unabhängig von dem isotropen Anfangsspannungszustand $I_{\sigma 0}$ ist. Würde man einen Anfangsspannungszustand zwischen dem in Abb. 3.7-1 dargestellten Anfangsspannungszustand σ_{z0} und dem maximalen Quelldruck $\sigma_{z,max}^{SW}$ betrachten, so wird lediglich die Kurve SW an der Stelle des betrachteten Anfangsspannungszustandes bildlich gekappt. Des Weiteren wird angenommen, dass infolge Vorlast bei drainierten Systemen eine Verdichtung stattfindet, welche durch die Porenzahl e_0, ein Parameter für das Quellenverhalten, als Äquivalent für die Verdichtung infolge Vorlast mit einhergeht.

Es ist davon auszugehen, dass ein Entwässern und somit ein Quelldruckabbau bei beliebigen Spannungs- Formänderungs- Zuständen auftreten kann und danach wieder eine Aufsättigung und damit Quellen stattfindet, Pfad SN in Abb. 3.7-1. Dabei ist angenommen, dass für den Schwellbeiwert $E_c \approx \infty$, definiert als die Steigung der ε_z^{SN} - $\log \sigma_z$ - Kurve, gilt. Schrumpfverformungen $\Delta\varepsilon^{SN}$ können erst auftreten, nach dem die Quelldrücke abgebaut sind. Nach Erreichen der Anfangsspannung σ_{z0} entstehen dann Schrumpfverformungen, die größer als die Schwellverformungen ε_z^{SW} sein können.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt jedoch auf der Untersuchung des Quellverhaltens bindiger Böden infolge Feuchteausbreitung. Deswegen werden Schrumpfdehnungen nur in den Voruntersuchungen betrachtet.

Das Formänderungsverhalten infolge Quellen kann allgemein mit folgendem Ansatz beschrieben werden:

$$I_{\varepsilon}^{SW} = I_{\sigma,max}^{SW}(e_0, S_{r,0}, S_{r,\infty}) \cdot f_1(I_{\sigma}) \quad , \; I_{\sigma 0} \leq I_{\sigma} \leq I_{\sigma,max}^{SW} \tag{3.7-1}$$

$$I_{\varepsilon}^{SW} = 0 \quad , \; I_{\sigma} > I_{\sigma,max}^{SW} \tag{3.7-2}$$

worin $I_{\sigma,max}^{SW}$ der maximale Quelldruck bei konstantem Volumen in Abhängigkeit der Parameter ist, I_{ε}^{SW} beschreibt die Quelldehnung und I_{σ} ist die aktuelle Spannung. Der maximale Quelldruck $I_{\sigma,max}^{SW}$ hängt von den folgenden Einflussgrößen ab: Anfangsporenzahl e_0, initialer Sättigungsgrad $S_{r,0}$ und Sättigungsgrad $S_{r,\infty}$, auf den die Probe aufgesättigt wird. Der Seperationsansatz kann wie folgt geschrieben werden:

$$I_{\sigma,max}^{SW} = p_a \cdot f_2(S_{r,0}) \cdot f_3(e_0) \cdot f_4\left(S_{r,\infty}\right) \tag{3.7-3}$$

wobei p_a der atmosphärische Druck ist.

Die zeitliche Entwicklung des Quellens wird, analog zu Gattermann (1998) und Wittke (2003), mittels Ausbreitung der Sättigung über einen Bodenkörper berücksichtigt. Hierfür muss der Wassertransport im Boden mit Hilfe der Transportkenngrößen und der hydraulischen Beziehungen berechnet werden.

Ebenso wird, ähnlich zu Wittke & Wittke (2004), die Teilsättigung durch den Parameter $S_{r,\infty}$ berücksichtigt. Die Quelldehnungsbeziehung soll aber hauptsächlich auf den, aus bestimmten Parameterkombinationen resultierenden, maximalen Quelldruck $I_{\sigma,max}^{SW}$ unter Volumenkonstanz bezogen werden, siehe Gleichung (3.7-3).

4 Ermittlung der bodenphysikalischen und mechanischen Eigenschaften des Versuchsmaterials

4.1 Beschreibung und Klassifizierung des Versuchmaterials

Die untersuchten Proben (Tonmehl IBECO-Uniton) haben laut Werksangaben (IBECO Bentonit-Technologie GmbH) den in der Tabelle 4.1-1 aufgelisteten Tonmineralbestand:

Tabelle 4.1-1: Tonmineralbestandteile

Tonminerale	Kaolinite > 40%
	Illite < 20%
	Smectite < 5%

Kaolinite weisen keine oder nur sehr geringe Schichtladungen auf und besitzen somit nur eine geringe Kationenaustauschkapazität (d.h. nur sehr geringe intrakristalline Quellung).

Illite haben hingegen eine sehr starke Schichtladung. Die in den Zwischenschichten eingebundenen Kalium-Ionen sind so stark gebunden, dass nur ein sehr geringer Teil austauschfähig ist. Durch die intensive Verknüpfung der einzelnen Silikatschichten mit den Kalium-Ionen im Zwischenschichtraum besitzen Illite keine intrakristalline Quellfähigkeit.

Smektite verfügen über eine sehr hohe Kationenaustauschkapazität und somit eine hohe intrakristalline Quellung. Der Anteil der intrakristallinen Quellung des verwendeten Probenmaterials ist durch einen Trocknungsversuch bei hoher Temperatur (> 250°C) bestimmbar.

Die innere spezifische Oberfläche dient als Hinweis auf das osmotische Quellpotential und beträgt für weniger quellfähige Minerale 30 m²/g und für stark quellfähige Minerale 800 m²/g. Die spezifische Oberfläche des Probenmaterials ist im Mittel vergleichsweise gering:

Tabelle 4.1-2: Spezifische Oberfläche der Tonminerale

Tonminerale	Kaolinite ca. 30 m²/g
	Illite ca. 100 m²/g
	Smectite ca. 800 m²/g

Auch Tonminerale die als nicht quellfähig bezeichnet werden, verfügen über ein geringes Quellvermögen.

In der nachfolgenden Abb. 4.1-1 ist die Korngrößenverteilung des Materials nach DIN 18123 dargestellt.

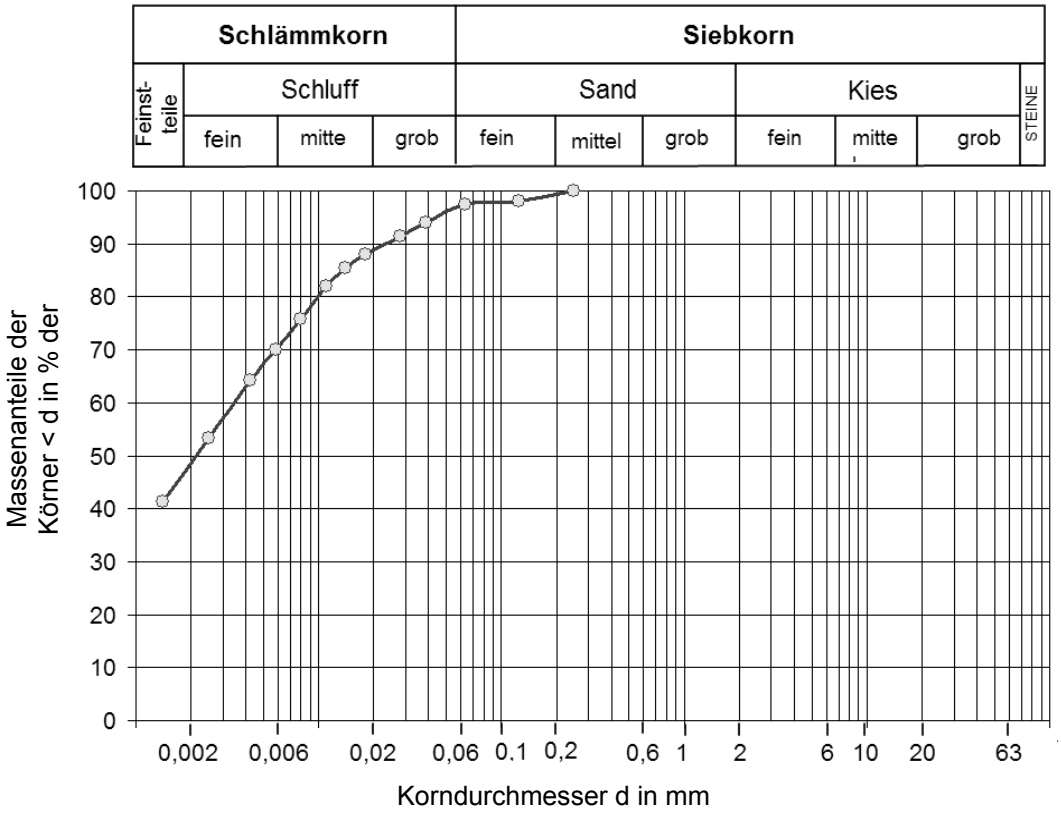


Abb. 4.1-1 Korngrößenverteilung nach DIN 18123 des verwendeten Tones.

Der Kornanteil an Ton, $d \leq 0{,}002$ mm, beträgt 49 % und der Kornanteil $d \leq 0{,}06$ mm beträgt 96 %. Der Anteil an Feinsand in dem Probenmaterial beläuft sich auf 4 %.

Die Ergebnisse der Bestimmung der Zustanzgrenzen nach DIN 18122, eingetragen in das Plastizitätsdiagramm, Abb. 4.1-2, ergeben nach DIN 18196 eine Bodenklassifizierung TA (ausgeprägt plastischer Ton).

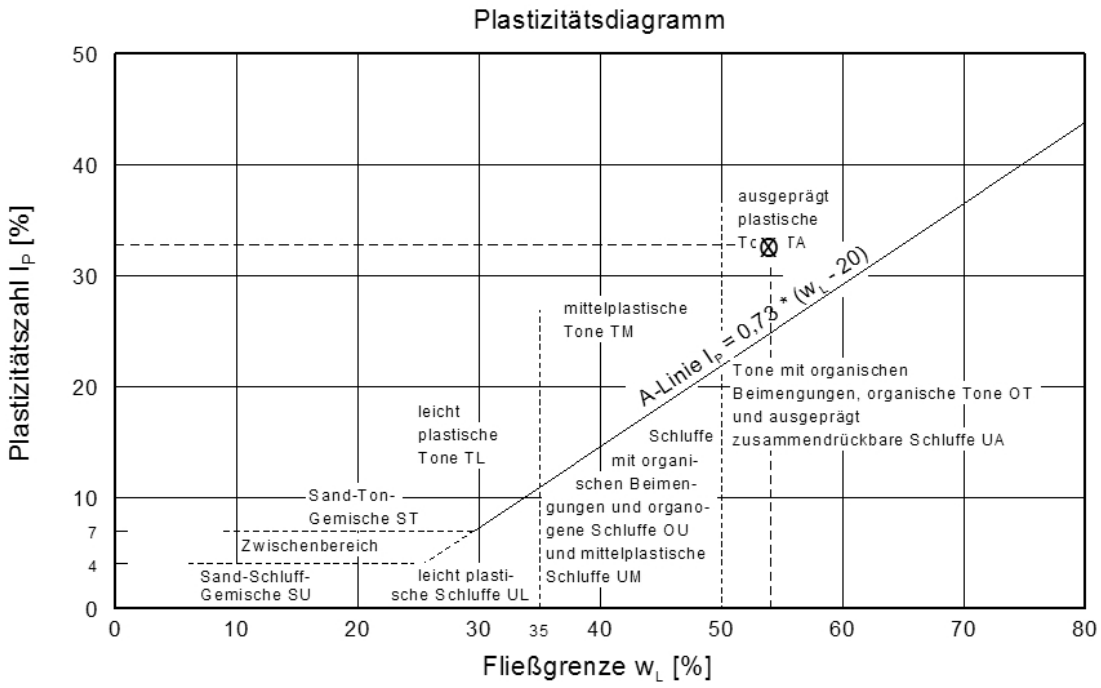


Abb. 4.1-2 Plastizitätsdiagramm zur Benennung bindiger Böden.

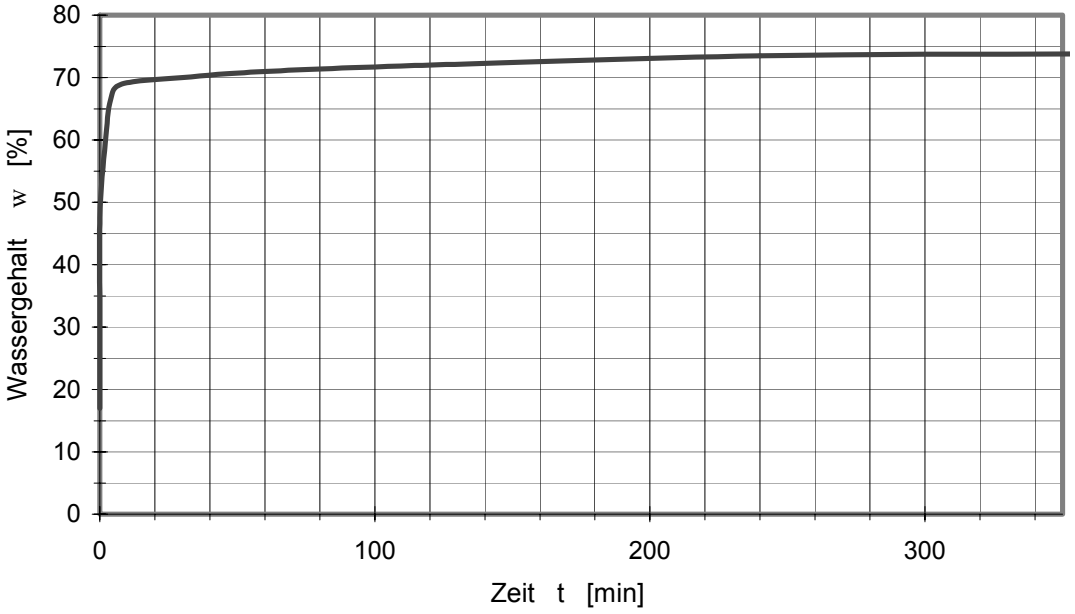


Abb. 4.1-3 Wasseraufnahmevermögen des verwendeten Tones nach DIN 18132.

Die Versuche zur Bestimmung der Wasseraufnahmefähigkeit nach DIN 18132 im Gerät nach Enslin-Neff ergeben ein mittleres Wasseraufnahmevermögen mit $w_A = 73,5$ % nach 4 Stunden, Abb. 4.1-3. Das Material wird anhand der Ergebnisse der Wasseraufnahmefähigkeit als mittelplastischer Ton TM nach DIN 18132, Tabelle 2, bewertet.

In Tabelle 4.1-3 sind die bodenphysikalischen Parameter zusammenfassend aufgeführt.

Tabelle 4.1-3: Bodenphysikalische Parameter

Korndichte nach DIN 18124		ρ_s = 2,65 g/cm³
Kornanteil d≤0,06 mm nach DIN 18123		96 %
Kornanteil d≤0,002 mm nach DIN 18123		49 %
Fließgrenze nach DIN 18122 T1		w_L = 54,0 %
Ausrollgrenze nach DIN 18122 T1		w_P = 21,3 %
Plastizitätszahl nach DIN 18122 T1		I_P = 33,7 %
Schrumpfgrenze nach DIN 18122 T2		w_s = 20,7 **%**
Wasseraufnahmevermögen über 4h nach DIN 18132		w_A = 73,5 %
Proctordichte nach DIN 18127		ρ_{Pr} = 1,614 g/cm³
Optimaler Wassergehalt für ρ_{Pr} nach DIN 18127		$w_{opt.}$ = 21,8 %
Glühverlust nach DIN 18128		V_{Gl} = 6,64 %
Durchlässigkeit nach DIN 18130:	i = 30 ; e= 0,65; S_{r0}= 0,96	k_f = 3,26E-10 m/s
	i = 30 ; e= 0,75; S_{r0}= 0,93	k_f = 3,29E-10 m/s

Zusammenfassend kann der verwendete Kaolinit als ein mittelplastischer bis ausgeprägt plastischer Ton (TM bis TA) nach DIN 18196 bezeichnet werden mit einem geringen bis mittleren Quellvermögen. Der Boden wird nach DIN 4022 als ein T,u* benannt.

Auf Grund seiner relativ niedrigen Saugspannung wurde sich für den Kaolinit als Probematerial entschieden, trotz seines relativ kleinen Quellpotentials. Diese niederen Saugspannungen auf der feuchten Seite erlauben über einen breiten Messbereich den Einsatz von einer einfachen und genauen Meßmethode zur Bestimmung dieser Saugspannungen; der Tensiometermessung.

4.2 Triaxiales und oedometrisches Kompressionsverhalten

In diesem Kapitel werden Ergebnisse von Triaxialversuchen am Versuchsmaterial vorgestellt, welche zur Parameterbestimmung für das in Kapitel 3.6.3 vorgestellte elastoplastische Stoffmodell dienen. Des Weiteren werden oedometrische Kompressionsversuche präsentiert.

4.2.1 Triaxialversuche

An dem gewählten Versuchsmaterial wurden konventionelle, triaxiale Kompressionsversuche durchgeführt. Es handelt sich um konsolidierte, dränierte Versuche (D - Versuche) nach DIN 18137-2 an normal- und überkonsolidierten Proben.

4.2.1.1 Probenherstellung und Versuchsdurchführung

Das Probenmaterial wurde 48 h vor Probenherstellung mit einem definierten Wassergehalt w_0 in einem Zwangsmischer angemischt. Anschließend ist analog zur Vorversuchsserie 1, Abschnitt 5.1.1, das Bodenmaterial in einem Mixer zerkleinert worden, um bei der Probenherstellung größere Lufteinschlüsse zu vermeiden. Die Probekörper mit einer Höhe $h_0 = 120$ mm und einem Durchmesser $d_0 = 100$ mm wurden in einem Zylinder mit beschichteter Innenfläche in 6 Einbaulagen statisch verdichtet. Die Proben haben dementsprechend eine gewisse Vorbelastung erfahren, wobei die isotrope Konsolidierspannung $\sigma_v = 200$ kPa größer ist als die Vorbelastung aus Probenherstellung. Anschließend sind die jeweiligen Versuchskörper aus dem Herstellzylinder ausgepresst, die Einbauparameter $S_{r,0}$ und e_0 überprüft und in ein konventionelles Triaxialgerät, schematisch dargestellt in Abb. 4.2-1, eingebaut worden.

Nach dem Einbau wurden die Proben zunächst 24 Stunden lang unter einer isotropen Vorlastspannung σ_v konsolidiert und anschließend auf ein bestimmtes Konsolidierverhältnis R_p entlastet.

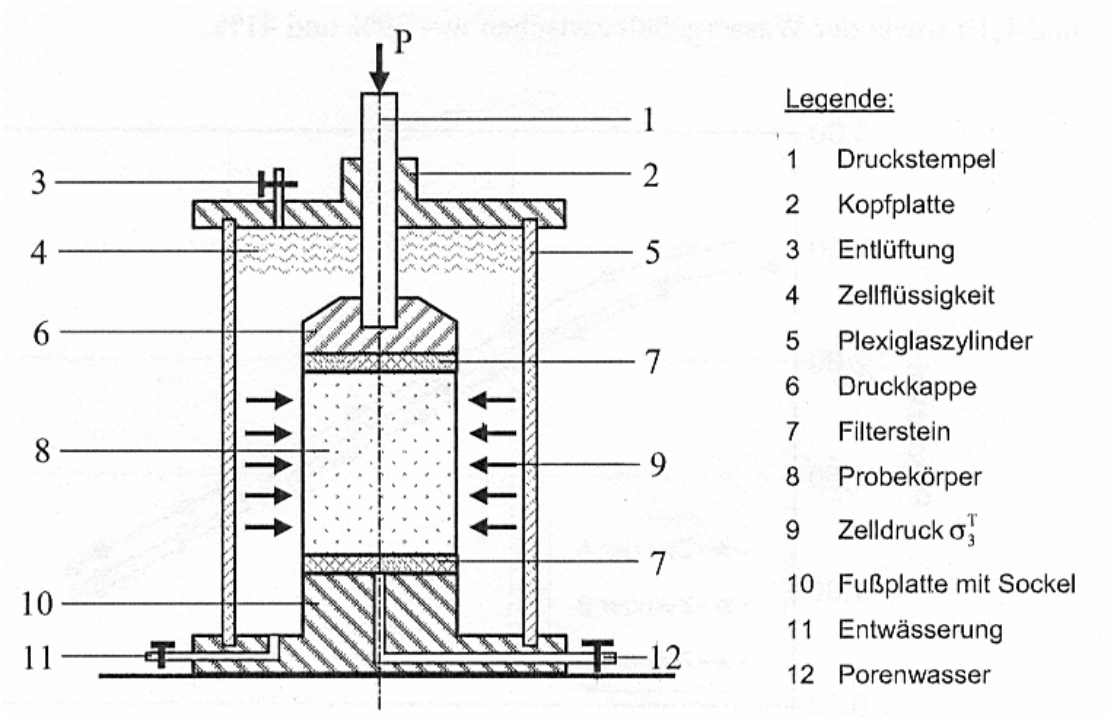


Abb. 4.2-1 Schema der verwendeten Triaxialzelle (Li 2002).

Bei offenem Entwässerungssystem wurden die teilgesättigten Proben dann mit einer konstanten Vorschubgeschwindigkeit von 0,0042 mm/min komprimiert. Die Geschwindigkeit ist so gewählt worden, dass sich kein Porenwasserüberdruck in der Probe bilden kann. Bei den Versuchen ist kein Wasser aus dem Entwässerungssystem ausgetreten.

4.2.1.2 Auswertung der Versuchsergebnisse

In Abb. 4.2-2 sind die Arbeitslinien aus 3 Versuchen dargestellt. Die zylindrischen Versuchskörper sind mit einem initialen Sättigungsgrad $S_{r,0}$ =0,70 und einer Anfangsporenzahl e_0 = 0,78 hergestellt und in das Gerät eingebaut worden. Die Versuchsproben besitzen mit diesen Herstellungsparametern eine Konsistenzzahl I_C = 0,994 , welche eine sehr steife Zustandsform beschreibt. Die Proben wurden mit σ_v = 200 kPa konsolidiert und mit den Seitendruckspannungen σ_3 = 50, 100 und 200 kPa abgeschert. Zur genaueren Bestimmung des Kompressions- und Elastizitätsmoduls sind die Proben mit einem Überkonsolidierverhältnis R_p = 2 und R_p = 4 in den Versuchen von der Axialspannung σ_1 = 200 kPa aus auf $\sigma_1 = \sigma_3$ isotrop entlastet und danach wiederbelastet worden.

Es wird angenommen, dass eine Vorlastspannung σ_v keinen Einfluss auf das Quellverhalten des Versuchsmaterials hat. Die hierdurch eintretenden Verdichtungseinflüsse werden durch die Parameter e_0 und $S_{r,0}$ im Quellansatz, Gleichung (3.7-1), erfasst.

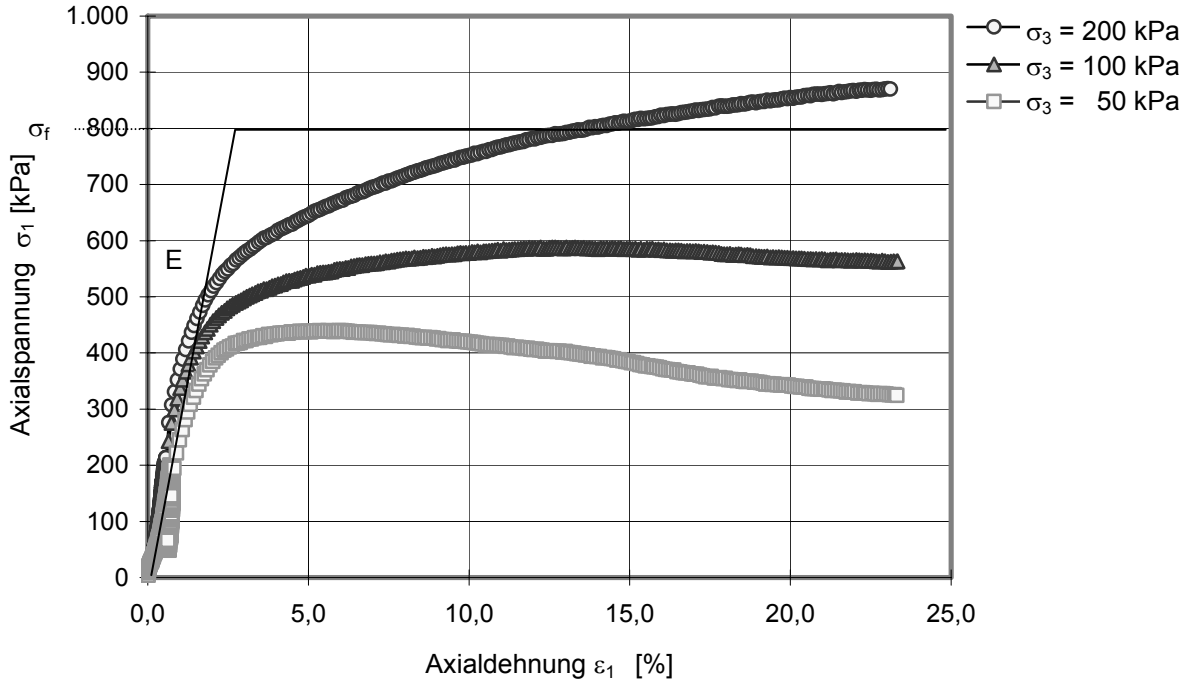


Abb. 4.2-2 Arbeitskurven des Kaolinit - Tones im Triaxialgerät, $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0} = 0{,}7$, $\sigma_v = 200$ kPa , $R_p = 1{,}2{,}4$.

Aus dem Verlauf der Arbeitslinien lassen sich sehr gut die Peak - Ausbildungen der überkonsolidierten Proben sowie der Übergang in ein Plateau in dem Versuch mit der normalkonsolidierten Probe erkennen. In Abb. 4.2-3 sind die Resultate in der Mohrschen Spannungsebene aufgetragen.

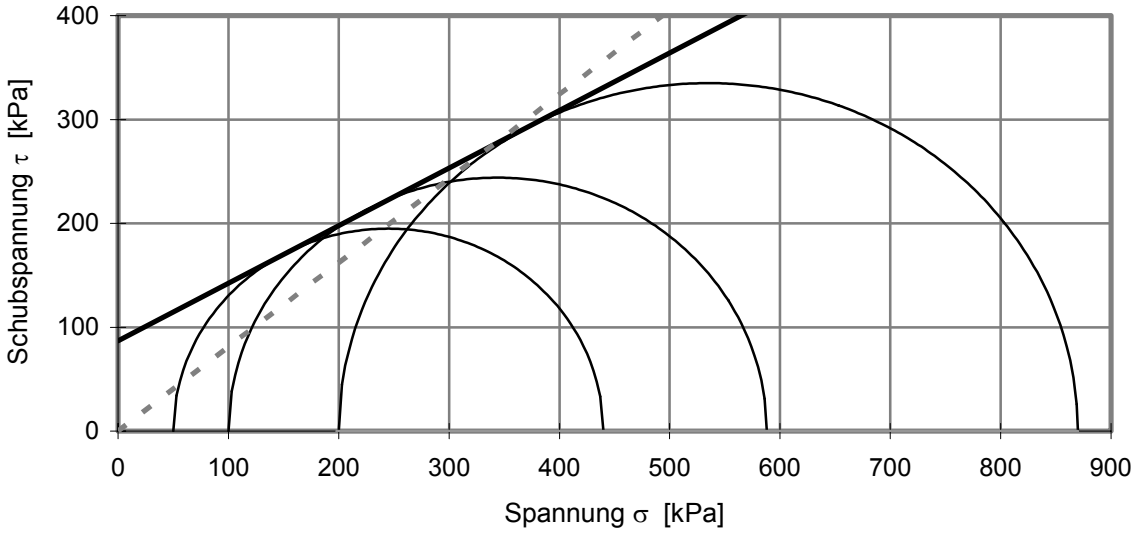


Abb. 4.2-3 Ermittlung der Scherparameter, $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0} = 0{,}7$, $\sigma_v = 200$ kPa , $R_p = 1{,}2{,}4$

Aus Abb. 4.2-3 können die Scherparameter wie folgt ermittelt werden:

Tabelle 4.2-1: Scherparameter und Elastizitätsmodul, $\sigma_v = 200$ kPa , $S_{r,0} = 0{,}7$, $e_0 = 0{,}78$

Reibungswinkel	$\varphi = 29°$
Kohäsion	$c = 87$ kPa
Winkel der Gesamtscherfestigkeit	$\varphi_s = 39°$
Elastizitätsmodul	$E = 30000$ kPa

Die in Tabelle 5.2-1 aufgeführten, aus den Versuchen ermittelten Scherparameter erscheinen für einen Kaolinitton (TM bis TA) trotz sehr steifer Konsistenz relativ groß. Jedoch stimmen die Scherparameter in der Größenordung gut mit denen von Wendling (2004) ermittelten Scherparametern an dem Material überein.

Für die Grenzgerade ergeben sich die Scherparameter mit $\tan \alpha = \sin \varphi$ sowie $b = c \cdot \cos \varphi$.

4.2.2 Oedometrische Kompressionsversuche

Die an dem Versuchsmaterial durchgeführten oedometrischen Kompressionsversuche sind von Kierzkowski (2007) übernommen worden.

4.2.2.1 Versuchsapparatur und Versuchsdurchführung

Die Versuchsapparatur und der Versuchsablauf sind ausführlich in Kierzkowski (2007) beschrieben. In Abb. 4.2-4 ist das Versuchsgerät dargestellt. Über ein Tensiometer, welches von unten in die zylindrischen eingebracht wird, werden die Porenwasserdrücke bzw. Saugspannungen erfasst.

Das Oedometer ist konzipiert für Proben mit einem Durchmesser $d = 100$ mm und einer initialen Höhe $h_0 = 19$ mm. Eine Probe, welche mittels statischer Verdichtung hergestellt wurde, wird in dem Gerät zwischen zwei porösen Platten gebettet.

In den Versuchen wurden Be- sowie Entlastungszyklen gefahren.

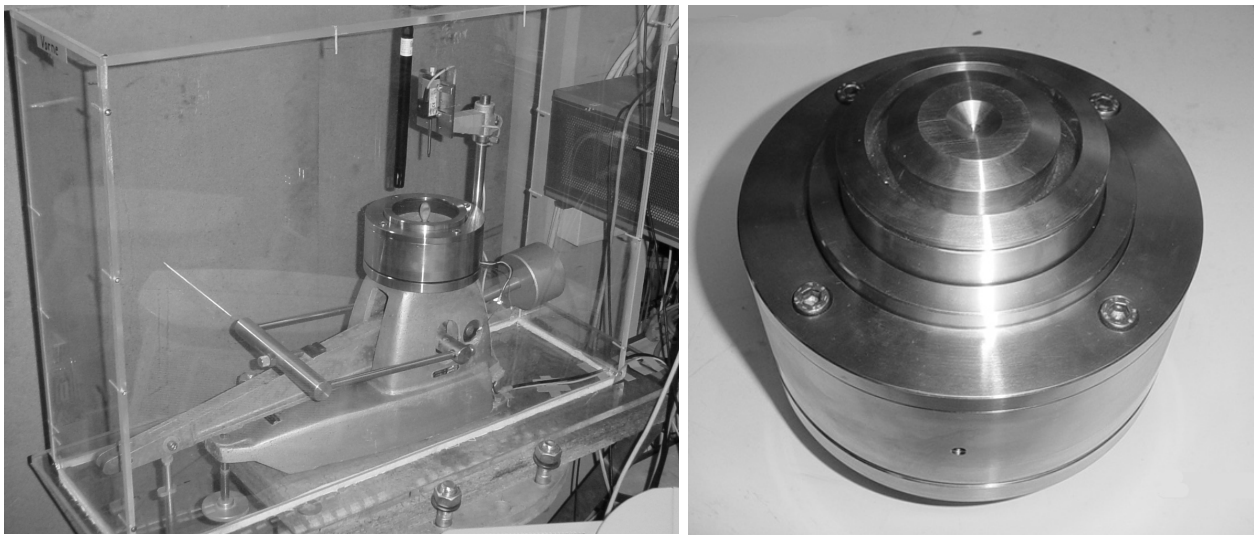


Abb. 4.2-4 Oedometer in der Plexiglasabdeckung und Tensiometer (links) sowie Nahaufnahme des Oedometers (rechts), (Kierzkowski 2007).

4.2.2.2 Auswertung der Versuchsergebnisse

In Abb. 4.2-5 ist das Ergebnis eines von Kierzkowski (2007) durchgeführten Oedometerversuches mit den initialen Parametern $e_0 = 0{,}78$ und $S_{r,0} = 0{,}95$ in einem Druck - Porenzahl - Diagramm dargestellt.

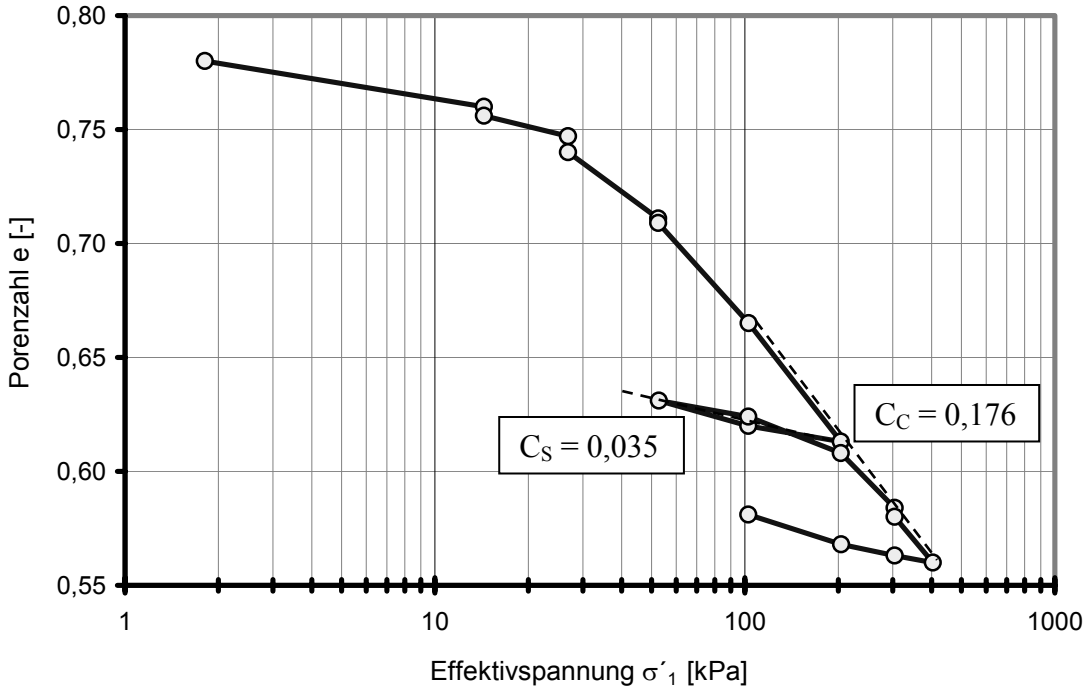


Abb. 4.2-5 Druck - Porenzahl - Diagramm mit Be- und Entlastungspfaden sowie Kriechphasen, $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0} = 0{,}95$, (Kierzkowski 2007).

Zusätzlich zu den Be- und Entlastungspfaden sind drei Kriechphasen bei $\sigma_1 = 12{,}5$ kPa, $\sigma_1 = 25{,}0$ kPa und $\sigma_1 = 50{,}0$ kPa untersucht worden. In dieser Arbeit wird das Kriechen jedoch nicht betrachtet.

Die resultierenden Werte für den Kompressionsbeiwert C_C sowie den Schwellbeiwert C_S sind typisch für einen Kaolinit - Ton mit dieser Dichte und Sättigung. Es ist jedoch zu erwarten, dass C_C und C_S bei einem initialen Sättigungsgrad $S_{r,0} < 0{,}95$ kleinere Werte annimmt, als in Abb. 4.2-5 dargestellt.

4.3 pF-Kurve des Versuchsmaterials

Zur Berechnung des Wassertransportes in einem Bodenkörper werden die Transportkenngrößen, wie in Abschnitt 3.4 beschrieben und übernommen von Wendling (2004), sowie die hydraulischen Beziehungen (pF-Kurven) benötigt.

Für die Ermittlung der pF-Kurve werden drei verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Wasserspannungen eingesetzt. Für die Messwerte in dem Bereich pF = 0 bis ca. 3 wird die Tensiometermethode zur direkten Bestimmung der Matrixsaugspannung verwendet. Für den Messbereich pF = 3 bis ca. 4 kommt eine so genannte „axis-translation"- Methode zur Messung der Matrixsaugspannung zum Einsatz. Hierfür wird ein Drucktopf mit einer 15 bar Keramikplatte genutzt. Die Versuche für den höheren Messbereich, pF > 4, werden mittels eines Vakuum - Austrocknungs - Apparates mit Hilfe der Korrelation von der relativen Luftfeuchte mit den totalen Saugspannungen ausgeführt.

4.3.1 Tensiometermethode

Zur Bestimmung der Saugspannungssättigungsbeziehungen des Kaolinit - Tones werden Aufsättigungsversuche mit Hilfe von Tensiometern durchgeführt in Abhängigkeit von der Porenzahl e und dem Sättigungsgrad S_r.

4.3.1.1 Versuchsapparatur

In den Versuchen wird das T5 Miniatur - Tensiometer der Firma UMS verwendet, abgebildet in Abb. 4.3-1. Das Tensiometer ist speziell für punktuelle Messungen in Bodensäulen konzipiert. Es besteht aus einem Korpus mit Druckaufnehmer, an dem ein mit entgastem, entionisiertem Wasser gefüllter Schaft angeschlossen ist. An dem Schaft ist eine poröse keramische Kerze angebracht, über die das Fluid im Schaft Kontakt mit dem Bodenwasser hat. Der Schaft sowie die Kerze haben einen Durchmesser $d_{Sch} = 5$ mm und der Korpus $d_{Kor} = 20$ mm. Diese geringen

Abmessungen lassen punktuelle Messungen bei geringer Bodenstörung zu und gewährleisten dabei ein schnelles Ansprechverhalten.

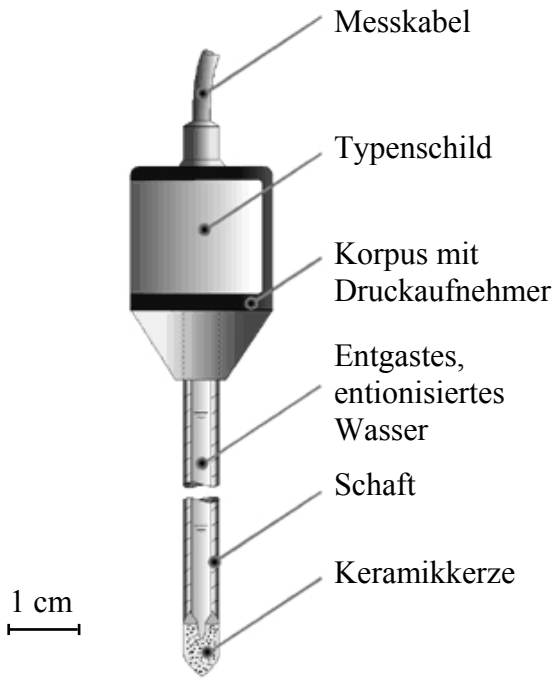


Abb. 4.3-1 UMS - T5 Miniatur Tensiometer (UMS Datenkatalog T5-Tensiometer 2004).

Die Wasserspannungen im Boden werden über das Wasser im Schaft des Tensiometers auf den Druckaufnehmer übertragen, der diese in ein elektrisches Messsignal umwandelt und über das Messkabel an ein Voltmeter weitergibt. Das T5 - Tensiometer deckt einen Messbereich pF = 0 bis ca. 3 ab und besitzt eine Messgenauigkeit von 1 cm Wassersäule.

4.3.1.2 Versuchsdurchführung

Die Versuche werden im Oedometer A, beschrieben in Abschnitt 5.2.2, unter Volumenkonstanz durchgeführt. Dabei ist das Tensiometer von unten senkrecht in den Versuchskörper eingebracht, siehe Abb. 5.2-8. Die Proben werden gleichermaßen hergestellt, wie die Proben für die Quellversuche in Serie 2, vergleiche Abschnitt 5.2.2.2. Jede Bodenprobe wird mit einem spezifischen Anfangssättigungsgrad $S_{r,0}$ und einer bestimmten Porenzahl e_0 hergestellt. Vor dem Einbau der zylindrischen Versuchsproben werden diese an der Unterseite zentrisch vorgebohrt, um größere Störungen durch das Eindringen des Tensiometers zu verhindern. Vor Einbau der Probe muss überprüft werden, ob die Flüssigkeit im transparenten Schaft des T5 - Tensiometers frei von Lufteinschlüssen ist.

Nachdem eine Probe im Oedometer A samt Tensiometer eingebaut ist, wird sie mit einem geringen axialen Anpressdruck $\sigma_{z0} = 9{,}0$ kPa beaufschlagt. Nachdem die Bodenprobe stabile Konditionen erreicht hat und Porenwasserüberdrücke abgebaut sind, wird der Versuch gestartet. Die Versuchsprobe wird von seiner Anfangssättigung $S_{r,0}$ aus schrittweise von unten bei arretierter Kopfplatte ($\varepsilon_z = 0$) bewässert, bis schlussendlich die volle Sättigung erreicht ist. Nach jeder Bewässerungsstufe auf eine bestimmte Sättigung $S_{r,i}$ wird abgewartet bis die Saugspannung im Zentrum der Probe konstant bleibt, bevor der nächste Bewässerungsschritt initiiert wird. Es wird die Annahme getroffen, dass damit im Zentrum der Probe der spezifische Sättigungsgrad $S_{r,i} =$ konstant für den Bewässerungsschritt i ist. Die Ablesung des vom Tensiometer abgegebenen Messsignals findet mittels eines Voltmeters statt. Der Umrechnungsfaktor der Tensiometerwerte in [mV] bei einer Versuchstemperatur von 20°C (1 cmWS = 0,979 hPa) beträgt:

$$\psi_m \ [\text{cmWS}] = \frac{\text{Ablesewert } [\text{mV}]}{0{,}103 \ [\text{mV/hPa}] \cdot 0{,}979 \ [\text{hPa/cmWS}]} \pm l_{Sch} \ [\text{mWS}] \qquad (4.3\text{-}1)$$

wobei l_{Sch} die Schaftlänge des Tensiometers ist, die je nach Messung und Lage des Tensiometers addiert oder subtrahiert werden muss. In den vorliegenden Versuchen muss die Schaftlänge l_{Sch} jeweils aufaddiert werden. Der Zahlenwert des Matrixpotentials ψ_m wird mittels Gleichung (3.2-7) in den allgemein gebräuchlichen pF-Wert umgerechnet.

Es werden jeweils Versuche mit den Porenzahlen e = 0,68 , e = 0,78 und e = 0,88 durchgeführt. Dabei ist darauf zu achten, dass der Anfangssättigungsgrad $S_{r,0}$ jeweils so zu wählen ist, dass die Saugspannung zu Beginn jeden Versuches nicht pF = 2,95 überschreitet.

4.3.1.3 Auswertung der Messergebnisse

In Abb. 4.3-2 sind für die Porenzahlen a) e = 0,88 , b) e = 0,78 und c) e = 0,68 jeweils die pF - Werte in Abhängigkeit von der Sättigung S_r aufgetragen. Die einzelnen Datenpunkte beschreiben die Versuchsergebnisse und die durchgezogenen Linien die Approximationen der Versuchsresultate für eine Aufsättigung nach Gleichung (3.3-7) mit den Tabellenwerten aus Tabelle 4.3-3. Unabhängig von der Porenzahl nimmt die Matrixsaugspannung, von einem scheinbaren Plateau aus, mit zunehmender Sättigung mehr und mehr ab, bis schließlich bei völliger Sättigung die Saugspannung asymptotisch gegen Null tendiert. Die pF - Kurvenverläufe für die verschiedenen Porenzahlen sind sehr ähnlich.

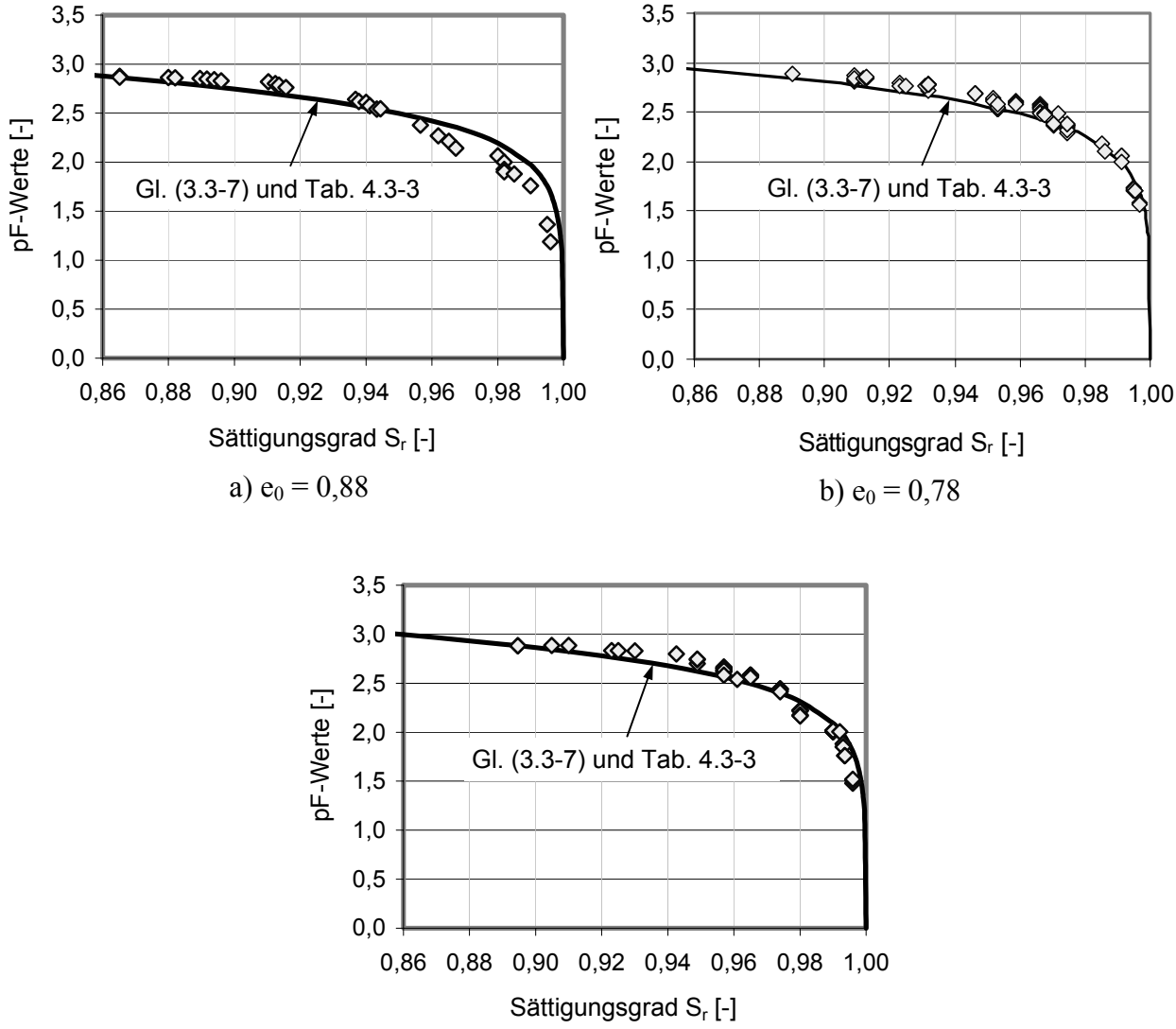


Abb. 4.3-2 Im Oedometer A ermittelte pF-Werte für verschiedene Porenzahlen e_0 , $S_{r,\infty} = 1{,}0$, T = 20°C , σ_{z0} = 9 kPa.

Mit ansteigender Porenzahl ist ein leichter Abbau in den pF - Werten zu erkennen, welcher jedoch nicht signifikant ist. Wenn man die pF - Werte der Kurven a) bis c) bei einer Sättigung von 86 % vergleicht, lässt sich eine Abnahme $\Delta pF = 0{,}06$ mit einem Anstieg in der Porenzahl $\Delta e = 0{,}1$ festzustellen. Diese leichte Reduktion in der Matrixsaugspannung setzt sich mit steigender Porenzahl über die gesamte Messbreite in dem ungefähr gleichen Verhältnis fort.

4.3.2 „Axis-Translation“ - Methode im Drucktopf mit Keramikplatte

Der allgemeine Begriff „axis - translation“ bezieht sich auf das Verfahren den Luftporendruck in einem teilgesättigten Boden anzuheben bei Aufrechterhaltung des Porenwasserdruckes bei einem meßbaren Referenzwert, welcher normalerweise dem Atmosphärendruck entspricht. Die Anwendung dieser Technik setzt eine Trennung zwischen der Luftphase und der Wasserphase voraus, welche in der Regel mit Hilfe von keramischen Platten geschieht.

In einem Drucktopf mit keramischer Platte können Be- und Entwässerungszyklen gefahren werden. Die Versuche wurden durchgeführt, um den Verlauf der pF - Kurven im Bereich mit pF = 3 bis pF = 4 in Abhängigkeit von der Porenzahl e zu bestimmen.

4.3.2.1 Versuchsapparatur

Für die Versuche wird zu Beginn ein Drucktopf mit einer Keramikplatte der Firma Soilmoisture verwendet, siehe Abb. 4.3-3. Im weiteren Verlauf der Versuchsserien ist ein modifizierter Drucktopf entwickelt worden, siehe Abb. 4.3-4. Diese modifizierte Apparatur funktioniert analog zu dem Drucktopf der Firma Soilmoisture, verfügt jedoch über 4 Ebenen mit jeweils einer Keramikplatte. Die einzelnen Ebene können getrennt voneinander bestückt, geöffnet und auch mit unterschiedlichen Drücken beaufschlagt werden. Somit arbeitet dieses Gerät wie 4 einzelne Drücktöpfe in einem.

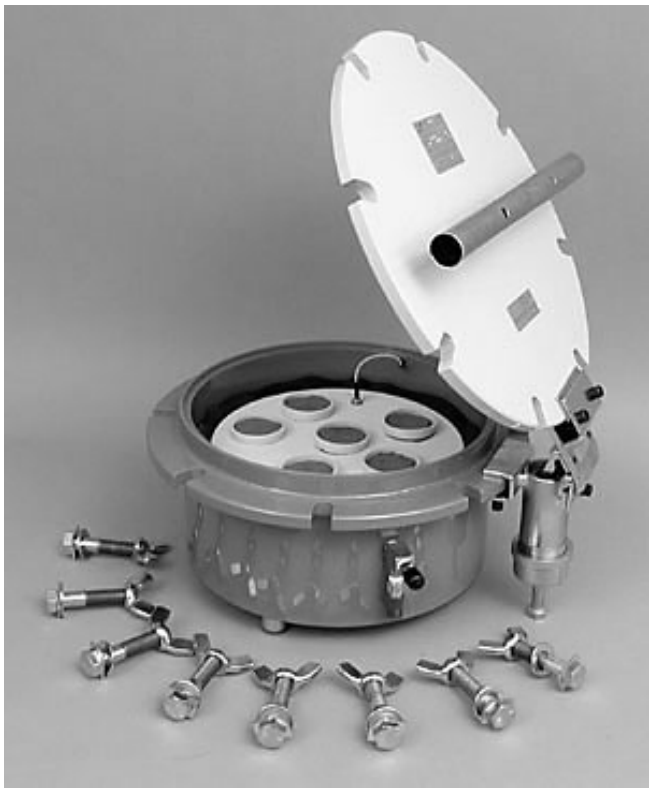


Abb. 4.3-3 Drucktopf mit Keramikplatte (Soilmoisture Equipment Corp. 2002).

Die wichtigsten Bauteile der Geräte sind jeweils die Keramikplatten mit einem hohen Lufteintrittspunkt von 1500 kPa. Mit diesen Platten findet die Trennung zwischen der Luftphase und der Wasserphase statt. Die Drucktöpfe sind an eine Druckluftleitung angeschlossen über die mit Hilfe von Manometern die Innendrücke der Töpfe geregelt werden.

4.3.2.2 Versuchsdurchführung

Die Probenvorbereitung findet analog zu der in den Quellversuchen der Serie 2 statt, vergleiche Abschnitt 5.2.2.2. Die idealen Abmessungen einer Zylinderprobe für die Versuche im Drucktopf sind laut Soilmoisture Equipment Corp. (2002) $h_0 = 10$ mm und $d_0 = 55$ mm. Die Proben werden in speziellen Ringen mit einem spezifischen Anfangssättigungsgrad $S_{r,0}$ und einer bestimmten Porenzahl e_0 statisch verdichtet.

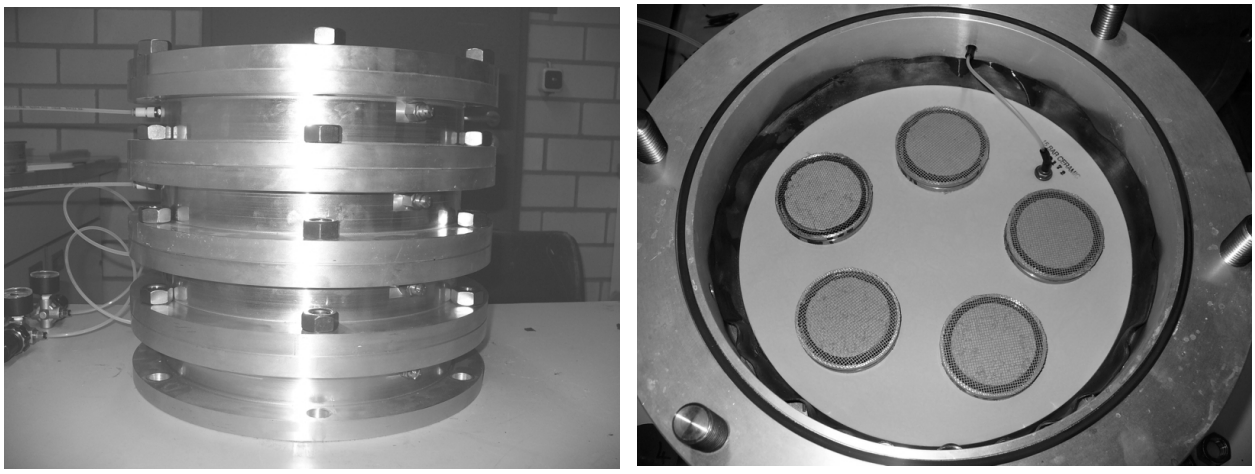


Abb. 4.3-4 Modifizierter Drucktopf mit 4 Ebenen und Keramikplatten (links) und Anordnung von 5 Probekörpern auf der 15 bar Keramikplatte einer Ebene (rechts).

Jede keramische Platte wird mit entionisiertem, entlüftetem Wasser gesättigt auf einem dreieckigen Abstandshalter am Boden eines Drucktopfes platziert. Zwischen dem Boden eines Drucktopfes und der Keramik befindet sich ein Wasserreservoir, welches ebenso mit entionisiertem, entlüftetem Wasser gefüllt ist. An das Wasserreservoir ist zu Beginn eines Versuches eine Bürette angeschlossen mit einer Wassersäule von 20-30 cm.

Nachdem die Keramik gesättigt ist sowie die Proben Porenwasserüberdrücke abgebaut haben und sich wieder im Gleichgewicht befinden, können sie auf der keramischen Platte in einem Drucktopf platziert werden. Dabei ist darauf zu achten, dass die Versuchsproben einen guten Kontakt zur Keramik besitzen. Während eines Versuches wird dieser Kontakt gewährleistet indem ein geringes Gewicht auf jede der Proben aufgelegt wird. Jede Platte bietet Platz für 5 Proben mit $d_0 = 55$ mm. Nachdem ein Drucktopf mit den Probekörpern bestückt ist, siehe

Abb. 4.3-4 rechts, wird dessen Deckel geschlossen und mit Bolzen luftdicht verschraubt. Danach wird in der Druckzelle langsam ein Druck p aufgebaut. Wird die Zelle und werden somit auch die Probekörper mit einem Druck $p < \psi_{m,0}$ beaufschlagt, sättigen die Proben langsam auf, indem sie sich Wasser aus der Keramik ziehen, bis der Gleichgewichtszustand $p = \psi_m$ erreicht ist. Wird ein Drucktopf jedoch mit einem Druck $p > \psi_{m,0}$ beaufschlagt, drückt sich das Bodenwasser aus den darin befindlichen Proben in die Keramik ,welche somit entwässern, bis wiederum $p = \psi_m$ erreicht ist. Bis zum Einstellen dieses Gleichgewichtszustandes können bei dem verwendeten Material bis zu einem Monat vergehen.

Wenn das Wasserniveau in der Bürette über einen längeren Zeitraum nicht mehr abfällt bzw. ansteigt, ist das ein Anzeichen dafür, dass das Gleichgewicht zwischen dem auferlegten Innendruck p in der Zelle und der Matrixsaugspannung ψ_m im Boden erreicht ist. Daraufhin wird der Druck in der Zelle auf Atmosphäreniveau abgelassen und die Proben aus dem Drucktopf entfernt. Änderungen in den Abmessungen der Proben werden mittels Schieblehre überwacht und der Wassergehalt mittels Ofentrocknung bestimmt.

4.3.2.3 Auswertung der Messergebnisse

Aufgrund der sehr zeitaufwendigen Tests und der zahlreichen Fehlversuche, u. a. infolge des nicht ausreichenden Kontaktes der Bodenproben zur Keramik, liegen nur insgesamt 8 verwertbare Versuchsergebnisse vor. Jeweils 4 für den Entwässerungsbereich und den Bewässerungsbereich. In der Tabelle 4.3-1 sind die Resultate zusammengestellt.

Tabelle 4.3-1: Versuchsergebnisse „axis-translation“ - Methode im Drucktopf

	Ausbaudaten				
Versuch	Porenzahl e [-]	Sättigungsgrad S_r [-]	Zellendruck p [kPa]	pF [-] nach Gl. 3.2-7	
1	0,78	0,81	200	3,30	Entwässerung
2	0,77	0,83	200	3,30	
3	0,77	0,83	200	3,30	
4	0,78	0,78	200	3,30	
5	0,68	0,72	200	3,30	Bewässerung
6	0,69	0,67	200	3,30	
7	0,78	0,66	200	3,30	
8	0,88	0,67	200	3,30	

Zusammen mit den Versuchsergebnissen aus 4.3.1 und 4.3.3 reichen die in dieser Versuchsreihe im Drucktopf erzielten Ergebnisse aus, um die pF - Kurven ausreichend genau zu approximieren, vergleiche Kapitel 4.3.4.

4.3.3 Vakuum - Austrocknungs - Methode

Um den Bereich hoher Saugspannungen pF > 4,0 abzudecken, werden Entwässerungsversuche in einem Vakuum - Austrocknungs - Gerät durchgeführt. Der relevante Sättigungsbereich in dieser Arbeit liegt bei $S_r \geq 0{,}63$, welches in Saugspannungswerten pF < 3,7 resultiert. Zur genaueren mathematischen Formulierung der pF – Kurven werden jedoch die Versuche zur Bestimmung der hohen pF - Werte durchgeführt.

Das Meßprinzip beruht darauf, dass die totalen Saugspannungen mittels Kontrolle der Luftfeuchtigkeit und Anwendung der Kelvin Gleichung (3.3-1) untersucht werden. Die Kelvin Gleichung beschreibt den Zusammenhang zwischen dem Potential des Porenwassers und dem Potential des Wasserdampfes in den Poren. Mittels von bestimmten H_2SO_4 - Lösungskonzentrationen kann die relative Luftfeuchte in einem geschlossenen Gefäß und somit in der Probe gesteuert werden.

4.3.3.1 Versuchsapparatur

Für die Versuche wird ein kegelförmiger Vakuum - Erlenmeyerkolben mit zusätzlichem Olivenanschluss unterhalb des Flaschenhalses verwendet, schematisch dargestellt in Abb. 4.3-5. Der Kolben aus vakuumfestem Glas besitzt ein Volumen V = 1000 cm³ und gewährleistet eine große Oberfläche der Säurelösung. Dies stellt sicher, dass sich im Gefäß die gewünschte relative Luftfeuchte schnell einpendelt. Ein Fünftel des Flaschenvolumens steht für die H_2SO_4 - Lösung zur Verfügung. Der Erlenmeyerkolben wird mit einem Pfropfen verschlossen, an dem ein Edelstahltraggestell angebracht ist, auf das wiederum zwei Probebehälter aus Edelstahl aufgesetzt sind. Diese Probebehälter sind für Proben mit einem Durchmesser $d_0 = 25$ mm und einer Höhe $h_0 = 7{,}5$ mm konzipiert. Ebenso besitzt der Pfropfen einen Durchgang für den Temperatur- und Feuchtesensor. An den Olivenanschluss wird eine regulierbare Vakuumpumpe angeschlossen.

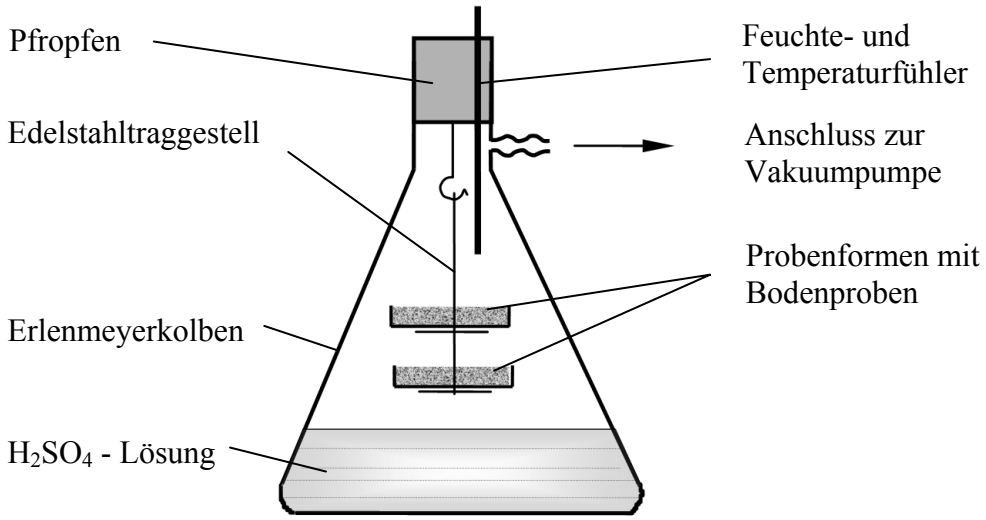


Abb. 4.3-5 Prinzipskizze des modifizierten Vakuum - Erlenmeyerkolbens.

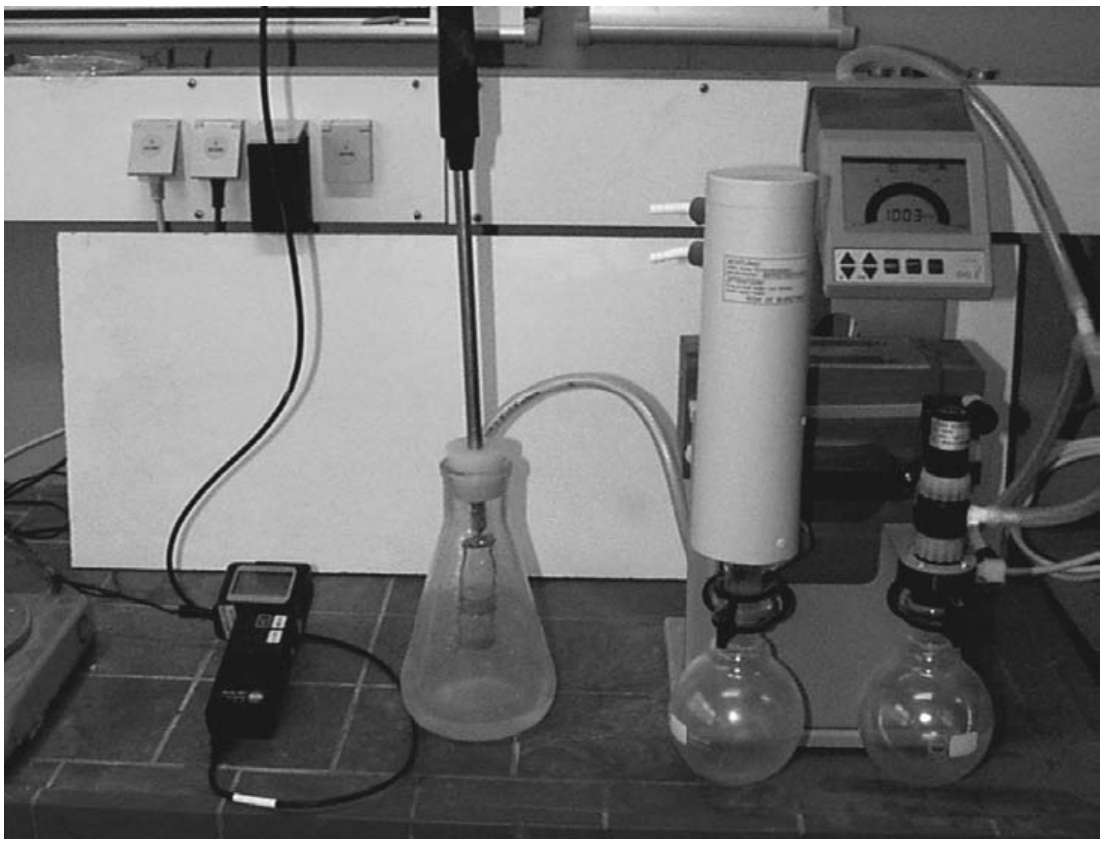


Abb. 4.3-6 Vakuum - Austrocknungs - Gerät.

Der Vakuum - Erlenmeyerkolben wird in einem Schutzbehälter untergebracht, um Beeinflussungen infolge externer Temperaturschwankungen entgegenzuwirken. Zur Veranschaulichung wurde bei der Aufnahme der Abb. 4.3-6 dieser Behälter entfernt.

4.3.3.2 Versuchsdurchführung

Die Probenvorbereitung verläuft analog zu derjenigen der Quelldruckversuche in Serie 1, vergleiche Abschnitt 5.2.1.2. Jede Bodenprobe wird mit einem spezifischen Anfangssättigungsgrad $S_{r,0}$ und einer bestimmten Porenzahl e_0 statisch in den Edelstahlprobebehältern hergestellt. Bevor die Versuchsproben in den Erlenmeyerkolben eingesetzt werden, wird der Kolben mit 200 cm³ der spezifischen H_2SO_4 - Lösungskonzentration gefüllt. Dieses Volumen gewährleistet, dass die infolge Feuchteaustausch mit der Probe entstehenden Konzentrationsänderungen der Lösung vernachlässigbar klein sind.

Die relative Luftfeuchtigkeit im Kolben hängt von der Säurekonzentration und dem auferlegten Vakuumdruck ab. Durch Erzeugen eines Vakuums im Erlenmeyerkolben wird die Versuchszeit um bis zu 95 % reduziert, da die Beweglichkeit von Molekülen invers proportional zum Gasdruck ist. Der Vakuumdruck wird während den Versuchen konstant auf 30 mbar gehalten.

Bevor eine Versuchsreihe gestartet wird, muss der Zusammenhang zwischen der Säurekonzentration und der relativen Luftfeuchte bekannt sein, damit dieser genau gesteuert werden kann.

Nachdem die H_2SO_4 - Lösung sowie die Proben, die oberhalb der Lösung an einem Drahtgestell am Pfropfen hängen, in den Kolben eingebracht sind, wird der Feuchte- und Temperaturmessfühler sowie die Vakuumpumpe angeschlossen und der Versuch gestartet.

Wenn sich die mit dem Messfühler erfasste relative Luftfeuchte im Gefäß bei konstanter Temperatur nicht mehr ändert, ist der Gleichgewichtszustand zwischen dem Porenwasserpotential und dem Potential des Wasserdampfes erreicht. Danach kann der Versuch gestoppt und die Proben ausgebaut werden.

Der zugehörige Wassergehalt in der Probe wird durch Ofentrocknung bestimmt und die gegebenenfalls veränderten Abmessungen der Probe werden mittels einer Schieblehre erfasst. Die totalen Saugspannungen werden mittels der Kelvin Gleichung (3.3-1) ermittelt.

4.3.3.3 Auswertung der Messergebnisse

Der Zusammenhang zwischen der Säurekonzentration und der sich im Gefäß einstellenden relativen Luftfeuchte bei einem Vakuumdruck von 30 mbar ist vorab ermittelt worden, siehe Abb. 4.3-7.

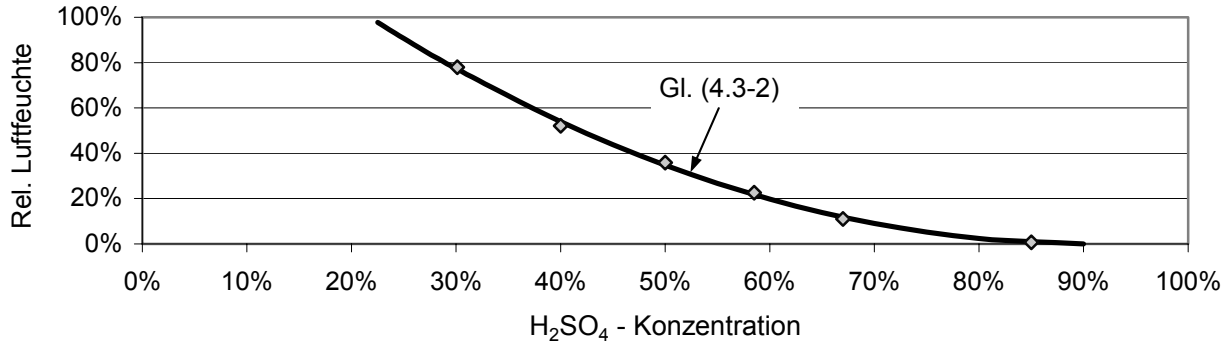


Abb. 4.3-7 Zusammenhang zwischen H_2SO_4-Lösungskonzentration und relativer Luftfeuchte p_V = 30 mbar , T = 20 °C.

Es zeigt sich, dass mit zunehmender Konzentration der Säure die relative Luftfeuchte im Kolben signifikant abnimmt. Ab einer H_2SO_4 - Konzentration von ca. 85 - 90 % ergibt sich die relative Luftfeuchte im Kolben zu Null.

Die in Abb. 4.3-7 dargestellte Beziehung zwischen der H_2SO_4 – Lösungskonzentration AC und der relativen Luftfeuchte RH kann nach folgender Gleichung approximiert werden:

$$RH = 2{,}1 \cdot AC^2 - 3{,}81 \cdot AC + 1{,}728 \quad [-] \qquad 0{,}22 \le AC \le 0{,}90 \qquad (4.3\text{-}2)$$

In Abb. 4.3-8 sind exemplarisch für zwei verschiedene Versuche die Verläufe in der relativen Luftfeuchte im Erlenmeyerkolben über die Zeit dargestellt.

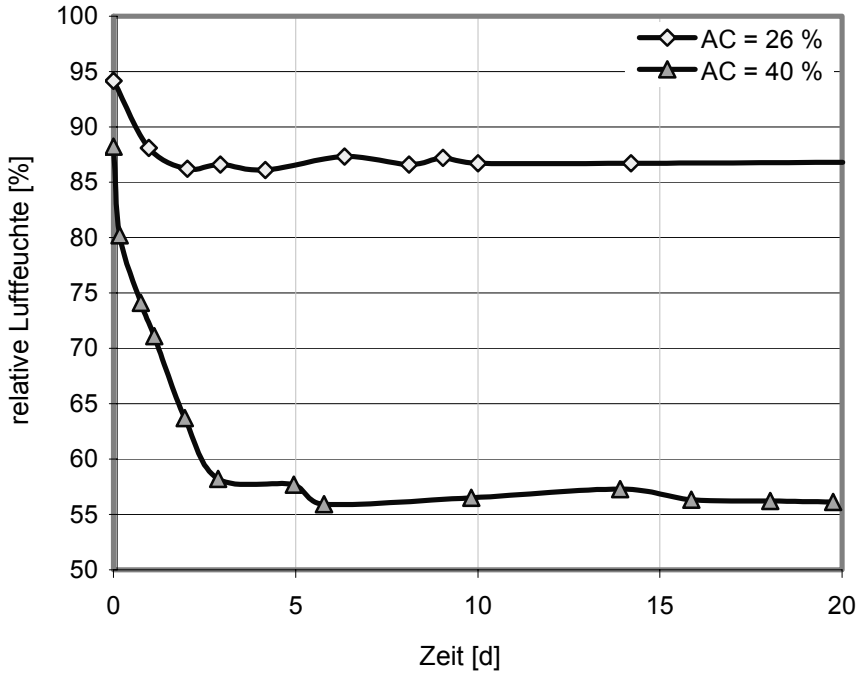


Abb. 4.3-8 Relative Luftfeuchte im Erlenmeyerkolben während 2 Versuchen mit verschiedenen H_2SO_4 - Lösungskonzentrationen, p_V = 30 mbar , T = 20 °C.

In den jeweiligen Versuchen sind je 2 Versuchsproben in dem Drahtgestell über der Lösungskonzentration AC platziert worden, siehe Abb. 4.3-5. Der eine Versuch ist mit einer H_2SO_4 - Lösung AC = 26 % durchgeführt worden, wobei in dem anderen Versuch die H_2SO_4 - Lösung eine Konzentration AC = 40 % aufwies.

Es ist klar zu erkennen, dass sich im Versuchskolben innerhalb von 3 bis 7 Tagen eine gleich bleibende relative Luftfeuchte einstellt. Damit ist jedoch noch nicht eindeutig gewährleistet, dass sich bereits nach dieser Zeit der Gleichgewichtswassergehalt in den Proben eingestellt hat. Aus diesem Grund wird die Versuchsdauer höher festgesetzt, auf 14 Tage. Des Weiteren ist festzustellen, dass in den Versuchen sich ungefähr die relative Luftfeuchte RH nach Gleichung (4.3-2) einstellt hat.

In Tabelle 4.3-2 sind die Resultate der Tests im Vakuum - Austrocknungs - Apparat zusammengestellt.

Tabelle 4.3-2: Versuchsergebnisse Vakuum - Austrocknungs - Methode

	Ausbaudaten				
Versuch	Porenzahl e [-]	Sättigungsgrad S_r [-]	Temperatur T [°C]	RH [%]	pF [-] nach Gl. (3.2-7) und Gl. (3.3-1)
1	0,87	0,11	20,3	56,1	5,89
2	0,77	0,14	20,3	86,9	5,28
3	0,77	0,15	20,5	74,9	5,59
4	0,87	0,13	20,1	76,7	5,55
5	0,79	0,47	19,8	99,2	4,04
6	0,77	0,49	19,7	98,9	4,18
7	0,79	0,38	20,2	98,3	4,37
8	0,78	0,38	20,5	98,1	4,41
9	0,69	0,16	20,3	86,8	5,28
10	0,67	0,17	20,1	86,7	5,29
11	0,68	0,17	20,1	86,7	5,29

4.3.4 Anpassung der mathematischen Formulierung

In Abb. 4.3-9 sind die pF-Werte aus der Tensiometermessung, der sogenannten „Axis-Translation“ - Methode im Drucktopf und der Vakuum - Austrocknungs - Methode zusammengefasst. Die Beziehungen sind in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad S_r für die Porenzahlen a) $e \approx 0{,}88$, b) $e \approx 0{,}78$ und c) $e \approx 0{,}68$ dargestellt.

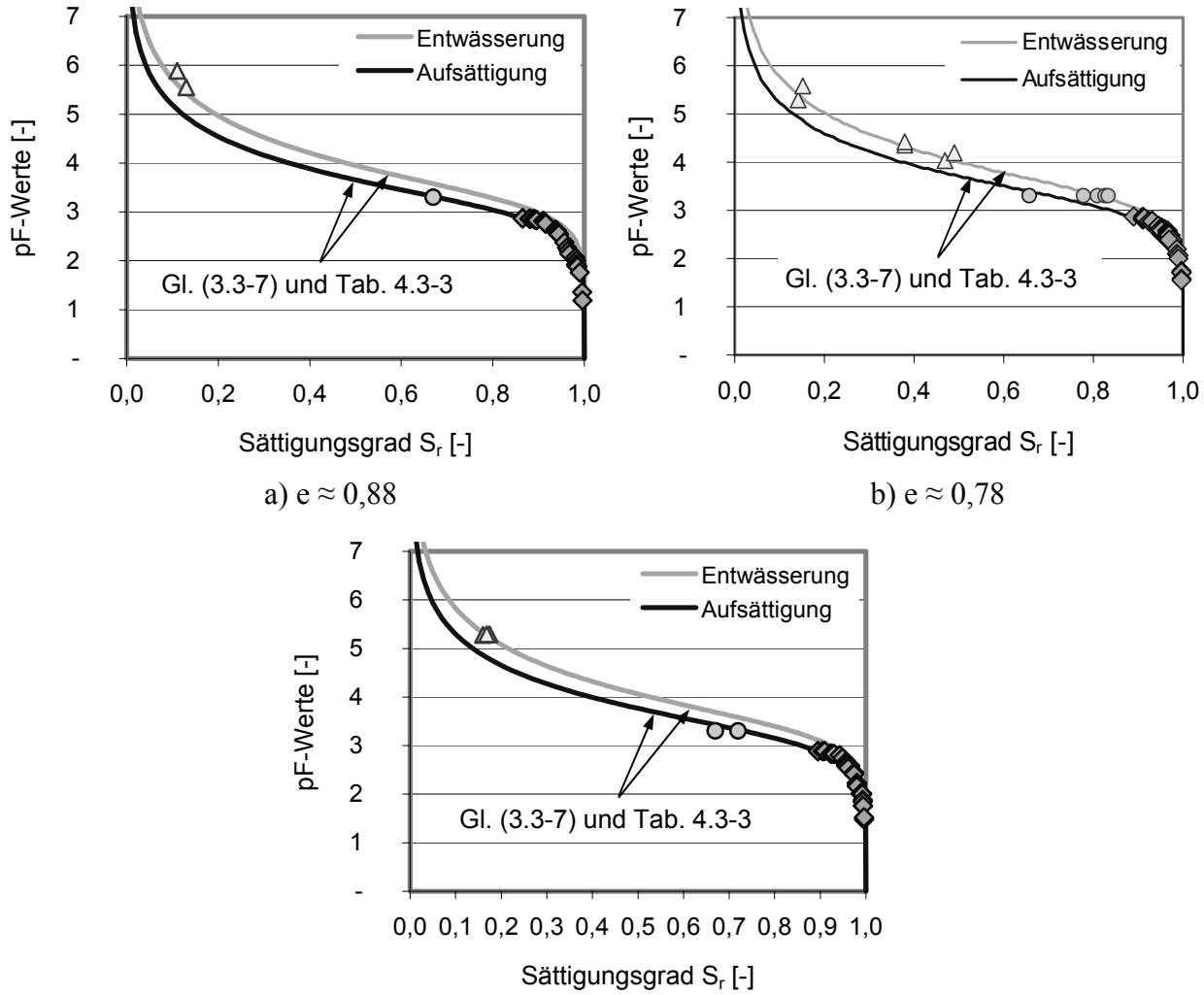
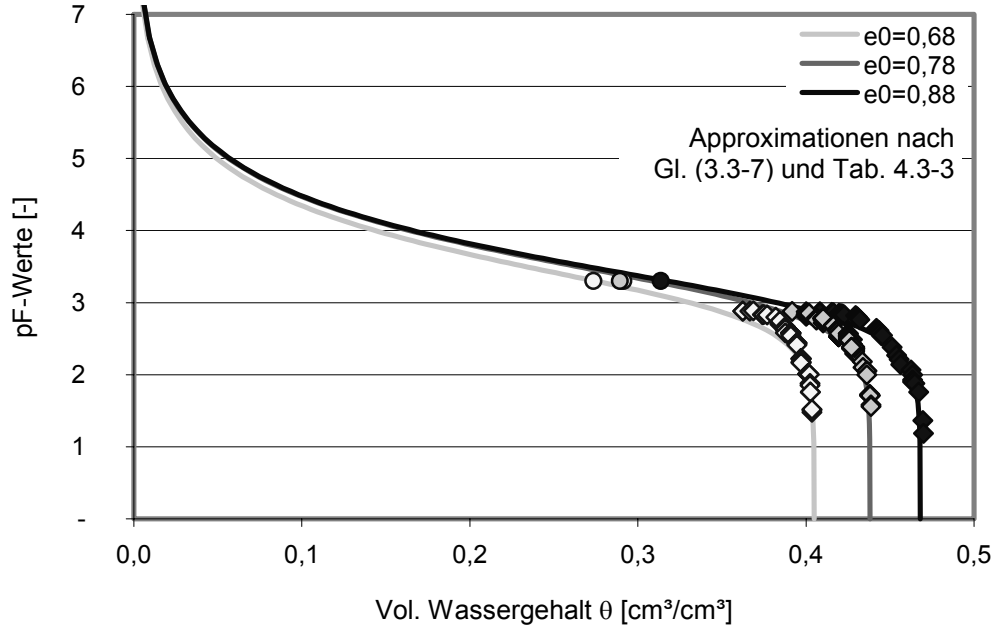


Abb. 4.3-9 Zusammenstellung der Saugspannung - Sättigungsbeziehungen für verschiedene Porenzahlen e.

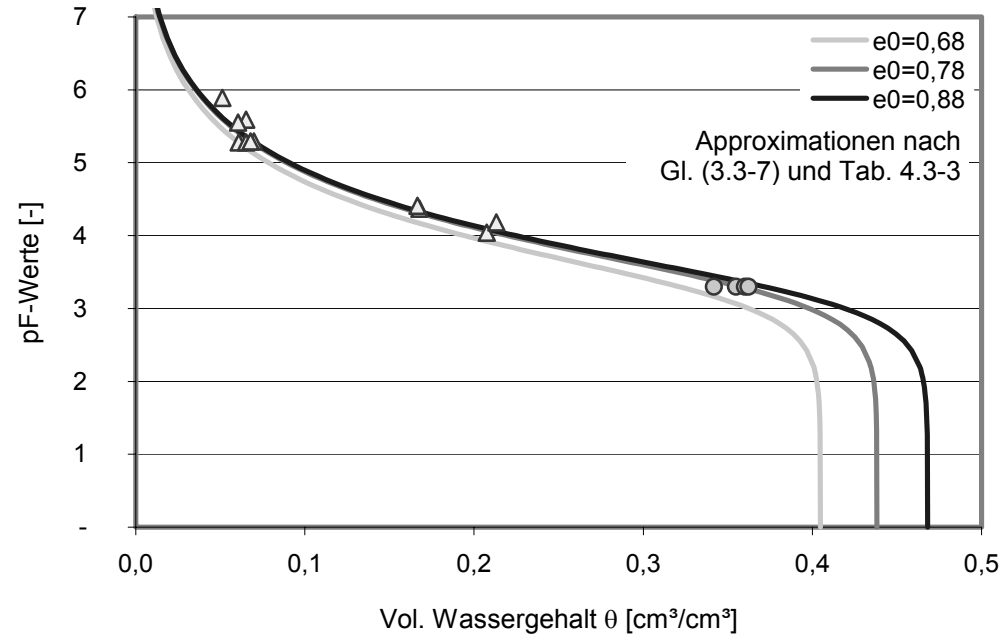
Die einzelnen Datenpunkte beschreiben die Versuchsergebnisse und die durchgezogenen Linien die Approximationen der Versuchsresultate nach Gleichung (3.3-7) mit den Werten aus Tabelle 4.3-3.

In den Saugspannungsverläufen über die Sättigung S_r ist kein deutlicher Hysteresis - Effekt für die Be- und Entwässerung zu erkennen. Der angenäherte Verlauf der Be- und

Entwässerungskurven wird durch die Approximation nach Gleichung (3.3-7) gegeben. Näher erklärt und beschrieben wird dieser Hysteresis - Effekt in Abschnitt 3.3.3. Für die unterschiedlichen Porenzahlen lässt sich jedoch kein signifikanter Unterschied im Verlauf der Kurven erkennen.



a) Bewässerung



b) Entwässerung

Abb. 4.3-10 Zusammenstellung der Saugspannung - Sättigungsbeziehungen für a) die Bewässerung und b) die Entwässerung in Abhängigkeit von der Porenzahl e.

Um die Ähnlichkeiten bzw. die Unterschiede in den pF - Kurvenverläufen zu verdeutlichen, sind die betrachteten Porenzahlen in Abb. 4.3-10 a) für die Bewässerung und b) für die Entwässerung noch einmal, jedoch in Abhängigkeit vom volumetrischen Wassergehalt θ, gegenübergestellt.

Der in Abb. 4.3-10 verwendete volumetrische Wassergehalt θ steht in folgendem Zusammenhang mit dem Sättigungsgrad S_r und der Porenzahl e:

$$\theta = \frac{S_r \cdot e}{1 + e} \qquad \left[cm^3/cm^3\right] \tag{4.3-3}$$

Aus Abb. 4.3-10 wird deutlich, dass sich die Kurven im oberen Saugspannungsbereich annähernd decken. Nur im unteren Bereich gibt es, aufgrund der unterschiedlichen volumetrischen Wassergehalte zur vollen Sättigung, Verschiebungen der einzelnen Kurven.

Für den untersuchten Porenzahlbereich ist die Veränderung in der Saugspannung - Sättigungsbeziehung relativ geringfügig.

Zur Approximation der pF-Kurven in Abhängigkeit von der Porenzahl und dem Sättigungsgrad wird das modifizierte van Genuchten Modell von Wendling (2004), Gleichung (3.3-7), verwendet. Die Parameter a_1, a_2 und a_3 ergeben sich für die Be- und Entwässerung nach Tabelle 4.3-3.

Tabelle 4.3-3: Werte der Parameter für Gl. (3.3-7)

	Entwässerung	Aufsättigung
a_1	1500	1000
a_2	3,50	3,00
a_3	0,71	0,71

Die Approximationen nach Gleichung (3.3-7) mit den Werten in Tabelle 4.3-3 sind bereits in den Abb. 4.3-2, 4.3-9 und 4.3-10 eingezeichnet. Es zeigt sich eine sehr gute Übereinstimmung der mathematischen Formel mit den Versuchsergebnissen.

Zur numerischen Simulation wird die Saugspannung - Sättigungsbeziehung tabellarisch in die ABAQUS - Inputdatei (*.inp) eingegeben.

5 Experimentelle Untersuchungen zum Quellen

Das Ziel der Untersuchungen ist es, das Volumenänderungsverhalten infolge Feuchteänderungen unter Beachtung der Anfangs- und Randbedingungen, zu erfassen sowie die Funktionen in den Gleichungen (3.7-1) und (3.7-3) zu bestimmen.

Zu den angesprochenen Anfangs- und Randbedingungen gehören der Primärspannungszustand $I_{\sigma,0}$, die Temperatur T, die Porenzahl e_0, der Sättigungsgrad $S_{r,0}$, die Luftfeuchte H, die Zeit t und die Herstellungsgeschichte der Proben.

5.1 Vorversuche

Zur Entwicklung einer geeigneten und reproduzierbaren Probenherstellung sowie zur Voruntersuchung der Quell- und Schrumpfeigenschaften des gewählten Versuchsmaterials werden die Vorversuchsserien 1 bis 3 durchgeführt.

In der ersten Vorversuchsserie werden das Quelldehnungsverhalten der Proben in axialer und radialer Richtung und die Feuchtigkeitsausbreitung in den Proben untersucht. Die Versuche werden in einem konventionellen Triaxialgerät bei ausschließlicher Bewässerung von unten gefahren.

In der zweiten Vorversuchsserie werden analog zur Vorversuchsserie 1 das Quelldehnungsverhalten in axialer und radialer Richtung sowie die Feuchtigkeitsausbreitung in den Proben anhand spezieller Triaxialversuche mit allseitiger Bewässerung der Versuchskörper in einem „Schaumstoffkorsett“ untersucht.

In einer dritten Vorversuchserie wird das Schrumpfverhalten der Proben frei von Überlagerungsspannungen betrachtet. Untersucht wird das Schrumpfen von Kaolinit - Proben in axialer und radialer Richtung unter bestimmten Ausgangsbedingungen. Des Weiteren soll analysiert werden welche am Tonmineral gebundene Wasserart für das quell- bzw. schrumpfbedingte Volumenänderungsverhalten eine Rolle spielt.

5.1.1 Vorversuchsserie 1: Quellversuche in einem konventionellen Triaxialgerät

Die Untersuchungen der ersten Vorversuchsserie konzentrieren sich auf das Quelldehnungsverhalten des Versuchsmaterials in axialer und radialer Richtung bei einer Bewässerung von unten in einer Triaxialzelle. Des Weiteren wird die Güte der Probenherstellung

und der Reproduzierbarkeit der Versuchskörper sowie die Wasserausbreitung in den Proben nach dem Versuch überprüft.

In einer konventionellen Triaxialzelle, siehe Abb. 5.1-1, werden die Durchströmungs-Quell-Versuche der Vorversuchsserie 1 durchgeführt. Variiert wird der initiale Sättigungsgrad $0{,}66 \leq S_{r,0} \leq 1{,}00$, wobei in jeder Versuchsreihe die Anfangsporenzahl e_0 konstant gehalten wird. Es werden Versuchsreihen mit den Porenzahlen $e_0 = 0{,}57$ und $e_0 = 0{,}69$ durchgeführt. Die Versuchszeit t ist auf 5-6 Tage beschränkt.

Abb. 5.1-1 Durchströmungs-Quellungsversuch in einer herkömmlichen Triaxialzelle.

Die Vorversuche führten zu folgender Probenherstellung in der Vorversuchsserie 1. Das Tonmehl (Wassergehalt w = 3,0%) wird mit destilliertem Wasser in einem Zwangsmischer zu w_0 homogenisiert und 48 Stunden stehen gelassen. Dadurch ist gewährleistet, dass die Quellverformungen des Materials infolge Anmischen mit w_0 abgeklungen sind. In späteren Versuchen wird festgestellt, dass diese Ausgleichszeit auf 24 h reduziert werden kann. Anschließend wird das Probenmaterial in einem Mixer zerkleinert, um bei der Probenherstellung größere Lufteinschlüsse zu vermeiden. Die Probekörper werden im Proctortopf hergestellt und zwar mit 7 Einbaulagen zu je 2 cm Dicke und der definierten Verdichtungsenergie von 25 Schlägen pro Lage. Nachfolgend wird die Probe mit der Probenhöhe von 14 cm auf 12 cm

gekürzt, 24 h statisch nachverdichtet und anschließend der oberste und der unterste Teil der Probe entfernt und somit die endgültige Probenhöhe von 10 cm erreicht. Dieses komplizierte Herstellungsverfahren gewährleistet eine weitgehend konstante Anfangswassergehaltsverteilung über die Probenhöhe (siehe Abb. 5.1-2) sowie die Erreichung des gewünschten Sättigungsgrades. Des Weiteren hat sich gezeigt, dass sich nach der Versuchsdurchführung eine kontinuierliche, stetige Wassergehaltsverteilung einstellt. Durch dieses Verfahren ist die Reproduzierbarkeit der Probenherstellung gewährleistet. Eine modifizierte Probenherstellung für die weiteren Versuche wird noch betrachtet, da die Vorbelastung durch diese Probenherstellung sehr hoch und deren Größe nicht genau definierbar ist und somit in zukünftigen Versuchen auch nicht konkret variiert werden kann.

Die zylindrischen Proben mit einem Durchmesser sowie einer Höhe von je 10 cm werden in Triaxialgeräte eingebaut. Die axiale Quellverformung wird über einen elektronischen Wegaufnehmer gemessen und die radiale Quelldehnung über 3 Messbandagen, die über den Mantel der Probe verteilt sind und deren Dehnungen (Verlängerungen) visuell erfasst werden. Die Zuflüsse werden über den Weg eines Kolbens im Druckzylinder des Triaxialgerätes, die Abflüsse mittels Pipetten erfasst.

Nach Abschluss des Versuchs wird die Probe in 6 gleich große Scheiben geschnitten und jeweils der Wassergehalt und die Dichte bestimmt. Daraus lässt sich u.a. die Wasserverteilung über die Probenhöhe im Endzustand angeben.

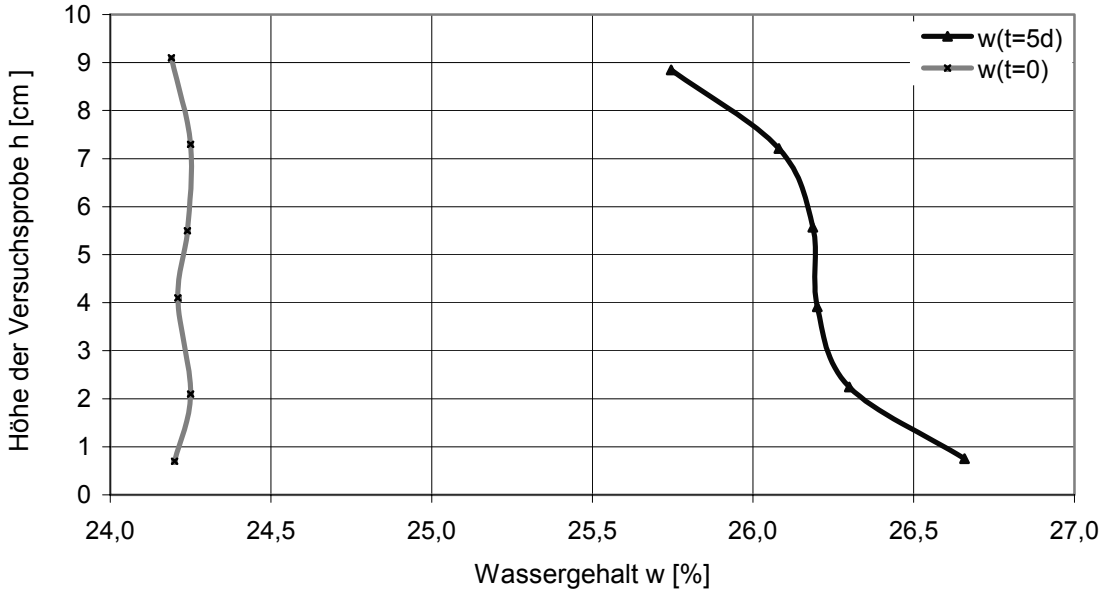


Abb.5.1-2 Anfangswassergehaltsverteilung w_0 und Wassergehaltsverteilung w (t = 5d) nach dem Versuch TR6 über die Probenhöhe, $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}94$, i = 80 , $\sigma_3 = 90$ kPa.

Exemplarisch für den Versuch TR6 ist in Abb. 5.1-2 die Wassergehaltsverteilung in der Probe nach der Probenherstellung und die Wassergehaltsverteilung in der Probe nach der Versuchsdurchführung mit der Versuchsdauer t = 5 Tage dargestellt. Es ist festzustellen, dass der Wassergehalt über die Probenhöhe vor Versuchsbeginn annähernd konstant ist. Die Wassergehaltsverteilung im Probenkörper nach Versuchende spiegelt den Durchströmungsprozess während des Tests von unten nach oben wieder. Um die relativ große Differenz in der Wassergehaltsverteilung über die Probenhöhe zum Versuchende ($\Delta w \approx 0{,}9$ %) zu kompensieren sowie die Versuchszeit eventuell zu verkürzen, käme eine geringere Probenhöhe in den Hauptversuchen in Frage.

Es werden während des Versuches die Zufluss- und die Abflussmengen an Wasser in die Probe bzw. aus der Probe erfasst. Im Folgenden werden exemplarisch Ergebnisse von 2 Versuchen [TR2, TR10] vorgestellt. Die Versuchsprobe TR2 besitzt einen initialen Sättigungsgrad $S_{r,0} = 0{,}98$ und die des Versuchs TR10 eine Anfangssättigung $S_{r,0} = 0{,}89$. Sonst sind die beiden Testkörper und der Versuchsablauf identisch.

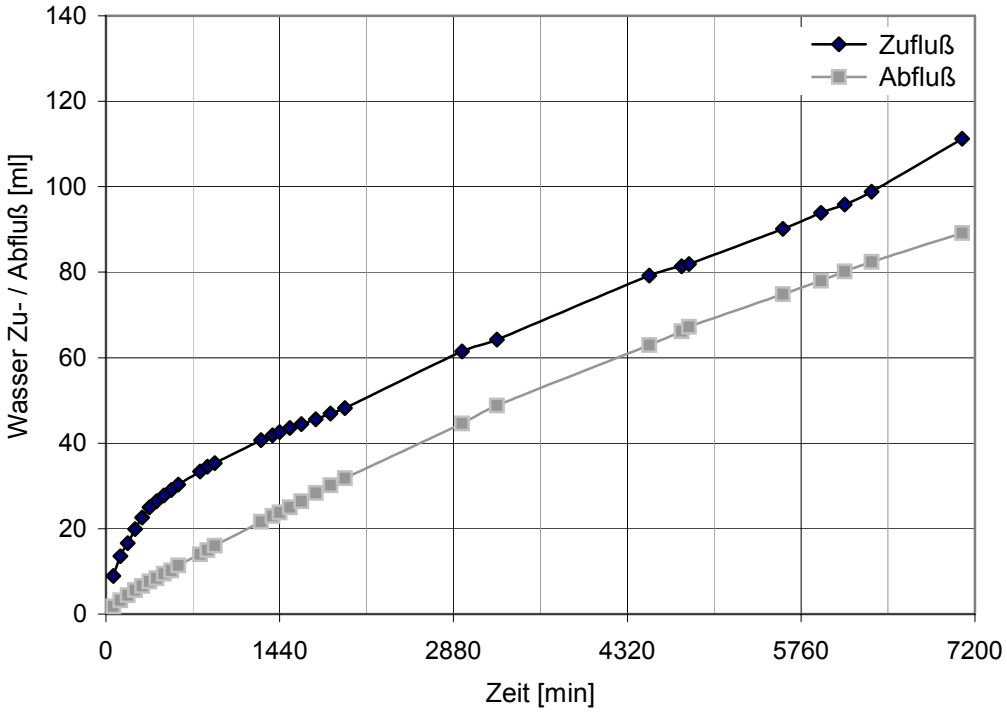


Abb.5.1-3 TR2: Zu- und Abflussmengen Summenlinie über die Versuchsdauer von 5 Tagen, $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}98$, $i = 80$, $\sigma_3 = 90$ kPa.

Abb. 5.1-3 zeigt die Summenlinien des zu- und abströmenden Wassers von dem Versuch TR2. Die Differenz der beiden Kurven beschreibt das in der Probe gespeicherte Wasser. Bereits nach

12 Stunden bleiben die Summenlinien annähernd parallel, d.h., dass die quellverformungsbedingte Speicherkapazität der Probe nach diesem Zeitpunkt bereits erschöpft ist. Bei der Probe TR10 mit der geringeren Anfangssättigung verlaufen die beiden Summenlinien erst nach ca. 48 Stunden parallel, siehe Abb. 5.1-4. Dies zeigt auf, dass sich die Wasseraufnahme und somit auch der Quellvorgang zeitlich verlängert, je niedriger die initiale Sättigung ist.

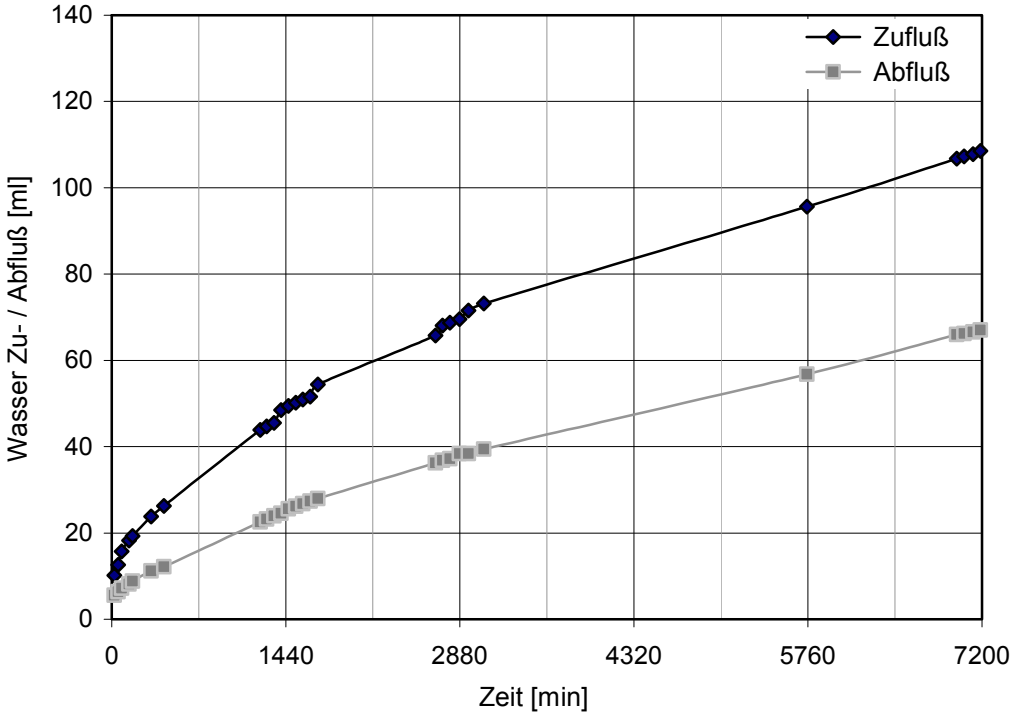


Abb.5.1-4 TR10: Zu- und Abflussmengen Summenlinie über die Versuchsdauer von 5 Tagen, $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}89$, $i = 80$, $\sigma_3 = 90$ kPa.

Die in Abb. 5.1-4 aufgetragene Summenlinie für den Zufluss des Versuches TR10 im Vergleich mit der des Versuches TR2, Abb. 5.1-3, zeigt, dass dieser zum Ende des Versuches praktisch identisch ist. Dies spricht u.a. für ein sehr gutes Ergebnis der Reproduktion der Probekörper. Nur der Ausfluss an Wasser aus den beiden Proben unterscheidet sich. Die Wasserspeicherkapazität der trockeneren Probe ist, wie erwartet, höher.

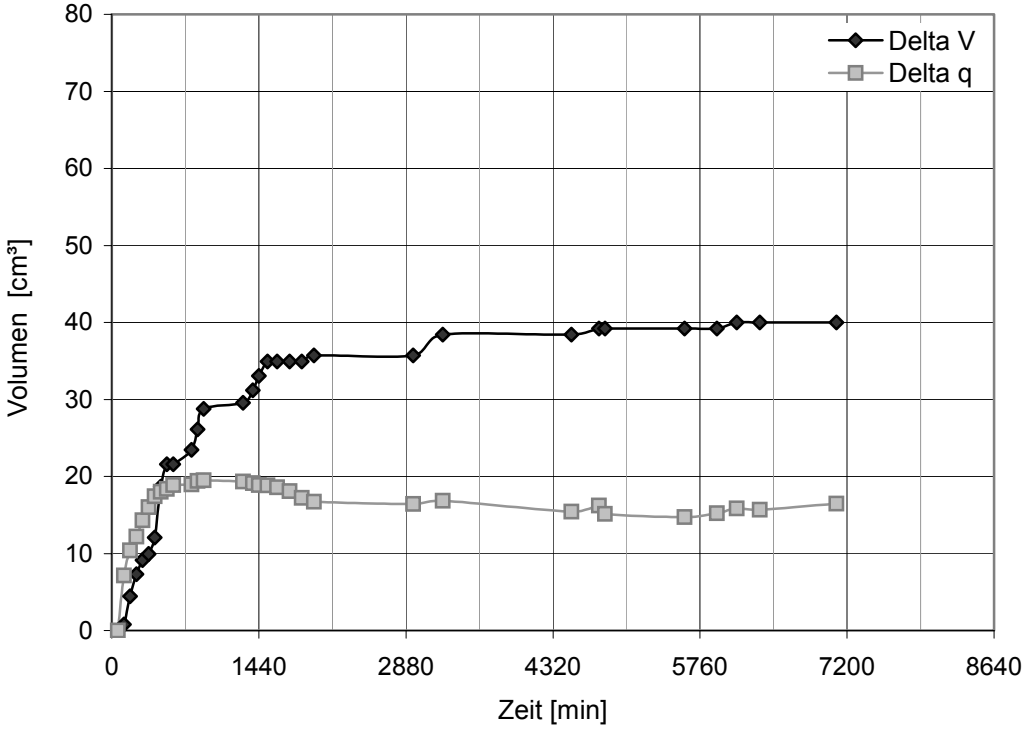


Abb.5.1-5 TR2: Zeitabhängige Volumenänderung ΔV und Wasseranlagerung Δq , t = 5d, $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}98$, i = 80 , $\sigma_3 = 90$ kPa.

Das in Abb. 5.1-5 und Abb. 5.1-6 dargestellte Quellvolumen ΔV berechnet sich analog zu Gleichung (3.6-10) wie folgt:

$$I_\varepsilon = \varepsilon_1 + 2 \cdot \varepsilon_3 \tag{5.1-1}$$

$$\Delta V = I_\varepsilon \cdot V_0 \tag{5.1-2}$$

Die Quellvolumina ΔV sowie Δq bleiben beim Versuch TR2 nach 3 Tagen annähernd konstant, siehe Abb. 5.1-5, und im Versuch TR10 nach circa 5 Tagen, siehe Abb. 5.1.6. Dieser Bereich der Versuchszeit bis zur Stagnation der Quellverformungen spiegelt sich auch bei den anderen Versuchen dieser Vorversuchsserie 1 ab. Damit wird die Versuchszeit für die Hauptversuche auf ein Minimum von 5 Tagen nach unten hin begrenzt.

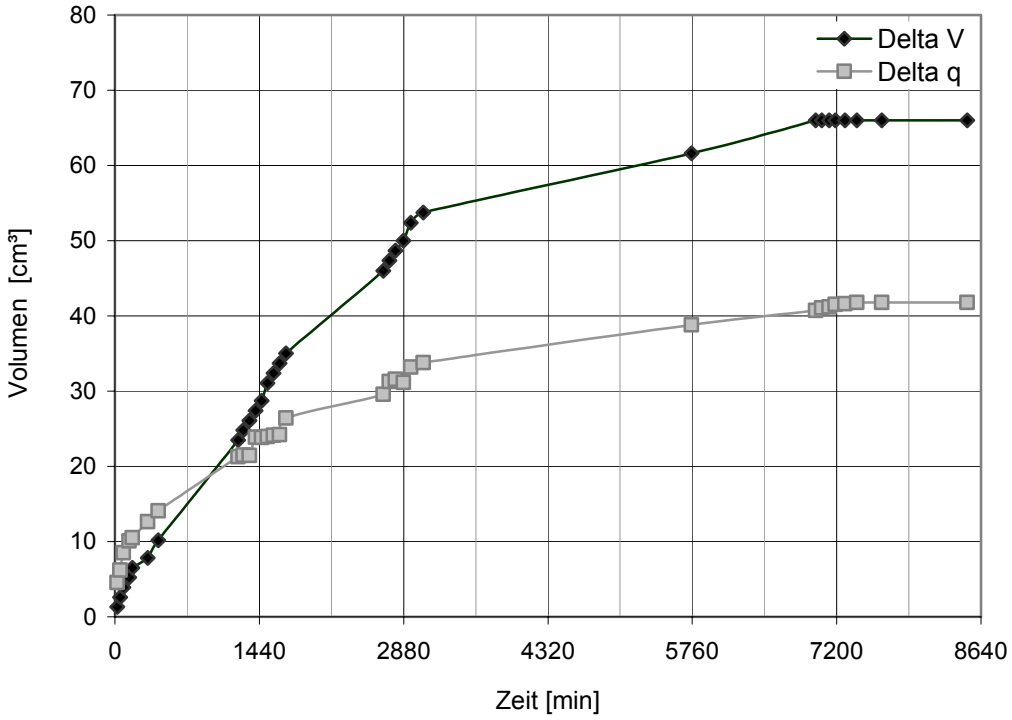


Abb.5.1-6 TR10: Zeitabhängige Volumenänderung ΔV und Wasseranlagerung Δq , t = 5d, $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}89$, i = 80 , $\sigma_3 = 90$ kPa.

Vergleicht man die Differenz Δq aus Zu- und Abflusssummenlinien der Versuche TR10 (Abb. 5.1-6) und TR2 (Abb. 5.1-5), erkennt man, dass diese Differenz zwischen den beiden Summenlinien zu Versuchsende etwa 25 cm³ beträgt. Dieses Volumen an Wasser nimmt die Probe TR10 mit einem $S_{r,0} = 0{,}89$ mehr auf als die Probe TR2 mit einem $S_{r,0} = 0{,}98$. Erstaunlich dabei ist, dass das ungefähr der Wassermenge entspricht, die benötigt würde, um den Probekörper TR10 im Ausgangszustand zu sättigen. Dies lässt vermuten, dass die weniger gesättigte Probe nur das Volumen mehr an Wasser speichert, welches sie benötigt, um zu sättigen gegenüber einer nahezu gesättigten Probe. Dieses Phänomen ist noch näher zu untersuchen.

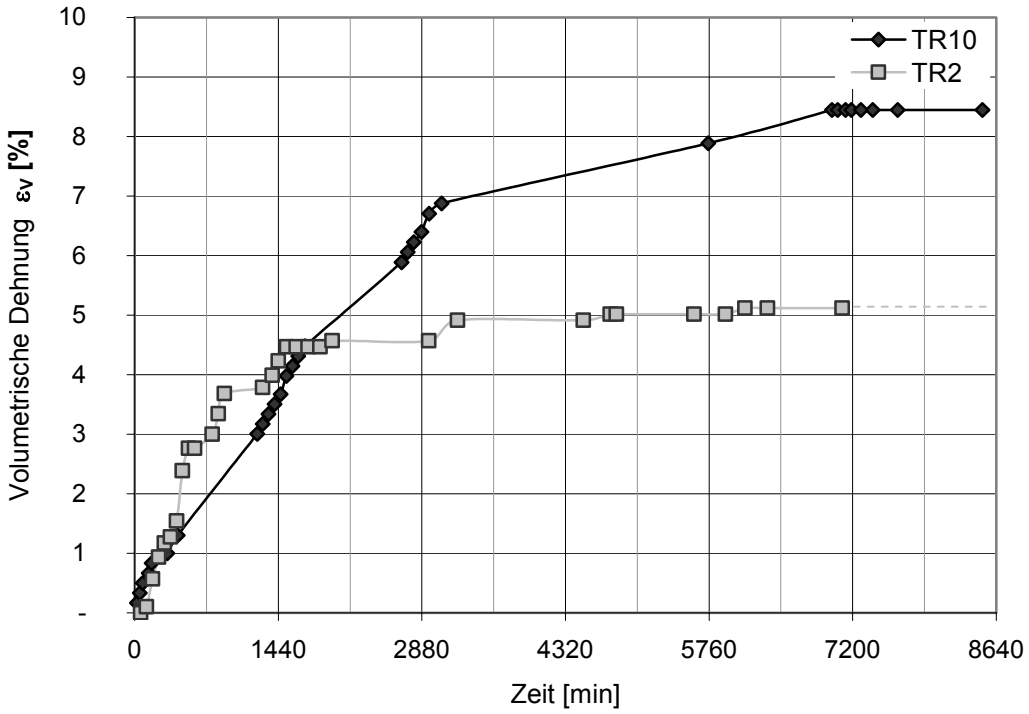


Abb.5.1-7 Zeitabhängige volumetrische Dehnung ε_V der Proben TR10 und TR2 im Vergleich, t = 5d, $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0}(TR10) = 0{,}89$, $S_{r,0}(TR2) = 0{,}98$, i = 80 , $\sigma_3 = 90$ kPa.

Die volumetrische Dehnung ε_v der beiden Probekörper TR2 und TR10 ist in Abb. 5.1-7 dargestellt. Gegen Versuchsende beträgt für Probe TR2 $\varepsilon_v = 5{,}1$ % und für Probe TR10 $\varepsilon_v = 8{,}4$ %. Der niedrigere Anfangssättigungsgrad der Probe TR10 hat einen erheblichen Einfluss auf die Größe der Quelldehnung.

Abb. 5.1-8 stellt exemplarisch am Versuch TR2 die zeitabhängige Quelldehnung in axialer sowie in radialer Richtung gegenüber. Die quellbedingten radialen Dehnungen sind aufgefächert in die radialen Dehnungen der unteren, mittleren und oberen Messbandage.

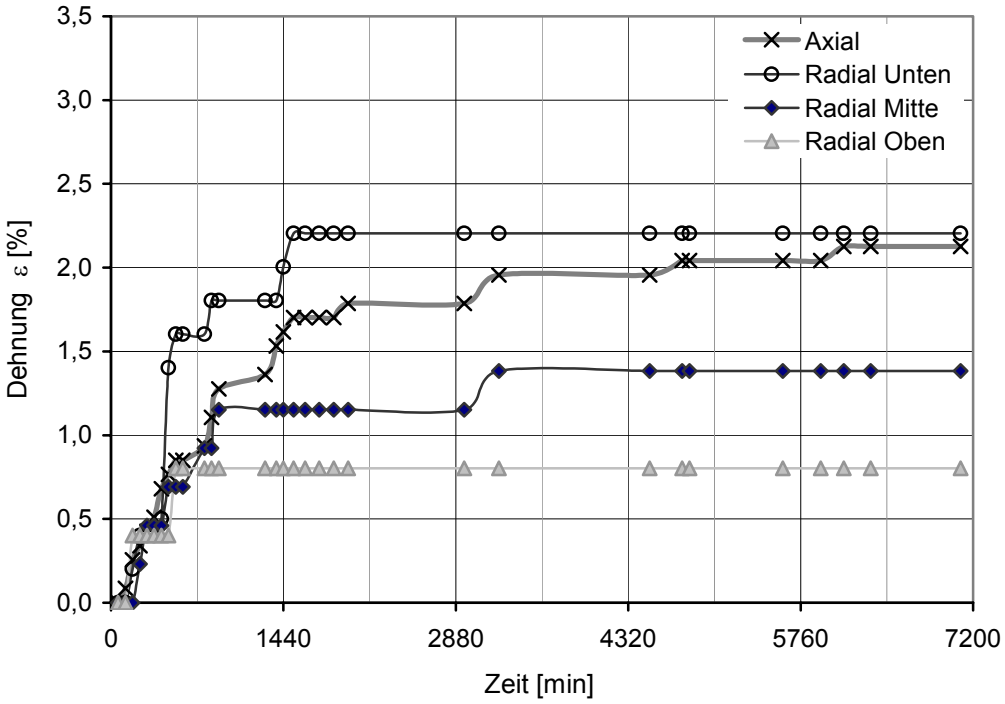


Abb.5.1-8 Zeitabhängige axiale Dehnung ε_a und radiale Dehnungen $\varepsilon_{r,i}$ an den einzelnen Messbandagen im Versuch TR2, $t = 5d$, $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}98$, $i = 80$, $\sigma_3 = 90$ kPa.

Es ist festzustellen, dass das triaxiale Quellverhalten in diesem Versuch keineswegs homogen ist. Die untere radiale Messbandage erfährt die größte und die obere die kleinste Dehnung. Dieses Phänomen spiegelt die inhomogene Wasserverteilung im Versuchskörper wieder (siehe Abb. 5.1-2) die auf den Durchströmungsprozess von unten nach oben zurückzuführen ist. Diese Tendenz der Radialdehnungen zeichnet sich auch in den Ergebnissen der anderen Versuche der Vorversuchsreihe 1 ab. Es ist davon auszugehen, dass sich in dieser Randzone durch weitere Wasseranlagerung im Bereich des niedrigeren Wassergehaltes nahe der Kopfplatte ein weiteres Quellen ergeben könnte.

Aufgrund dieser Resultate wird die Probenhöhe vorerst für die weiteren Untersuchungen auf die Hälfte reduziert, um eine annähernd gleich bleibende Wassergehaltsverteilung in der Probe zu erreichen und die daraus resultierenden Quelldehnungen zu betrachten.

Zur dieser näheren Untersuchung des Quellverhaltens in radialer und axialer Richtung wird Vorversuchsserie 2 durchgeführt.

5.1.2 Vorversuchsserie 2: Quellversuche mit allseitiger Bewässerung

Die Tests der Vorversuchsserie 2 werden unternommen, um analog zu Vorversuchserie 1 die Güte der Probenherstellung zu verifizieren. Des Weiteren wird ein Augenmerk auf das quellbedingte Materialverhalten in Axial- und Radialrichtung gelegt.

Die zylindrische Probe mit einem Durchmesser von 4 cm und einer Einbauhöhe von ca. 5 cm wird mit einem homogenen Anfangssättigungsgrad $S_{r,0}$ in ein „Schaumstoffkorsett“ ohne Umschließung mit einer Membran eingebracht, siehe Abb. 5.1-9. Dieser Schaumstoff verhindert ein Ausschlämmen der Probe und lässt eine allseitige Verformung infolge Quellen der Probe zu. Das Schaumstoffkorsett mit der Probe wird mit einem steifen Stahlzylinder umschlossen. Eine Drainage wird in axialer Richtung in den Versuchskörper eingebracht, damit Luftüberdrücke in der Probe ausgeschlossen werden können.

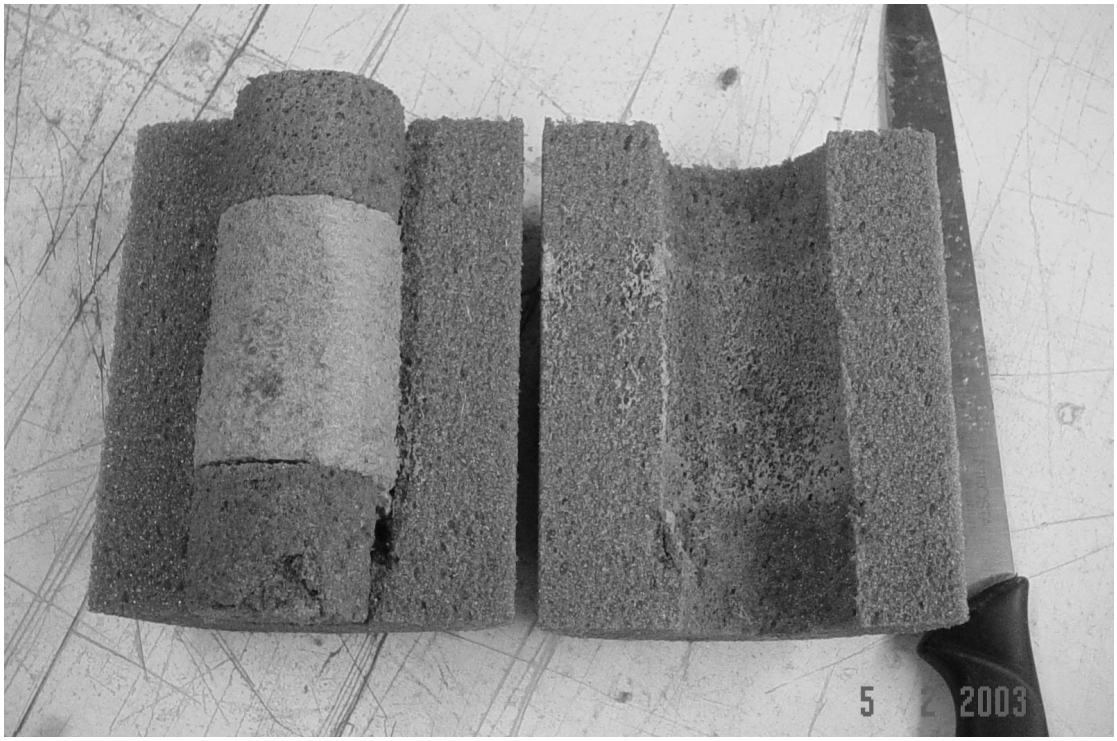


Abb. 5.1-9 Probekörper in seinem „Schaumstoffkorsett“ nach Versuchsende.

Die Versuchsproben werden mit hydrostatischen Drücken von 100 kPa beaufschlagt und der Versuchskörper beginnt sich in dieser Phase aufzusättigen. Registriert werden die axialen Verformungen unter Annahme von Isotropie ($\Delta\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_2 = \Delta\varepsilon_3$), die Versuchszeit, die Temperatur und die Zuflussmenge an entlüftetem Wasser in den Zylinder.

Während der Aufsättigung der Probe ($S_r \rightarrow 1{,}0$) verringert sich die effektive Spannung im Probenkörper und verschwindet total, wenn die Probe völlig gesättigt ist ($I_{\sigma'} = 0$). Bis zum

Abklingen der Quellverformungen bleibt sowohl die Temperatur T als auch der Zelldruck konstant. Die Proben wurden 24 h nach Anmischen des Materials mit dem vorgegebenen Wassergehalt w_0 mit dem hydrostatischen Druck beaufschlagt.

In Abb. 5.1-10 ist die Quelldehnung – Sättigungsbeziehung exemplarisch für eine Probe dargestellt. Die Probe wurde 7 Tage bewässert, bis die maximale volumetrische Quelldehnung erreicht war.

Die volumetrische Quelldehnung nimmt kontinuierlich zu, bis die Probe bei fast völliger Sättigung die maximale Dehnung $\varepsilon_V = 13{,}3$ % erfährt.

Weitere größte Quelldehnungen nach erfolgter Sättigung sind für verschiedene Anfangssättigungsgrade $S_{r,0}$ in Abb. 5.1-11 dargestellt. Die Proben hatten drei unterschiedliche initiale Porenzahlen.

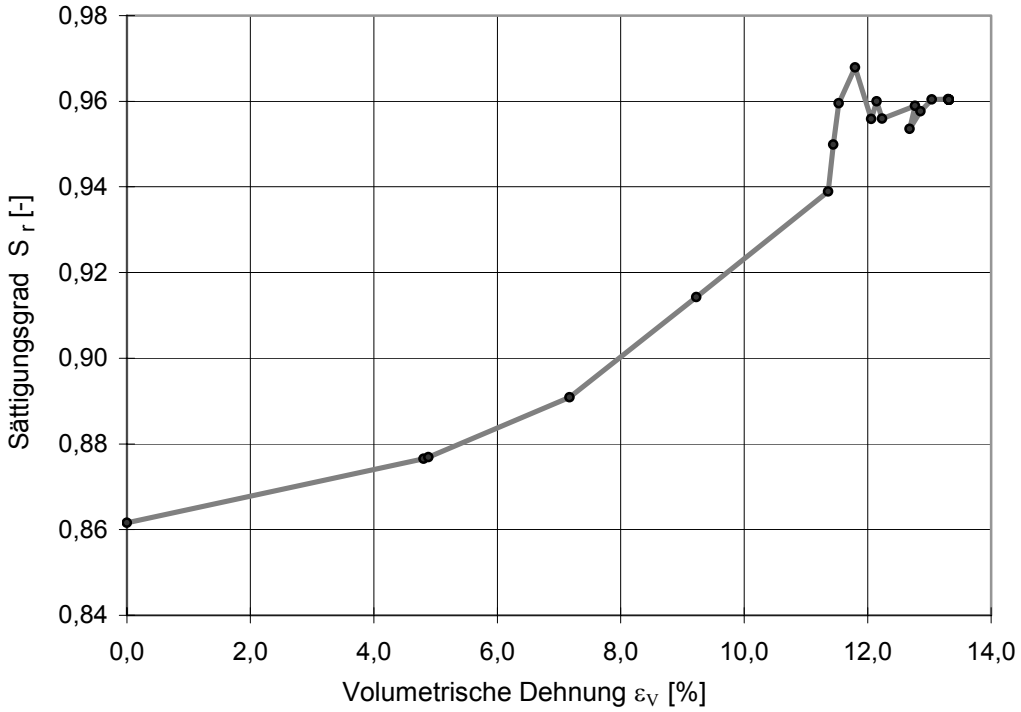


Abb. 5.1-10 Quelldehnung - Sättigungslinie, $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0} = 0{,}86$, T = 20 °C, $I_{\sigma'}$ ($S_r \rightarrow 1{,}0$) = 0 kPa.

Mit zunehmender Dichte sowie mit abnehmendem Anfangssättigungsgrad erhöhen sich die Quelldehnungen. Es scheint, dass mit abnehmendem Anfangswassergehalt alle Kurven ein gemeinsames Plateau besitzen.

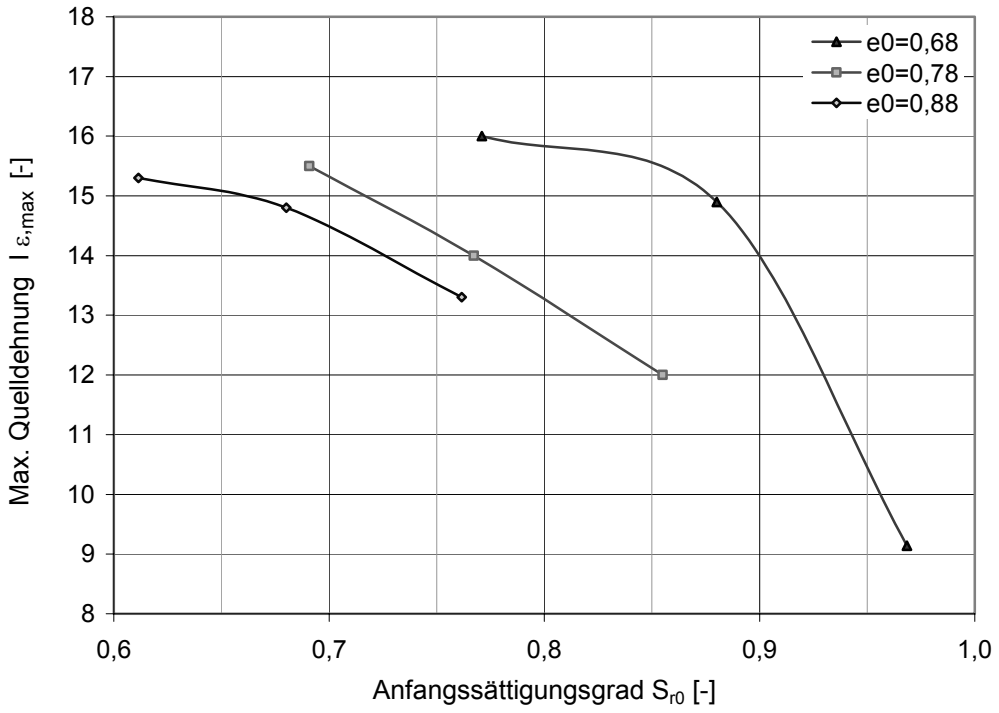


Abb. 5.1-11 Beziehung der max. Quelldehnungen zu dem initialen Sättigungsgrad mit verschiedenen Anfangsporenzahlen, T = 20 °C, $I_{\sigma'} = 0$ kPa, σ_v = konstant.

Des Weiteren ergaben die Untersuchungen, dass im Endzustand die Radialverformungen ε_r ungefähr 87 % bis 100% der axialen Deformationen ε_a sind. Damit ist die getroffene Isotropieannahme ($\Delta\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_2 = \Delta\varepsilon_3$) annähernd bestätigt und es wird im ersten Schritt davon ausgegangen, dass das triaxiale Quellverhalten in etwa homogen ist.

5.1.3 Vorversuchsserie 3: Schrumpfversuche

In der Vorversuchsserie 3 werden Versuche zum Schrumpfen durchgeführt, bei denen die Probe frei von Überlagerungsspannung zwischen zwei Filterplatten platziert wird, siehe Abb. 5.1-12. Die in der Bodenmechanik übliche Betrachtung des Schrumpfens feinkörniger Böden beginnt gewöhnlich beim flüssigen Zustand nahe der Fließgrenze aufbereiteten Materials, wie das auch für den Indexwert w_s in Tabelle 4.1-3 geschehen ist. Hier soll jedoch das Schrumpfverhalten der Versuchskörper unter bestimmten Ausgangsbedingungen, wie Dichte und Wassergehalt, untersucht werden.

Die Proben werden 24 h nach dem Anmischen statisch in einem Zylinder verdichtet, so dass die gewünschten Ausgangswerte gegeben sind. Variiert werden die Anfangsporenzahl [$e_{0,1}$=0,68 , $e_{0,2}$=0,78 , $e_{0,3}$=0,88] und der initiale Sättigungsgrad $0{,}75 \leq S_{r,0} \leq 1{,}00$. Nach Herstellung werden die Proben aus dem Zylinder ausgedrückt und zwischen zwei Filterplatten

mit aufgelegtem Filterpapier platziert. Die Schwellzeit vor Beginn der Versuche beträgt zusätzlich noch einmal 24 h. In diesem Zeitraum baut sich ein statischer, durch die Vorbelastung entstandener Porenwasserüberdruck, komplett ab und die Probe entspannt sich. Daraufhin startet der Versuch infolge Austrocknung bei isothermen Bedingungen. Das Filterpapier ermöglichte ein unbehindertes Gleiten der Probe. Die Verschiebungen in axialer und radialer Richtung werden mittels Schieblehren und der jeweilige Wassergehalt mittels Wägung ermittelt. Wenn gegen Ende des Versuches kein merklicher Gewichtsverlust infolge Austrocknung bei isothermen Bedingungen mehr eintritt, wird die Probe im Ofen bei 105°C heruntergetrocknet auf w = 0 %.

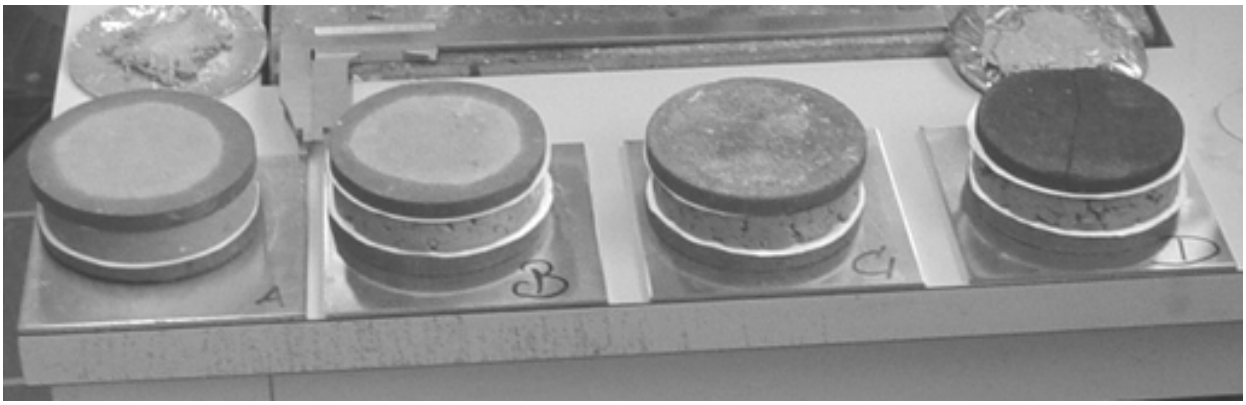


Abb. 5.1-12 Vier Probekörper in den Vorversuchen zum Schrumpfen.

Exemplarisch ist in Abb. 5.1-13 ein Ergebnis eines Schrumpfversuches an einer Probe mit den initialen Parametern $e_0 = 0{,}88$ und $S_{r,0} = 0{,}99$ dargestellt.

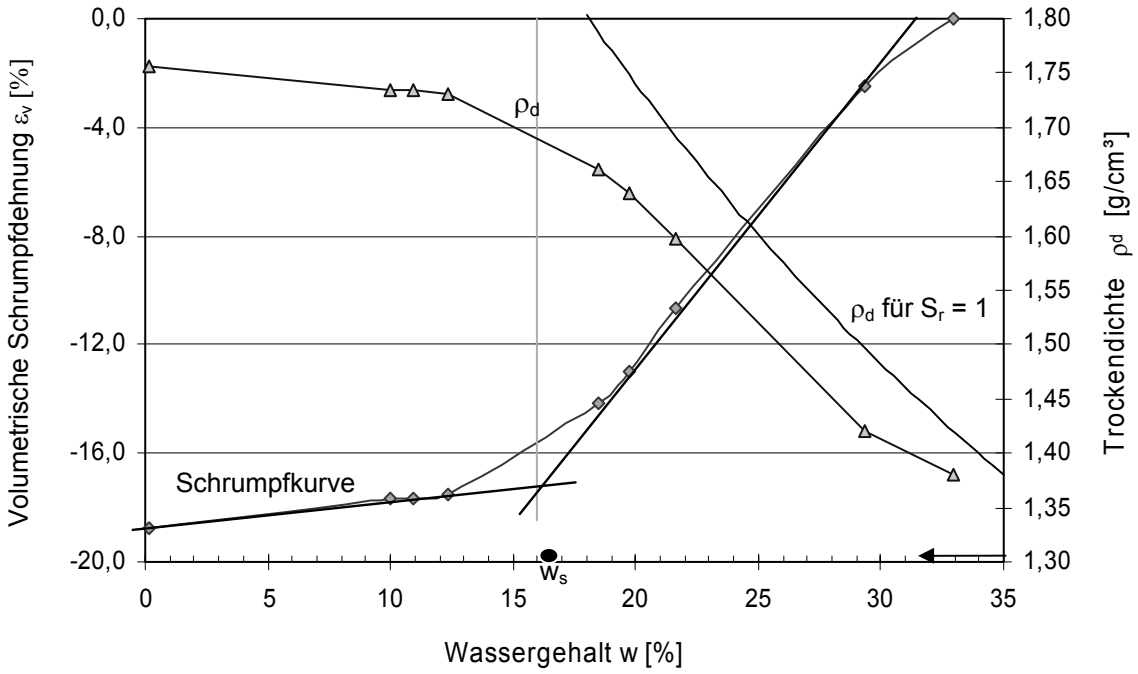


Abb. 5.1-13 Ergebnisse eines Schrumpfversuchs, $e_0 = 0{,}88$, $S_{r,0} = 0{,}99$, $w_0 = 0{,}33$, T = 20 °C.

Der Verlauf der Kurven der Volumenabnahme und der Dichtezunahme zeigt jeweils zwei deutlich voneinander zu unterscheidende Bereiche. Einen ersten Abschnitt vom Ausgangswassergehalt bis zur so genannten Schrumpfgrenze w_s und einen zweiten Abschnitt von $w = w_s$ bis $w = 0$. Im ersten Bereich erfolgt im Rahmen der Wassergehaltsabnahme eine Volumenreduzierung und damit eine starke Zunahme der Trockendichte. Dies geschieht unter einer nahezu gleich bleibenden Sättigung. Ab dem Kurvenabschnitt w_s gegen $w = 0$ liegen diese Verhältnisse gerade umgekehrt. Der Übergang zu diesem Bereich erfolgt relativ abrupt und wird mit dem Wert w_s gekennzeichnet. Es bleiben, wie erwartet, das Volumen und die Dichte ab der Schrumpfgrenze w_s nahezu konstant.

In Abb. 5.1-14 sind exemplarisch drei Schrumpfversuche mit unterschiedlicher Anfangssättigung und konstanter Porenzahl zu Beginn der Versuche zusammengestellt. Die Vorspannung σ_v ist bei allen drei Versuchen konstant gehalten. Die Kurven sind einander zwar ähnlich, die nahezu gesättigte Probe weist allerdings ein nennenswert größeres Schrumpfmaß auf. Das Gesamtschrumpfmaß der beiden trockeneren Probekörper ist nahezu gleich.

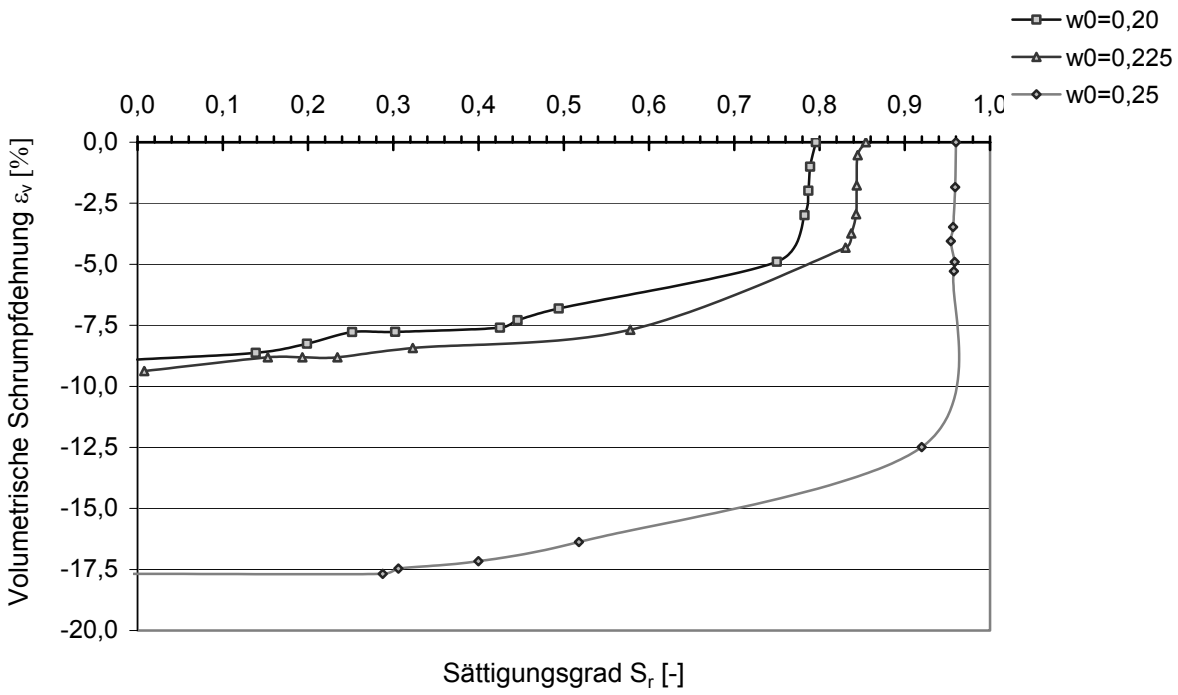


Abb. 5.1-14 Zusammenstellung von drei Schrumpfkurven mit verschiedenen Anfangssättigungen, $e_0 = 0{,}68$, $T = 20$ °C, σ_v = konstant.

Die Abhängigkeit des Schrumpfmaßes von der Anfangsporenzahl ist exemplarisch für drei Versuche mit dem initialen Sättigungsgrad $S_{r,0} = 0{,}78$ in Abb. 5.1-15 veranschaulicht. Die Vorspannung σ_v ist bei allen drei Versuchen wieder konstant gehalten. Die Kurven sind einander wieder sehr ähnlich. Die Probe mit der lockersten Lagerung weist allerdings ein weitaus größeres Schrumpfmaß auf als die dichteren Proben.

Die Körner der relativ dichten Proben können infolge der Saugspannung nicht mehr viel näher zusammen rücken, da sie schon relativ eng liegen. Die Schrumpfversuche an den Proben mit den Anfangsporenzahlen $e_0 = 0{,}68$ und $e_0 = 0{,}78$ resultieren in der Größenordnung zu ähnlichen Gesamtschrumpfmaßen.

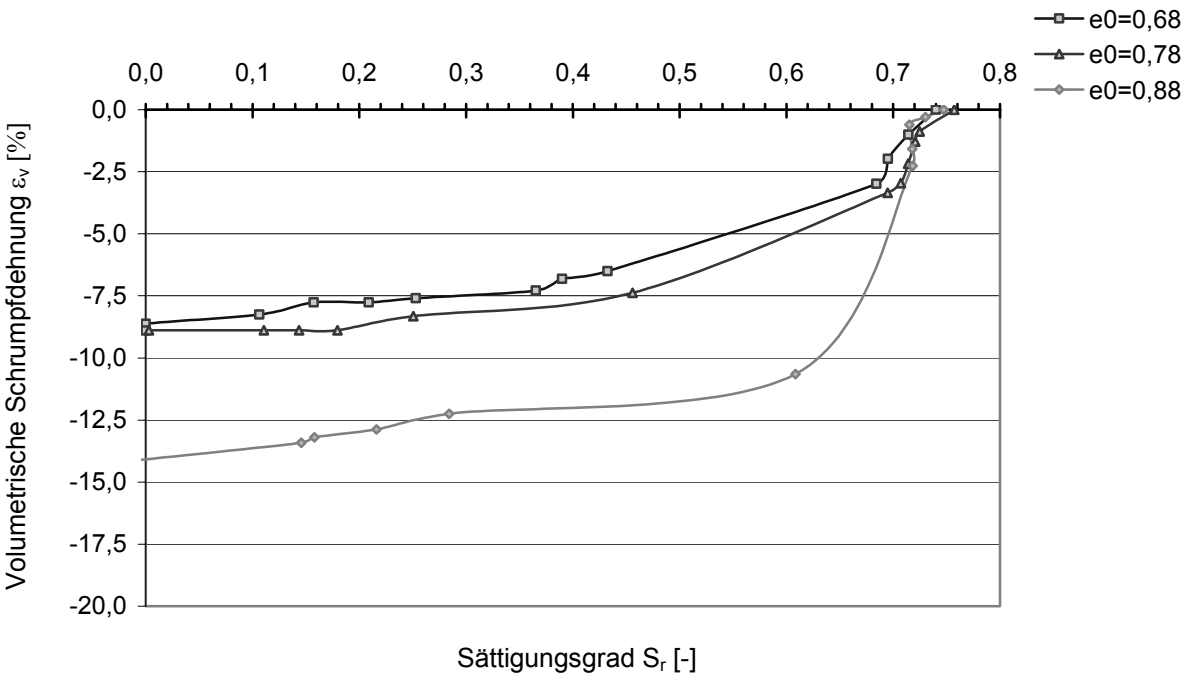


Abb. 5.1-15 Zusammenstellung von drei Schrumpfkurven mit verschiedenen initialen Porenzahlen, $S_{r,0} = 0{,}78$, $T = 20$ °C, σ_v = konstant.

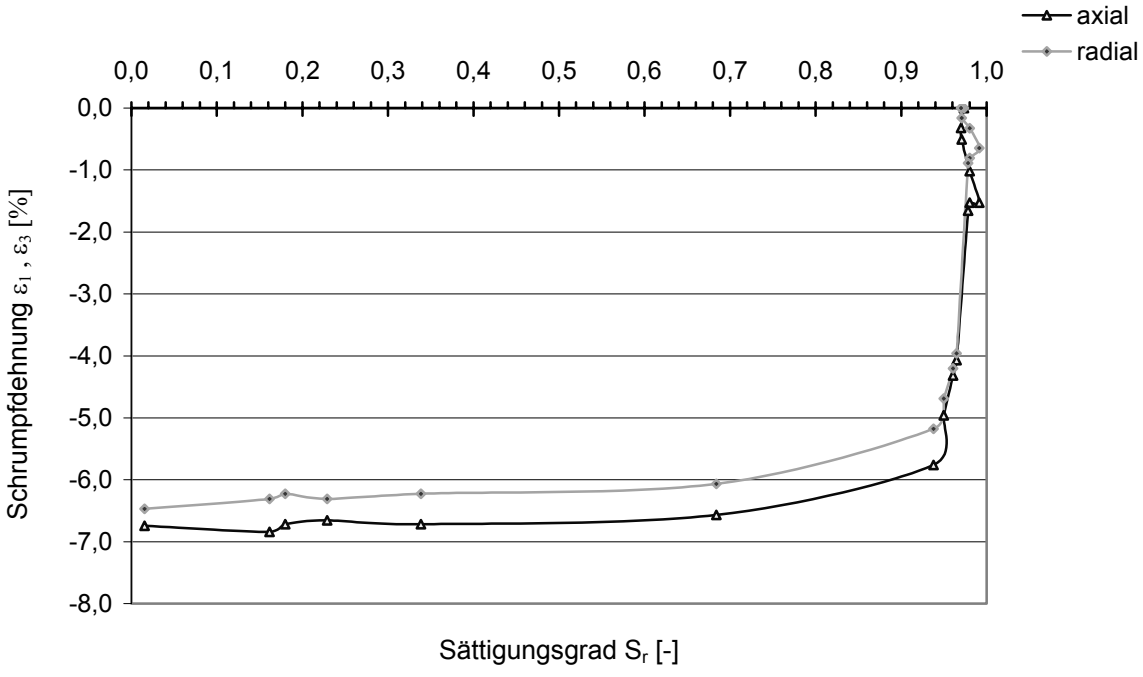


Abb. 5.1-16 Vergleich der Axial- mit der Radialschrumpfung, $e_0 = 0{,}88$, $S_{r,0} = 0{,}98$, $w_0 = 0{,}32$, $T = 20$ °C.

Vergleicht man die Axialschrumpfung mit der Schrumpfung in radialer Richtung, siehe Abb. 5.1-16, ist zu erkennen, dass die Schrumpfgrenze und das Gesamtschrumpfmaß in beiden Richtungen annähernd gleich groß ist. Damit kann von einem isotropen Material ausgegangen werden.

Des Weiteren wird ein Schrumpfversuch durchgeführt, bei dem eine Probe nach Trocknung bei 105°C (definiert als w = 0 %) noch weiter in 100°C Schritten erhitzt wird bis zu 1000°C. Dadurch soll eine Aussage über das in der Probe intrakristallin gebundene Wasser getroffen werden können. Das Zentrum der Probe wurde zusätzlich mit einem Ring von 2,6 cm Durchmesser ausgestochen, damit sich die Zwangsbeanspruchungen in der Probe bei der hochthermischen Trocknung reduzieren und diese nicht zerbricht. Das Ergebnis ist in Abb. 5.1-17 dargestellt.

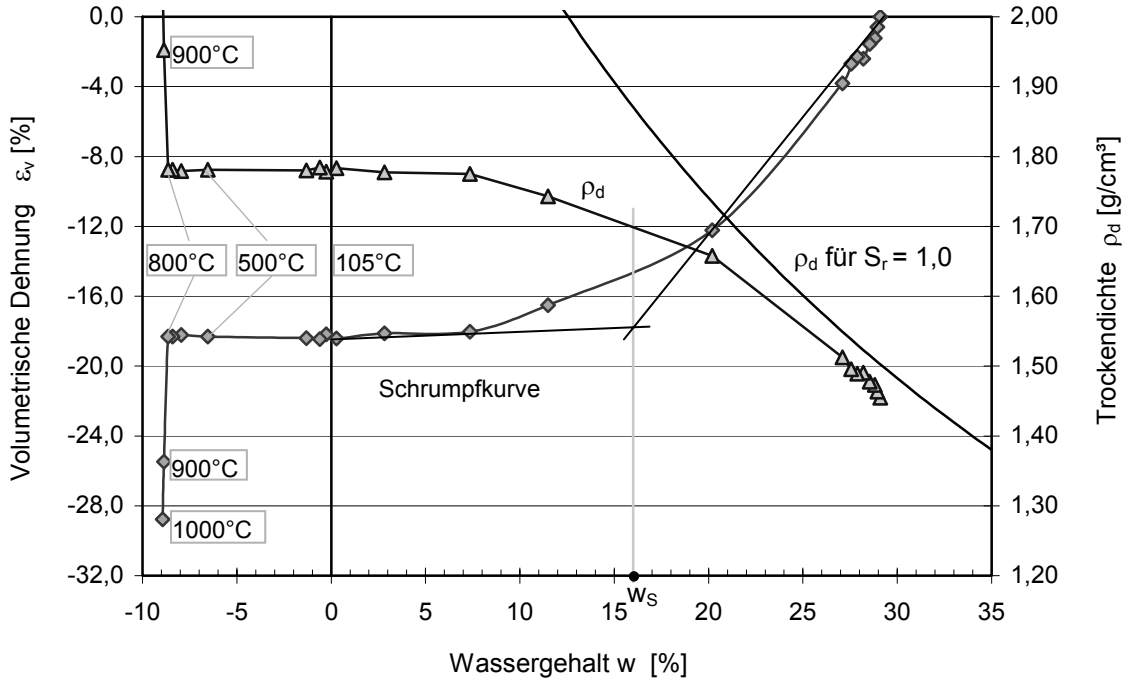


Abb. 5.1-17 Ergebnisse eines Schrumpfversuchs mit zusätzlich hochthermischem Trocknen zum Versuchende, $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0}=0{,}99$, $w_0=0{,}291$, T(bis w → 0 %) = 20 °C.

Die Schrumpfkurve bis w = 0 % verläuft erwartungsgemäß. Es wird festgestellt, dass die Schrumpfdehnungen der Kreisring - Probe größer sind als die einer Vollzylinderprobe. Dies ist auf die Reduzierung der Zwänge in dem kreisringförmigen Probekörper zurückzuführen.

Nachdem die Probe bei 105°C getrocknet ist, wird der Versuchskörper im Glühofen getrocknet. In Abb. 5.1-17 ist zu erkennen, dass erst ein Brennen der Probe bei 500°C einen signifikanten

Gewichtsverlust bei Volumenkonstanz bewirkt. Dieses Phänomen setzt sich fort bis zu einer Brenntemperatur von 800°C. Bis zu dieser Temperatur hat die Probe, ausgegangen von w = 0 % bei 105°C, insgesamt 8,6 % Wasser verloren, welches dem intrakristallinen Wasser zugeordnet werden kann. Bei Temperaturen größer 800°C verliert die Versuchsprobe stark an Volumen und die Dichte nimmt zu. Dies geschieht jedoch unter Massekonstanz. Damit reduziert sich das Volumen der Probe nicht infolge Wasserverlusts, sondern infolge mineralischer Verbackung.

Dass das intrakristalline Wasser erst merklich ab 500°C ausgetrieben werden kann, lässt den Schluss zu, dass die Bindung der Wassermolekularschichten auf den Oberflächen der Elementarschichten sehr groß ist. Deshalb ist davon auszugehen, dass die intrakristalline Quellung bereits relativ zeitnah nach Aufbereitung des Materials mit dem Anfangswassergehalt w_0 abgeschlossen ist und damit in dieser Untersuchung keine Rolle mehr spielt.

5.1.4 Erkenntnisse aus den Vorversuchsserien

Die umfangreichen Voruntersuchungen haben ergeben, dass der Kaolinitton ein mittleres, für die Untersuchungen ausreichendes, Quellvermögen besitzt. Die Reproduktion der Probekörper und deren Homogenität bezüglich Wassergehaltsverteilung und Dichte sind gewährleistet. Des Weiteren ist festgestellt worden, dass das Quelldehnungs- und Schrumpfverhalten des Kaolinits isotrop ist. Damit kann auch mit isotropen Eigenschaften in dem Quelldruckverhalten sowie in dem isotropen Quelldruckdehnungsverhalten gerechnet werden, welches aber noch genauer geprüft wird.

Auch in den Vorversuchen, in denen das grundsätzliche Schrumpfverhalten des Versuchsmaterials betrachtet wurde, ist festgestellt worden, dass die Axialschrumpfung und das Schrumpfen in radialer Richtung annähernd gleich groß sind. Damit kann von einem isotropen Material ausgegangen werden. Darüber hinaus ist die These untermauert worden, dass hauptsächlich das diffus gebundene Wasser für das Quellphänomen des Versuchsmaterials verantwortlich ist.

Das Hauptaugenmerk dieser Arbeit liegt jedoch auf dem Quellverhalten teilgesättigter bindiger Böden. Aus diesem Grund wird das Schrumpfen im Weiteren nicht betrachtet.

5.2 Hauptversuche

Das Ziel der Hauptversuche ist die Bestimmung der Funktionen der Gleichungen (3.7-1) bis (3.7-3) sowie die Beurteilung der Einflüsse der in den Funktionen enthaltenen Parameter auf das Materialverhalten. Dazu werden drei verschiedene Typen von Testsserien betrachtet.

In der ersten Serie werden Quelldruckversuche in einer Standardoedometerzelle durchgeführt. Die Versuche dienen der Bestimmung des maximalen, axialen Quelldrucks in Abhängigkeit von den vorgegebenen Parametern unter Volumenkonstanz.

In der zweiten Serie werden gleichfalls Oedometerversuche durchgeführt. Es wird der Einfluss der axialen Quelldehnung auf den axialen und radialen Quelldruck analysiert. Für diese Untersuchungen ist ein spezielles, modifiziertes Oedometergerät, bezeichnet als Oedometer A, entwickelt worden.

Die Tests der dritten Serie sind eine Fortführung der Tests der zweiten Serie. Es wird jedoch die Korrelation zwischen dem volumemetrischen Quelldruck und der Quelldehnung in axialer und radialer Richtung betrachtet. Für diese Tests der dritten Serie ist ein weiteres Oedometergerät, bezeichnet als Oedometer B, entwickelt worden. Dieses funktioniert konform zu einem triaxialen Equipment.

5.2.1 Serie 1: Quelldruckversuche

Die Tests der ersten Versuchserie werden durchgeführt zur Erfassung des, aus bestimmten Parameterkombinationen resultierenden, maximalen Quelldrucks $\sigma_{z,max}^{SW}$ bzw. $I_{\sigma,max}^{SW}$ unter Volumenkonstanz, vgl. Gleichung (3.7-3). Variiert werden hierbei der initiale Sättigungsgrad $S_{r,0}$, die Anfangsporenzahl e_0 sowie der finale Sättigungsgrad $S_{r,\infty}$, auf den die Proben aufgesättigt werden.

5.2.1.1 Versuchsapparatur

Die Untersuchungen werden in einem Standardoedometer durchgeführt, dessen Belastungsarm mittels einer verstellbaren Schraube arretierbar ($\varepsilon_z = 0$) ist. Die Oedometerzelle ist zusätzlich mit einer Kraftmessdose ausgerüstet, die zwischen dem Belastungsarm und der Kopfplatte angebracht ist, siehe Abb. 5.2-1. Durch Anziehen der Arretierschraube lässt sich eine beliebige axiale Spannung σ_z auf die Probe aufbringen, deren Größe an der Kraftmessdose kontrolliert werden kann. Die Arretierung sowie die Verschiebungen infolge der aufgebrachten Vorlastspannung σ_z werden durch einen elektronischen Wegaufnehmer kontrolliert.

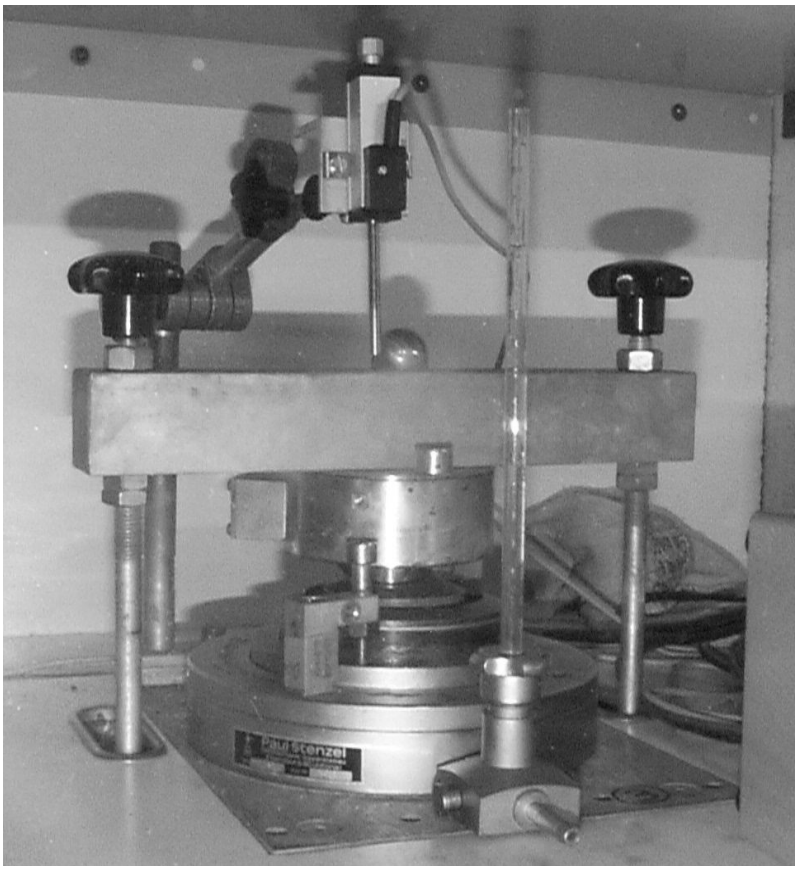


Abb. 5.2-1 Oedometerzelle mit zusätzlicher Kraftmessdose

Der Oedometerring mit beschichteter Ringinnenfläche kann einen Probekörper mit dem Durchmesser $d_0 = 100$ mm und der Höhe $h_0 = 20$ mm aufnehmen. Die Bewässerung der Proben erfolgt mittels eines geeichten Glaszylinders und die Durchströmung des Probekörpers findet von unten statt. Die Zelle ist in einem Klimaschrank untergebracht, in welchem eine annähernd konstante Luftfeuchtigkeit und isotherme Bedingungen vorherrschen.

5.2.1.2 Versuchsdurchführung

Zur Probenherstellung wird das trockene Tonmehl zum Zeitpunkt t_0 mit destilliertem Wasser in einem Zwangsmischer mit w_0 angemischt. Die Vorversuche haben ergeben, dass das Quellen des Materials infolge w_0 nach 48 h bereits abgeschlossen ist.

Abb. 5.2-2 zeigt schematisch den Zusammenhang zwischen dem Druck und der Porenzahl in halblogarithmischer Darstellung. Von Punkt 1) aus wird das Material mittels statischer Verdichtung auf e_0' verdichtet und wieder entlastet. Es stellt sich dann nach Entspannung der Probe die Anfangsporenzahl e_0 ein. Bei Wiederbelastung infolge I_σ^{SW} bis zum Punkt 2) ist bei Kurve a) der Einfluss von C_S maßgeblich und in Kurve b) von C_C. Diese Einflüsse müssen bei der Probenherstellung und in den Versuchen berücksichtigt werden.

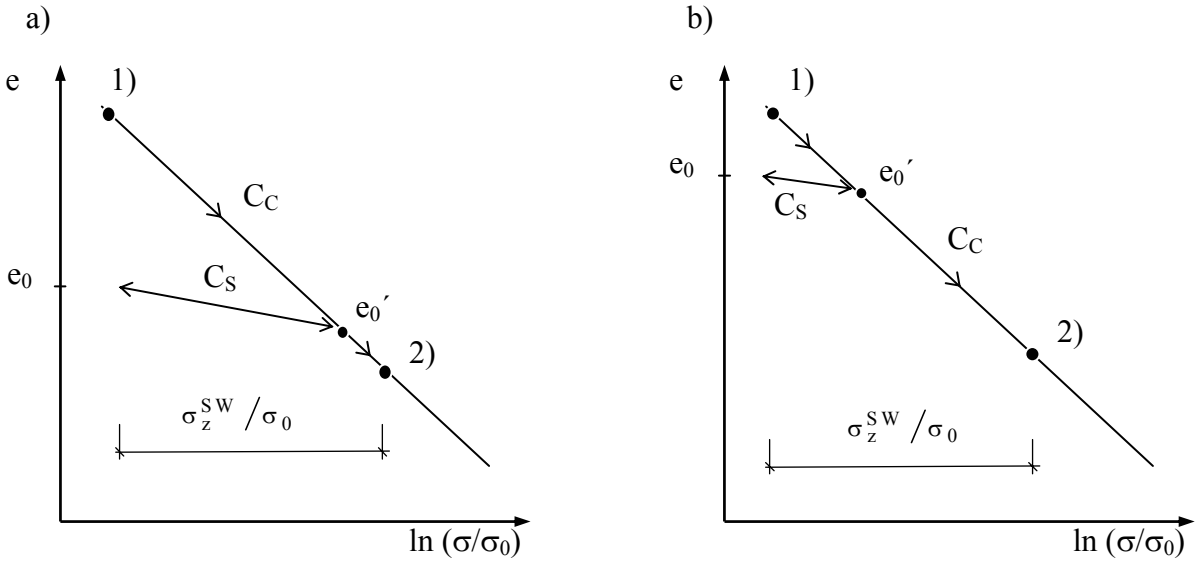


Abb. 5.2-2 Druck-Porenzahl-Diagramme in halblogarithmischer Darstellung

Die Probe wird danach in einem Topf mittels Presse mit Druckaufnehmer statisch verdichtet, unter Beachtung, dass die vertikale Spannung σ_v hierbei kleiner ist als der maximale vertikale Quelldruck $\sigma_{z,max,i}^{SW}$ der Probe im nachfolgenden Oedometertest. Anschließend wird die Probe in das Oedometergerät eingebaut und mit einem kleinen vertikalen Anpressdruck von σ_{z0} = 9,0 kPa beaufschlagt und der Belastungsarm arretiert. Nachdem die Probe stabile Konditionen erreicht hat, beginnt die Bewässerung und die Probe beginnt unter konstantem Volumen zu quellen. Der axiale Quelldruck σ_z^{SW} wird hierbei mittels der Kraftmessdose registriert.

In Tabelle 5.2-1 ist das Versuchsprogramm bei einer Versuchstemperatur von 20 °C zusammengestellt.

Tabelle 5.2-1: Versuchsprogramm Serie 1

Anfangs-sättigungsgrad $S_{r,0}$ [-]	Endsättigungsgrad $S_{r,\infty}$ [-]			
	0,82	0,88	0,95	1,0
	Anfangsporenzahl e_0 [-]			
0,63	0,68 0,78 0,88	0,68	0,68	0,78 0,88
0,68	0,68 0,78 0,88	0,68 0,78 0,88	0,68 0,78 0,88	0,68 0,78 0,88
0,78	0,78	0,68 0,78 0,88	0,68 0,78 0,88	0,68 0,78 0,88
0,84				0,78 0,88
0,88			0,68 0,78	0,68 0,78 0,88

Erläuterung zu Tabelle 5.2-1: Für eine initiale Sättigung $S_{r,0} = 0{,}63$ und eine Endsättigung $S_{r,\infty} = 0{,}82$ werden 3 Versuche mit den Anfangsporenzahlen $e_0 = 0{,}68$, $e_0 = 0{,}78$ und $e_0 = 0{,}88$ durchgeführt.

Die Versuche werden teilweise auch in den Versuchsserien 2 und 3, im Oedometer A und B, fortgeführt, um die axialen und radialen Quelldrücke getrennt voneinander erfassen zu können und diese miteinander zu vergleichen.

5.2.1.3 Auswertung der Messergebnisse

Abb. 5.2-3 zeigt in halblogarithmischer Auftragung exemplarisch die Ergebnisse von drei Quelldruckversuchen bei Volumenkonstanz mit dem Anfangszustand $\sigma_{z0} = 9{,}0$ kPa. Alle Proben sind mit $e_0 = 0{,}68$ und $S_{r,0} = 0{,}68$ eingebaut und auf $S_{r,\infty}$ aufgesättigt worden.

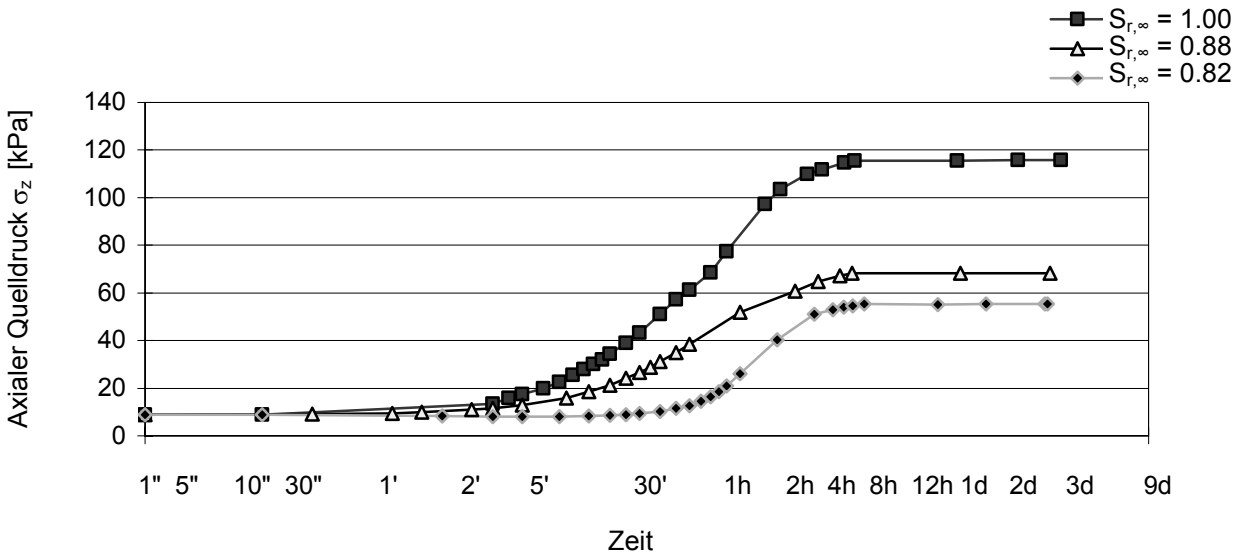


Abb. 5.2-3 Quelldruck-Zeit-Linien, $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} \approx 0{,}68$, $T = 20°C$, $\Delta I_\varepsilon = 0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa.

Die Proben mit dem initialen Sättigungsgrad $S_{r,0}$ werden zum Zeitpunkt $t_1 = 0$ [s] von unten bewässert. Daraufhin beginnen die Proben sich aufzusättigen und allmählich zu quellen bis schlussendlich der finale Sättigungsgrad $S_{r,\infty}$ erreicht ist und der daraus resultierende maximale Quelldruck $\sigma^{SW}_{z,max}$ sich ausbildet. Der Quellbeginn ist schon nach 5 Minuten festzustellen. Bereits nach ca. 8 bis 12 Stunden stellt sich in den Probekörpern der maximale Quelldruck $\sigma^{SW}_{z,max,i}$ ein. Es wird ersichtlich, dass sich $\sigma^{SW}_{z,max}$ mit abnehmender finaler Sättigung $S_{r,\infty}$ deutlich verringert.

In Abb. 5.2-4 sind beispielhaft weitere Endergebnisse in Abhängigkeit von e_0 und $S_{r,0}$ aufgetragen. Die Versuchsproben wurden alle auf $S_{r,\infty} = 1{,}0$ aufgesättigt. Es wird anfänglich Isotropie angenommen, womit sich die Spannungssumme $I^{SW}_{\sigma,max} = 3 \cdot \sigma^{SW}_{z,max}$ ergibt. Diese Annahme wird in den Serien 2 und 3 überprüft, siehe Abb. 5.2-10 und Abb. 5.2-22.

Die einzelnen Datenpunkte in der Abb. 5.2-4 geben die Versuchsresultate wieder und die kontinuierlichen Linien beschreiben die Approximation der Versuchsergebnisse nach Gleichung (5.2-1). Dies gilt gleichermaßen für die folgenden Abbildungen 5.2-5 und 5.2-6.

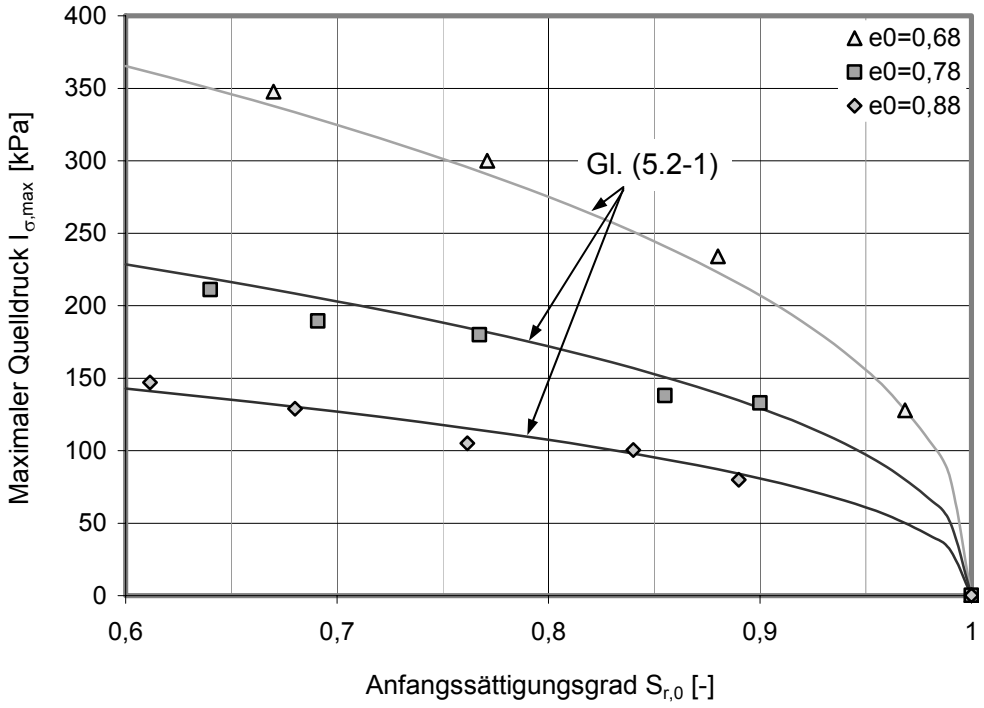


Abb. 5.2-4 Maximale Quelldrücke in Abhängigkeit von $S_{r,0}$ und e_0 für $S_{r,\infty} = 1{,}00$, $T = 20°C$, $\Delta I_\varepsilon = 0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa.

Die Ergebnisse in Abb. 5.2-4 zeigen, dass mit zunehmender Porenzahl und damit abnehmender Steifigkeit der Probe die Quelldrücke signifikant abnehmen. Für feste e_0 - Werte und zunehmender Anfangssättigung besteht die gleiche Tendenz.

Abb. 5.2-5 stellt auch die maximal erreichbaren Quelldrücke in Abhängigkeit von e_0 und $S_{r,0}$ dar. Jedoch sind die Versuchsproben nicht voll, sondern auf $S_{r,\infty} = 0{,}88$ aufgesättigt worden.

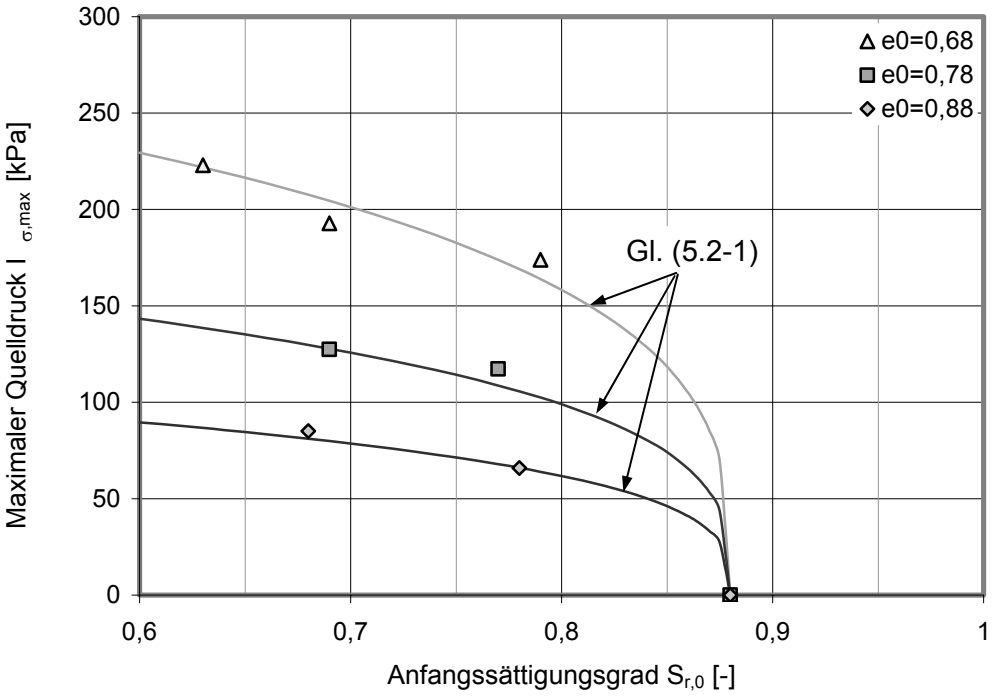


Abb. 5.2-5 Maximale Quelldrücke in Abhängigkeit von $S_{r,0}$ und e_0 für $S_{r,\infty} = 0{,}88$, $T = 20°C$, $\Delta I_\varepsilon = 0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa.

Es sind aus den Ergebnissen der Versuche für $S_{r,\infty} = 0{,}88$ die gleichen Tendenzen wie aus den Versuchen mit $S_{r,\infty} = 1{,}0$ abzuleiten. Die maximalen Quelldrücke $I^{SW}_{\sigma,max}$ nehmen mit zunehmender Anfangssättigung $S_{r,0}$ sowie zunehmender Porenzahl e_0 ab. Die Größe des Quelldruckes im Vergleich zu den Versuchen mit völliger Sättigung zum Ende der Versuche, Abb. 5.2-4, ist jedoch bedeutend geringer.

Zusammenfassend sind in Abb. 5.2-6 die Versuchsergebnisse für $e_0 = 0{,}88$ und $e_0 = 0{,}78$ sowie $e_0 = 0{,}68$ abgebildet. Es ist jeweils der Zusammenhang zwischen dem maximalen Quelldruck $I^{SW}_{\sigma,max}$ sowie dem initialen und finalen Sättigungsgrad dargestellt.

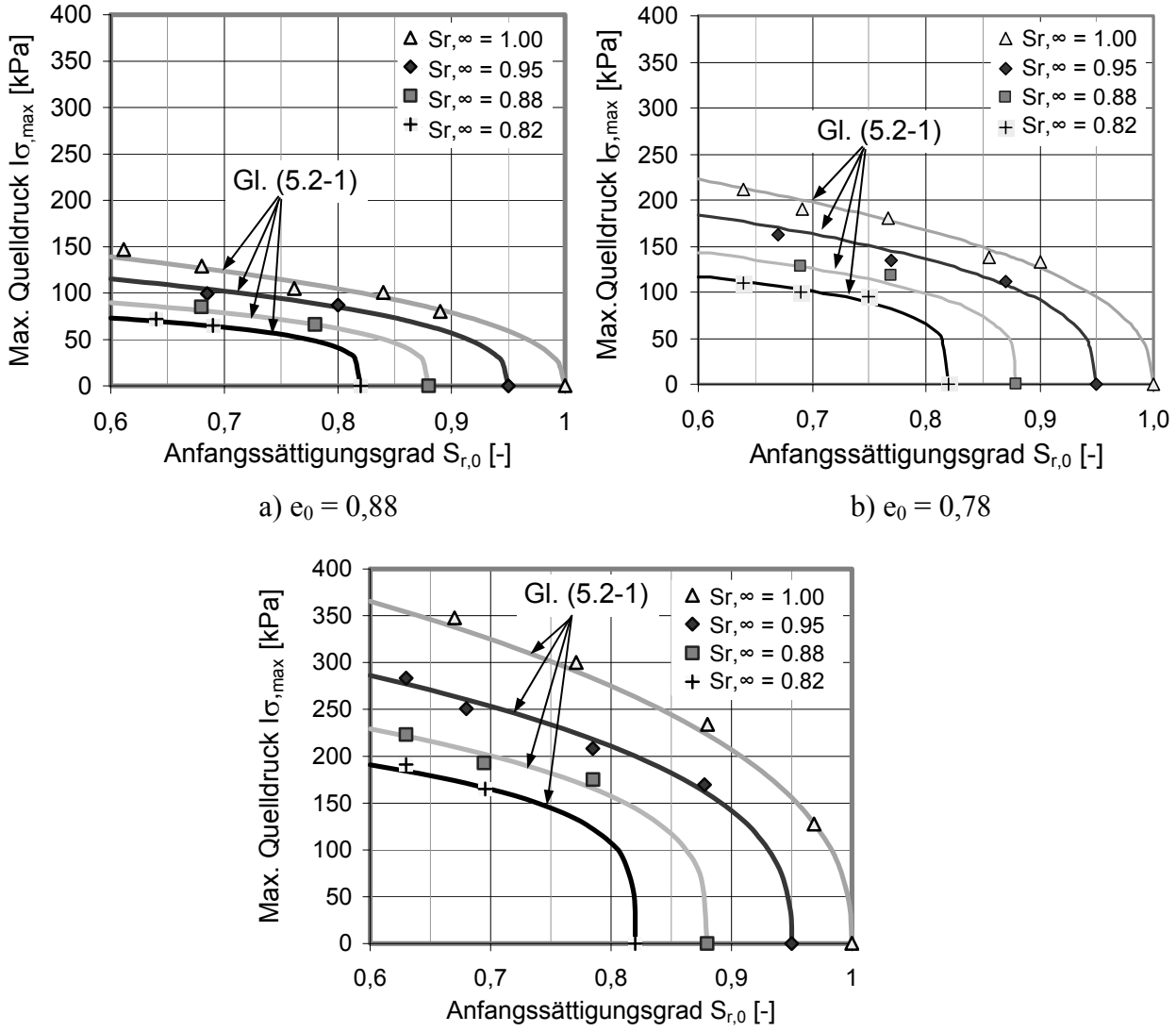


Abb. 5.2-6 $I^{SW}_{\sigma,max}$ in Abhängigkeit von $S_{r,0}$ und $S_{r,\infty}$; T = 20°C, $\Delta I_\varepsilon = 0$, σ_{z0} = 9 kPa.

Die Resultate zeigen auf, dass der Quelldruck $I^{SW}_{\sigma,max}$ mit Anstieg der Anfangssättigung $S_{r,0}$ deutlich abfällt. Dieselbe Entwicklung zeichnet sich für abfallende $S_{r,\infty}$ - Werte ab. Wiederum zeigen die Ergebnisse, dass der maximale Quelldruck $I^{SW}_{\sigma,max}$ mit zunehmender Steifigkeit der Probe beträchtlich an Größe gewinnt.

Unter Zugrundelegung der in Abb. 5.2-6 dargestellten Versuchsergebnisse lassen sich sämtliche Resultate der ersten Versuchserie, unter Annahme von Isotropie mit $I_{\sigma,max}^{SW} = 3 \cdot \sigma_{z,max}^{SW}$, mittels der folgenden Expotentialfunktion approximieren:

$$I_{\sigma,max}^{SW} = 3.29 \cdot p_a \cdot \exp\left(3.65 \cdot S_{r,\infty} - 4,7 \cdot e_0\right) \cdot \left[S_{r,\infty} - S_{r,0}\right]^{\left(0.95 \cdot S_{r,\infty} - 0,54\right)} \qquad (5.2\text{-}1)$$

Die Gleichung (5.2-1) ist gültig für $0,68 \le e_0 \le 0,88$; $0,6 \le S_{r,0} \le 1,0$ sowie $0,8 \le S_{r,\infty} \le 1,0$ und ist jeweils schon in den Abb. 5.2-4 bis 5.2-6 aufgetragen. Zur Veranschaulichung und Verdeutlichung der Ergebnisse wird in Abb. 5.2-7 die Kurvenfläche für den maximalen Quelldruck $I_{\sigma,max}^{SW}$ unter Volumenkonstanz bei völliger Sättigung zum Versuchsende in Abhängigkeit von e_0 und $S_{r,0}$ dargestellt. Die Gleichung (5.2-1) beschreibt jeden Punkt auf dieser Kurvenfläche, mit $S_{r,\infty} = 1,0$, sowie die Punkte unter dieser Kurvenfläche mit $0,8 \le S_{r,\infty} < 1,0$.

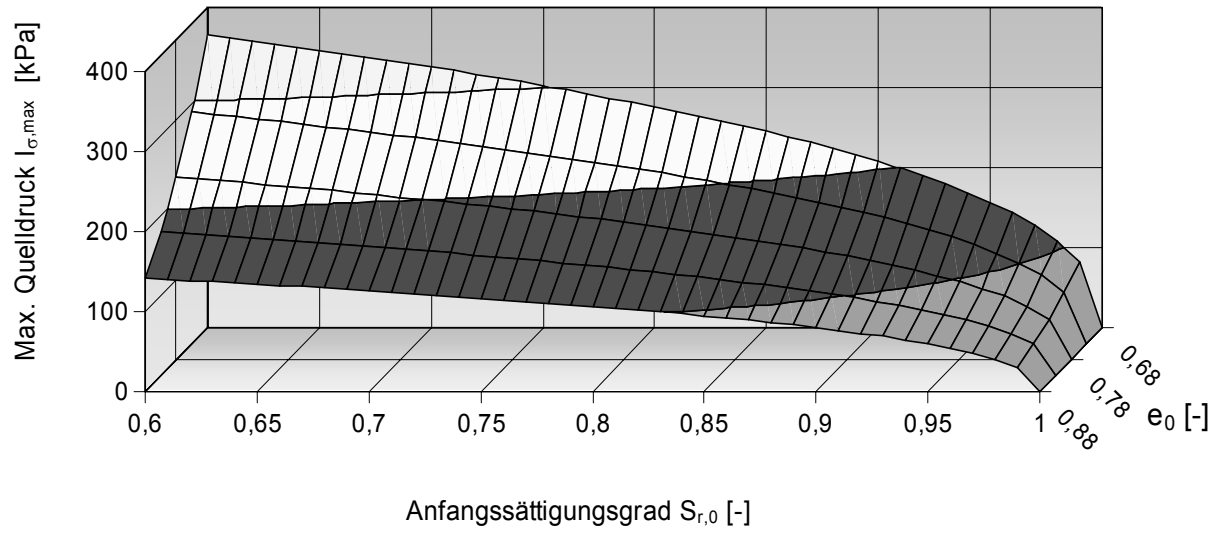


Abb. 5.2-7 Maximaler Quelldruck in Abhängigkeit von $S_{r,0}$ und e_0 für $S_{r,\infty} = 1,00$, $T = 20°C$, $\Delta I_\varepsilon = 0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa.

5.2.2 Serie 2: Einaxiale Quelldruck - Quelldehnungsversuche

Zur Bestimmung der Beziehung zwischen dem Quelldruck σ^{SW} und der axialen Quelldehnung ε_z^{SW} werden die Versuche der zweiten Serie durchgeführt. Des Weiteren sollen die zuvor getroffenen Isotropieannahmen überprüft werden. Hierzu ist es erforderlich, den Quelldruck separat in radialer und axialer Richtung registrieren zu können. In den Tests werden analog zu Serie 1 der initiale Sättigungsgrad $S_{r,0}$, die Anfangsporenzahl e_0 sowie der Endsättigungsgrad $S_{r,\infty}$, auf den die Proben aufgesättigt werden, variiert.

5.2.2.1 Versuchsapparatur

Für die Untersuchungen ist ein spezielles Oedometergerät, beschrieben als Oedometer A, entwickelt worden. Mit diesem Equipment ist es möglich, den radialen und den axialen Quelldruck getrennt voneinander zu erfassen.

Der Oedometerring mit einem Innendurchmesser d_i = 100 mm und einer Höhe h = 75 mm ist für Versuchsproben mit einer Dicke h_0 = 50 mm konzipiert. Die Innenfläche des Zylinders ist beschichtet, um ein Gleiten der Probe zu gewährleisten. Auf der Außenfläche des Qedometerrings sind in halber Höhe acht temperaturkompensierte Dehnungsmessstreifen angebracht, siehe Prinzipskizze in Abb. 5.2-8.

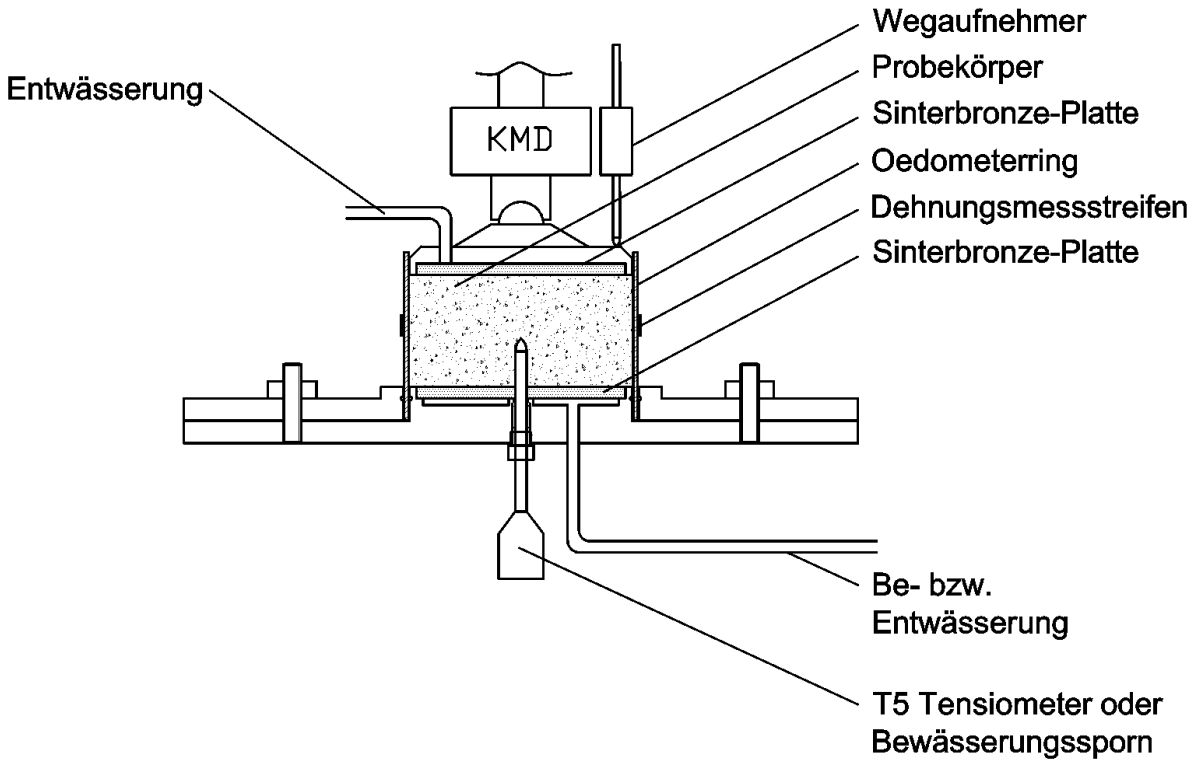


Abb. 5.2-8 Prinzipskizze von Oedometer A.

Mit Hilfe dieser Dehnungsmessstreifen wird die Radialverformung des Ringes gemessen, woraus sich die Ringkraft bzw. die Ringspannung berechnen lässt. Aus diesen Ringkräften wiederum wird der Radialdruck, der von der Probe auf den Ring ausgeübt wird, ermittelt. Die Dehnungen im Oedometerring betragen maximal 0,008 % und sind damit so gering, dass von vollkommen behinderter Seitendehnung der Proben ausgegangen werden kann. Die axiale Spannung wird analog zu Serie 1 mittels einer Kraftmessdose erfasst, welche ebenfalls wie bei dem konventionellen Equipment zwischen der Kopfplatte und dem arretierbaren Belastungsarm positioniert ist, siehe Abb. 5.2-9. Durch Anziehen bzw. Lösen der Arretierschraube lässt sich eine beliebige axiale Spannung σ_z bzw. Dehnung ε_z aufbringen. Die Größe von σ_z wird durch die Kraftmessdose kontrolliert und ε_z mittels eines elektronischen Wegaufnehmers.

Zur Messung der Wasserspannungen ist ein T5 - Tensiometer von der Unterseite bis in die Mitte der Probe eingebracht. Mit diesem Tensiometer wird mit einer Genauigkeit von 1 cm Wassersäule ein Messbereich von pF = 0 bis pF = 3 abgedeckt. Bei dem verwendeten Versuchsmaterial kann also je nach Dichte ab einem Sättigungsgrad von um die 87 % die Saugspannung gemessen werden.

Abb. 5.2-9 Oedometer A mit Kraftmessdose und Dehnungsmessstreifen an der Außenfläche des Oedometerrings im Versuch (links) und vor einem Versuch (rechts).

Die Bewässerung der Proben erfolgt, übereinstimmend zur ersten Serie, steuerbar mittels eines geeichten Glaszylinders. Die Probekörper werden von unten durchströmt. Die Zelle ist abermals,

wie die kommerzielle Zelle der Versuchserie 1 auch, in einem Klimaschrank untergebracht, in welchem annähernd konstante Luftfeuchtigkeit und isotherme Bedingungen vorherrschen.

5.2.2.2 Versuchsdurchführung

Die Herstellung der zylindrischen Proben findet konform zur Serie 1 statt, vgl. Abschnitt 5.2.1.2. Nachdem die Probe, die bereits im Ring hergestellt wurde, im Gerät eingebaut ist, wird sie mit einem geringen Anpressdruck von $\sigma_{z0} = 9{,}0$ kPa beaufschlagt und der Belastungsarm dabei arretiert. Nachdem die Versuchsprobe wiederum stabile Konditionen erreicht hat, wird das Experiment gestartet. Der Probekörper wird unter konstantem Volumen von seinem initialen Sättigungsgrad $S_{r,0}$ auf einen spezifizierten Sättigungsgrad $S_{r,\infty}$ bewässert. Infolge dessen stellt sich der zugehörige maximale Quelldruck $\sigma^{SW}_{max,i}$ ein, welcher axial mittels der Kraftmessdose und radial mit Hilfe der Dehnungsmessstreifen auf dem Oedometerring registriert wird.

Daraufhin wird stufenweise eine spezifische Deformation in z-Richtung zugelassen, um die Beziehung zwischen der axialen Quelldehnung ε_z^{SW} und der Vertikalspannung σ_z zu bestimmen. Nach jedem Deformationsschritt wird ein stabiles Einpendeln der Vertikalspannung abgewartet und aufgenommen, bevor der nächste Quelldehnungsschritt eingeleitet wird. Dieses Prozedere wird wiederholt bis die Vertikalspannung $\sigma_z \approx \sigma_{z0} = 9{,}0$ kPa beträgt. Die korrespondierende Größe der Quelldehnung wird als $\varepsilon^{SW}_{z,max}$ definiert. Gemäß von Wolffersdorff et al. (2004) erzielt man mit dieser speziellen Testprozedur verglichen mit in-situ Versuchen die besten Resultate.

Die Versuche werden für festgelegte Werte von Anfangssättigung $S_{r,0}$, finaler Sättigung $S_{r,\infty}$ sowie Anfangsporenzahl e_0 durchgeführt, aufgelistet in Tabelle 5.2-2.

Tabelle 5.2-2: Versuchsprogramm Serie 2

Anfangs-	Endsättigungsgrad $S_{r,\infty}$ [-]			
sättigungsgrad	0,82	0,88	0,95	1,0
$S_{r,0}$ [-]	Anfangsporenzahl e_0 [-]			
0,70	0,68 0,78	0,68 0,78 0,88	0,68 0,78 0,88	0,68 0,78 0,88
0,80		0,68	0,68 0,78 0,88	0,68 0,78 0,88
0,85				0,68 0,78
0,90				0,68 0,78 0,88

Erläuterung zu Tabelle 5.2-2: Für eine initiale Sättigung $S_{r,0} = 0{,}70$ und eine Endsättigung $S_{r,\infty} = 0{,}88$ werden 3 Versuche mit den Anfangsporenzahlen $e_0 = 0{,}68$, $e_0 = 0{,}78$ und $e_0 = 0{,}88$ durchgeführt.

5.2.2.3 Auswertung der Messergebnisse

Anhand von zwei typischen Quelldruckversuchen im Oedometer A bei Volumenkonstanz, sind in Abb. 5.2-10 exemplarisch die Quelldrücke in Axial- und Radialrichtung während der Aufsättigungsphase in Beziehung gestellt. Beide Proben sind mit der Porenzahl $e_0 = 0{,}78$ eingebaut, mit dem Anfangszustand $\sigma_{z0} = 9{,}0$ kPa beaufschlagt und auf $S_{r,\infty} = 1{,}0$ aufgesättigt worden. Die Versuchskörper unterscheiden sich nur hinsichtlich ihrer initialen Sättigung $S_{r,0}$.

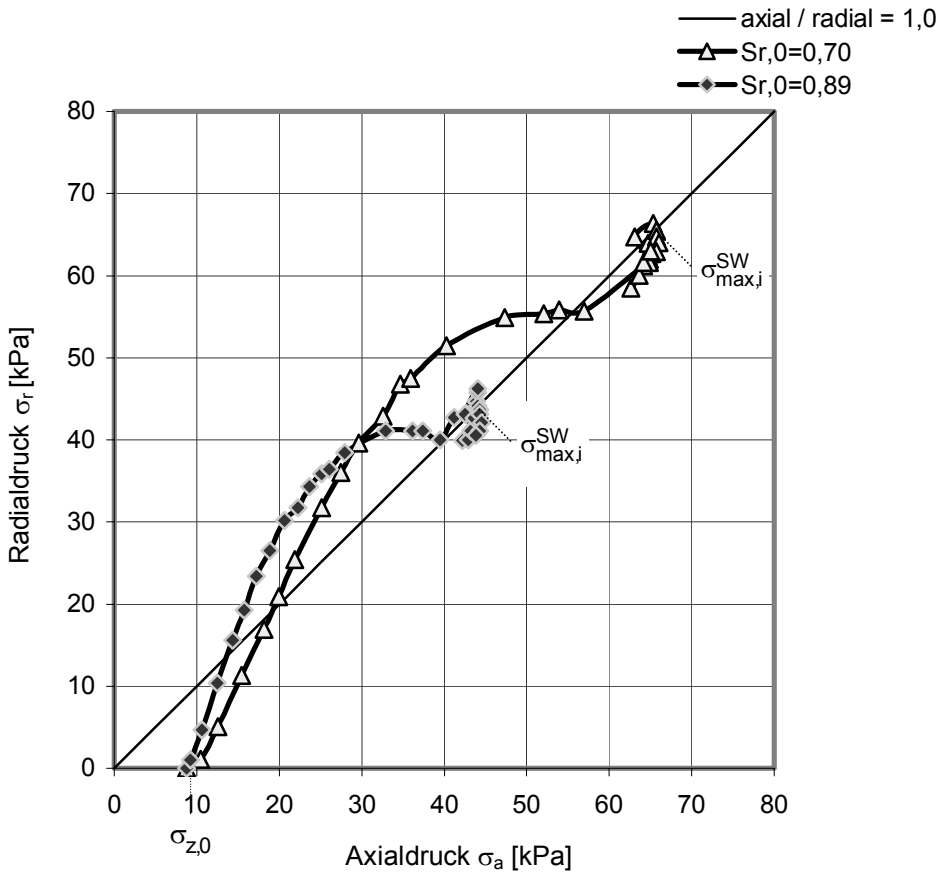


Abb. 5.2-10 Axialer Quelldruck σ_z^{SW} in Beziehung zum radialen Quelldruck σ_r^{SW} bei Volumenkonstanz, $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $T = 20°C$, $\varepsilon_r = 0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa.

Zu Beginn des Aufsättigungsprozesses herrscht nur der axiale Druck in der Größe des Anpressdruckes $\sigma_{z0} = 9{,}0$ kPa vor. Beim Erreichen von 28 – 36 % des maximalen Quelldrucks bei Volumenkonstanz sind der aus der Bewässerung resultierende Quelldruck in axialer und radialer Richtung ungefähr gleich. Jedoch zeigt sich mit fortschreitendem Absorptionsprozess,

dass der radiale Druck größer wird als der axiale. Gegen Ende der Quelldruckversuche stellt sich allerdings wieder ein Verhältnis von annähernd 1 zwischen dem Axialdruck und dem Radialdruck ein, welches der Definition für isotropes Materialverhalten entspricht.

Diese Variation des Spannungsverhältnisses im Verlauf eines Versuches reflektiert den Wasser - Absorptionsprozess vom Boden zum Kopfende der Bodenprobe. Dieses Phänomen kann anhand der Tatsache erklärt werden, dass die Dehnungsmessstreifen (DMS) entlang des Zentrums auf der Außenseite des Zylinders angebracht sind und der Ring sich jedoch infolge des Infiltrationsprozesses nicht gleichförmig ausdehnt. Dieses Verhalten ist in allen Tests der Versuchsreihe in Oedometer A zu beobachten, vergleiche Dobrowolsky & Vrettos (2005). Aufgrund der gleichmäßigen Belastung des Ringes am Ende der Quelldrucktests bei Volumenkonstanz stellt sich immer wieder ein Spannungsverhältnis von 1 ein. Aus diesen Gründen wird weiterhin für das Quelldruckverhalten bei konstantem Volumen von Isotropie ausgegangen. Dieses Isotropieverhalten wird in der 3. Versuchsserie noch einmal genauer betrachtet, siehe Abb. 5.2-22.

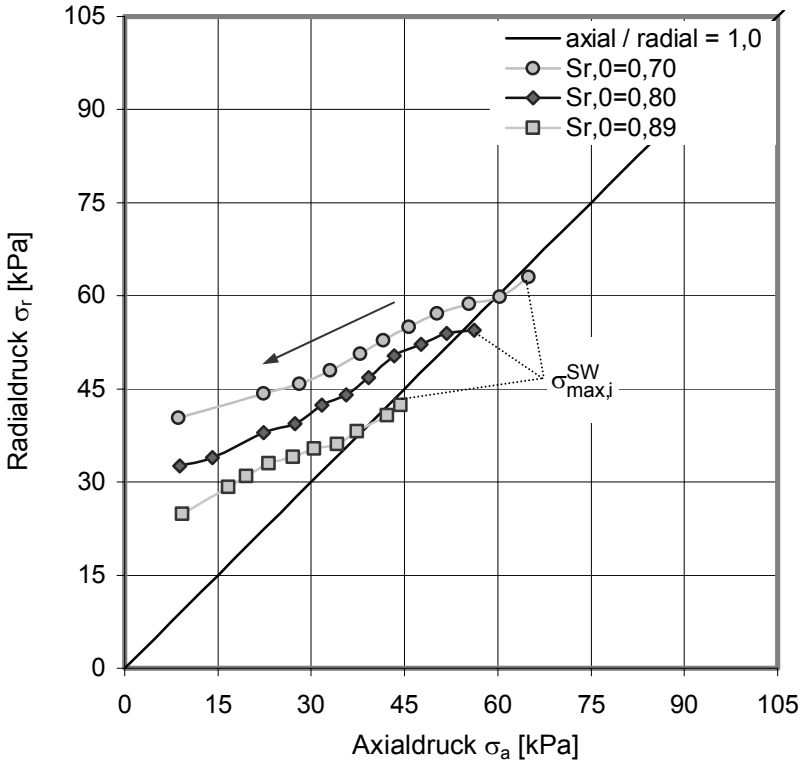


Abb. 5.2-11 a σ_z^{SW} in Beziehung zu σ_r^{SW} bei schrittweiser axialer Dehnung für $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $T = 20°C$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa, $\varepsilon_r = 0$.

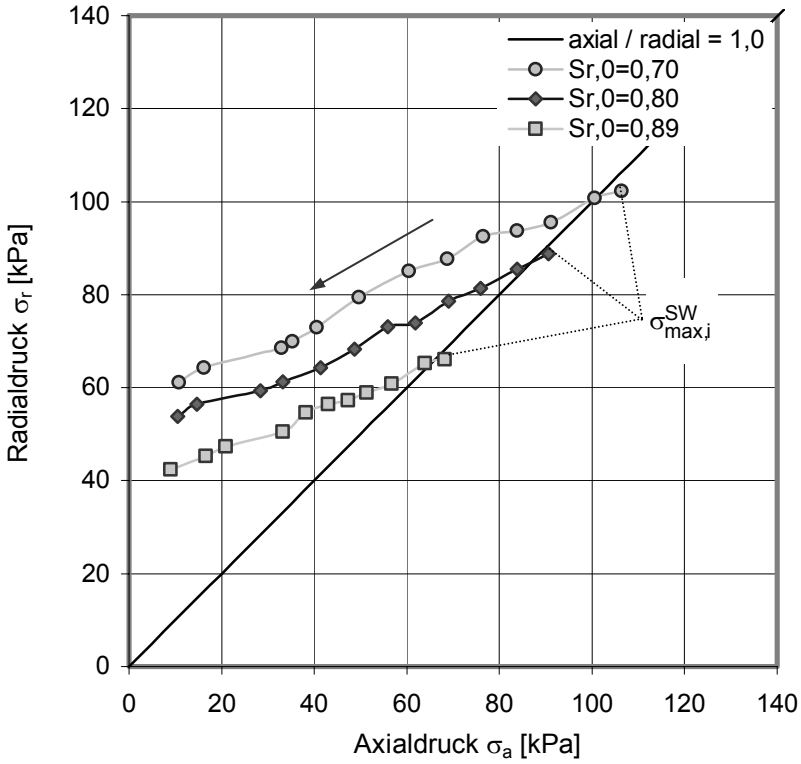


Abb. 5.2-11 b σ_z^{SW} in Beziehung zu σ_r^{SW} bei schrittweiser axialer Dehnung für $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $T = 20°C$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa, $\varepsilon_r = 0$.

Nach Erreichen des maximalen Quelldruckes infolge Bewässerung bei konstantem Volumen wird in den Versuchen der Serie 2 eine stufenweise Dehnung in z-Richtung zugelassen.

Der Abbau des Quelldrucks in axialer und radialer Richtung infolge dieser Deformation ist in den Abb. 5.2-11 a und 5.2-11 b dokumentiert. Dargestellt sind die Beziehungen zwischen dem axialen Quelldruck und dem radialen Quelldruck für Versuche mit den initialen Porenzahlen a) $e_0 = 0{,}78$ und b) $e_0 = 0{,}68$ sowie den Anfangsättigungen $S_{r,0} = 0{,}70$, $S_{r,0} = 0{,}80$ und $S_{r,0} = 0{,}89$. Für die Porenzahl $e_0 = 0{,}88$ sind keine Ergebnisse dargestellt, da bei diesen Versuchen, aus technischen Gründen, leider kein Radialdruck σ_r^{SW} erfasst werden konnte.

Nach der Bewässerung der Proben bei konstantem Volumen stellte sich jeweils ungefähr der nach Gleichung (5.2-1) berechnete maximale Quelldruck $I_{\sigma,max}^{SW}/3 = \sigma_{z,max}^{SW} = \sigma_{r,max}^{SW}$ ein. Infolge der sukzessiv zugelassenen axialen Deformation baut sich der Quelldruck allmählich ab. Mit zunehmender Verformung nimmt der axiale Quelldruck σ_z^{SW} in einem weitaus größeren Maß ab als der radiale Quelldruck σ_r^{SW}. Die Beziehung zwischen σ_z^{SW} und σ_r^{SW} verläuft jedoch annähernd geradlinig. Vergleicht man die in Abb. 5.2-11 dargestellten Kurven miteinander, so wird ersichtlich, dass diese linearen Zusammenhänge annähernd parallel verlaufen. Dieses

Phänomen steht im Widerspruch zu den getroffenen Beobachtungen von Kiehl (1990), der eine nichtlineare Beziehung angenommen hat.

Die in Abb. 5.2-11 veranschaulichten Resultate lassen den Schluss zu, dass der Abbau der Quelldrücke in jeweiliger Richtung stark von der Richtung der Deformation abhängt. Diese Ergebnisse werden später noch einmal im Oedometer B überprüft, vergleiche Abschnitt 5.2.3.4.

Ein repräsentatives Resultat aus einem Quelldruckdehnungsversuch im Oedometer A ist in Abb. 5.2-12 in einem linearen Maßstab dargestellt. Der Probekörper mit einer initialen Porenzahl $e_0 = 0{,}78$ ist bei Volumenkonstanz von seinem Anfangssättigungsgrad $S_{r,0} = 0{,}7$ bis zur vollen Sättigung aufgesättigt worden, vergleiche Kurve für $S_{r,0} = 0{,}7$ in Abb. 5.2-10. Der maximale Quelldruck, nach Gleichung (5.2-1) abgeschätzt zu $\sigma^{SW}_{z,max} = I^{SW}_{\sigma,max} / 3 = 65{,}88$ kPa, ist nach der Aufsättigung der Probe annähernd erreicht worden. Anschließend ist schrittweise eine Dehnung in axialer Richtung zugelassen worden.

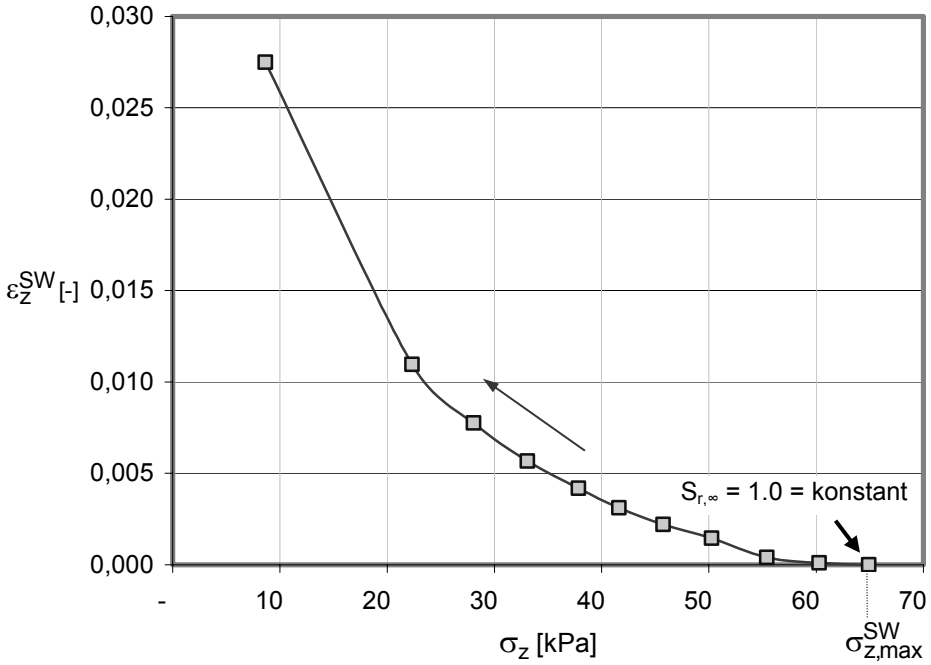
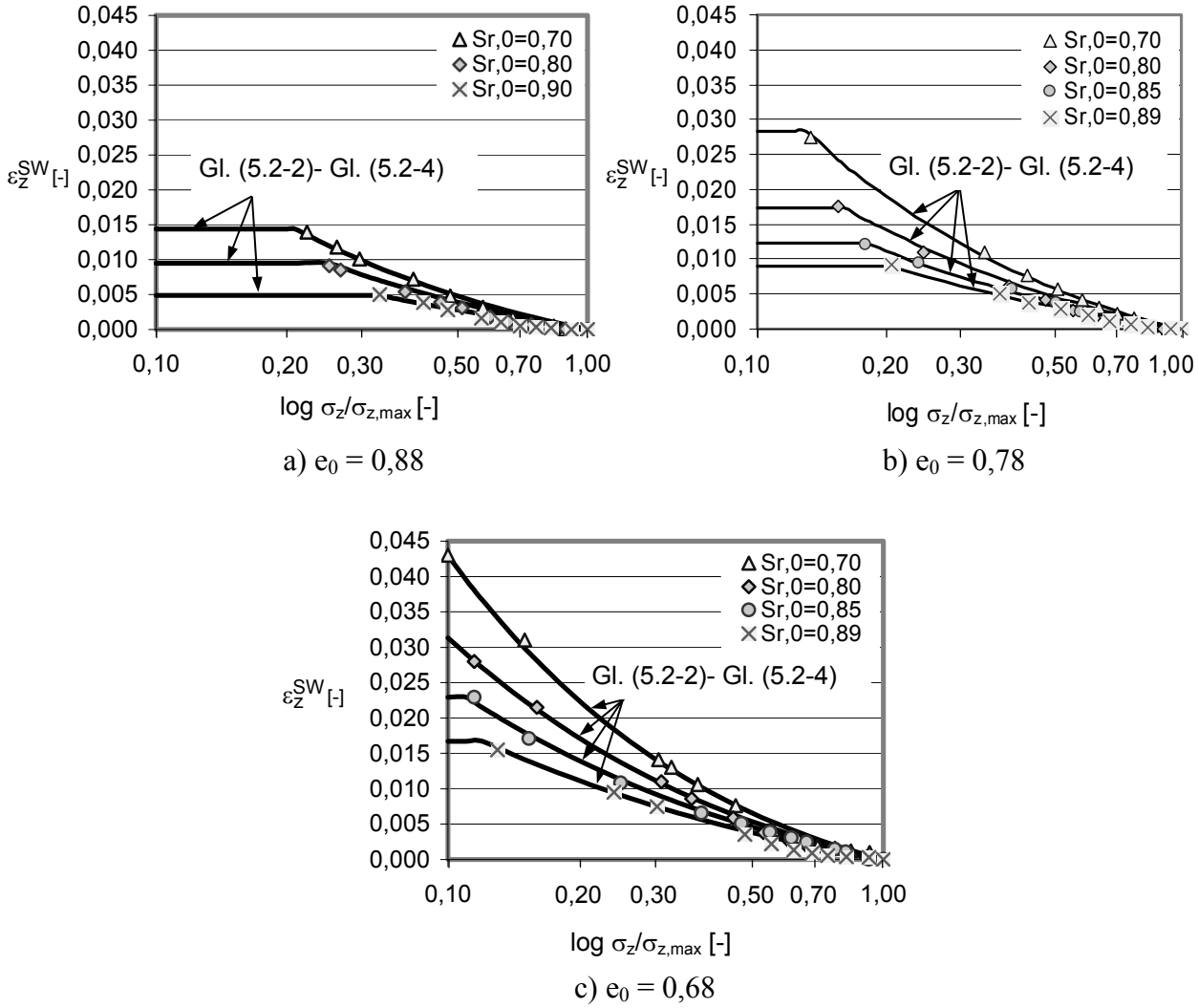


Abb. 5.2-12 Quelldruck in Abhängigkeit der Volumenänderung, $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0} = 0{,}7$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa , $\varepsilon_r = 0$, $T = 20$ °C.

Mit einer Abnahme der axialen Spannung σ_z ist eine signifikante Zunahme der axialen Quelldehnung ε_z^{SW} zu beobachten. In Abb. 5.2-13 sind in drei Diagrammen, in normierter, halblogarithmischer Form, 11 Versuchsergebnisse für die Porenzahlen a) $e_0 = 0{,}88$, b) $e_0 = 0{,}78$ sowie c) $e_0 = 0{,}68$ zusammengestellt. Die Proben mit einem initialen Sättigungsgrad

$0{,}70 \leq S_{r,0} \leq 0{,}90$ sind bis zur völligen Sättigung aufgesättigt worden. Nachdem die Sättigung $S_{r,\infty} = 1{,}0$ erreicht war und sich der maximale Quelldruck nach Gleichung (5.2-1) eingestellt hatte, ist die stufenweise Dehnung in z-Richtung initiiert worden und die Quelldehnung ε_z^{SW} bildet sich aus.



a) $e_0 = 0{,}88$ b) $e_0 = 0{,}78$

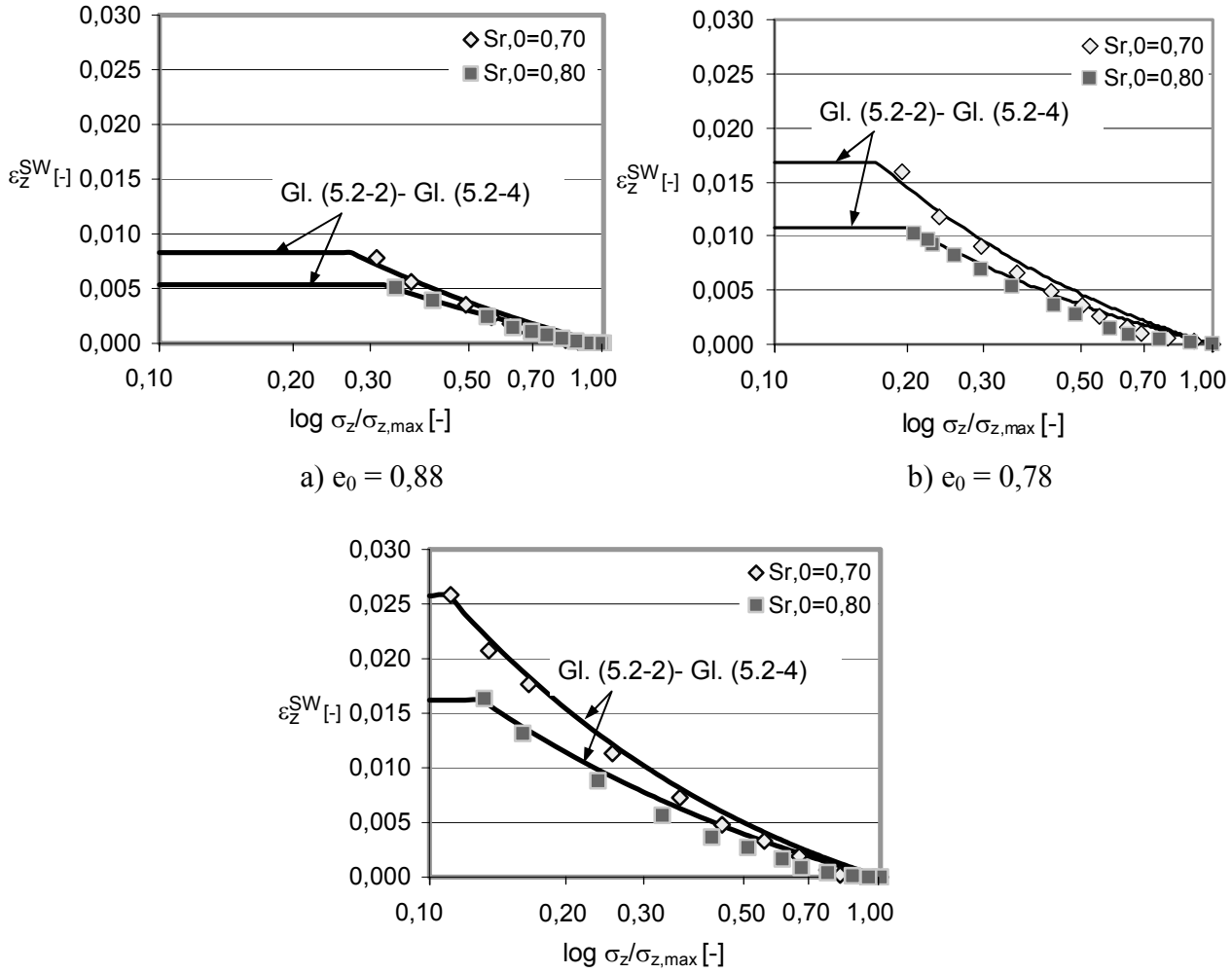
c) $e_0 = 0{,}68$

Abb. 5.2-13 Quelldehnung ε_z^{SW} in Abhängigkeit von der Vertikalspannung und $S_{r,0}$ für diverse Porenzahlen e_0 , $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $\sigma_{z,max}$ nach Gl.(5.2-1), $\varepsilon_r = 0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa , T = 20°C.

Es ist in Abb. 5.2-13 erkennbar, dass die Quelldehnung ε_z^{SW} mit Abnahme der Vertikalspannung kontinuierlich zunimmt bis ein Plateau erreicht wird. Grund für diese Stagnation der Quelldehnung ist das Erreichen des Anpressdruckes $\sigma_{z0} = 9$ kPa, mit dem ein Versuch gestartet wird. Die eindimensionale Quelldehnungsbeziehung zeichnet sich im halblog. Maßstab durch eine leicht gekrümmte Linie ab. Dies steht im Kontrast zu den Ergebnissen und der Formulierung nach Grob (1972), siehe Abb. 3.6-5, in der die Quelldehnungsbeziehung im halblogarithmischen Maßstab durch eine gerade Linie beschrieben wird.

Des Weiteren lässt sich feststellen, dass mit niedrigeren initialen Sättigungen die Quelldehnungen überproportional zunehmen. Dies lässt den Schluss zu, dass das Quellpotenzial des Materials mit abnehmender Anfangssättigung zunimmt. Die gleiche Tendenz lässt sich für eine abnehmende Porenzahl, also mit zunehmender Dichte der Probekörper, erkennen. Je kompakter die Probe ist, desto ausgeprägter bildet sich die Quellhebung aus. Mit diesem Phänomen geht auch einher, dass die Krümmung der Quelldehnungskurve im halblogarithmischen Maßstab mit zunehmendem Quellpotential zunimmt. Das heißt, je niedriger der initiale Sättigungsgrad und je höher die Dichte, desto deutlicher bildet sich diese Krümmung aus und die Quelldehnungen nehmen außerordentlich zu.

In Abb. 5.2-14 sind weitere Ergebnisse, in normierter, halblogarithmischer Form, für die Porenzahlen a) $e_0 = 0{,}88$, b) $e_0 = 0{,}78$ sowie c) $e_0 = 0{,}68$ aufgetragen.



a) $e_0 = 0{,}88$ b) $e_0 = 0{,}78$

c) $e_0 = 0{,}68$

Abb. 5.2-14 Quelldehnung ε_z^{SW} in Abhängigkeit von der Vertikalspannung und $S_{r,0}$ für diverse Porenzahlen e_0 , $S_{r,\infty} = 0{,}95$, $\sigma_{z,max}$ nach Gl.(5.2-1), $\varepsilon_r = 0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa , T = 20°C.

Die Proben mit einem initialen Sättigungsgrad $S_{r,0} = 0{,}7$ bzw. $S_{r,0} = 0{,}8$ sind jedoch nicht völlig aufgesättigt worden, sondern nur bis zu einer finalen Sättigung $S_{r,\infty} = 0{,}95$.

Aus den in Abb. 5.2-14 dargestellten Ergebnissen für teilgesättigte Zustände ergeben sich die gleichen Tendenzen wie für gesättigte Endzustände, Abb. 5.2-13. Die axiale Quelldehnung nimmt mit abnehmender initialer Sättigung als auch mit zunehmender Dichte signifikant zu. Die Krümmung und Steigung der Quelldehnungslinie nimmt mit zunehmendem Quellpotential immer mehr zu. Die Größe der Quelldehnung in z-Richtung bleibt jedoch deutlich hinter den Ergebnissen für voll gesättigte Zustände zurück. Damit wird klar, dass der finale Sättigungsgrad, neben dem initialen Sättigungsgrad und der Porenzahl, für die Ausbildung der Quelldehnung eine große Rolle spielt.

Der Einfluss der initialen Porenzahl wird noch einmal deutlich anhand der in Abb. 5.2-15 dargestellten Ergebnisse. Die Proben der drei gegenübergestellten Quelldehnungsversuche weisen alle einen initialen Sättigungsgrad $S_{r,0} = 0{,}7$ und eine finale Sättigung $S_{r,\infty} = 0{,}88$ auf.

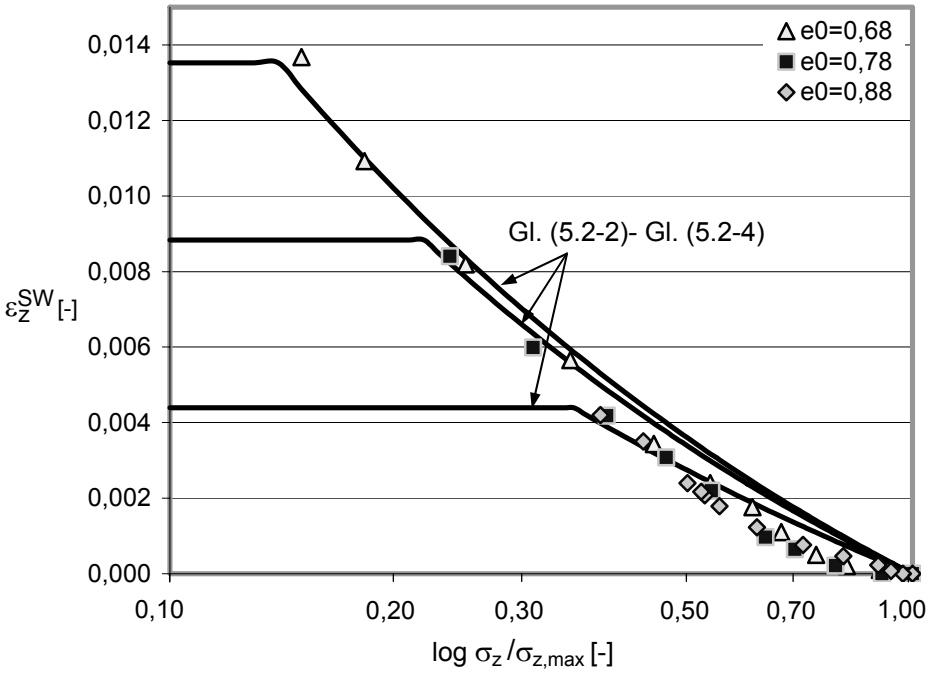
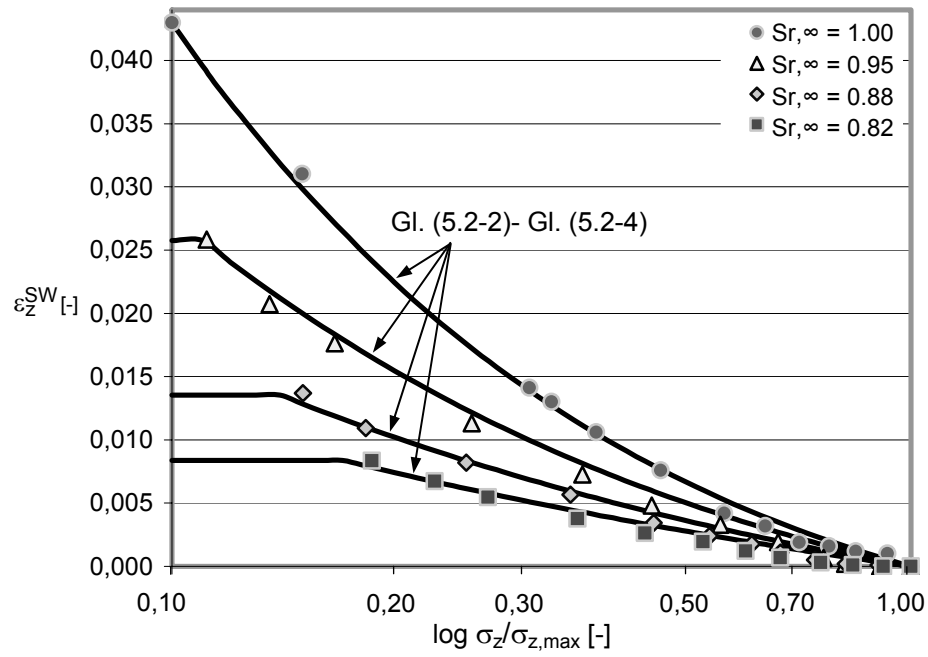


Abb. 5.2-15 Quelldehnung ε_z^{SW} in Abhängigkeit von der Vertikalspannung und e_0 für $S_{r,0} = 0{,}70$, $S_{r,\infty} = 0{,}88$, $\sigma_{z,max}$ nach Gl.(5.2-1), $\varepsilon_r = 0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa, T = 20°C.

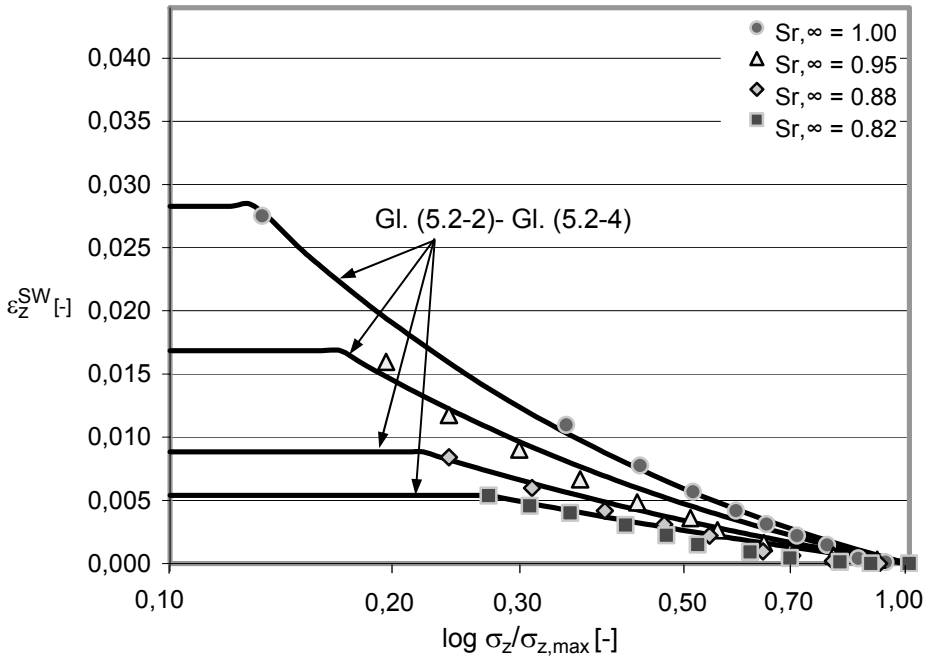
Im Verlauf der Quelldruckdehnungsbeziehung zeigt sich anfänglich kein merklicher Unterschied. Jedoch in der schlussendlichen Größe der maximalen Quelldehnung ε_z^{SW} ist ein

signifikanter Unterschied zu erkennen. Mit einer Erhöhung der Porenzahl um $\Delta e_0 = 0{,}1$ verdoppelt sich annäherungsweise die zugehörige axiale Quelldehnung.

In Abb. 5.2-16 sind Quelldruckdehnungsverläufe für die Porenzahlen a) $e_0 = 0{,}68$ und b) $e_0 = 0{,}78$ zusammengestellt.



a) $e_0 = 0{,}68$



b) $e_0 = 0{,}78$

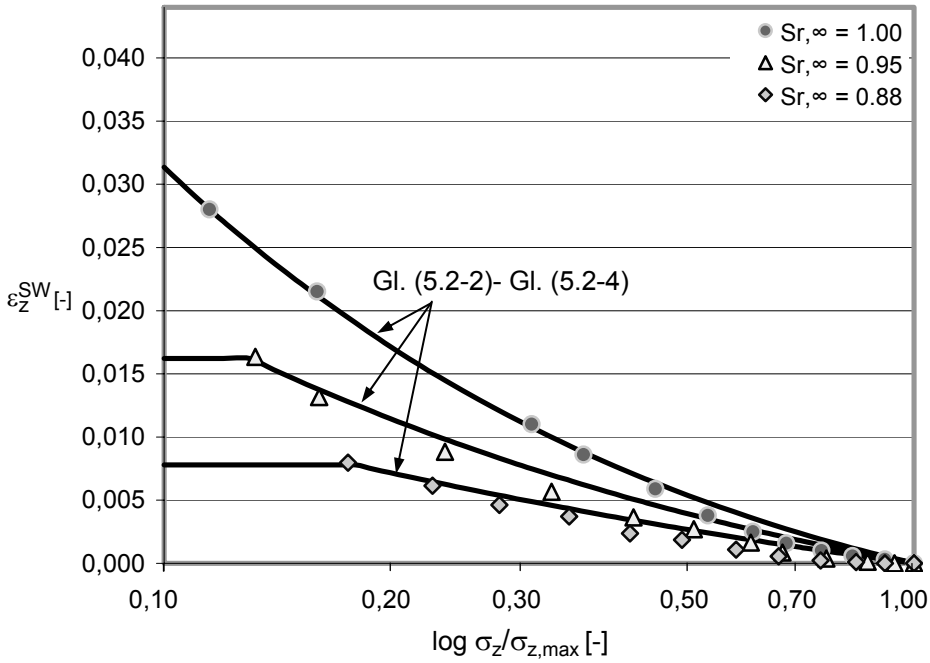
Abb. 5.2-16 ε_z^{SW} in Abhängigkeit von der Vertikalspannung und $S_{r,\infty}$ für a) $e_0 = 0{,}68$ und b) $e_0 = 0{,}78$; $S_{r,0} = 0{,}70$, $\sigma_{z,max}$ nach Gl.(5.2-1), $\varepsilon_r = 0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa, T = 20°C.

Es wird der Einfluss der finalen Sättigung $S_{r,\infty}$ auf die Entwicklung des Quellens aufgezeigt, indem die Anfangssättigung $S_{r,0} = 0{,}7$ konstant gehalten wird. Dargestellt sind finale Sättigungszustände $0{,}82 \leq S_{r,\infty} \leq 1{,}00$.

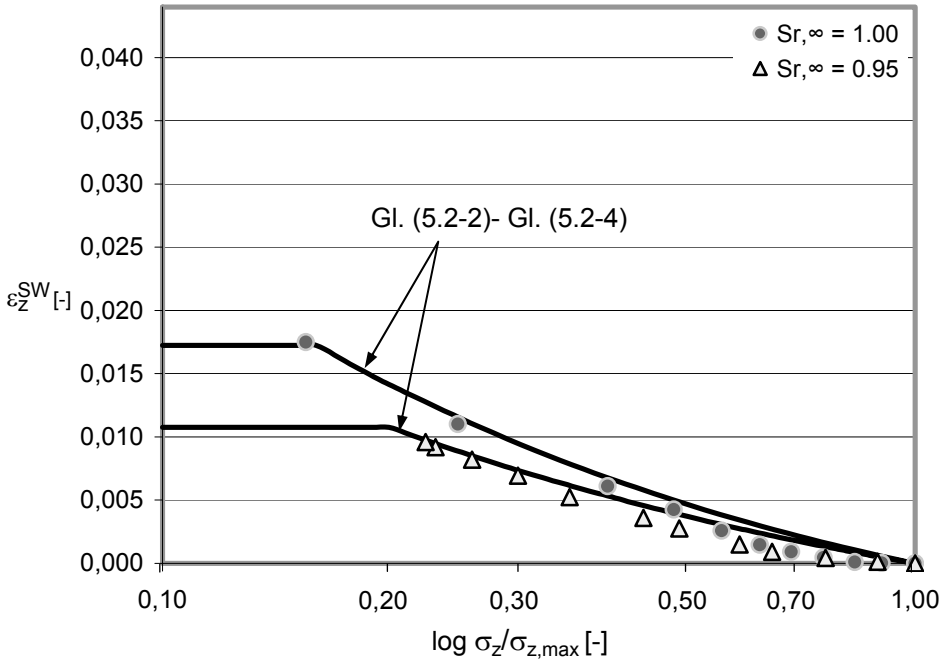
An den Resultaten wird deutlich, dass unabhängig von der Porenzahl mit abnehmender finaler Sättigung $S_{r,\infty}$ auch die Quelldehnung ε_z^{SW} bedeutend abnimmt. Sättigt man eine Probe auf $S_{r,\infty} = 0{,}95$ anstatt $S_{r,\infty} = 1{,}00$, so reduziert sich die maximale Quellhebung $\varepsilon_{z,max}^{SW}$ bereits um ca. 40 %. Der Einfluss der finalen Sättigung erhöht sich mit zunehmender Dichte.

Abb. 5.2-17 stellt Ergebnisse von weiteren Versuchen in Abhängigkeit von dem finalen Sättigungsgrad $S_{r,\infty}$ für die Porenzahlen a) $e_0 = 0{,}68$ und b) $e_0 = 0{,}78$ dar. Im Gegensatz zu den vorgestellten Resultaten in Abb. 5.2-16 mit $S_{r,0} = 0{,}7$, ist hier der initiale Sättigungsgrad auf $S_{r,0} = 0{,}8$ belassen worden.

Die Quelldehnungsversuche mit einer Anfangssättigung $S_{r,0} = 0{,}80$ in Abb. 5.2-17 verglichen mit den Versuchen mit einer Anfangssättigung $S_{r,0} = 0{,}70$ in Abb. 5.2-16, ergeben beträchtlich kleinere axiale Quelldehnungen $\varepsilon_{z,max}^{SW}$. Die Tendenzen der Zusammenhänge stimmen jedoch überein und spiegeln sich auch in den Ergebnissen von Abb. 5.2-13 wieder.



a) $e_0 = 0{,}68$



b) $e_0 = 0{,}78$

Abb. 5.2-17 ε_z^{SW} in Abhängigkeit von der Vertikalspannung und $S_{r,\infty}$ für a) $e_0 = 0{,}68$ und b) $e_0 = 0{,}78$; $S_{r,0} = 0{,}80$, $\sigma_{z,max}$ nach Gl.(5.2-1), $\varepsilon_r = 0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa, T = 20°C.

Des Weiteren ist ein Quelldruckdehnungsversuch mit einem zusätzlichen Ent- und Bewässerungszyklus durchgeführt worden. Der Einfluss dieses Vorgangs auf den Quelldruck soll näher betrachtet werden. Dazu ist in einem Versuch nach einer definierten, schrittweise zugelassenen Quellhebung, die Kopfplatte wieder arretiert und die Austrocknung der Probe initiiert worden. Nachdem infolge der Entwässerung sich der Quelldruck bis auf die Größe des Anpressdruckes $\sigma_{z0} = 9$ kPa zu Versuchsbeginn abgebaut hatte, ist die Probe wieder bewässert worden. Das Resultat dieses Versuches mit einer Anfangsporenzahl $e_0 = 0{,}78$, einer initialen Sättigung $S_{r,0} = 0{,}9$ und einer finalen Sättigung $S_{r,\infty} = 1{,}0$ ist in Abb. 5.2.18 dargestellt.

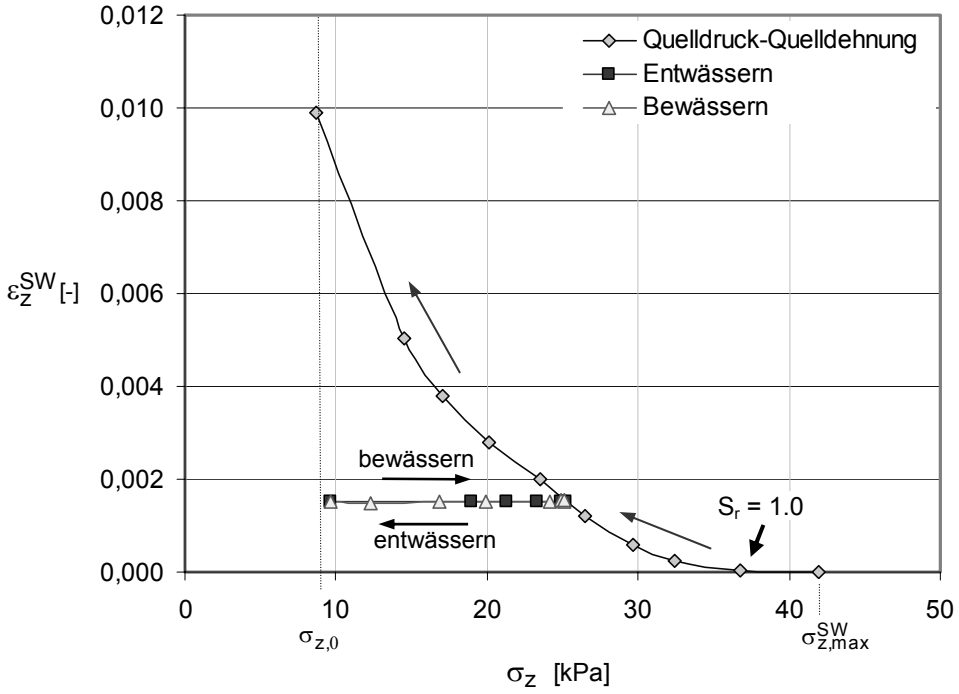


Abb. 5.2-18 Quelldruck in Abhängigkeit der axialen Volumenänderung mit einem zusätzl. Ent- und Bewässerungszyklus, $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0} = 0{,}9$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa , T = 20 °C.

Das Ergebnis in Abb. 5.2-18 zeigt, dass keine Schrumpfverformungen ε_z^{SN} auftreten solange der Quelldruck σ_z^{SW} noch vorherrscht. Sie sind erst zu erwarten, nachdem der Quelldruck abgebaut ist. Damit ist die in Abschnitt 3.7 getroffene Annahme bestätigt, dass E_c, welches definiert ist als die Steigung der ε_z^{SN} - σ_z - Kurve, infinit ist. Nach erneuter Bewässerung auf $S_{r,\infty} = 1{,}0$ entwickelt sich wieder der Ausgangsquelldruck, welcher vorherrschte als die Entwässerung gestartet wurde. Dieses Resultat indiziert elastisches Quellverhalten des Versuchsmaterials.

Aus diesem Grund sowie, dass das Quellen des Materials infolge Druck und Entwässerung grundsätzlich umkehrbar ist, vergleiche Abschnitt 3.1.2.2, wird im Folgenden das Quelldruckdehnungsverhalten als elastisch eingestuft.

Des Weiteren wird angenommen, dass die in diesem Kapitel vorgestellten Formänderungen infolge Entlastung ausschließlich aus elastischen Quelldehnungen herrühren.

Auf Grundlage der hier vorgestellten Ergebnisse, dargestellt in Abb. 5.2-12 bis einschließlich Abb. 5.2-18, wird eine Approximation für das einaxiale Quelldruckdehnungsverhalten in Abhängigkeit von dem maximalen Quelldruck $\sigma_{z,max}^{SW} = I_{\sigma,max}^{SW}/3$, nach Gleichung (5.2-1), vorgeschlagen:

$$\varepsilon_z^{SW} = \frac{a}{\left(\sigma_z / \sigma_{z,max}^{SW}\right)^b} \cdot \log\left(\sigma_z / \sigma_{z,max}^{SW}\right) \qquad ; \ \sigma_{z0} < \sigma_z < \sigma_{z,max}^{SW} \tag{5.2-2}$$

Die Grundform des eindimensionalen Quellgesetzes nach Grob (1972), Gleichung (3.6-31), bleibt somit erhalten. Jedoch wird das Quellgesetz auf den maximalen Quelldruck $\sigma_{z,max}^{SW}$ anstatt $\sigma_{z,0}$ bezogen und der konstante Quellparameter $K_{z,q}$ wird durch einen variablen Term ersetzt. Der maximale Quelldruck $\sigma_{z,max}^{SW}$ ist wiederum abhängig von dem initialen Sättigungsgrad $S_{r,0}$, dem finalen Sättigungsgrad $S_{r,\infty}$ sowie der Porenzahl e_0. Damit ist in dem vorgeschlagenen Quellgesetz die Teilsättigung berücksichtigt und beinhaltet folgende Variabeln:

- Initiale Porenzahl e_0
- Anfangssättigungsgrad $S_{r,0}$
- Endsättigungsgrad $S_{r,\infty}$

Beachtet man weiterhin analog zu Grob (1972), dass die Quellhebungen für vertikale Spannungen $\sigma_z > \sigma_{z,max}^{SW}$ gleich Null sind sowie, dass unterhalb des minimalen Drucks $\sigma_{z,0}$ die Quelldehnung ε_z^{SW} nicht weiter zunehmen, erhält man folgende Gleichungen:

$$\varepsilon_z^{SW} = 0 \qquad ; \ \sigma_z \geq \sigma_{z,max}^{SW} \tag{5.2-3}$$

$$\varepsilon_z^{SW} = \frac{a}{\left(\sigma_{z0} / \sigma_{z,max}^{SW}\right)^b} \cdot \log\left(\sigma_{z0} / \sigma_{z,max}^{SW}\right) \qquad ; \ \sigma_z \leq \sigma_{z0} \tag{5.2-4}$$

In Natura kann $\sigma_{z,0}$ einen Wert von geringem Ausmaß einnehmen bei welchen sich $\varepsilon_{z,max}^{SW}$ einstellt. In den Versuchen wird jedoch als minimal praktikabler Anpressdruck $\sigma_{z,0} = 9$ kPa gewählt.

Die Variabeln a und b sind folgendermaßen definiert:

$$a = \frac{1}{3} \cdot (-0,23 \cdot e_0 + 0,111) \cdot \sigma_{z,max}^{SW} / p_a \tag{5.2-5}$$

$$b = (2,85 \cdot e_0 - 1,455) \cdot \sigma_{z,max}^{SW} / p_a - 0,096 \tag{5.2-6}$$

Die Gleichungen (5.2-5) und (5.2-6) sind bezogen auf den Atmosphärendruck p_a und gültig für $0,68 \leq e_0 \leq 0,88$. In jedem Einzelversuch bleiben die Größen a und b konstant, da $\sigma_{z,max}^{SW}$, der atmosphärische Druck p_a auch die initiale Porenzahl unveränderlich bleiben.

Die Approximationen der Resultate nach den Gleichungen (5.2-2) bis (5.2-6) sind schon in den Abb. 5.2-13 bis 5.2-17 aufgetragen und zeigen die exzellente Güte der Approximation.

In Abb. 5.2-19 sind die Approximation für verschiedene Anfangsporenzahlen e_0 in Abhängigkeit von dem initialen Sättigungsgrad $S_{r,0}$ und für $S_{r,\infty} = 1,0$ aufgetragen.

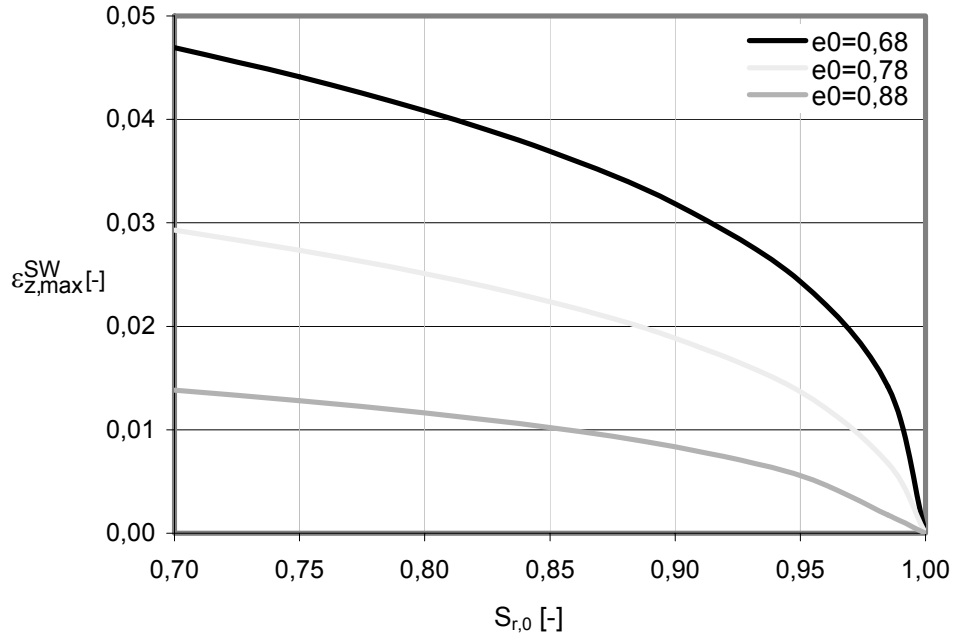
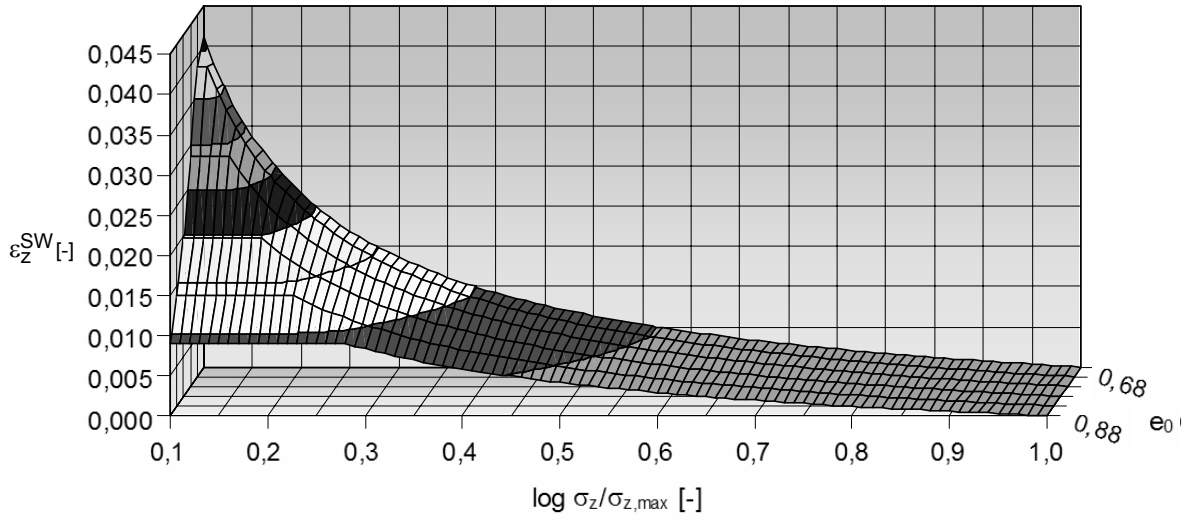


Abb. 5.2-19 Approximationen für $\varepsilon_{z,max}^{SW}$ in Abhängigkeit vom initialen Sättigungsgrad $S_{r,0}$ und der Anfangsporenzahl e_0, $S_{r,\infty} = 1,0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa, $\varepsilon_r = 0$, T = 20 °C

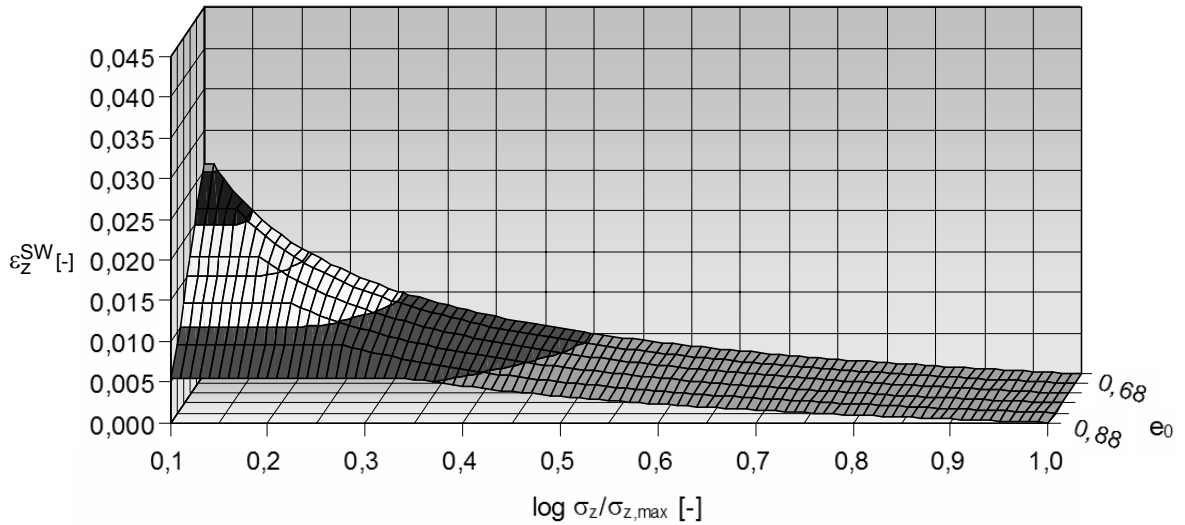
Es lässt sich feststellen, dass mit zunehmender Porenzahl das Quelldehnungspotential signifikant abnimmt. Für zunehmende initiale Sättigungen besteht die gleiche Tendenz. Vergleicht man Abb. 5.2-4, in der der maximale Quelldruck $\sigma_{z,max}^{SW}$ bei Volumenkonstanz über den Anfangssättigungsgrad $S_{r,0}$ für verschiedene initiale Porenzahlen e_0 aufgetragen ist, mit Abb. 5.2-19, wird deutlich, dass der maximale Quelldruck $\sigma_{z,max}^{SW}$ und die maximale Quelldehnung $\varepsilon_{z,max}^{SW}$ miteinander korrespondieren.

Zur Veranschaulichung und Verdeutlichung der Ergebnisse sind in Abb. 5.2-20 drei Kurvenflächen mit Quelldruckdehnungsbeziehungen des Materials mit einer initialen Sättigung $S_{r,0} = 0{,}70$ in Abhängigkeit von der Porenzahl e_0 dargestellt. Im linearen Maßstab wird die Veränderung des Quelldruckdehnungszusammenhangs in Abhängigkeit von den finalen Sättigungen a) $S_{r,\infty} = 1{,}00$; b) $S_{r,\infty} = 0{,}95$ und c) $S_{r,\infty} = 0{,}88$ aufgezeigt.

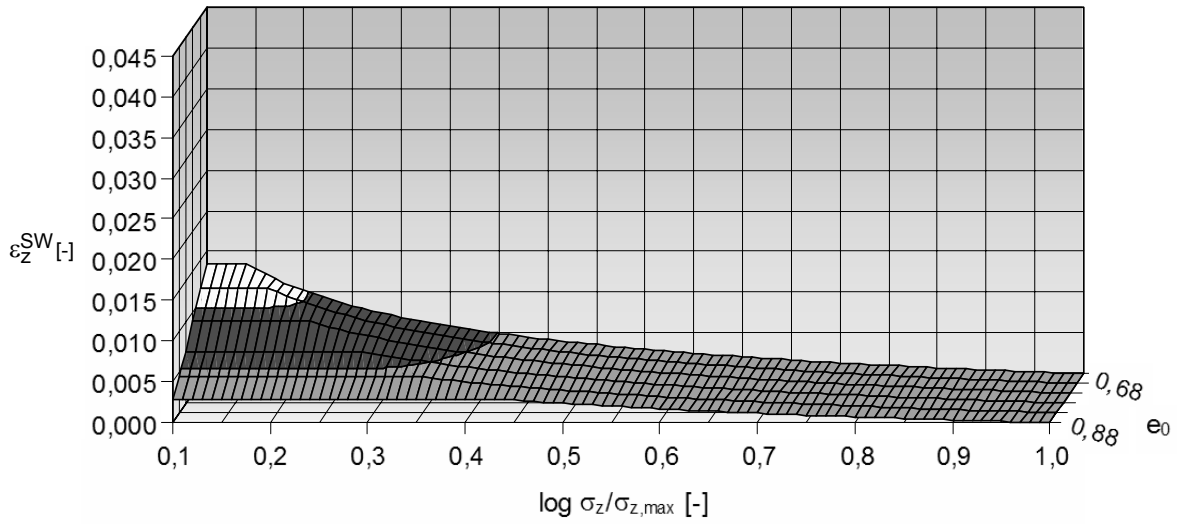
Die in Abb. 5.2-20 dargestellten Approximationen bringen den signifikanten Abfall in ε_z^{SW} mit abnehmender finaler Sättigung zum Ausdruck. Dieser Einfluss intensiviert sich für Proben höherer Dichte.



a) $S_{r,\infty} = 1{,}00$



b) $S_{r,\infty} = 0{,}95$



c) $S_{r,\infty} = 0{,}88$

Abb. 5.2-20 Quelldehnungsbeziehungen in Abhängigkeit von der σ_z für a) $S_{r,\infty} = 1{,}0$, b) $S_{r,\infty} = 0{,}95$ und c) $S_{r,\infty} = 0{,}88$; $S_{r,0} = 0{,}70$, $T = 20°C$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa.

5.2.3 Serie 3: Triaxiale Quelldruck - Quelldehnungsversuche

Die Versuche der dritten Versuchsserie werden zur Entwicklung eines objektiven Quellgesetzes durchgeführt. Es soll der Zusammenhang zwischen I_{ε}^{SW} und I_{σ}^{SW} bestimmt werden. Des Weiteren soll das in Abschnitt 5.2.2.2 untersuchte Quellverhalten noch einmal genau überprüft und bestätigt werden.

Hierzu ist es erforderlich, den Quelldruck und die Quelldehnung separat in radialer und axialer Richtung registrieren und kontrollieren zu können. In den Tests werden analog zu Serie 1 und 2 der initiale Sättigungsgrad $S_{r,0}$, die Anfangsporenzahl e_0 sowie der Endsättigungsgrad $S_{r,\infty}$, auf den die Proben aufgesättigt werden, variiert.

5.2.3.1 Versuchsapparatur

Für die Experimente ist ein weiteres spezielles Oedometergerät, bezeichnet als Oedometer B, entwickelt und konstruiert worden. Dieses Gerät ermöglicht einerseits, den radialen und den axialen Quelldruck getrennt voneinander zu erfassen, andererseits die Quelldehnungen in axialer sowie radialer Richtung zu variieren. Somit ist die Funktionsweise des Oedometerapparates B ähnlich der eines triaxialen Equipments.

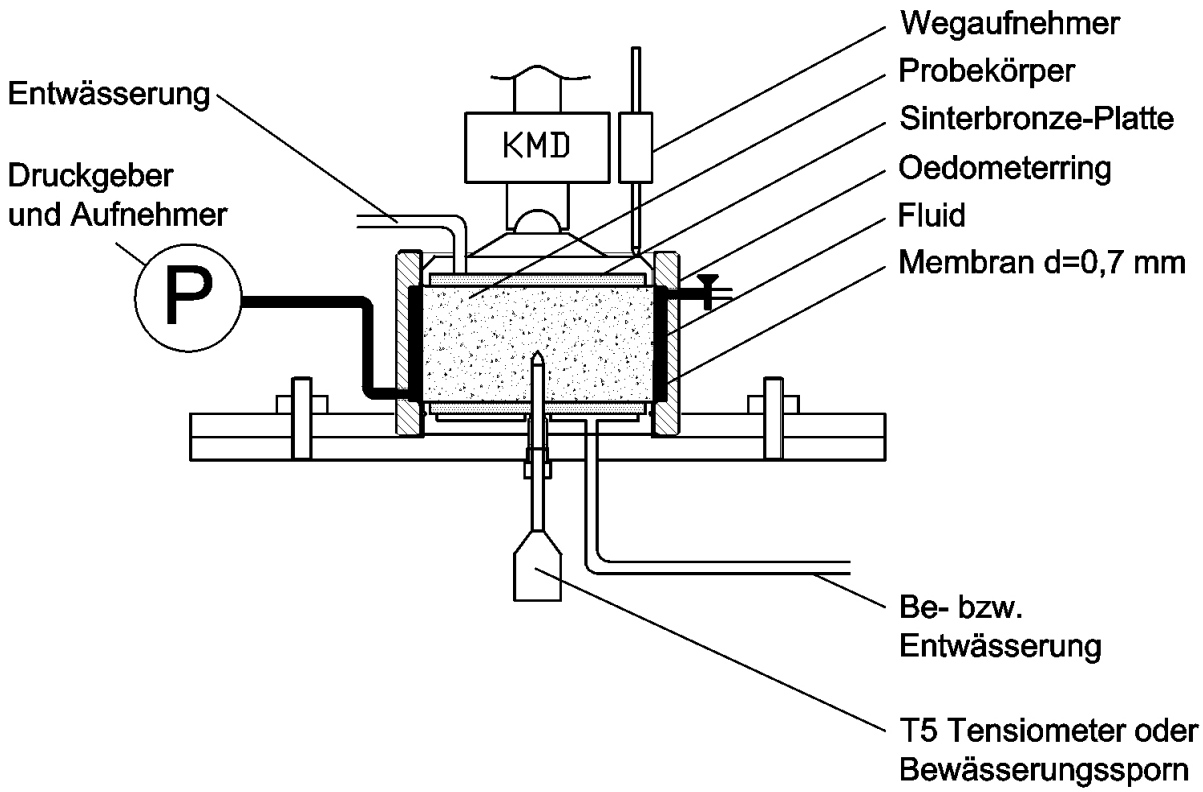


Abb. 5.2-21 Prinzipskizze von Oedometer B.

Die Struktur von Oedometer B ist, bis auf den Oedometerring, identisch mit der von Oedometer A, siehe Abb. 5.2-21. Der Oedometerring mit einem Innendurchmesser $d_i = 100$ mm und einer Höhe $h = 75$ mm ist für Versuchsproben mit einer Dicke $h_0 = 50$ mm konzipiert. Auf der Innenseite des Ringes ist eine, speziell für das Equipment hergestellte, Butylkautschuk – Membran mit einer Wandungsdicke von 0,4 mm angebracht, siehe Abb. 5.2-22. Butylkautschuk zeichnet sich im Gegensatz zu Latex- oder Neoprenmembranen als besonders dampfdiffusionsdicht aus und besitzt trotzdem sehr gute elastische Eigenschaften. Der Raum zwischen dem Ring und der Membran ist mit dem Fluid Glyzerin gefüllt. Mittels eines Druckaufnehmers wird der Druck σ_r in diesem Reservoir hinter der Membran aufgenommen. Durch Regulierung des im Reservoir befindlichen Fluidvolumens wird die Radialdehnung ε_r kontrolliert. Die axiale Spannung wird analog zu Serie 1 und 2 mittels einer Kraftmessdose erfasst. Die Größe der axialen Spannung σ_z wird durch die Kraftmessdose kontrolliert und die axiale Dehnung ε_z mittels einem elektronischen Wegaufnehmer.

Zur Messung der Wasserspannungen, wie auch in Oedometergerät A, kann ein T5 - Tensiometer von der Unterseite bis in die Mitte der Probe eingebracht werden.

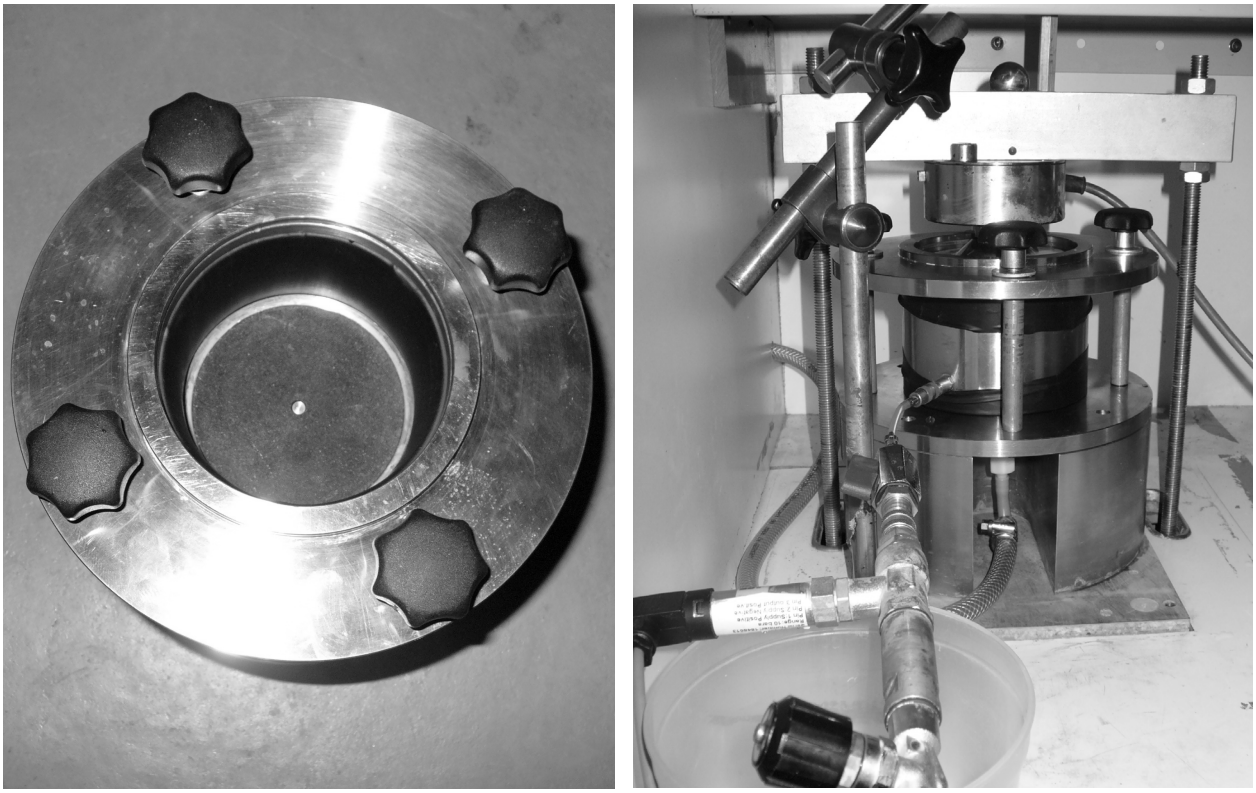


Abb. 5.2-22 Oedometer B mit innen liegender Butylkautschuk-Membran vor einem Versuch (links) und im Versuch mit Druckaufnehmer und Kraftmessdose (rechts).

Entsprechend zu Serie 1 und 2 werden die Proben im Versuch kontrolliert von unten bewässert. Die Zelle des Oedometergerätes B ist in einem Klimaschrank untergebracht, in welchem annähernd konstante Luftfeuchtigkeit und isotherme Bedingungen vorherrschen.

5.2.3.2 Versuchsdurchführung

Die Herstellung der zylindrischen Proben findet konform zur Serie 2 statt, beschrieben im Abschnitt 5.2.2.2. Die Probe wird jedoch nicht im Oedometerring hergestellt, sondern in einer zylindrischen Form mit dem gleichen Innendurchmesser. Die Innenfläche des Herstellungszylinders ist beschichtet, so dass das Auspressen der Probe in den Oedometerring erleichtert wird. Nachdem die Probe im Gerät eingebaut ist, wird sie mit einem geringen, isotropen Anpressdruck $\sigma_{z0} = \sigma_{r0} = 9{,}0$ kPa beaufschlagt. Der Belastungsarm wird arretiert und der Zugang zum Fluidreservoir im Oedometerring verschlossen. Nachdem der Versuchskörper stabile Konditionen erreicht hat wird der Versuch gestartet.

Die Probe wird, analog zu Serie 1 und 2, unter konstantem Volumen von einem initialen Sättigungsgrad $S_{r,0}$ aus auf einen spezifizierten Sättigungsgrad $S_{r,\infty}$ bewässert. Infolgedessen stellt sich der zugehörige maximale Quelldruck $\sigma^{SW}_{max,i}$ ein. Dieser wird axial mittels der Kraftmessdose und radial mittels des am Reservoir angeschlossenen Druckaufnehmers registriert. Anschließend wird stufenweise eine spezifizierte isotrope Deformation zugelassen, um die Beziehung zwischen I^{SW}_{ε} und I^{SW}_{σ} zu bestimmen. Dabei wird von Isotropie ausgegangen, woraus sich die volumetrischen Quelldehnungen ε^{SW}_{v} nach Gleichung (3.6-44) ergeben. Die Korrelation zwischen I^{SW}_{ε} und ε^{SW}_{v} lautet für diesen Fall wie folgt:

$$I^{SW}_{\varepsilon} = \varepsilon^{SW}_{v} = \varepsilon^{SW}_{1} + \varepsilon^{SW}_{2} + \varepsilon^{SW}_{3} = 3 \cdot \varepsilon^{SW}_{i} \quad ; \quad i = 1,2,3 \qquad (5.2\text{-}7)$$

Nach jedem isotropen Deformationsschritt wird ein stabiles Einpendeln der radialen und axialen Spannung abgewartet und aufgenommen, bevor der nächste isotrope Quelldehnungsschritt eingeleitet wird. Dieser Vorgang wiederholt sich bis die Vertikalspannung und Radialspannung ungefähr wieder die Ausgangsspannung $I_{\sigma 0}$ erreicht haben. Die korrespondierende Größe der Quelldehnung wird konform zu Serie 2 mit $I^{SW}_{\varepsilon,max}$ bezeichnet.

Die Versuche werden für bestimmte, maßgebende Werte der initialen Sättigung $S_{r,0}$, der Endsättigung $S_{r,\infty}$ sowie der Anfangsporenzahl e_0 durchgeführt, zusammengestellt in Tabelle 5.2-3.

Tabelle 5.2-3: Versuchsprogramm Serie 3

Anfangs-sättigungsgrad $S_{r,0}$ [-]	Endsättigungsgrad $S_{r,\infty}$ [-]			
	0,82	0,88	0,95	1,0
	Anfangsporenzahl e_0 [-]			
0,70	0,78	0,68 0,78	0,68 0,78 0,88	0,68 0,78 0,88
0,80			0,78	0,68 0,78 0,88
0,82				0,78
0,85				0,68 0,78 0,88
0,90				0,78

Erläuterung zu Tabelle 5.2-3: Für eine initiale Sättigung $S_{r,0} = 0{,}70$ und eine Endsättigung $S_{r,\infty} = 0{,}95$ werden 3 Versuche durchgeführt, mit den Anfangsporenzahlen $e_0 = 0{,}68$, $e_0 = 0{,}78$ und $e_0 = 0{,}88$.

5.2.3.3 Auswertung der Messergebnisse

In Abb. 5.2-23 sind exemplarisch die Datenpunkte der Quellspannungen in radialer und axialer Richtung über einen gesamten Quelldruckdehnungsversuch aufgezeigt. Die Bodenprobe ist mit einer Anfangsporenzahl $e_0 = 0{,}78$ und einer initialen Sättigung $S_{r,0} = 0{,}70$ hergestellt und in das Oedometergerät B eingebaut worden. Daraufhin wurde der Versuchskörper mit einem isotropen Anfangsspannungszustand $I_{\sigma 0} = 3 \cdot \sigma_{i0} = 27$ kPa beaufschlagt. Anschließend ist die Probe analog zu Serie 1 und 2 unter Volumenkonstanz auf $S_{r,\infty}$ aufgesättigt worden. Nachdem der maximale Quelldruck $I_{\sigma,max}^{SW}$ sich eingestellt hatte ist eine volumetrische, isotrope Quelldehnung schrittweise zugelassen worden und der resultierende radiale und axiale Quelldruck, σ_r und σ_z, wurde erfasst.

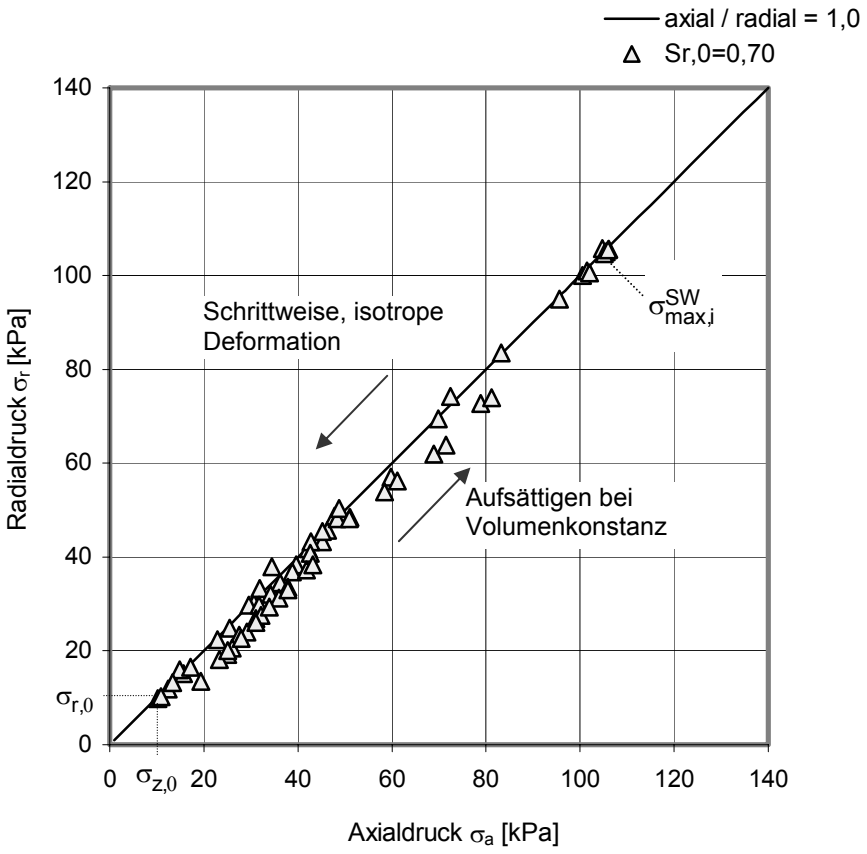


Abb. 5.2-23 Axialer Quelldruck σ_z^{SW} in Beziehung zum radialen Quelldruck σ_r^{SW},

$e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}7$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $T = 20°C$, $\sigma_{z0} = \sigma_{r0} = 9$ kPa.

Es ist festzustellen, dass das Verhältnis des Quelldruckes in Axialrichtung zu dem in Radialrichtung, bei volumenkonstantem Aufsättigen sowie nach Aufgeben der isotropen Deformation, immer annähernd gleich 1 ist. Dieses Verhalten ist in allen Versuchen der Serie 3 zu beobachten und belegt das zuvor angenommene, isotrope Quellverhalten der Versuchsproben.

Das Ergebnis eines repräsentativen Quelldruckdehnungsversuches im Oedometer B ist in Abb. 5.2-24 dargestellt. Es werden die Spannungen in axialer und radialer Richtung in Abhängigkeit von der jeweiligen Dehnung betrachtet.

Die Probe ist konform zu Serie 2 von ihrem Anfangssättigungsgrad $S_{r,0} = 0{,}7$ aus bei konstantem Volumen auf $S_{r,\infty} = 1{,}0$ aufgesättigt worden. Infolge Bewässerung stellt sich der isotrope, maximale Quelldruck ein, welcher nach Gleichung (5.2-1) zu $I^{SW}_{\sigma,max} = \sigma^{SW}_{i,max} \cdot 3 = 197{,}6$ kPa abgeschätzt werden kann. Nach Erreichen von $I^{SW}_{\sigma,max}$ ist schrittweise eine isotrope Dehnung zugelassen worden und der resultierende Quelldruck in axialer und in radialer Richtung getrennt voneinander erfasst worden.

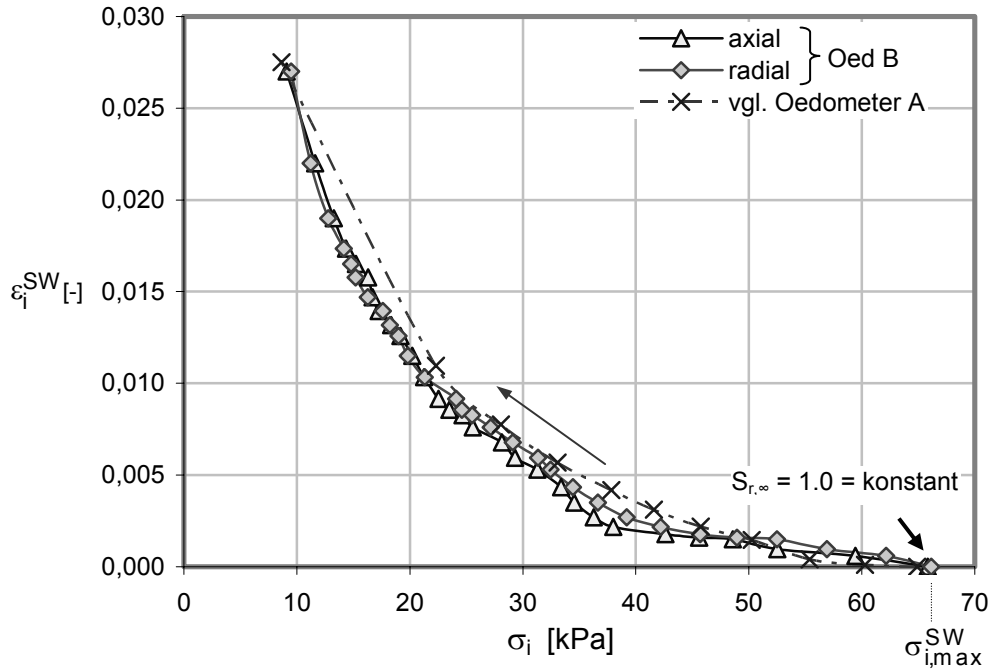


Abb. 5.2-24 Axialer und radialer Quelldruck in Abhängigkeit von der Dehnung,
$e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0} = 0{,}7$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $\sigma_{i0} = 9$ kPa , T = 20 °C, i = 1,2,3.

Die Quellspannungen bauen sich mit zunehmender isotroper Quelldehnung deutlich ab, wobei sich die Spannungen in axialer und radialer Richtung annähernd in gleich großem Maß abbauen.

Mit der Abnahme der Spannung in axialer oder radialer Richtung geht eine deutliche Zunahme der Quelldehnungen einher. In dem Ergebnis ist das Isotropieverhalten der Probe klar zu erkennen. Die axiale Quelldehnung ε_z^{SW} entspricht im isotropen Spannungszustand immer annähernd der radialen Quelldehnung ε_r^{SW}. Diese Konformität spiegelt sich in allen Versuchen der dritten Serie wieder. Um die einaxialen Quelldruckdehnungsversuche der Serie 2 mit den dreiaxialen Versuchen der Serie 3 vergleichen zu können, ist in Abb. 5.2-24 zusätzlich das Ergebnis eines Versuches mit identischen Parametern im Oedometer A, vergleiche Abb. 5.2-12, eingetragen. Es ist bemerkenswert, dass die Quelldehnungen in axialer Richtung bei beiden Versuchsarten zu jedem Zeitpunkt etwa die gleiche Größe aufweisen. Dieses Ergebnis lässt den Schluss zu, wie er auch schon von Kiehl (1990) getroffen wurde, vergleiche Kapitel 3.6.4.2, dass die Quelldehnungen in den jeweiligen Richtungen näherungsweise nur von den Normalspannungen der betreffenden Richtung abhängig sind. Die triaxialen Quellversuche von Pregl et al. (1980), auf denen die Annahmen von Kiehl (1990) basieren, belegen, dass diese Beziehung zwischen den Hauptquelldehnungen und den Hauptnormalspannungen besteht.

Somit ist die von Kiehl (1990) aufgestellte Annahme, dass die Hauptquelldehnungen nur von den zugehörigen Hauptnormalspannungen abhängig sind, untermauert worden.

Zur weiteren Beurteilung der Reproduzierbarkeit der Versuchsproben sowie der Versuchsergebnisse der dritten Serie sind zwei Kaolinit - Proben hergestellt worden mit nahezu identischen Ausgangsbedingungen. Beide Versuchskörper sind mit einer initialen Porenzahl $e_0 = 0{,}68$ und einer Anfangssättigung $S_{r,0} \approx 0{,}7$ hergestellt und in das Oedometer B eingebaut worden. Darauf folgte das Aufbringen des isotropen Anfangsspannungszustandes $I_{\sigma 0} = 27$ kPa. Die Proben wurden unter Volumenkonstanz aufgesättigt. Nachdem sich infolge Quellen der für die Parameter maximale Quelldruck $I^{SW}_{\sigma,max} \approx 315$ kPa in beiden Proben eingestellt hatte, ist eine isotrope Quelldehnung schrittweise zugelassen worden.

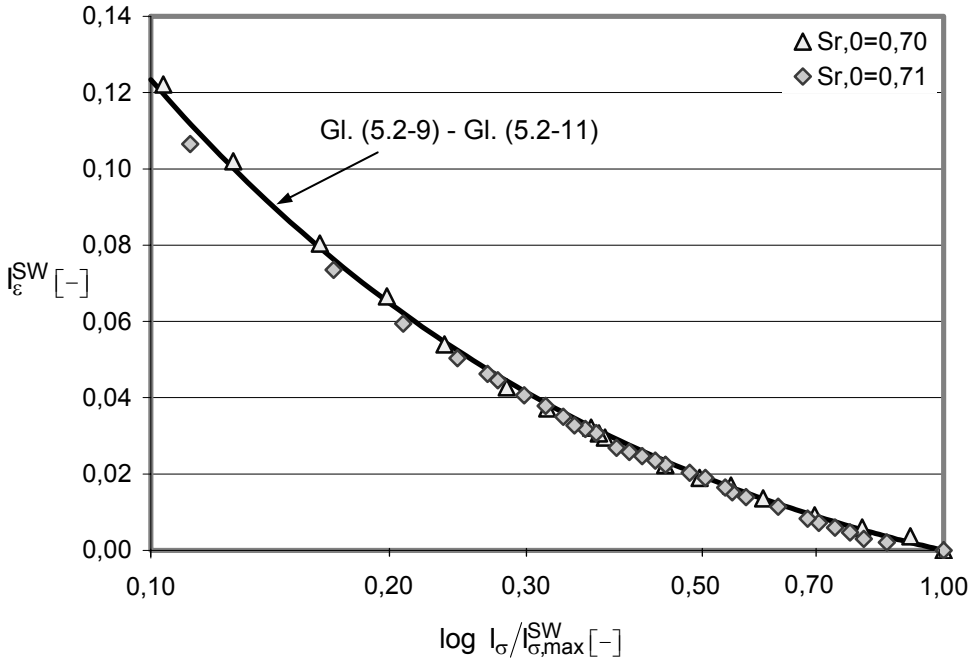


Abb. 5.2-25 Quelldehnung I^{SW}_{ε} in Abhängigkeit von der isotropen, normierten Spannung, $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $I_{\sigma 0} = 27$ kPa , T = 20 °C.

In Abb. 5.2-25 sind die Resultate der Quelldruckdehnungsbeziehungen beider Versuche übereinander dargestellt. Beziehungen sind in halblogarithmischer Form aufgetragen und auf $I^{SW}_{\sigma,max}$ normiert.

Es lässt sich feststellen, dass aus den Versuchen für beide Proben eine sehr gute Übereinstimmung in der Quelldruckdehnungsbeziehung resultiert. Somit ist aufgezeigt, dass eine gute Reproduzierbarkeit der Versuche gewährleistet ist. Des Weiteren ist festzustellen, dass sich

auch für die isotrope Quelldehnungsbeziehung in halblogarithmischer Darstellung eine leicht gekrümmte Linie resultiert. Dies spiegelt auch die Ergebnisse der zweiten Serie wieder und steht im Kontrast zu der häufig verwendeten eindimensionalen Formulierung, welche die Relation im halblogarithmischen Maßstab durch eine gerade Linie beschreibt.

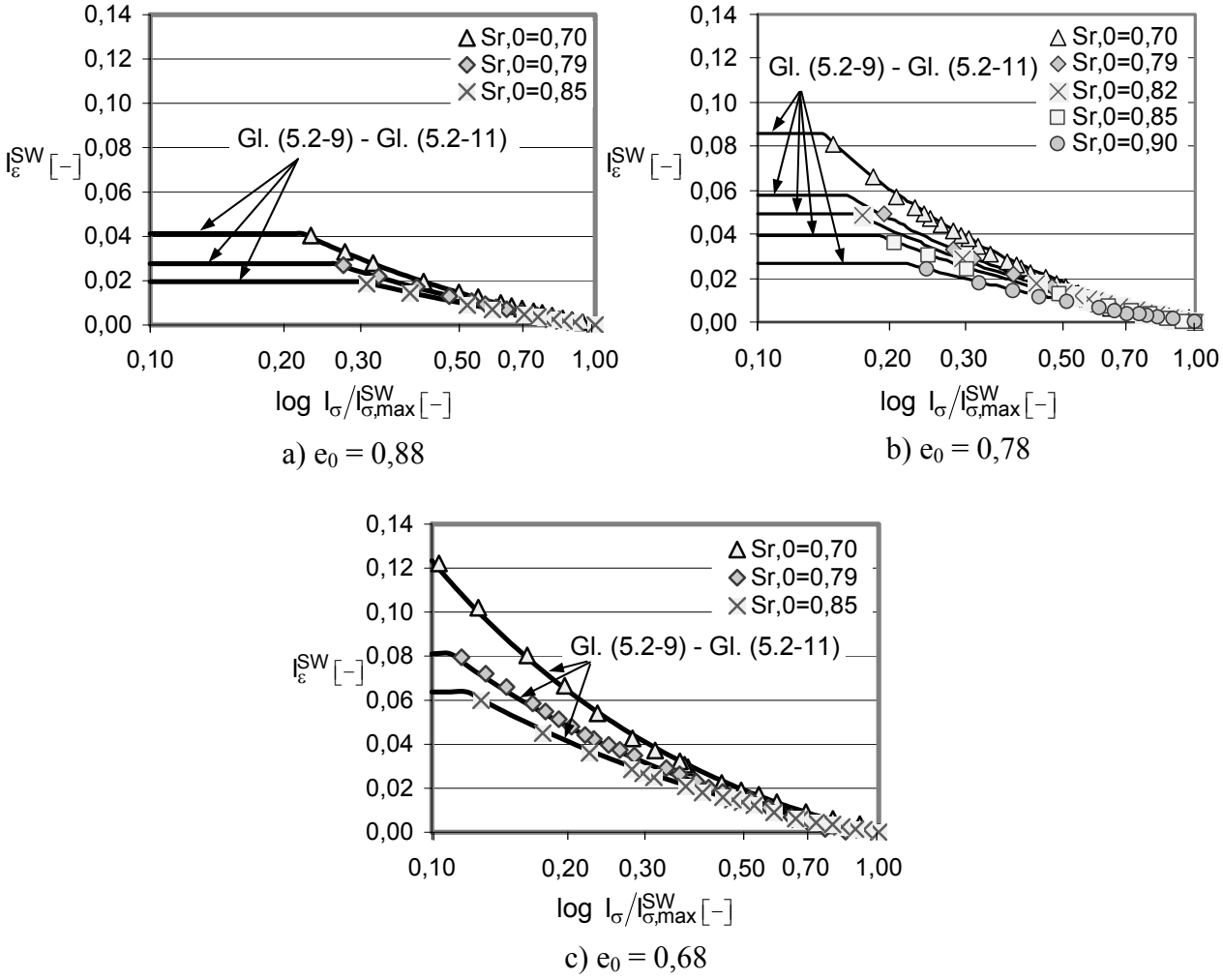


Abb. 5.2-26 Quelldehnung I_ε^{SW} in Abhängigkeit von der isotropen, normierten Spannung und $S_{r,0}$ für verschiedene e_0 , $S_{r,\infty}$ = 1,0 , T = 20°C , $I_{\sigma 0}$ = 27 kPa.

In Abb. 5.2-26 sind in halblogarithmischer Form die Ergebnisse aus 11 Versuchen in drei Diagrammen zusammengefasst. Es werden die Quelldehnungsbeziehungen des Materials betrachtet für die Porenzahlen a) e_0 = 0,88 , b) e_0 = 0,78 sowie c) e_0 = 0,68 , wobei die isotropen Spannungen I_σ auf den für die Parameter maximalen Quelldruck $I_{\sigma,max}^{SW}$ normiert sind.

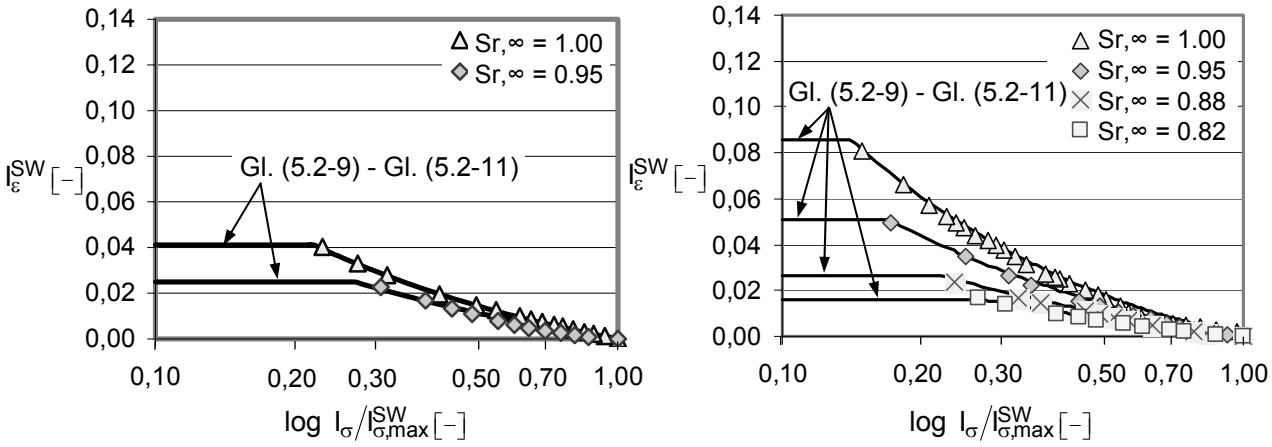
Die Proben mit einem initialen Sättigungsgrad $0{,}70 \leq S_{r,0} \leq 0{,}90$ sind im ersten Schritt bei konstantem Volumen auf $S_{r,\infty} = 1{,}0$ gesättigt worden. Nachdem die völlige Sättigung erreicht war, ist die stufenweise isotrope Dehnung initiiert worden.

Aus den Ergebnissen, dargestellt in Abb. 5.2-26, lassen sich vergleichbare Schlüsse ziehen, wie auch in Serie 2 gezogen wurden, siehe Abschnitt 5.2.2.3. Mit zunehmender Quelldehnung bauen sich die Quellspannungen signifikant ab, bis wiederum der isotrope Ausgangsspannungszustand $I_{\sigma 0}$ erreicht wird. Im halblogarithmischen Maßstab zeichnet sich der Zusammenhang zwischen dem Quelldruck und der Quelldehnung abermals durch eine gekrümmte Beziehung ab. Diese Krümmung nimmt mit kleiner werdender initialer Sättigung $S_{r,0}$ sowie abnehmender Anfangsporenzahl e_0 stark zu. Des Weiteren ist klar zu erkennen, dass sich das Quellpotential des Materials mit zunehmender Dichte sowie abnehmender Anfangssättigung überproportional verstärkt.

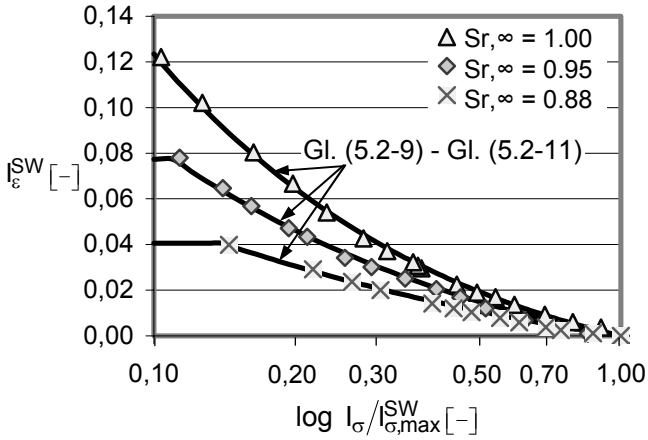
Es sind Untersuchungen unternommen worden zur Betrachtung des Quelldruckdehnungsverhaltens des Versuchsmaterials für teilgesättigte Endzustände. Analog zu Serie 2 soll die Quelldehnung in Abhängigkeit von der Quellspannung bestimmt werden für ausgewählte Sättigungen im Endzustand $0{,}82 \leq S_{r,\infty} < 1{,}0$. Jedoch dieses Mal für isotrope Zustände.

Die Probenherstellung und die Versuche verlaufen im wesentlichen Teil übereinstimmend zu den Versuchen in denen die Proben voll aufgesättigt werden ($S_{r,\infty} = 1{,}0$). In der Aufsättigungsphase bei Volumenkonstanz wird den Proben allerdings nur exakt soviel Wasser zugeführt, dass sie rechnerisch den zu erzielenden $S_{r,\infty}$ erreichen. Wenn sich der für die Parameter maximale Quelldruck $I_{\sigma,max}^{SW}$ eingestellt hat sowie $\sigma_z^{SW} = \sigma_r^{SW}$ wird davon ausgegangen, dass sich der Wassergehalt auf Grund der Kapillarität zum größten Teil gleichmäßig im Probekörper verteilt hat. Daraufhin wird schrittweise eine isotrope Quelldehnung zugelassen und der resultierende Quelldruck erfasst.

In der Abb. 5.2-27 sind verschiedene Ergebnisse aus Quelldruckdehnungsversuchen im Oedometer B für ausgewählte Parameterwerte $0{,}82 \leq S_{r,\infty} \leq 1{,}0$ und $0{,}68 \leq e_0 \leq 0{,}88$ zusammengestellt. Die Sättigung der Proben zu Versuchsbeginn ist in den dargestellten ausgewerteten Experimenten konstant auf $S_{r,0} = 0{,}70$ gehalten.



a) $e_0 = 0{,}88$ b) $e_0 = 0{,}78$



c) $e_0 = 0{,}68$

Abb. 5.2-27 Quelldehnung I_ε^{SW} in Abhängigkeit von der isotropen, normierten Spannung und $S_{r,\infty}$ für verschiedene e_0 , $S_{r,0} = 0{,}70$, $T = 20°C$, $I_{\sigma 0} = 27$ kPa.

Die in der Abb. 5.2-27 dargestellten Resultate veranschaulichen die ausgeprägte Abhängigkeit des Quellpotentials von dem Endsättigungsgrad $S_{r,\infty}$ sowie wiederum von der Anfangsporenzahl e_0. Wie erwartet, geht die Quelldehnung mit zunehmender Porenzahl deutlich zurück. Des Weiteren nimmt die isotrope Quelldehnung I_ε^{SW} mit abnehmender Endsättigung $S_{r,\infty}$ signifikant ab. Scheinbar unabhängig von der Porenzahl nimmt bei den Versuchen mit einer initialen Sättigung $S_{r,0} = 0{,}70$ die maximale isotrope Quelldehnung $I_{\varepsilon,max}^{SW}$ bereits um circa 40 % ab, wenn die Proben im Endzustand nur auf $S_{r,\infty} = 0{,}95$ anstatt völlig aufgesättigt werden. $I_{\varepsilon,max}^{SW}$ nimmt sogar um ca. 68 % ab, wenn man den Endsättigungsgrad $S_{r,\infty} = 0{,}88$ setzt.

In Abb. 5.2-28 sind zwei Versuche mit unterschiedlichen Anfangssättigungen und gleicher Endsättigung $S_{r,\infty} = 0{,}95$ sowie Anfangsporenzahl $e_0 = 0{,}78$ gegenübergestellt.

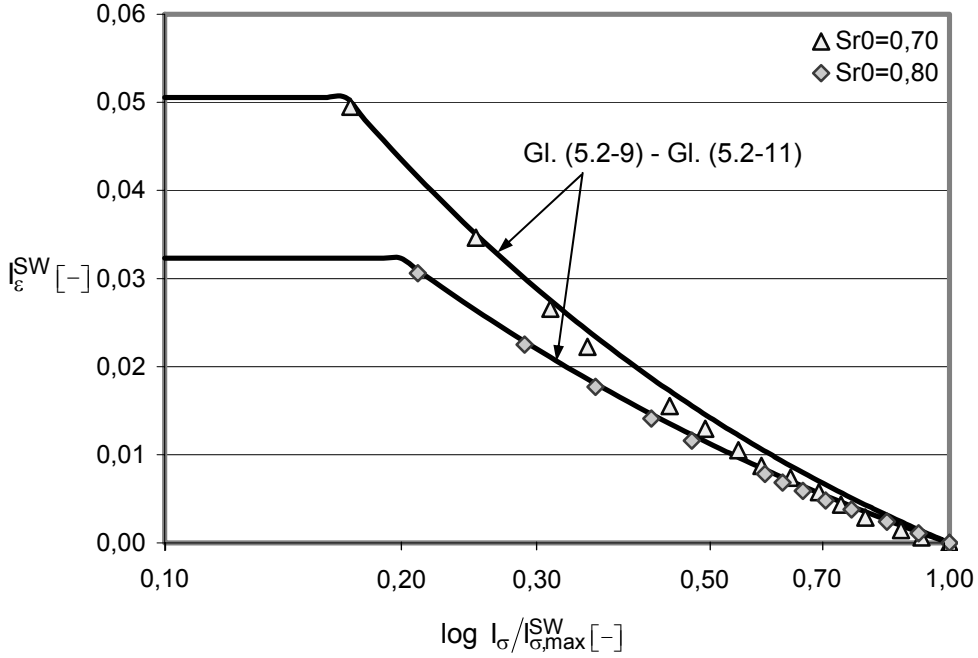


Abb. 5.2-28 Quelldehnung I_ε^{SW} in Abhängigkeit von der isotropen, normierten Spannung und $S_{r,0}$ für $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,\infty} = 0{,}95$, $T = 20°C$, $I_{\sigma 0} = 27$ kPa.

Diese Gegenüberstellung verdeutlicht, dass bei einem teilgesättigten Endzustand $S_{r,\infty} = 0{,}95$ immer noch ein erheblicher Unterschied im Quelldruckdehnungsverlauf infolge unterschiedlicher initialer Sättigungen zu erkennen ist. Die jeweilige maximale isotrope Quelldehnung $I_{\varepsilon,max}^{SW}$ beträgt wieder ungefähr 40 % von der maximalen isotropen Quelldehnung für voll gesättigte Endzustände, vergleiche Abb. 5.2-26.

Zur mathematischen Annäherung des isotropen Quelldruckquelldehnungsverhaltens wird auf Grundlage der hier vorgestellten Resultate eine Approximation gesucht. Analog zu Kapitel 5.2.2.3 werden dabei die Quelldehnungen als elastisch angenommen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die in diesem Kapitel vorgestellten Formänderungen infolge Entlastung ausschließlich aus elastischen Quelldehnungen herrühren, da die Proben vor Versuchsbeginn nur mit einer minimalen mechanischen Einwirkung ($I_{\sigma 0}$=27 kPa) beaufschlagt wurden.

Wie festgestellt sind die Hauptquelldehnungen abhängig von den zugehörigen Hauptnormalspannungen und der Porenzahl e_0. Somit kann die Approximation analog zu den Formulierungen in Kapitel 5.2.2.3 ausgedrückt werden. Dementsprechend gilt für den isotropen Fall:

$$I_\varepsilon^{SW} = 3 \cdot \varepsilon_z^{SW} \tag{5.2-8}$$

welches mit den Gleichungen (5.2-2) bis (5.2-4) resultiert zu:

$$I_{\varepsilon}^{SW} = \frac{c}{\left(I_{\sigma} \Big/ I_{\sigma,max}^{SW} \right)^{d}} \cdot \log\left(I_{\sigma} \Big/ I_{\sigma,max}^{SW} \right) \quad ; \; I_{\sigma 0} < I_{\sigma} < I_{\sigma,max}^{SW} \tag{5.2-9}$$

$$I_{\varepsilon}^{SW} = 0 \quad ; \; I_{\sigma} \geq I_{\sigma,max}^{SW} \tag{5.2-10}$$

$$I_{\varepsilon}^{SW} = \frac{c}{\left(I_{\sigma 0} \Big/ I_{\sigma,max}^{SW} \right)^{d}} \cdot \log\left(I_{\sigma 0} \Big/ I_{\sigma,max}^{SW} \right) \quad ; \; I_{\sigma} \leq I_{\sigma 0} \tag{5.2-11}$$

In Natura kann $I_{\sigma 0}$ einen Wert von geringem Ausmaß einnehmen bei welchen sich $I_{\varepsilon,max}^{SW}$ einstellt. In den Versuchen wird jedoch als minimal praktikabler Anpressdruck $I_{\sigma 0} = \sigma_{1,0}+\sigma_{2,0}+\sigma_{3,0} = 27$ kPa gewählt.

Die Variabeln c und d werden entsprechend, für den isotropen Fall, zu den Gleichungen (5.2-5) und (5.2-6) wie folgt formuliert:

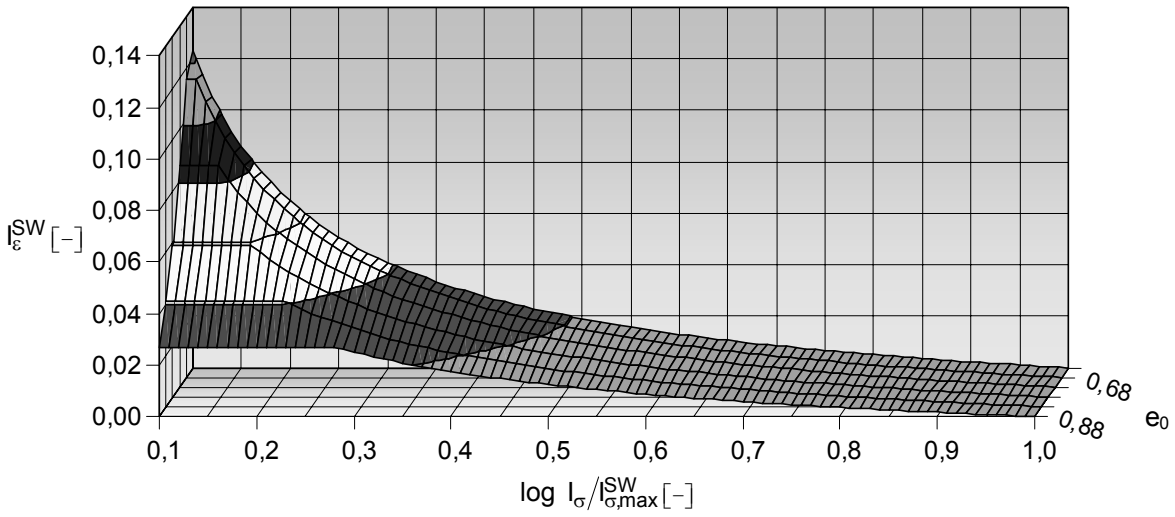
$$c = \frac{1}{3} \cdot (-0,23 \cdot e_0 + 0,111) \cdot I_{\sigma,max}^{SW} \Big/ p_a \tag{5.2-12}$$

$$d = \frac{1}{3} \cdot (2,85 \cdot e_0 - 1,455) \cdot I_{\sigma,max}^{SW} \Big/ p_a - 0,096 \tag{5.2-13}$$

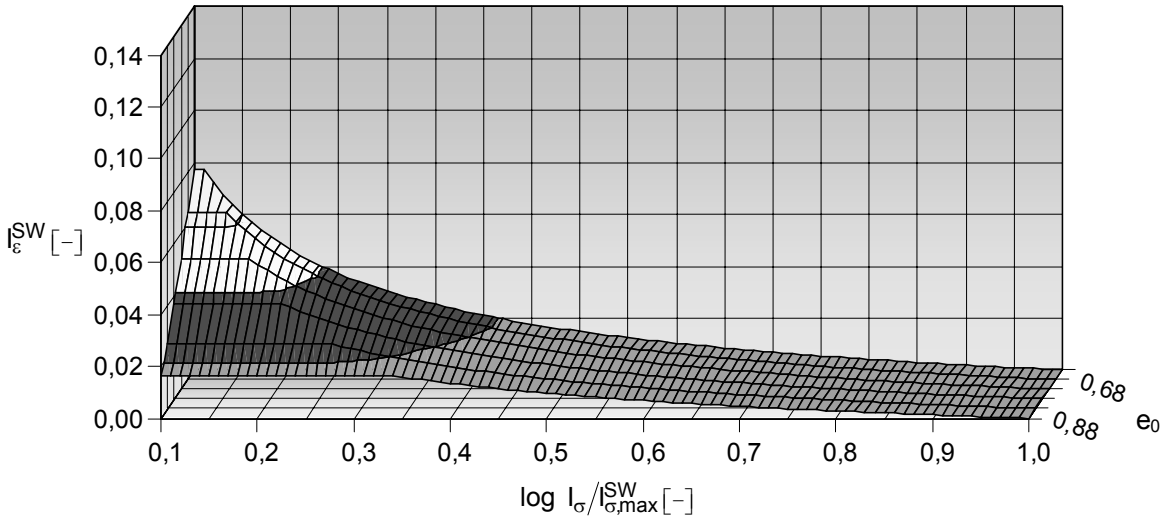
Die Formulierungen (5.2-12) und (5.2-13) sind analog zu den Gleichungen (5.2-5) und (5.2-6) auf den Atmosphärendruck p_a bezogen und gültig für $0,68 \leq e_0 \leq 0,88$. Entsprechend zu Serie 2 bleiben für jeden Einzelversuch die Größen c und d konstant, da $I_{\sigma,max}^{SW}$, der atmosphärische Druck p_a und auch die initiale Porenzahl e_0 während eines Einzelversuches unveränderlich bleiben.

Die Approximationen der Resultate durch die Gleichungen (5.2-9) bis (5.2-13) sind schon in den einzelnen Abb. 5.2-25 bis 5.2-28 als kontinuierliche Linie eingetragen. Die Approximation beschreibt die Ergebnisse sehr gut.

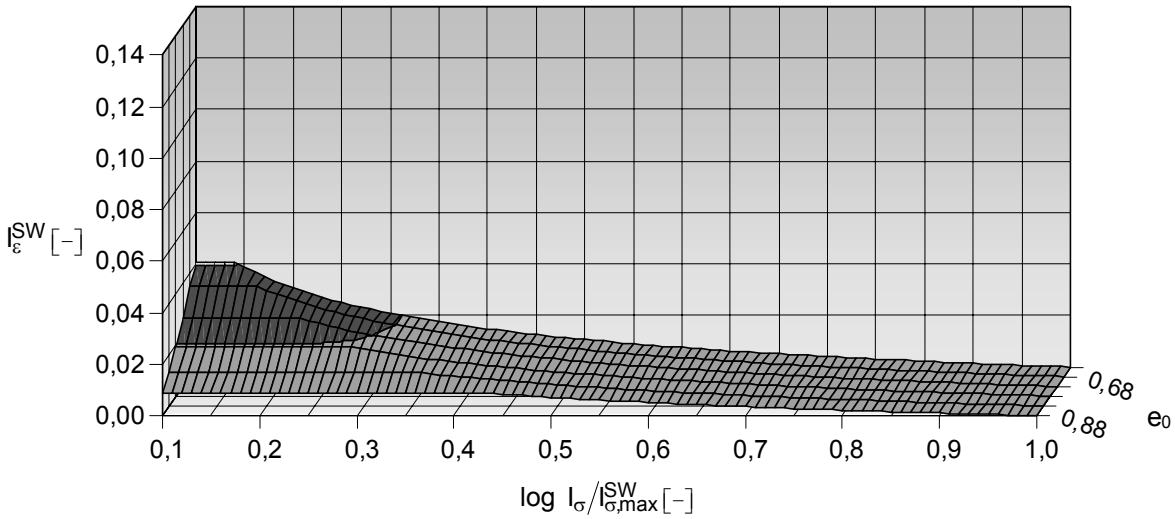
Zur anschaulichen Darstellung der Approximation für die isotrope Quelldruckdehnungsbeziehung sind in Abb. 5.2-29 drei Kurvenflächen im linearen Maßstab abgebildet. In allen Kurven geht der Anfangssättigungsgrad $S_{r,0} = 0,70$ ein. Es wird die Variation der Quelldruckdehnungsbeziehung in Abhängigkeit von den finalen Sättigungen a) $S_{r,\infty} = 1,00$; b) $S_{r,\infty} = 0,95$ und c) $S_{r,\infty} = 0,88$ sowie von der initialen Porenzahl $0,68 \leq e_0 \leq 0,88$ aufgezeigt.



a) $S_{r,\infty} = 1{,}00$



b) $S_{r,\infty} = 0{,}95$



c) $S_{r,\infty} = 0{,}88$

Abb. 5.2-29 Quelldehnungsbeziehungen in Abhängigkeit von I_σ für a) $S_{r,\infty} = 1{,}0$, b) $S_{r,\infty} = 0{,}95$ und c) $S_{r,\infty} = 0{,}88$; $S_{r,0} = 0{,}70$, $T = 20°C$, $I_{\sigma 0} = 27$ kPa.

Die in Abb. 5.2-29 dargestellten Approximationen verdeutlichen noch einmal die signifikante Abnahme der Größe der Quelldehnung I_{ε}^{SW} mit abnehmender finaler Sättigung $S_{r,\infty}$. Enorm verstärkt wird dieses Phänomen mit größer werdender Porenzahl e_0. Darüber hinaus nimmt die Steigung der Kurven mit größer werdendem finalen Sättigungsgrad $S_{r,\infty}$ beträchtlich zu. Im Allgemeinen gilt, dass mit zunehmendem Quellpotential die Krümmung in der Quelldruckdehnungsbeziehung ausgeprägter erscheint.

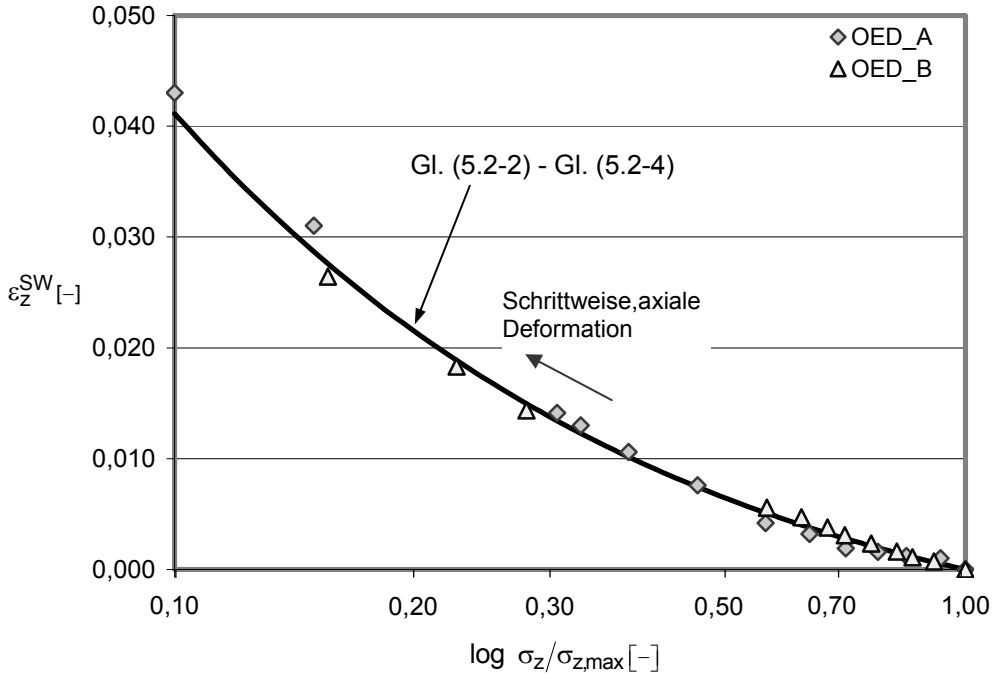
5.2.3.4 Überprüfung der Ergebnisse aus Serie 2 mittels Oedometer B

Zur Überprüfung der Ergebnisse aus Serie 2 sind im Oedometer B neben den isotropen Deformationszuständen auch zwei einaxiale Quelldruckdehnungstests gefahren worden. Hierfür wurde nach Erreichen des maximalen Quelldrucks bei Volumenkonstanz nur eine stufenweise axiale Deformation zugelassen und der resultierende axiale sowie radiale Quelldruck erfasst.

In Abb. 5.2-30 sind die Ergebnisse aus dem Versuch im Odometer A mit dem im Oedometer B für die Porenzahl $e_0 = 0{,}68$ und den Sättigungsgrad $S_{r,0} = 0{,}70$ verglichen. Oben ist die einaxiale Quelldruck - Dehnungsbeziehung dargestellt und darunter wird der Zusammenhang zwischen dem radialen und axialen Quelldruck über die gesamte Versuchsdauer veranschaulicht. Die Versuche im Oedometer A sind von einem deviatorischen Anfangsspannungszustand und die Versuche im Oedometer B von einem isotropen Anfangsspannungszustand $\sigma_{z,0} = \sigma_{r,0} = 9$ kPa aus gestartet worden.

In der einaxialen Quelldruckdehnungsbeziehung zeigt sich trotz der unterschiedlichen Anfangsspannungszustände eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse aus Oedometer A und B. In der Aufsättigungsphase bei konstantem Volumen zeigt sich in beiden Versuchen die allmähliche Zunahme des Quelldruckes bis der maximale, isotrope Quelldruck σ_{max}^{SW} erreicht wird. Bei dem Test im Oedometer B zeigt sich dieser Anstieg isotrop, im Oedometer A jedoch nicht. Dieses Ergebnis spiegelt das Resultat, dargestellt in Abb. 5.2-10, wieder und kann anhand der ungleichmäßigen Belastung des Ringes infolge des Infiltrationsprozesses von unten erklärt werden. Im Endzustand der Aufsättigung bei gleich bleibendem Volumen wird jedoch der isotrope Spannungszustand $\sigma_{z,max}^{SW} = \sigma_{r,max}^{SW}$ erreicht.

Im Anschluss wird die schrittweise Dehnung in z-Richtung zugelassen, was zu einem Abbau des Quelldruckes führt. In axialer Richtung baut sich der Druck in einem größeren Maße ab als in radialer Richtung. Der Zusammenhang zwischen dem radialen und dem axialen Quelldruck bildet sich jedoch annähernd linear aus.



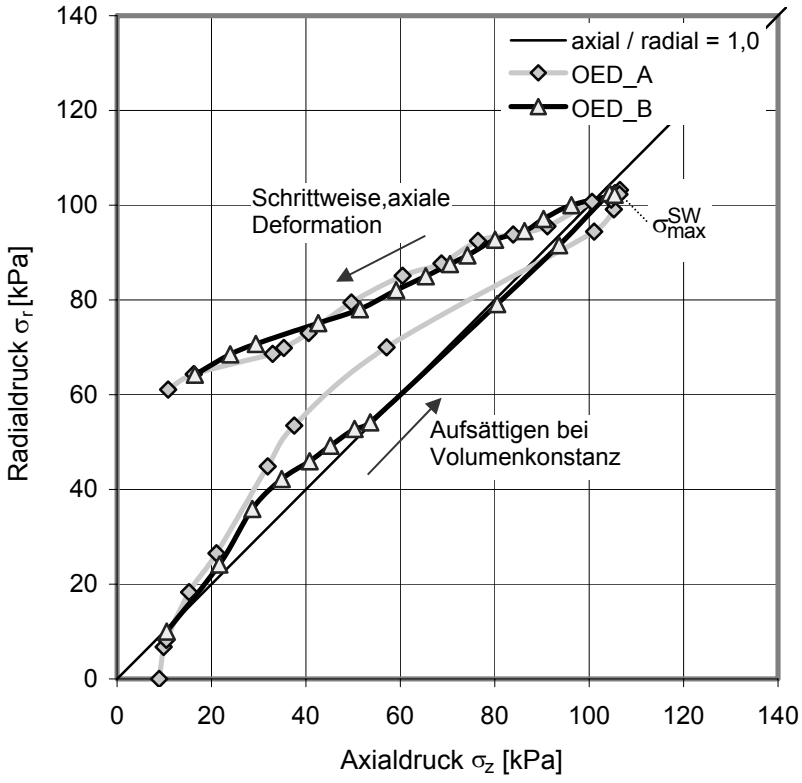
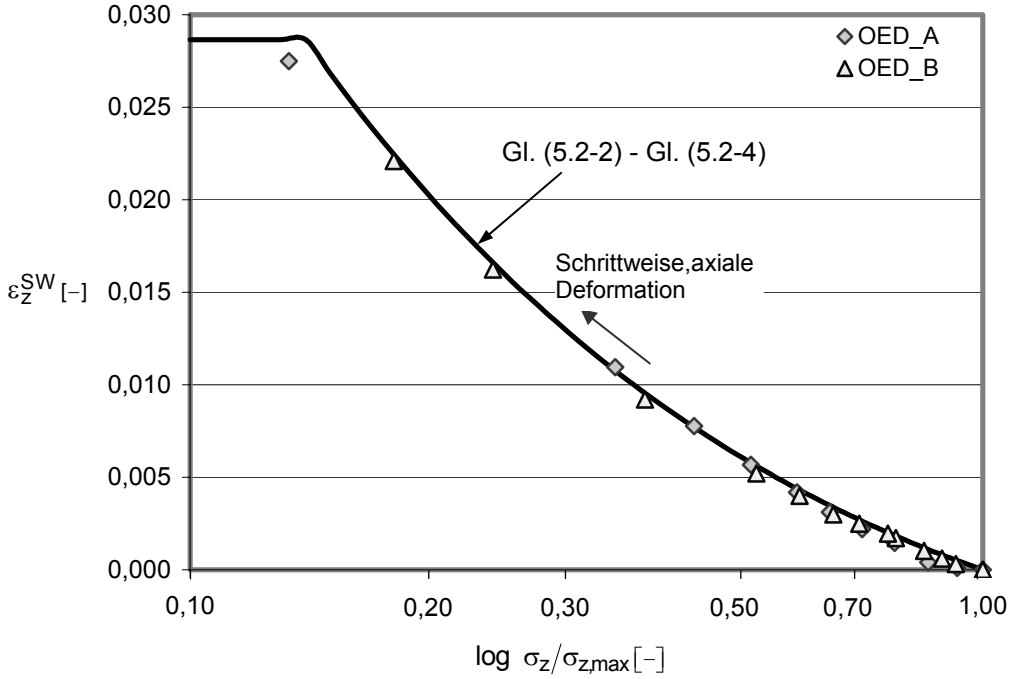


Abb. 5.2-30 Vergleich zweier Versuche mit einaxialer Dehnung im Oedometer A und B für $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}70$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $T = 20°C$, $\sigma_{z0} \approx 9$ kPa.

Der Vollständigkeit halber sind in Abb. 5.2-31 die Ergebnisse aus beiden Oedometern für die Porenzahl $e_0 = 0{,}78$ und den Anfangssättigungsgrad $S_{r,0} = 0{,}7$ gegenübergestellt.



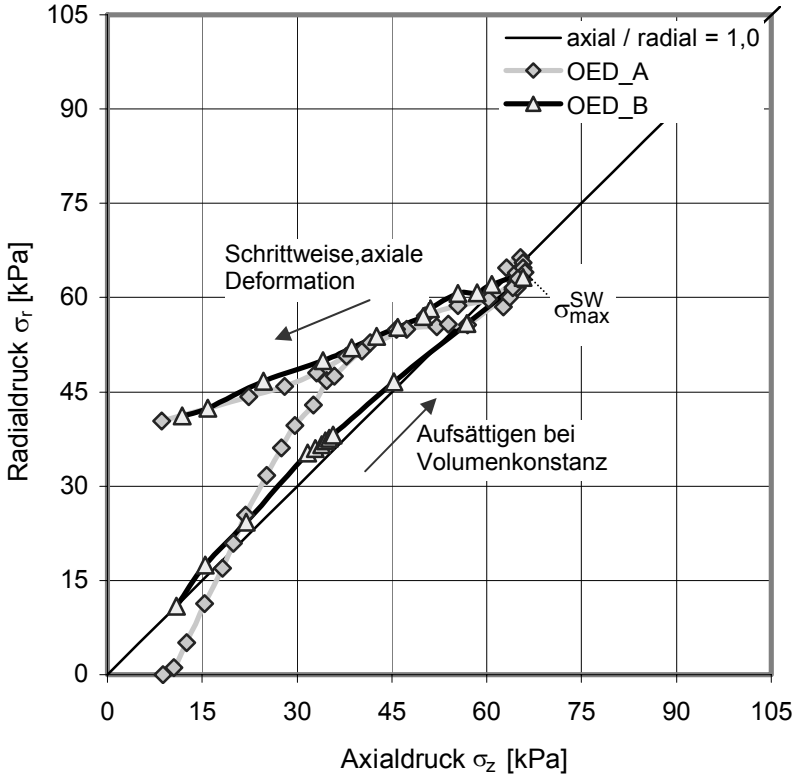


Abb. 5.2-31 Vergleich zweier Versuche mit einaxialer Dehnung im Oedometer A und B für $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0} = 0{,}70$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $T = 20°C$, $\sigma_{z0} \approx 9$ kPa.

Oben ist wieder die einaxiale Quelldruckdehnungsbeziehung dargestellt und darunter der Zusammenhang zwischen dem radialen und axialen Quelldruck.

Abermals resultiert im Vergleich der einaxialen Quelldruckdehnungsbeziehung trotz der unterschiedlichen Anfangsspannungszustände, vor der Bewässerung bei Volumenkonstanz, eine gute Übereinstimmung. Obwohl die Werte der initialen Spannungszustände relativ klein sind wird davon ausgegangen, dass dies gleichermaßen für größere Anfangsspannungszustände gilt. Dies ist jedoch nicht experimentell im Rahmen dieser Arbeit überprüft worden.

Es zeigt sich in den Versuchen mit $e_0 = 0{,}78$, dass die Beziehung zwischen dem radialen und axialen Quelldruck über die gesamten Versuche die gleichen Merkmale und Tendenzen aufweist wie in den zuvor aufgezeigten und verglichenen Tests mit der initialen Porenzahl $e_0 = 0{,}68$.

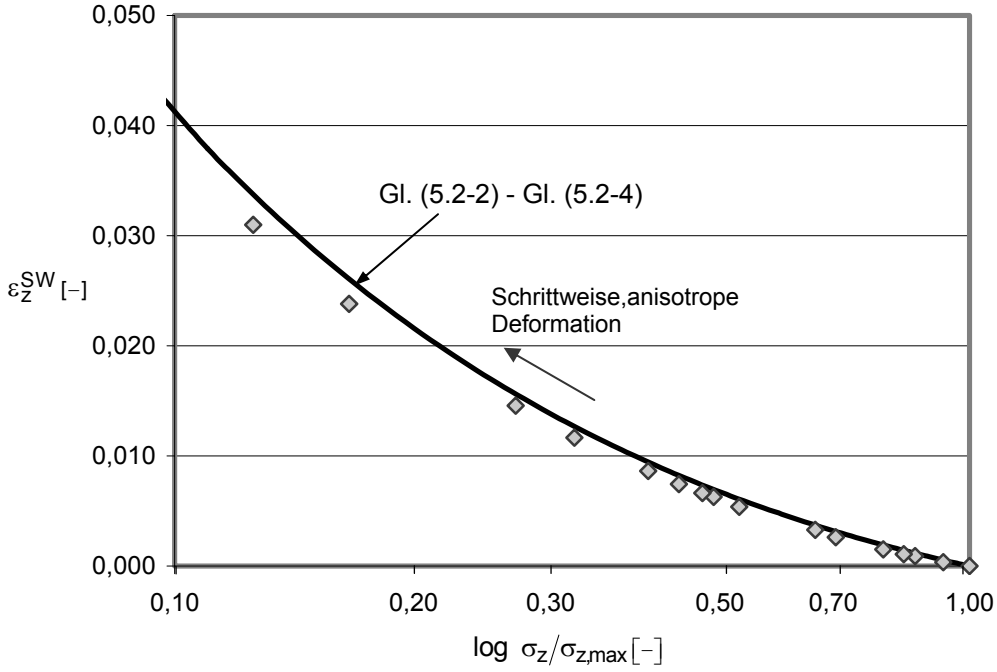
Damit ist die Reproduktion und Verwendbarkeit der Ergebnisse aus beiden Versuchsserien überprüft.

5.2.3.5 Anisotroper Quelldehnungsversuch im Oedometer B

Zur genaueren Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem radialen und axialen Quelldruck im Quelldruckdehnungsversuch wird ein weiterer anisotroper Versuch durchgeführt. Hierfür wurde nach Erreichen des maximalen Quelldrucks bei Volumenkonstanz eine stufenweise axiale und radiale Deformation zugelassen, wobei $\Delta\varepsilon_r = 0{,}5 \cdot \Delta\varepsilon_z$. Dabei ist der resultierende axiale sowie radiale Quelldruck aufgenommen worden.

Die Versuchsprobe wurde mit einer Porenzahl $e_0 = 0{,}68$ und einem Sättigungsgrad $S_{r,0} = 0{,}70$ hergestellt und in Oedometer B eingebaut. Nach dem Aufsättigen der Probe auf $S_{r,\infty} = 1{,}0$ bei konstantem Volumen ist der maximale Quelldruck $\sigma_{z,max}^{SW} = \sigma_{r,max}^{SW}$, approximiert nach Gleichung (5.2-1), annähernd erreicht worden. Darauf folgend sind die zuvor beschriebenen schrittweisen Dehnungen eingeleitet worden.

In Abb. 5.2-32 ist oben das Resultat der Quelldruck - Dehnungsbeziehung dargestellt und darunter der Zusammenhang zwischen dem radialen und dem axialen Quelldruck über den gesamten Versuch.



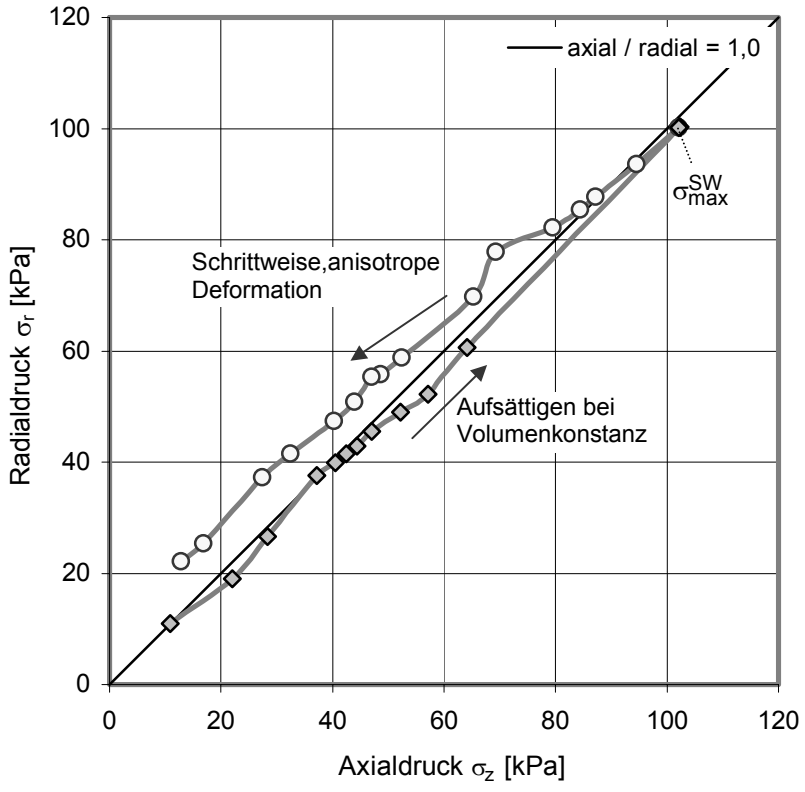


Abb. 5.2-32 Anisotroper Quelldruckdehnungsversuch mit $\Delta\varepsilon_r = 0{,}5 \cdot \Delta\varepsilon_z$, $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}70$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $T = 20°C$, $\sigma_{z0} \approx \sigma_{r0} \approx 9$ kPa.

Das Resultat der axialen Quelldruckdehnungsbeziehung zeigt eine gute Übereinstimmung mit der Approximation nach Gleichung (5.2-2). Dies belegt noch einmal, dass die Quelldehnungen in

den jeweiligen Richtungen näherungsweise nur von den Normalspannungen der betreffenden Richtung abhängig sind, vergleiche Abschnitt 5.2.3.3.

In der Beziehung zwischen dem axialen und radialen Quelldruck ist zu erkennen, dass sich der Quelldruck in der Aufsättigungsphase bei konstantem Volumen isotrop aufbaut bis sich der maximale Quelldruck einstellt hat. In der darauf folgenden stufenweise zugelassenen anisotropen Deformation $\Delta\varepsilon_r = 0{,}5 \cdot \Delta\varepsilon_z$ baut sich der Quelldruck nach und nach ab. Jedoch baut sich, wie erwartet, der Quelldruck in axialer Richtung in einem größeren Maß ab als in radialer Richtung. In Abb. 5.2-33 ist diese Beziehung mit den Beziehungen aus dem einaxialen und dem isotropen Versuch, welche identische Ausgangsparameter aufweisen, gegenübergestellt.

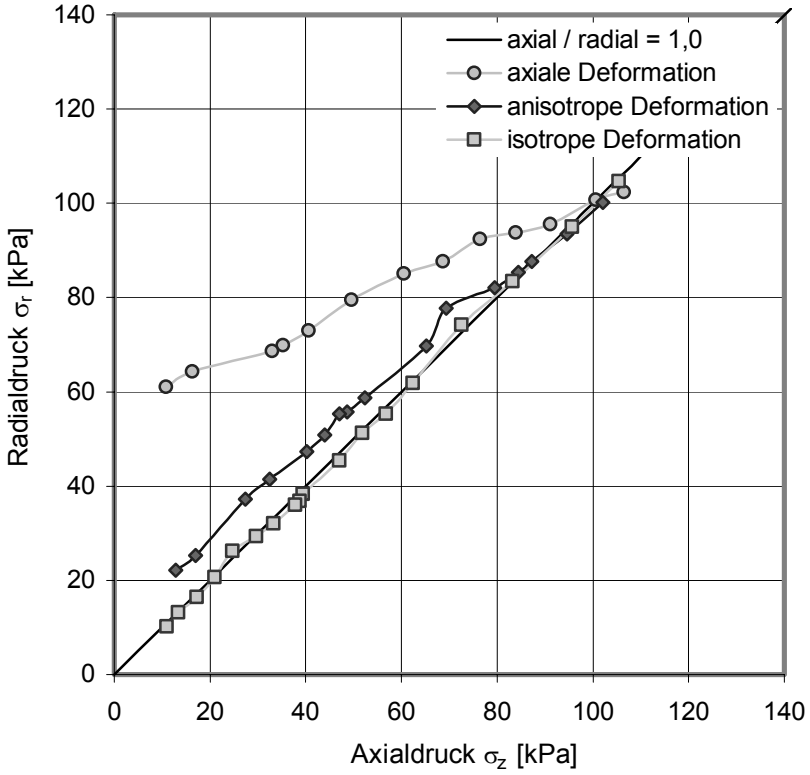


Abb. 5.2-33 σ_z^{SW} in Beziehung zu σ_r^{SW} für einaxiale, isotrope und anisotrope Deformation , $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}7$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $T = 20°C$.

Es ist klar zu erkennen, dass bei dem Versuch mit einaxial zugelassener Dehnung $\Delta\varepsilon_r = 0$, im Oedometer A, sich der Quelldruck in axialer Richtung mit zunehmender Deformation weitaus größer abbaut als der Quelldruck in radialer Richtung. Bei dem Versuch mit isotroper Deformation $\Delta\varepsilon_r = \Delta\varepsilon_z$ im Oedometer B baut sich der Quelldruck in jeweiliger Richtung gleich bleibend ab. Das Resultat für den Zusammenhang zwischen dem axialen und radialen

Quelldruck bei dem Versuch mit der anisotropen Deformation $\Delta\varepsilon_r = 0{,}5 \cdot \Delta\varepsilon_z$ liegt zwischen den Ergebnissen aus Oedometer A und dem isotropen Versuch in Oedometer B. Allerdings baut sich der radiale Quelldruck bei dem anisotropen Versuch in einem erheblich größeren Maß ab als bei dem Test mit einaxial zugelassener Dehnung. Des Weiteren ist festzustellen, dass sich in allen drei Versuchen die Beziehung zwischen den Quelldrücken in jeweiliger Richtung als nahezu linear beschreiben lässt. Unter Einbezug der hier vorgestellten Ergebnisse sowie der Resultate aus Kapitel 5.2.2.3 lässt sich die folgende Approximation für den Zusammenhang zwischen $\Delta\sigma_r^{SW}/\Delta\sigma_z^{SW}$ und $\Delta\varepsilon_r^{SW}/\Delta\varepsilon_z^{SW}$ herleiten:

$$\frac{\Delta\sigma_r^{SW}}{\Delta\sigma_z^{SW}} = -0{,}61 \cdot \left(\frac{\Delta\varepsilon_r^{SW}}{\Delta\varepsilon_z^{SW}}\right)^2 + 1{,}17 \cdot \left(\frac{\Delta\varepsilon_r^{SW}}{\Delta\varepsilon_z^{SW}}\right) + 0{,}44 \qquad \text{für} \quad \Delta\varepsilon_r^{SW} \le \Delta\varepsilon_z^{SW} \neq 0 \qquad (5.2\text{-}14)$$

Diese Annäherung ist gültig zur Beschreibung der Versuchsresultate sowie unabhängig von den Größen S_r und e_0.

Eine Umlagerung bzw. ein Abbau der Quellspannungen ist bei Langzeitversuchen jedoch nicht auszuschließen. Solche Versuche sind im Rahmen dieser Arbeit allerdings nicht durchgeführt worden.

5.3 Allgemeiner Überblick der benötigten Versuche und Parameter für eine numerische Quellanalyse

5.3.1 Quelldruck – Quelldehnungsverhalten

Das Quellverhalten von teilgesättigten bindigen Böden hängt neben dem mineralogischen Aufbau des Bodens, beschrieben in Kapitel 3.1, überwiegend von den folgenden Kenngrößen ab:

- Anfangssättigungsgrad $S_{r,0}$
- Endsättigungsgrad $S_{r,\infty}$
- Anfangsporenzahl e_0

Zur Bestimmung des Quelldruckdehnungsverhaltens eines Bodens sind triaxiale Quelldruckdehnungsversuche notwendig, beschrieben in Abschnitt 5.2.3. Ist ein isotropes Quelldruckdehnungsverhalten nachgewiesen sind auch einaxiale Quelldruckdehnungsversuche ausreichend.

Mit den Versuchsgeräten muss es möglich sein, den Probekörper bei Volumenkonstanz von einem Anfangssättigungsgrad $S_{r,0}$ aus auf einen finalen Sättigungsgrad $S_{r,\infty}$ aufzusättigen und

dabei den entstehenden Quelldruck in axialer und radialer Richtung zu erfassen. Somit kann der maximale Quelldruck $\sigma_{i,max}^{SW}$ der von einem quellfähigen Boden infolge Durchfeuchtung bei konstantem Volumen ausgeübt wird, in Abhängigkeit des Anfangs- und Endsättigungsgrades sowie der initialen Porenzahl, bestimmt werden.

Zur Ermittlung der Quelldruckdehnungsbeziehung ist es erforderlich, dass nach Einstellen des maximalen Quelldrucks $\sigma_{i,max}^{SW}$ eine stufenweise und spezifizierte isotrope Deformation zugelassen wird, wobei nach jeder Stufe der resultierende Quelldruck in axialer und radialer Richtung aufgenommen wird.

Sollte der resultierende Quelldruck trotz isotroper Deformation in radialer Richtung und axialer Richtung nicht übereinstimmen, liegt ein Boden mit einem anisotropen Quellvermögen vor. In diesem Fall sollten auch, je nach Fragestellung, triaxiale Quelldruckdehnungsversuche mit definierten anisotropen Deformationen durchgeführt werden.

5.3.2 Wassertransport

Zur Berechnung des Wassertransportes in einem teilgesättigten Bodenkörper werden die gesättigte sowie die ungesättigte Wasserleitfähigkeit des Bodes und die hydraulischen Beziehungen (pF-Kurven) benötigt.

Die Bestimmung der gesättigten und ungesättigten Wasserleitfähigkeit findet anhand von Durchlässigkeitsversuchen statt.

Für die Ermittlung der pF-Kurve stehen verschiedene Verfahren zur Bestimmung der Wasserspannungen zur Verfügung, vergleiche Abschnitt 3.3-4. Für die Messwerte in dem Bereich pF = 0 bis ca. 3 wird häufig, wie auch in dieser Arbeit, die Tensiometermethode zur direkten Bestimmung der Matrixsaugspannung verwendet. Für den Messbereich pF = 3 bis ca. 4 kommen vermehrt so genannte „axis-translation“- Methoden zur Messung der Matrixsaugspannung zum Einsatz.

Gängige Techniken zur Bestimmung der totalen Saugspannung im Bereich pF > 4 sind die Feuchtigkeitsmesstechnik, die Feuchtigkeitskontrolltechnik und die Filterpapiermethode ohne Kontakt zur Probe. Zu den Feuchtigkeitskontrolltechniken gehören zum Beispiel Feuchtigkeitssteuerung mittels Salz- und Säurelösungen. Die Filterpapiertechnik ohne Kontakt zur Probe ist eine indirekte Methode zur Bestimmung der Feuchtigkeit. Für jede dieser Methoden ist die Kelvin´sche Gleichung (3.3-1) zu verwenden, um die gemessenen bzw. gesteuerten Feuchtigkeitswerte in die totale Saugspannung umzurechen.

6 Numerische Simulation

Zunächst wird das eingesetzte Finite Elemente Programm kurz vorgestellt und erläutert. Im Folgenden werden Simulationen von Laborversuchen an teilgesättigten, bindigen Böden durchgeführt und mit den Testergebnissen verglichen.

Im Anschluss wird die Lösung eines gewählten, praxisrelevanten Randwertproblems vorgestellt und analysiert.

6.1 Beschreibung des eingesetzten FE - Programms

Zum Einsatz kommt das Finite - Element - Programmsystem ABAQUS Version 6.4. Entwickelt wurde das System von Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc., Providence, Rhode Island, USA und wird für die Nutzung vom regionalen Hochschulrechenzentrum der TU Kaiserslautern gegen eine Lizenzgebühr zur Verfügung gestellt.

Das ABAQUS Programmsystem beinhaltet ABAQUS/Standard, ein allgemeines Finite - Element - Programm, ABAQUS/Explicit, ein Finite - Element - Programm speziell zur Berechnung von hochdynamischen Vorgängen sowie von Umformprozessen, sowie ABAQUS/CAE, ein Prä- und Postprozessor zum Aufbau und zur Auswertung von ABAQUS - Modellen. ABAQUS/Explicit wird in dieser Arbeit nicht verwendet.

ABAQUS bietet zahlreiche Möglichkeiten zur Erweiterung des FE - Programms in Form von Fortran - Subroutinen. Mittels dieser Routinen können zum Beispiel benutzerdefinierte Stoffmodelle, vorgegebene Anfangs- und Randbedingungen u.v.a. eingebaut werden. Es besteht in ABAQUS ebenso die Möglichkeit, das Material Boden als Mehrphasenmaterial (Feststoff, wassergefüllte Poren und Luftporen) zu betrachten. Damit ist das Programm gut geeignet zur Berechnung von teilgesättigten Zuständen. Darüber hinaus ist bereits ein allgemeines Quellmodell in ABAQUS implementiert. Die Beziehung beschreibt das sättigungsabhängige, freie, volumetrische Quellen von umströmten Feststoffkörnern.

6.2 Konstitutive Beziehungen

In den numerischen Simulationen ist für die mechanische Beanspruchung eine linear elastische - idealplastische Spannungsdehnungsbeziehung angenommen, vergleiche Kapitel 3.6.

Die inkrementellen, umkehrbaren elastischen Quelldeformationen $\Delta\varepsilon^{SW}$ werden additiv mit den mechanischen elasto-plastischen Deformationen $\Delta\varepsilon^{m}$ überlagert, siehe Gleichung (3.6-1). Die absoluten Dehnungsinkremente $\Delta\varepsilon$ ergeben sich damit zu:

$$\Delta\varepsilon = \Delta\varepsilon^{m} + \Delta\varepsilon^{SW} = \Delta\varepsilon^{el,m} + \Delta\varepsilon^{pl,m} + \Delta\varepsilon^{SW} \tag{6.2-1}$$

Dabei werden nur isotrope Quellverformungen als Zwangsbeanspruchung hinzu addiert. Die absoluten Spannungsinkremente $\Delta\sigma$ setzen sich aus den mechanischen Spannungs-anteilen $\Delta\sigma^{m}$ und den quellbedingten Spannungsanteilen $\Delta\sigma^{SW}$ zusammen:

$$\Delta\sigma = \Delta\sigma^{m} + \Delta\sigma^{SW} \tag{6.2-2}$$

Die Beziehung zwischen den mechanischen Spannungsinkrementen sowie den quellbedingten elastischen Spannungen und den jeweiligen Dehnungsinkrementen werden mittels den Spannungs- Verzerrungs- Matrizen berechnet:

$$\Delta\sigma = \left[D^{el} \right] \cdot \left(\Delta\varepsilon^{m} - d\lambda \cdot \frac{\partial F}{\partial \sigma} \right) + \left[D^{el,SW} \right] \cdot \Delta\varepsilon^{SW} \tag{6.2-3}$$

worin F die Fließfunktion und $d\lambda$ ein Proportionalitätsfaktor nach Gleichung (3.6-30) ist, welcher für plastisches Verhalten $\lambda > 1$ und für rein elastisches Verhalten $\lambda = 0$ ist. Dilatanz und Kontraktanz infolge Scherbeanspruchung werden bei der assoziierten Fließregel, welche annähernd zutreffend ist für bindige Böden, durch den Dilatanzwinkel beschrieben.

In Gleichung (6.2-3) werden zu den elasto-plastischen Beanspruchungen rein isotrope Quellverformungen als Zwangsbeanspruchung hinzu addiert. Über Iterationsschritte erfolgt dann die Berechnung des Gleichgewichtzustandes.

In dem Finite - Elemente - Programm ABAQUS ist bereits ein allgemeines Quellmodell für unbehindertes, volumetrisches Quellen ($I_\sigma \rightarrow 0$) implementiert. Die Beziehung zwischen dem Sättigungsgrad S_r und der maximalen volumetrischen Quelldehnung $\varepsilon^{SW}_{jj,max}$ wird in der Abb. 6.2-1 verdeutlicht.

Das Programm berechnet die zeitabhängige, instationäre Wasserausbreitung im System und greift für jedes Inkrement an der tabellarisch in das Hauptprogramm eingegebenen Kurve, dargestellt in Abb. 6.2-1, die Änderung der volumetrischen Quelldehnung $\Delta\varepsilon^{SW}_{v,max}$ in Abhängigkeit von der Anfangssättigung $S^I_{r,0}$ und Endsättigung S^I_r in jedem Inkrement ab. Somit ergibt sich laut Hibbit, Karlson & Sorensen Inc. (2002), wobei $\varepsilon^{SW}_v = I^{SW}_{\varepsilon,v} = \varepsilon^{SW}_1 + \varepsilon^{SW}_2 + \varepsilon^{SW}_3$ ist, die maximal mögliche Dehnungsänderung $\Delta\varepsilon^{SW}_{i,max}$ bei unbehinderter Quelldehnung in jeweiliger Richtung zu:

$$\Delta\varepsilon^{SW}_{i,max} = \frac{1}{3}\left[I^{SW}_{\varepsilon,v}\left(S^I_r\right) - I^{SW}_{\varepsilon,v}\left(S^I_{r,0}\right)\right] \qquad ; \qquad i = 1,2,3 \tag{6.2-4}$$

Die Beziehung zwischen der Quellspannung und der Quelldehnung wird mittels der Quellmatrix [$D^{el,SW}$], Gleichung (6.2-5), berechnet.

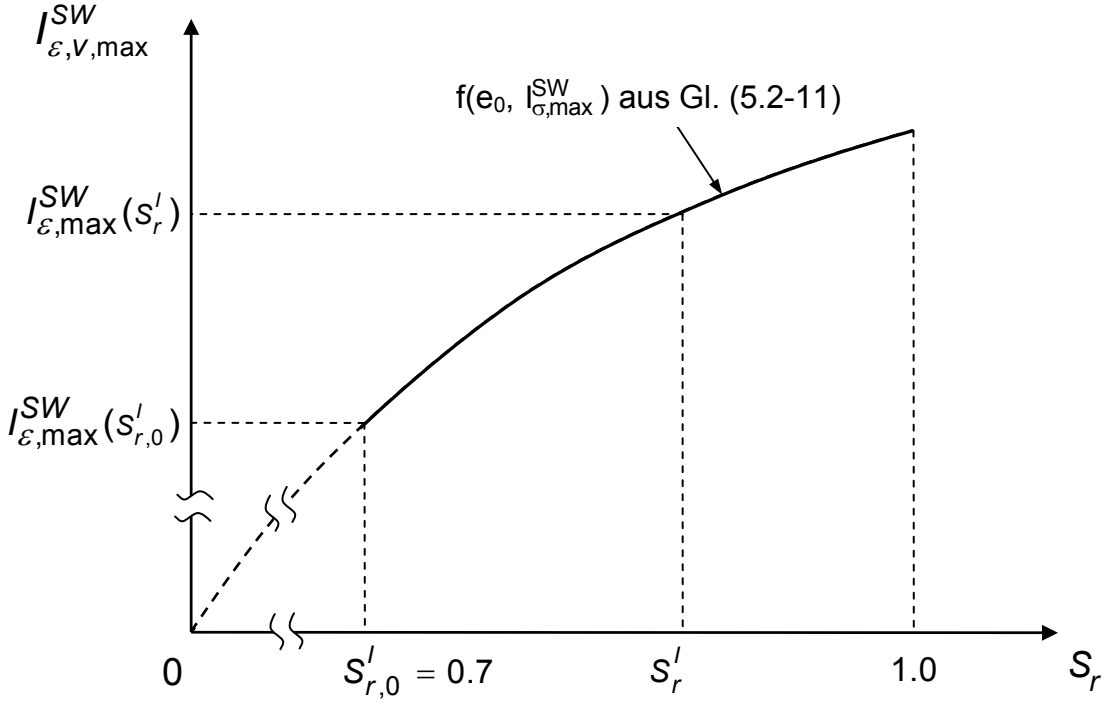


Abb. 6.2-1 Allgemeines Quellmodell für unbehindertes Quellen zur Eingabe in ABAQUS.

Die Beziehung (6.2-4), veranschaulicht in Abb. 6.2-1, wird aus den Testergebnissen erhalten, indem in Gleichung (5.2-11) die Gleichung (5.2-1) mit einem variierenden Anfangssättigungsgrad $S_{r,0}$ = 0 ... 1,0 und konstanter Porenzahl e_0 sowie konstantem Endsättigungsgrad $S_{r,\infty}$ eingesetzt wird. Die resultierenden Werte der Beziehung (6.2-4) werden dann tabellarisch in die Inputdatei (*.inp) des ABAQUS – Hauptprogramms eingegeben. Für

jede Bodenschicht mit einer eigenen Anfangsporenzahl e_0 muss gesondert eine tabellarische Eingabe der Beziehung (6.2-4) erfolgen. Die Eingabe in das Hauptprogramm ABAQUS kann nicht mittels von Gleichungen erfolgen sondern nur in Tabellenform.

Die Kurve, dargestellt in Abb. 6.2-1, ist gleichermaßen für Aufsättigung und Entwässerung gültig. Für $S^I_{r,0} > S^I_r$ tritt Schrumpfen ein. Bei der Betrachtung von Entwässerungspfaden muss somit u. a. die Eingabe einer gesonderten Schrumpfkurve erfolgen.

Die mechanische Spannungs - Verzerrungs - Matrix $[D^{el}]$ ist nach Gleichung (3.6-5) definiert. Es ist bekannt, dass dieses Materialgesetz, vorgestellt in Abschnitt 3.6, nur bedingt zur Beschreibung des Materialverhaltens teilgesättigter, bindiger Böden geeignet ist. Es ist jedoch relativ einfach zu handhaben und adäquat genug, um zu demonstrieren, dass die implementierten Quellbeziehungen gemeinsam mit einem Großteil anderer mechanischer Spannungsdehnungsbeziehungen verwendet werden können.

Die elastische Quellmatrix $[D^{el,SW}]$ ergibt sich analog zu der mechanischen Elastizitätsmatrix $[D^{el}]$ nach Gleichung (3.6-5), wobei das Kompressionsmodul K, definiert nach Gleichung (3.6-8), in Gleichung (3.6-5) eingesetzt und durch ein Pseudomodul, dem Tangentenmodul Q für das Quellen, ersetzt wird. Des Weiteren wird die Querdehnzahl ν in der mechanischen elastischen Stoffmatrix $[D^{el}]$ durch die Querdehnzahl ν^{SW} für das Quellen ersetzt. Somit ergibt sich die Quellmatrix $[D^{el,SW}]$ unter der Vorraussetzung, dass nur Hauptquelldehnungen auftreten und infolge Quellen keine Schubspannungszustände entstehen, wie folgt:

$$\left[D^{el,SW} \right] = \frac{Q}{\left(1+\nu^{SW}\right)} \begin{bmatrix} 1-\nu^{SW} & \nu^{SW} & \nu^{SW} \\ \nu^{SW} & 1-\nu^{SW} & \nu^{SW} \\ \nu^{SW} & \nu^{SW} & 1-\nu^{SW} \end{bmatrix} \tag{6.2-5}$$

Die Querdehnzahl ν^{SW} für das Quellen wird dabei anfänglich mit $\nu^{SW} = 0{,}3$ angenommen.

Im ersten Schritt resultiert, infolge der zeitabhängigen, instationären Wasserausbreitung im System, mit Gleichung (6.2-4) und vollkommen behinderter Quelldehnung $\Delta\varepsilon_1 = \Delta\varepsilon_2 = \Delta\varepsilon_3 = 0$ somit der maximale Quelldruck $I^{SW}_{\sigma,max}$ nach Gleichung (6.2-6):

$$\Delta I^{SW}_{\sigma,max} = Q_0 \cdot \Delta I^{SW}_{\varepsilon,max} \tag{6.2-6}$$

Der initiale Quellmodul Q_0 in diesem Berechnungsschritt ist hierbei:

$$Q_0 = \frac{I^{SW}_{\sigma,max}}{I^{SW}_{\varepsilon,max}} \tag{6.2-7}$$

um den maximalen Quelldruck $I^{SW}_{\sigma,max}$ bei Volumenkonstanz in Abhängigkeit der von ABAQUS berechneten Feuchteausbreitung zu erhalten. $I^{SW}_{\sigma,max}$ in Gleichung (6.2-7) berechnet sich nach Gleichung (5.2-1) und $I^{SW}_{\varepsilon,max}$ nach Gleichung (5.2-11).

Diese besondere Vorgehensweise zur Berechnung von $I^{SW}_{\sigma,max}$ wird von ABAQUS verlangt, obwohl $I^{SW}_{\sigma,max}$ nach Gleichung (5.2-1) bekannt ist. Das Hauptprogramm übergibt die maximalen, isotropen Quelldehnungsänderung $\Delta\varepsilon^{SW}_{i,max}$ infolge Aufsättigung nach Gleichung (6.2-4) an die Benutzerroutine UMAT, beschrieben in Kapitel 6.3. In der Routine besteht die Möglichkeit den maximalen Quelldruck $I^{SW}_{\sigma,max}$ zu berechnen, jedoch nicht, diesen berechneten Quelldruck direkt in das Hauptprogramm zu übergeben. Aus diesem Grund wird Q_0 nach Gleichung (6.2-7) definiert, mit welchem, mittels der Quellmatrix $[D^{el,SW}]$ nach Gleichung (6.2-5), der maximale Quelldruck $I^{SW}_{\sigma,max}$ bei Volumenkonstanz resultiert und in das Hauptprogramm übergeben wird. Somit ist auf indirektem Weg $I^{SW}_{\sigma,max}$, berechnet nach Gleichung (5.2-1), in das Programm implementiert worden.

Nachdem der isotrope, maximale Quelldruck $I^{SW}_{\sigma,max}$ bei Volumenkonstanz in Abhängigkeit der instationären Wasserausbreitung im System ermittelt ist, werden nach Gleichung (6.2-4) die inkrementellen Deformationen ermittelt. Der isotrope Quelldruck berechnet sich dann zu:

$$\Delta\sigma^{SW}_i = \left[D^{el,SW} \right] \cdot \Delta\varepsilon^{SW}_i \tag{6.2-8}$$

Dabei ist der Quellmodul Q in der Quellmatrix $[D^{el,SW}]$ nach Gleichung (6.2-5), für Spannungszustände $\sigma_{i,0} < \sigma_i < \sigma^{SW}_{i,max}$ wie folgt definiert, siehe Abb. 6.2-2:

$$Q = -\frac{dI_\sigma}{dI^{SW}_\varepsilon} \qquad ; \quad \sigma_{i,0} < \sigma_i < \sigma^{SW}_{i,max} \tag{6.2-9}$$

Der Quotient dI_σ zu dI^{SW}_ε charakterisiert die Tangentenneigung in der Quelldruck-Quelldehnungsbeziehung, vergleiche Abb. 6.2-2, die sich nach Gleichung (5.2-9) ergibt.

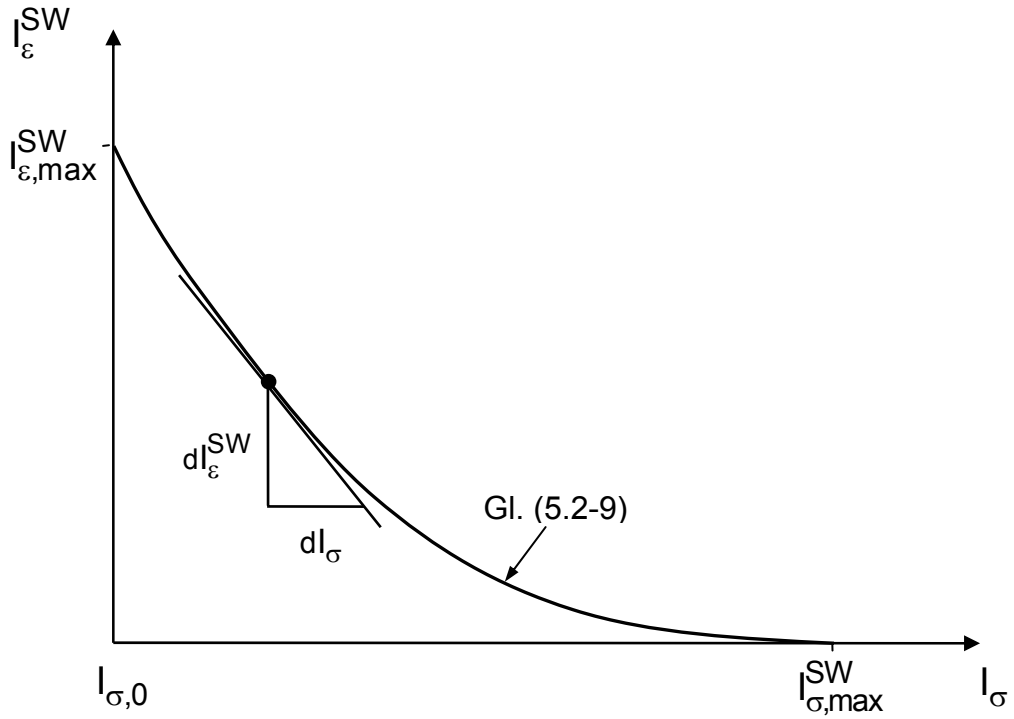


Abb. 6.2-2 Bestimmung des Quellmoduls Q aus den Versuchsergebnissen (stets Aufsättigung).

Es wird die Hypothese eingeführt, dass die Spannungssumme I_σ zur Ermittlung des Quellmoduls Q für beliebige Spannungszustände gleich $3 \cdot \sigma_{i,min}$ ist. Diese Hypothese wird begründet auf den Versuchsresultaten, vergleiche Abb. 5.2-24, sowie den bereits von Kiehl (1990) getroffenen Annahmen, vergleiche Abschnitt 3.6.4.2.

Aus diesem Grund wird das Quellmodul Q, bestimmt aus Gleichung (5.2-9) nach Abb. 6.2-2, als Funktion von σ_i ausgewertet, vergleiche Abb. 6.2-3. Die Kurve in Abb. 6.2-3 ist somit die Ableitung von Abb. 6.2-2 bzw. Gleichung (5.2-9), ausgewertet nach $I_\sigma = 3 \cdot \sigma_{i,min}$.

Die Auswertung des Quellmoduls Q in Abhängigkeit von $\sigma_{i,min}$, entsprechend Abb. 6.2-3, wird in ABAQUS implementiert. Für die Simulationen der Versuche aus Kapitel 5.2 ist somit $\sigma_{i,min} = \sigma_1 = \sigma_z$.

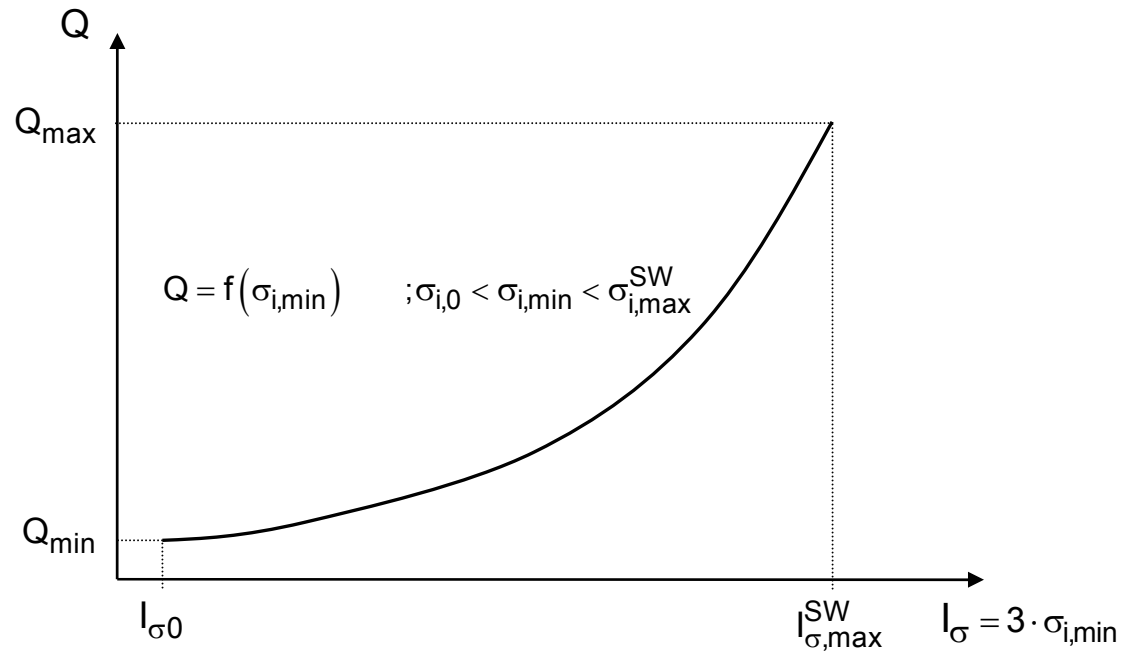


Abb. 6.2-3 Auswertung des Quellmoduls Q in Abhängigkeit von Hauptnormalspannung $\sigma_{i,min}$.

In den Simulationen wird für Spannungszustände $\sigma_{i,0} < \sigma_{i,min} < \sigma_{i,max}^{SW}$ der nichtlineare Quellmodul Q nach Gleichung (6.2-9) verwendet. Für Spannungszustände $\sigma_{i,min} \geq \sigma_{i,max}^{SW}$ bleibt der Quelldruck $\sigma_{i,max}^{SW}$ unverändert. Für einen Spannungszustand kleiner bzw. gleich der minimalen initialen Anfangsspannung $\sigma_{i,0}$ wird das Quellmodul nach Gleichung (6.2-10) verwendet. Es stellen sich dann die maximal möglichen Quelldehnungen in Abhängigkeit der Parameter ein.

$$Q = \frac{dI_\sigma}{dI_\varepsilon^{SW}} \qquad ; \; I_\sigma = I_{\sigma 0} \tag{6.2-10}$$

Darin ist $I_{\sigma 0} = \sigma_{1,0} + \sigma_{2,0} + \sigma_{3,0}$ der minimale praktikable Anpressdruck aus den Versuchen, vergleiche Kapitel 5.2.3.3, welcher gegen 0 gehend angenommen werden kann. $\Delta I_\varepsilon^{SW}$ berechnet sich nach Gleichung (5.2-11).

Der hier eingeführte Quellmodul gilt gleichermaßen auch für Entwässerungsvorgänge (Schrumpfen) und ist bei Betrachtung solcher gegebenenfalls zu modifizieren.

Die Implementierung des mechanischen Stoffmodells und des variablen Quellmoduls Q in ABAQUS erfolgt mittels einer Benutzerroutine (UMAT), siehe Kapitel 6.3. Der Quellmodul Q wird spannungsabhängig anhand der Versuchsergebnisse bestimmt und in die Routine eingebaut.

6.3 Die Benutzerroutine UMAT

Mittels der Benutzersubroutine UMAT erfolgt die Implementierung des mechanischen Stoffmodells und des variablen Quellmoduls Q in ABAQUS. Der Quellmodul Q wird spannungsabhängig anhand der in Kapitel 5.2.3.3 vorgestellten Versuchsresultate bestimmt, beschrieben in Kapitel 6.2, und in die Routine integriert.

Die beiden wichtigsten Aufgaben, die in der Routine UMAT erfüllt werden müssen, sind:

1) Die Bestimmung der Spannungsanteile anhand des Stoffmodells für vorgegebene Dehnungsinkremente und Aktualisierung des Spannungszustandes.

2) Die Berechnung der neuen Steifigkeitsmatrix für den neuen Spannungszustand.

Die Benutzerroutine UMAT kann mit allen Analysetypen in ABAQUS verwendet und auch mit anderen Routinen gekoppelt werden. Zur Abfrage bestimmter aktueller Parameter wie z. B. der Sättigung, dem Porenwasserdruck u. a., welche nicht als Eingangswerte in die UMAT vom Hauptprogramm mit übergeben werden, ist die Routine URDFIL in die UMAT mit eingebettet worden.

Das Hauptflussdiagramm der programmierten Routine ist in Abb. 6.3-1 anschaulich dargestellt.

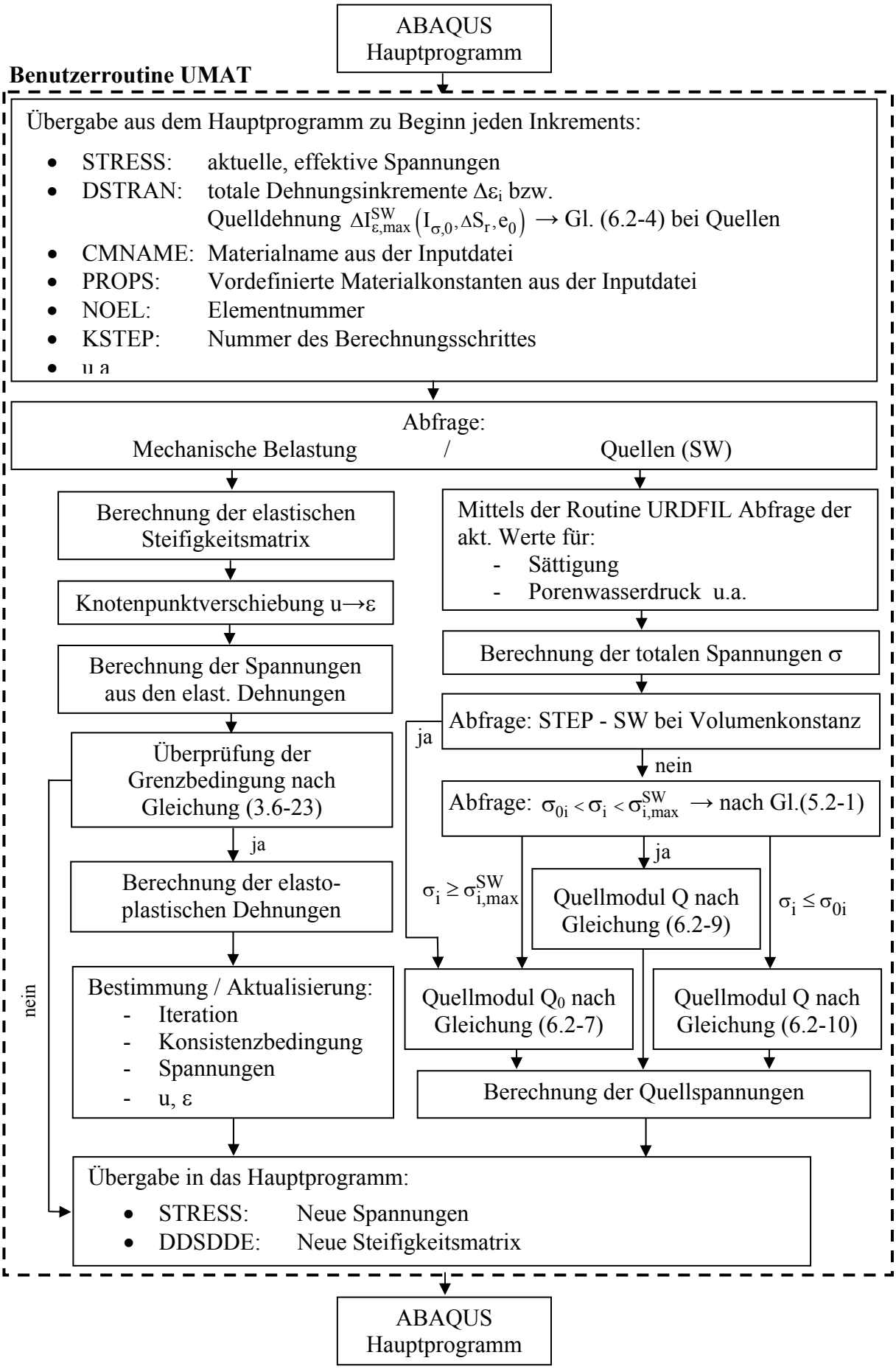


Abb. 6.3-1 Hauptflussdiagramm der verwendeten Benutzerroutine UMAT.

In der Benutzerroutine UMAT wird nach Übergabe der Eingangswerte aus dem Hauptprogramm eine Abfrage durchgeführt, ob es sich um die Analyse einer mechanischen Belastung handelt oder die Analyse von Quelleinwirkungen. Dies erfolgt individuell, je nach Anzahl und Art der im Eingabefile (*.inp) gewählten Berechnungsschritte (STEPs). Die Quellverformungen werden additiv zu den mechanischen Verformungen gemäß Gleichung (3.6-1) überlagert.

Das heißt, dass der Endzustand nach einer mechanischen Analyse als Ausgangszustand für die folgende Quellberechnung dient. Darauf folgend kann auch wieder, je nach Belastungsgeschichte, eine mechanische Analyse folgen, die abermals den Endzustand aus der vorherigen Berechnung als Ausgangszustand besitzt. Dies kann beliebig oft mit verschiedenen Analysetypen erfolgen.

Zur Berechnung eines Quellvorgangs, d.h. Quellen infolge einer instationären Feuchteausbreitung in quellfähigem Boden, werden aktuelle Parameterwerte aus dem System benötigt, wie zum Beispiel der Porenwasserdruck und die Sättigung. Diese werden jedoch nicht aus dem Hauptprogramm in die Benutzerroutine UMAT übergeben. Eine Übergabe dieser Werte findet mittels einer weiteren Subroutine URDFIL statt, welche in die Routine UMAT eingebaut wird.

In der Eingabedatei wird mittels des Ausgabebefehls ELFILE definiert, welche Parameterwerte in eine separate Ausgabedatei (*.fil) geschrieben werden. Mit Hilfe der Untersubroutine URDFIL ist es möglich, diese Ausgabedatei zu lesen sowie auszuwerten und in die Routine UMAT mittels so genannter COMMON - Blocks zu übergeben. Somit ist es zum Beispiel möglich die totalen Spannungen an jedem Integrationspunkt im System zu berechnen.

Die Berechnung der maximalen Quelldehnungsinkremente in Abhängigkeit von der initialen Sättigung sowie dem Endsättigungsgrad in jedem Inkrement, vergleiche Gleichung (6.2-4), wird vom Hauptprogramm durchgeführt und im Berechnungsschritt - Quellen bei Volumenkonstanz - in die Routine übergeben. In der Benutzerroutine UMAT werden mittels der Quellmatrix $[D^{el,SW}]$ und des darin enthalten Anfangsmoduls Q_0, nach Gleichung (6.2-7), die maximalen Quellspannungen berechnet bzw. übergeben. Es wird in diesem Rechenschritt nach Gleichung (5.2-9) der inkrementelle Betrag $\Delta I_\varepsilon^{SW}\left(I_\sigma, \Delta S_r, e_0\right)$ ermittelt und für die Komponenten der Quelldeformation die Annahme $\Delta\varepsilon_i^{SW} = 1/3 \cdot \Delta I_\varepsilon^{SW}$ getroffen. In den folgenden Iterationsschritten wird die Konsistenzbedingung sowohl für den elasto - plastischen Grenzzustand als auch für den Quellzustand erfüllt.

Für letzteren gilt nach Gleichung (6.2-2) für jede Hauptkomponente:

$$\left|\Delta\sigma_i^{SW}\right| > 0 \quad \text{für} \quad \left|I_\sigma\right| < \left|I_{\sigma,max}^{SW}\right| \tag{6.3-1}$$

und

$$\Delta\sigma_i^{SW} = 0 \quad \text{für} \quad \left|I_\sigma\right| \geq \left|I_{\sigma,max}^{SW}\right| \tag{6.3-2}$$

Ist $\left|I_\sigma\right| = \left|I_{\sigma,max}^{SW}\right|$ gegeben, gilt nach Gleichung (6.2-1):

$$\left|\Delta\varepsilon_i^{SW}\right| = \left|\Delta\varepsilon_i^{m}\right| \tag{6.3-3}$$

Ist $\left|I_\sigma\right| \geq \left|I_{\sigma,max}^{SW}\right|$ gegeben, wird im nächsten Rechenschritt $\Delta I_\varepsilon^{SW} = 0$ gesetzt.

Nach Berechnung der Stoffgleichungen in der UMAT werden der aktuelle Spannungszustand und die neu berechnete Steifigkeitsmatrix für den neuen Spannungszustand in das Hauptprogramm übergeben.

6.4 Simulation der einaxialen Quelldruckdehnungsversuche aus Serie 2

Zur Überprüfung der Güte der in ABAQUS eingegebenen und implementierten Beziehungen werden die experimentellen Ergebnisse aus Serie 2 nachgerechnet und mit den Simulationen verglichen.

6.4.1 Geometrie und FEM - Modell

Die Geometrie des Modells entspricht der der Probeköper im Oedometer A mit einer Höhe $h_0 = 0{,}05$ m und einem Durchmesser $d_0 = 0{,}10$ m. Das Modell ist mit den achsensymmetrischen Elementen des Typs CAX4P (4-node bilinear displacement and pore pressure) aufgebaut, wobei ein Element im Querschnitt die Abmessungen 0,5 cm x 0,5 cm aufweist. Dies führt zu 100 axialsymmetrischen Elementen aus denen das Modell zusammengesetzt wird, siehe Abb. 6.4-1. An den Eckpunkten der Elemente sind die aktiven Freiheitsgrade für die Verschiebungen u_r, u_z und den Porenwasserdruck vorhanden.

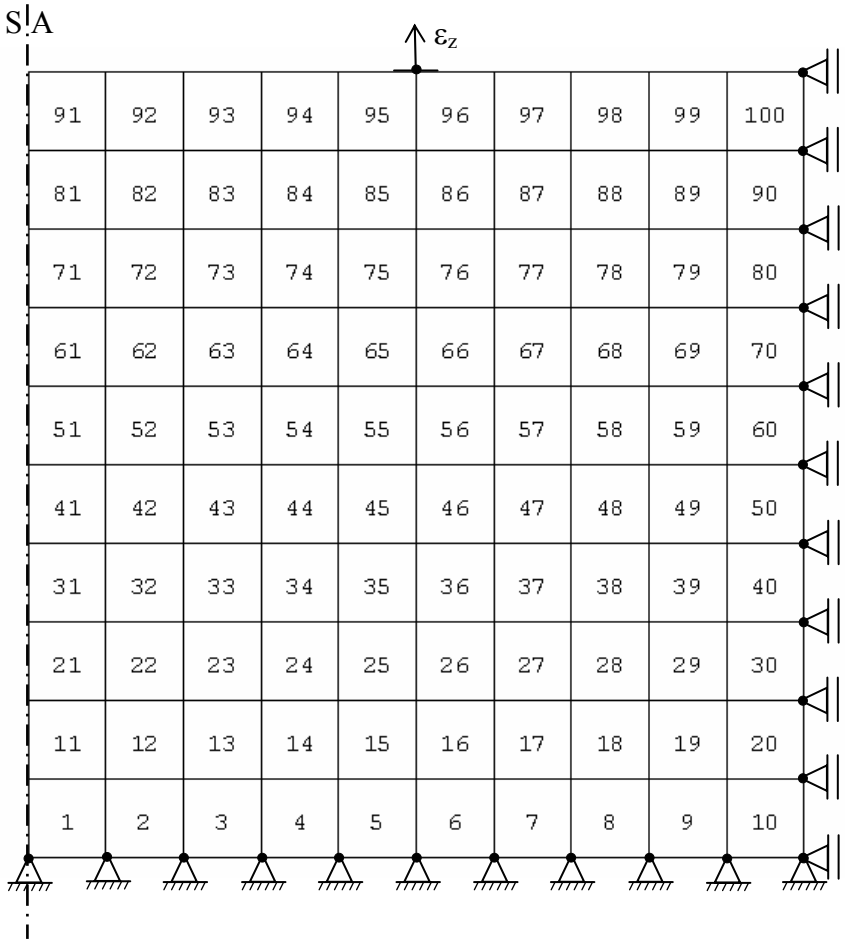


Abb. 6.4-1 FE - Netz, Elemente und Randbedingungen des Finite - Elemente - Modells für die Simulation der Versuche der Serie 2.

Die Verschiebungen am unteren Ende der Probe sind verhindert. Am Rand des Modells wird nur eine vertikale Verschiebung u_z zugelassen. Die vertikalen Verschiebungen u_z am oberen Ende des Versuchskörpers können verhindert ($u_z = 0$), aber auch zugelassen ($u_z \neq 0$) werden.

6.4.2 Materialeigenschaften

Für die mechanische Beanspruchung wird linear elastisches - ideal plastisches Materialverhalten angenommen, wie in Abschnitt 3.6.3 beschrieben. Die elastoplastischen Bodenkenngrößen werden, wie in Kapitel 4.2 ermittelt, angesetzt. Der E-Modul für die mechanische Beanspruchung wird nach dem Versuchsresultat für $e_0 = 0{,}78$ und $S_{r,0} = 0{,}7$, dargestellt in Abb. 4.2-2, mit $E = 30000$ kPa angesetzt. Die Triaxialversuche sind mit einer Vorlastspannung $\sigma_v = 200$ kPa gefahren worden. Es wird angenommen, dass diese Vorlastspannung σ_v keinen Einfluss auf das Quellverhalten hat. Die durch eine Vorbelastung eventuell eintretende Verdichtung wird durch die Parameter e_0 und $S_{r,0}$ im Quellansatz, Gleichung (3.7-1), erfasst.

Eine Änderung der mechanischen Bodenkennwerte mit der Porenzahl und der Sättigung des Bodens wird nicht berücksichtigt. In den Oedometerversuchen der Serie 2 und 3, mit einer in der Größe nicht nennenswerten mechanischen Beanspruchung (Eigengewicht und Vertikalbelastung $\sigma_z = 9$ kPa), ist eine Änderung dieser mechanischen Bodenkenngrößen nur von sehr geringem Einfluss und hat keine Auswirkung auf die Resultate infolge Quellen.

Da in dieser Arbeit nur normalkonsolidierte Zustände betrachtet werden, werden die Scherwiderstände durch den Winkel der Gesamtscherfestigkeit nach Tabelle 4.2-1 beschrieben.

Das Quellverhalten des Materials wird, wie in Kapitel 6.2 beschrieben, implementiert.

Die Berechnung des Wassertransportes q im Bodenkörper findet analog zu Kapitel 3.4 statt. Hierzu werden die hydraulischen Beziehungen und die gesättigte sowie teilgesättigte Wasserleitfähigkeit benötigt.

Die Saugspannungssättigungsbeziehung des Versuchsmaterials, nach Gleichung (3.3-7) mit den ermittelten Konstantenwerten nach Tabelle 4.3-3, wird tabellarisch in die ABAQUS - Inputdatei (*.inp) eingegeben.

Die gesättigte Wasserleitfähigkeit wird nach Tabelle 4.1-3 mit $k_f = 3{,}3E\text{-}10$ [m/s] angesetzt und die Beziehung für die teilgesättigte Wasserleitfähigkeit nach Gleichung (3.4-4), in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad S_r , tabellarisch in die ABAQUS - Inputdatei (*.inp) eingefügt.

6.4.3 Berechnungsablauf und Belastungsgeschichte

Im ersten Berechnungsschritt (STEP 1) erfolgt eine Gleichgewichtsanalyse, in der auf die Probe mit den initialen Parametern $S_{r,0}$ und e_0 das Eigengewicht und die porenzahl- und sättigungsgradabhängige Saugspannung aufgebracht werden. Des Weiteren wird der geringe axiale Anpressdruck σ_{z0} von oben her initiiert.

Nachdem der Anfangsgleichgewichtszustand erreicht ist, beginnt der zweite Berechnungsschritt (STEP 2). Die Probe ist dabei allseitig eingespannt und wird von unten her auf einen definierten Endsättigungsgrad $S_{r,\infty}$ über die Berechnungszeit Δt des STEPs aufgesättigt, indem am Boden des Modells der entsprechende Porenwasserdruck nach Gleichung (3.3-7) mit den Werten der Tabelle 4.4-3 definiert wird.

ABAQUS berechnet im STEP 2, in Abhängigkeit der fortschreitenden Durchfeuchtung ΔS_r der Probe bei konstantem Volumen, die maximalen Quelldehnungsinkremente nach Gleichung (6.2-4) und übergibt diese in die Benutzerroutine UMAT. In diesem Berechnungsschritt resultieren, mittels der in die Routine implementierten Quellmatrix $[D^{el,SW}]$ und des darin enthalten Quellmoduls Q_0 nach Gleichung (6.2-7), die maximalen Quellspannungen $I^{SW}_{\sigma,max}$ nach Gleichung (5.2-1).

In Abb. 6.4-2 ist die annähernd homogene Durchfeuchtung des Modells am Ende des STEPs 2 visualisiert. Die Anfangszeit t_0 und Endzeit t_{Ende} eines STEPs wird für jeden STEP eingegeben, wobei die Inkrementierung automatisch verläuft in Abhängigkeit von einem vordefinierten Toleranzwert UTOL. Dieser Toleranzwert UTOL gibt die in einem Element maximal zulässige Änderung des Porenwasserdruckes in einem Zeitinkrement vor. Infolge der zeitabhängigen Feuchteausbreitung im Modell ändern sich die mit dem Sättigungsgrad gekoppelten Porenwasserspannungen. Mit dem gewählten Toleranzwert UTOL =|10| kPa wird die Zeitinkrementierung so gesteuert, dass diese vordefinierte Änderung des Porenwasserdruckes in keinem Element sowie keinem Inkrement überschritten wird.

Im dritten Berechnungsschritt (STEP 3) wird eine Deformation in z - Richtung am Kopf der Probe zugelassen, wobei der am Boden des Modells definierte Porenwasserdruck aufrechterhalten wird. Die Größe der zugelassenen Verschiebung baut sich linear über die im STEP eingegebene Berechnungszeit Δt auf.

Die zugelassene Deformation $\Delta\varepsilon_z$ (bei $\Delta\varepsilon_r = 0$) wird vom Hauptprogramm in die Benutzerroutine UMAT übergeben. In der Routine berechnet sich daraus der Quelldruckabbau in jeweiliger Richtung mittels der in die Routine implementierten Quellmatrix $[D^{el,SW}]$ nach Gleichung (6.2-5)

sowie der darin enthalten Beziehungen für das spannungsabhängige Quellmodul Q nach den Gleichungen (6.2-7), (6.2-9) und (6.2-10).

Die Inkrementierung verläuft analog zu STEP 2, wobei der Toleranzwert UTOL auf einen sehr kleinen Wert UTOL =|0,5| kPa gesetzt wird um exakte Resultate zu erhalten.

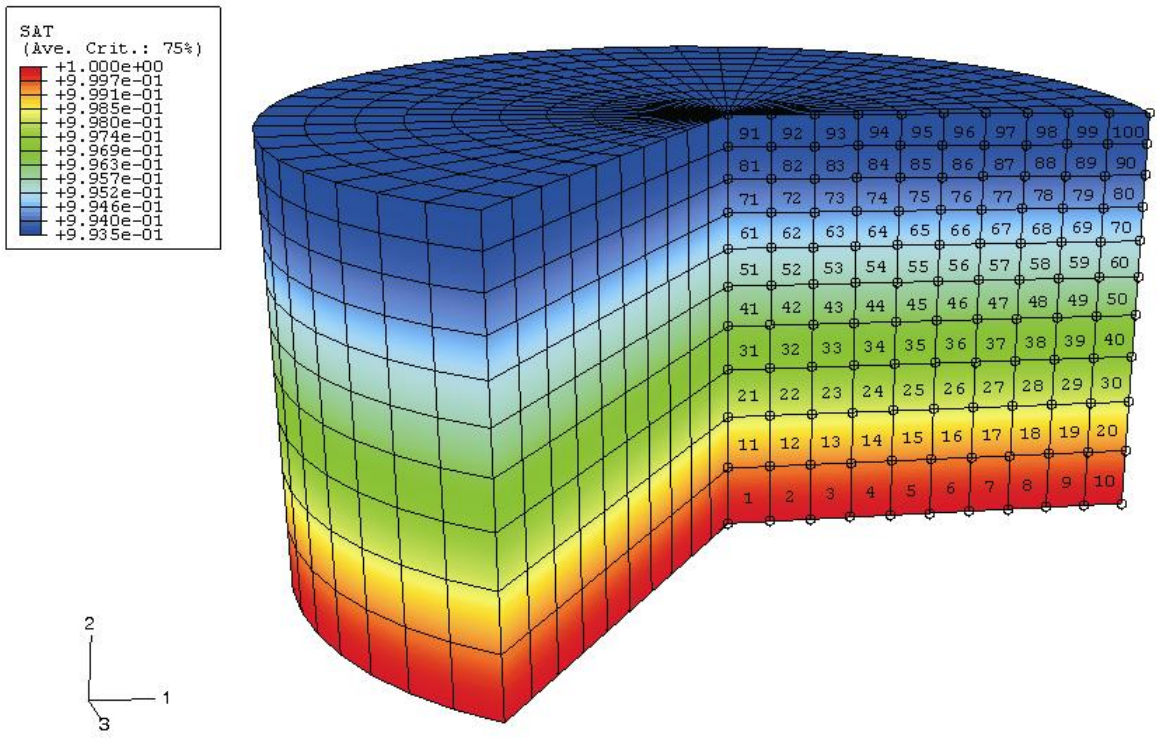


Abb. 6.4-2 Visualisierung der Sättigungsverteilung im axialsymmetrischen Modell am Ende von STEP 2, $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}7$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa.

6.4.4 Ergebnisse und Diskussion

Ein repräsentatives Ergebnis aus einem Quelldruckdehnungsversuch im Oedometer A ist in Abb. 6.4-3 in einem linearen Maßstab mit der Approximation nach Gleichung (5.2-2) sowie der numerischen Simulation des Versuches verglichen. Im STEP 2 der Simulation ist der Probekörper mit der Porenzahl $e_0 = 0{,}78$ bei konstantem Volumen von einem initialen Sättigungsgrad $S_{r,0} = 0{,}7$ aus auf $S_{r,\infty} = 1{,}0$ aufgesättigt worden. Darauf folgend ist im STEP 3 die axiale Dehnung zugelassen worden.

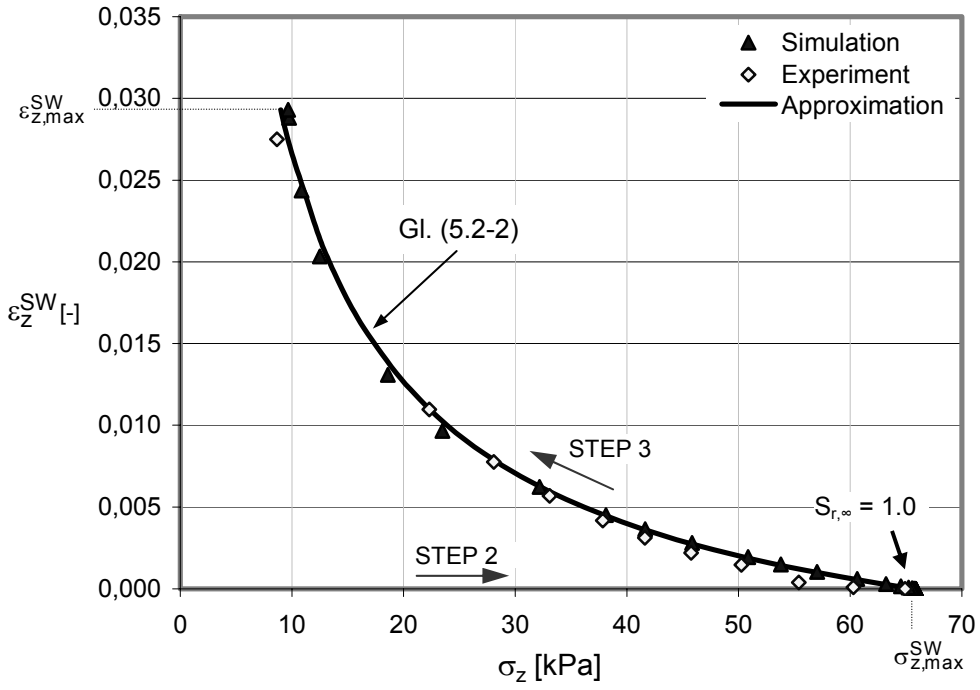


Abb. 6.4-3 Vergleich der σ_z - ε_z^{SW} - Beziehung aus dem Versuch mit der Simulation sowie der Approximation nach Gleichung (5.2-2), $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0} = 0{,}7$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa.

Die in Abb. 6.4-3 dargestellten Resultate zeigen, dass sich die Versuchsergebnisse annähernd mit der Approximation und den Simulationsergebnissen decken. In STEP 2 stellt sich infolge Bewässerung der für die Parameter maximale Quelldruck $\sigma_{z,max}^{SW}$ ein. Die implementierten Beziehungen führen im STEP 3 zu einer guten Übereinstimmung der Resultate in der Quelldruckdehnungsbeziehung.

In Abb. 6.4-4 sind in halblogarithmischer Form die Ergebnisse der oedometrischen Quelldruckdehnungsbeziehungen aus verschiedenen numerischen Simulationen mit den Approximationen der Versuchsergebnisse nach Gleichung (5.2-4) gegenübergestellt. Betrachtet werden die Zusammenhänge für die Parameterwerte a) $e_0 = 0{,}88$, b) $e_0 = 0{,}78$ sowie c) $e_0 = 0{,}68$, wobei die vertikalen Spannungen σ_z normiert sind auf den jeweiligen maximalen Quelldruck $\sigma_{z,max}^{SW}$. Die Simulationen mit $S_{r,\infty} = 1{,}0$ sind für initiale Sättigungen $S_{r,0} = 0{,}70$, $S_{r,0} = 0{,}80$ und $S_{r,0} = 0{,}90$ durchgeführt worden. Die Querdehnzahl ν^{SW} ist anfänglich mit $\nu^{SW} = 0{,}30$ angenommen worden.

Die kontinuierlich ausgebildeten Linien stellen die Approximationen dar, wobei die einzelnen Datenpunkte die numerischen Resultate nach jedem Inkrement abbilden.

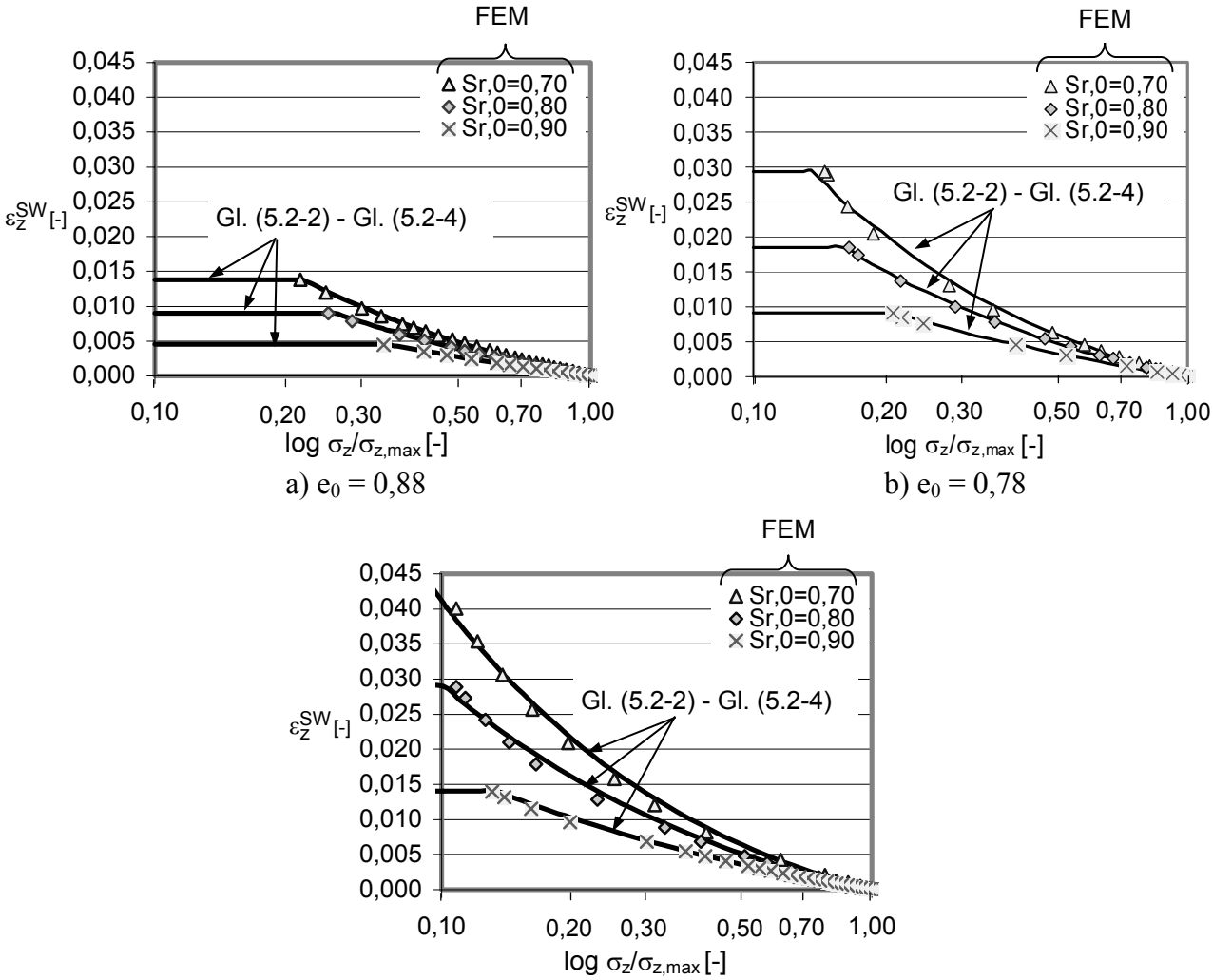


Abb. 6.4-4 Vergleich der axialen Quelldruckdehnungsbeziehungen aus den Approximationen mit den FE-Simulationen für variierende e_0 und $S_{r,0}$, $S_{r,\infty}$ =1,0 , σ_{z0} = 9 kPa.

Aus dem Vergleich der Daten in Abb. 6.4-4 wird ersichtlich, dass der Quellmodul Q nach Gleichung (6.2-9) für alle variierten und dargestellten Parameterwerte zu einer sehr guten Übereinstimmung in den Ergebnissen führt.

Zur exemplarischen Überprüfung der implementierten Quellbeziehungen für Endsättigungszustände $S_{r,\infty} \leq 1{,}0$ sind in Abb. 6.4-5 in halblogarithmischer Form drei Resultate aus den numerischen Simulationen mit den Approximationen nach Gleichung (5.2-2) bis (5.2-4) verglichen. Die Parameter $e_0 = 0{,}78$ und $S_{r,0} = 0{,}7$ wurden hierbei konstant gehalten und die Querdehnzahl ν^{SW} ist wieder mit $\nu^{SW} = 0{,}30$ angesetzt worden.

Die kontinuierlich dargestellten Linien beschreiben die Approximationen und die einzelnen Datenpunkte bilden die numerischen Resultate nach jedem Inkrement ab.

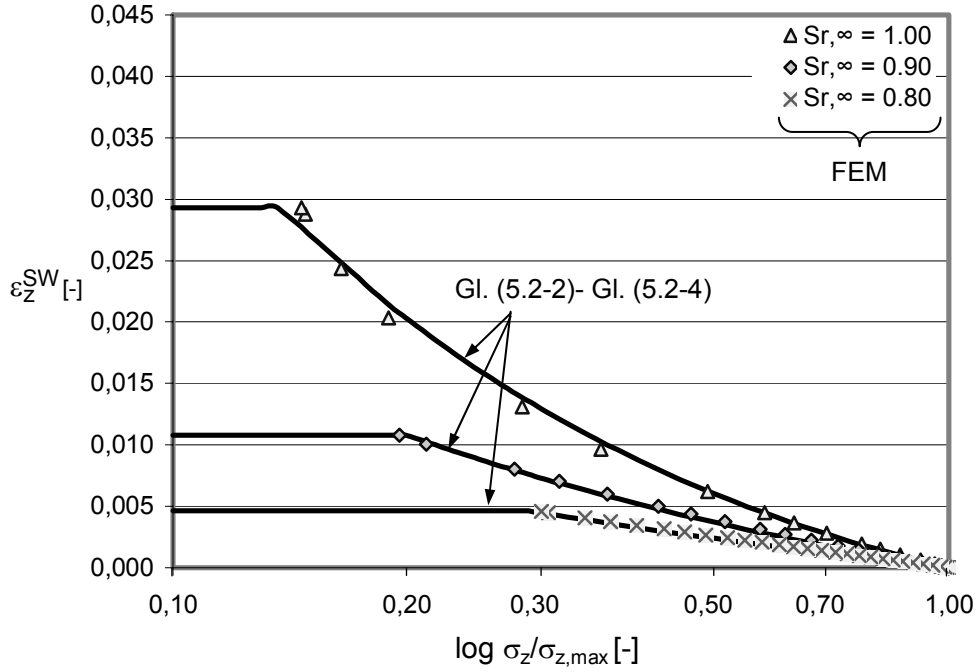


Abb. 6.4-5 Vergleich der axialen Quelldruckdehnungsbeziehungen aus den Approximationen mit den FE-Simulationen für verschiedene $S_{r,\infty}$, $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0} = 0{,}7$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa.

Analog zu den Berechnungen mit einem Endsättigungsgrad $S_{r,\infty} = 1{,}0$ stimmen die Ergebnisse mit $S_{r,\infty} < 1{,}0$ ebenfalls sehr gut mit den Approximationen der Versuchsresultate überein.

Zur Untersuchung, ob die in den Simulationen angesetzte Querdehnzahl $\nu^{SW} = 0{,}30$ mit den Versuchsergebnissen zu vereinbaren ist, sind für die Parameterwerte $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}70$ und $S_{r,\infty} = 1{,}0$ weitere Berechnungen mit variierender Querdehnzahl ν^{SW} durchgeführt worden.

Die einzelnen Datenpunkte in Abb. 6.4-6 beschreiben das Ergebnis für σ_z^{SW} zu σ_r^{SW} aus dem einaxialen Quelldruckdehnungsversuch, vergleiche Abb. 5.2-11 b) für $S_{r,0} = 0{,}70$. Die durchgezogenen Linien stellen die Simulationsergebnisse für verschiedene Querdehnzahlen ν^{SW} dar.

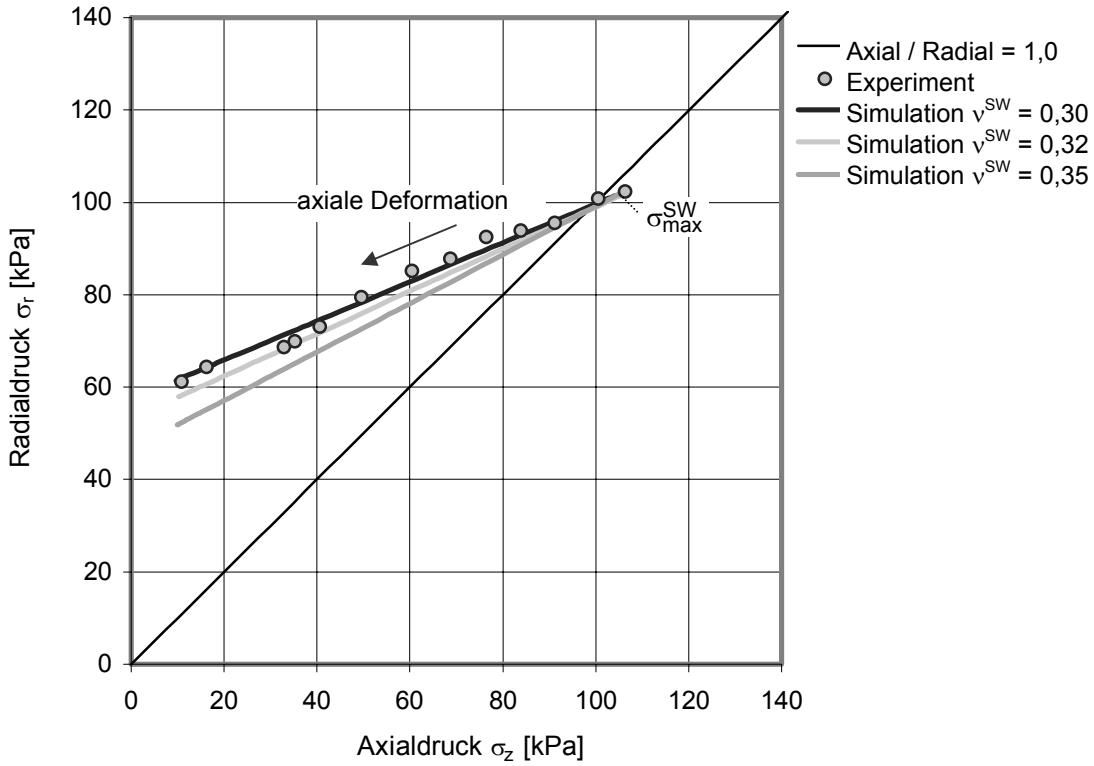
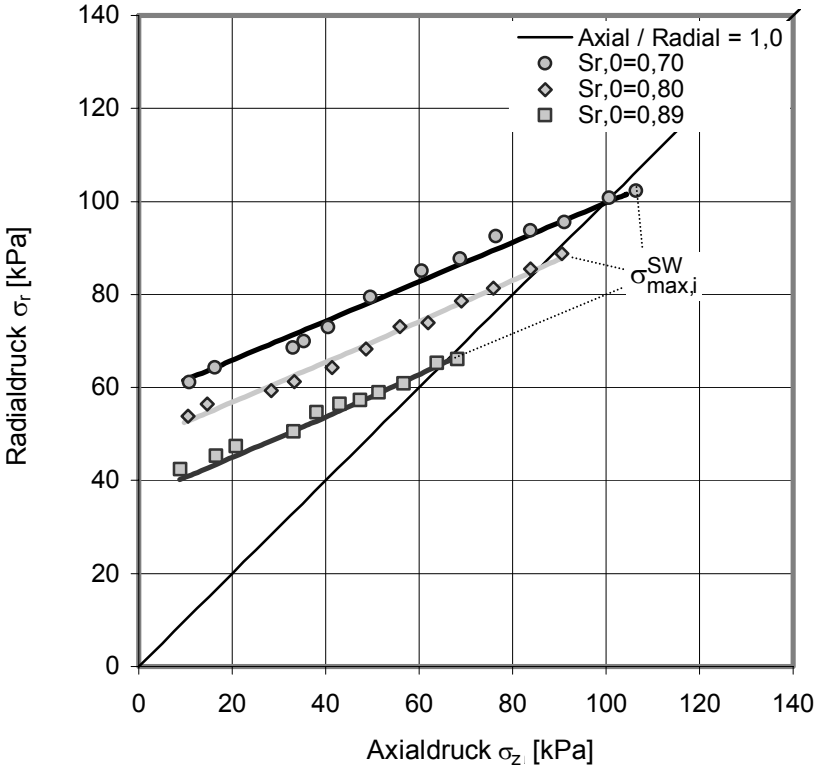


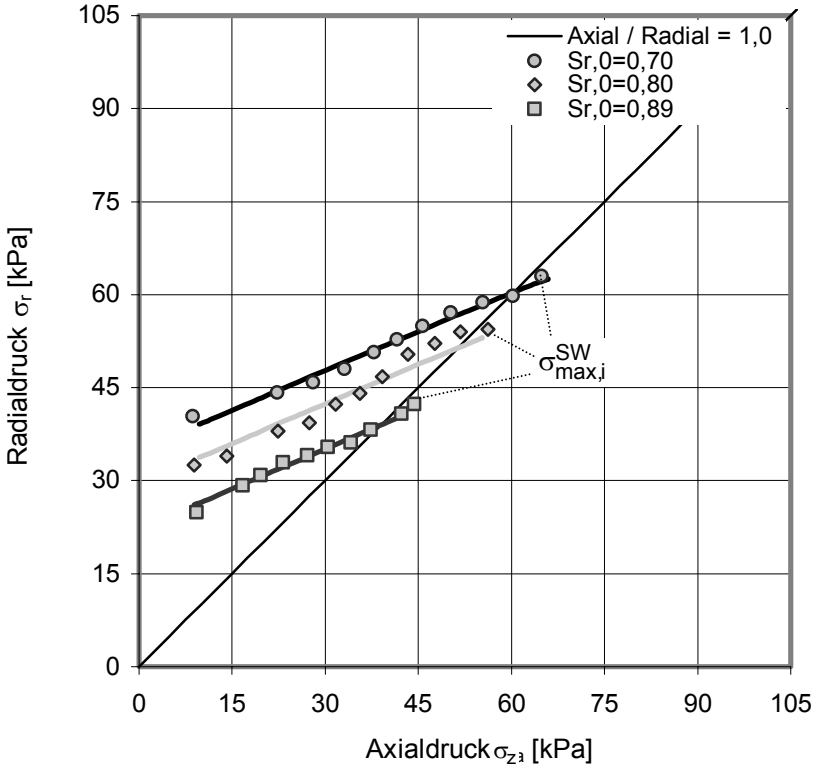
Abb. 6.4-6 Vergleich der Resultate für die Beziehung σ_z^{SW} - σ_r^{SW} aus einem Versuch mit Simulationen für verschiedene ν^{SW}, $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}7$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa.

Simuliert wurde der Versuch mit $\nu^{SW} = 0{,}30$, $\nu^{SW} = 0{,}32$ und $\nu^{SW} = 0{,}35$. In Abb. 6.4-6 ist zu erkennen, dass mit zunehmender Querdehnzahl ν^{SW} die lineare Beziehung zwischen dem axialen und radialen Quelldruck in ihrem Gefälle zunimmt. Würde die Querdehnzahl für das Quellen noch größer werden und den maximalen Wert $\nu^{SW} = 0{,}499$ annehmen, würde der Zusammenhang zwischen σ_z^{SW} und σ_r^{SW} auf der Achshalbierenden $\sigma_z^{SW} / \sigma_r^{SW} = 1{,}0$ liegen. Dementsprechend würde sich für die Querdehnzahl $\nu^{SW} = 0$ der radiale Quelldruck σ_r^{SW} mit zunehmender axialer Dehnung nicht abbauen und die Beziehung σ_z^{SW} zu σ_r^{SW} würde anhand einer horizontalen Gerade durch $\sigma_{z,max}^{SW}$ beschrieben werden.

Weiterhin ist festzustellen, dass die Querdehnzahl $\nu^{SW} = 0{,}30$ am Besten das Versuchsergebnis widerspiegelt.



a) $e_0 = 0{,}68$



b) $e_0 = 0{,}78$

Abb. 6.4-7 Vergleich der Resultate aus den Versuchen mit den Simulationen, mit $\nu^{SW} = 0{,}30$, für die Beziehung σ_z^{SW} - σ_r^{SW} mit verschiedenen e_0 und $S_{r,0}$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa.

In Abb. 6.4-7 sind die Resultate aus Abb. 5.2-11 mit den numerischen Berechnungen verglichen. Die Datenpunkte stellen wieder die aufgezeichneten Spannungswerte aus den Experimenten dar und die Geraden die Simulationsergebnisse.

Es ist zu erkennen, dass die verwendete Querdehnzahl $\nu^{SW} = 0{,}30$ für sämtliche Versuche zu guten Übereinstimmungen in den Resultaten führt.

Somit ist belegt, dass mit den implementierten Quellbeziehungen und der Querdehnzahl $\nu^{SW} = 0{,}30$ das einaxiale Quelldehnungsverhalten sich sehr gut simulieren lässt.

Wie in Kapitel 3.7 beschrieben ist davon auszugehen, dass ein Entwässern bei beliebigen Spannungszuständen entlang der Quellspannungs - Quelldehnungs - Beziehung auftreten kann und darauf folgend wieder ein Quellen, dargestellt in Abb. 5.2-18. Zur Untersuchung dieses Phänomens ist ein Quelldruck - Dehnungsversuch mit einem Ent- und Bewässerungszyklus durchgeführt worden, vergleiche Abb. 5.2-18. Das Ergebnis aus diesem Versuch ist in Abb. 6.4-8 mit dem Resultat aus der Simulation dieses Versuchs verglichen.

Zur numerischen Simulation wurde die Belastungsgeschichte, beschrieben in Abschnitt 6.3.5, um 3 weitere Berechnungsschritte (STEPs) erweitert. Nachdem im STEP 3 eine definierte Dehnung in axialer Richtung zugelassen worden ist, wird im nachfolgenden STEP 4 die Verschiebung am Kopf des Modells, dargestellt in Abb. 6.4-1, arretiert und am Boden des Modells eine Saugspannung $\psi_{m,1}$ nach Gleichung (3.3-7) und den Parameterwerten nach Tabelle 4.3-3 definiert, die dem entsprechendem Ausgangssättigungsgrad $S_{r,0}$ entspricht. Somit entwässert die Probe über die Zeit auf $S_{r,0}$. Nach Erreichen des Anfangsättigungsgrades $S_{r,0}$ startet STEP 5. Bei identischen Randbedingungen wie in STEP 4 wird am Fuß des Modells die Saugspannung $\psi_{m,2} = 0$ definiert und die Probe sättigt wieder auf. Nachdem sich im Versuchskörper über die Zeit wieder die Sättigung $S_{r,\infty} = 1{,}0$ gleichmäßig ausgebreitet hat, wird STEP 6 gestartet und die axiale Deformation weiter zugelassen bis $\varepsilon_{z,max}^{SW}$ erreicht ist. Somit ist STEP 6 die Fortführung von STEP 3.

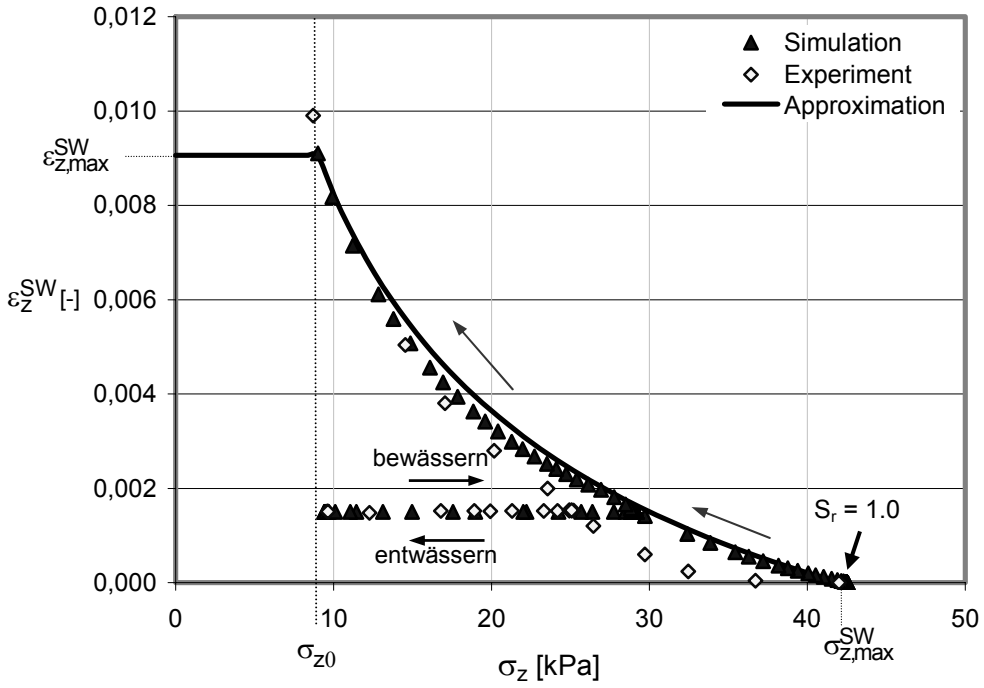


Abb. 6.4-8 Vergleich der σ_z - ε_z^{SW} - Beziehung aus dem Versuch mit einem zusätzlichen Ent- und Bewässerungszyklus mit der Simulation sowie der Approximation der Resultate aus Serie 2, $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0} = 0{,}9$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $\sigma_{z0} = 9$ kPa.

Aus den in Abb. 6.4-8 gegenüberstellten Quelldruckdehnungsbeziehungen ist zu erkennen, dass es in der Anfangsphase nur eine mäßige Übereinstimmung des Versuchresultates mit der Approximation gibt. Dies ist mit möglichen Ungenauigkeiten im Versuchsablauf bzw. in der Herstellung des Probekörpers zu erklären. Jedoch stimmt das Ergebnis aus der Simulation sehr gut mit der Approximation überein, aus der der implementierte Quellmodul abgeleitet wurde. Betrachtet man den Be- und Entwässerungszyklus bei einem bestimmten Spannungsdehnungszustand, wird das Ergebnis aus dem Versuch durch das Resultat der Simulation widergespiegelt. Der vertikale Quelldruck σ_z^{SW} baut sich infolge Entwässerung bis σ_{z0} ab, ohne dass eine Schrumpfverformung ε_z^{SN} mit einhergeht. Nach erneuter Bewässerung auf $S_{r,\infty} = 1{,}0$ entwickelt sich wieder der Ausgangsquelldruck, welcher vor der Entwässerung vorherrschte.

Somit ist gezeigt, dass auch solche Ent- und Bewässerungszyklen realitätsnah numerisch zu simulieren sind, solange σ_{z0} nicht unterschritten wird. Bei Spannungszuständen $\sigma_z < \sigma_{z0}$ sind Schrumpfverformungen zu erwarten, welche hier jedoch nicht näher untersucht wurden.

6.5 Simulation der triaxialen Quelldruck Dehnungsversuche aus Serie 3

Zur weiteren Beurteilung der in ABAQUS eingegebenen und implementierten Beziehungen werden die Versuchsergebnisse aus Serie 3 numerisch simuliert und verglichen.

6.5.1 Geometrie und FEM - Modell

Die Geometrie des Modells wird exakt der der Probeköper im Oedometer B nachempfunden. Dies entspricht ebenfalls den Abmessungen der Versuchskörper in Serie 2, mit $h_0 = 0{,}05$ m und $d_0 = 0{,}10$ m, vergleiche Abschnitt 6.4.1. Das Modell wird ebenfalls, wie in Abschnitt 6.4.1 beschrieben, mit axialsymmetrischen Elementen des Typs CAX4P aufgebaut. Die Verschiebungen in z-Richtung werden am Boden der Probe verhindert, vergleiche Abb. 6.4-1. Im Gegensatz zu dem Modell, dargestellt in Abb. 6.4-1, können neben den Verschiebungen u am Kopf auch die am Rand des Versuchskörpers verhindert ($u_z = 0$, $u_r = 0$) und auch zugelassen ($u_z \neq 0$, $u_r \neq 0$) werden.

6.5.2 Materialeigenschaften

Die Materialeigenschaften werden analog zu Abschnitt 6.4.2 angesetzt.

6.5.3 Berechnungsablauf und Belastungsgeschichte

Im ersten Berechnungsschritt (STEP 1) erfolgt eine Gleichgewichtsanalyse. In dieser Analyse wird die Probe, mit den initialen Parametern $S_{r,0}$ und e_0, mit dem Eigengewicht und der porenzahl- und sättigungsgradabhängigen Saugspannung beaufschlagt. Darüber hinaus wird die Probe, analog zu den durchgeführten Versuchen in Kapitel 5.2.3, mit dem initialen, isotropen Anpressdruck $\sigma_{z0} = \sigma_{r0}$ belastet.

Im folgenden Berechnungsschritt (STEP 2) wird der Probekörper allseitig eingespannt und von unten her über die eingegebene Berechnungszeit des STEPs, t_0 und t_{Ende}, auf den definierten Endsättigungsgrad $S_{r,\infty}$ aufgesättigt. Dies erfolgt durch Anlegen eines entsprechenden Porenwasserdruckes, nach Gleichung (3.3-7) mit den Tabellenwerten der Tabelle 4.3-3, am Boden des Modells. Das Hauptprogramm ABAQUS berechnet im STEP 2, in Abhängigkeit der berechneten Feuchteausbreitung ΔS_r in der Probe bei konstantem Volumen, die maximalen Quelldehnungsinkremente nach Gleichung (6.2-4) und übergibt diese in die Benutzerroutine UMAT. In diesem Berechnungsschritt resultieren, mittels der in die Routine implementierten

Quellmatrix $[D^{el,SW}]$ und des darin enthalten Quellmoduls Q_0 nach Gleichung (6.2-7), die maximalen Quellspannungen $I_{\sigma,max}^{SW}$ nach Gleichung (5.2-1).

Im dritten Berechnungsschritt (STEP 3) wird eine isotrope ($u_z = u_r$) oder auch anisotrope ($u_z \neq u_r \neq 0$) Deformation der Probe zugelassen, wobei der am Boden des Modells definierte Porenwasserdruck aufrechterhalten wird. Die Größe der Verschiebung in jeweiliger Richtung baut sich, analog zur Simulation der Serie 2, linear über die im STEP vorgegebene Berechnungszeit Δt auf.

Die zugelassene Deformation $\Delta\varepsilon_z$ und $\Delta\varepsilon_r$ wird vom Hauptprogramm in die Benutzerroutine UMAT übergeben. In der Routine berechnet sich daraus der Quelldruckabbau in jeweiliger Richtung mittels der in die Routine implementierten Quellmatrix $[D^{el,SW}]$ nach Gleichung (6.2-5) sowie der darin enthalten Beziehungen für das spannungsabhängige Quellmodul Q nach den Gleichungen (6.2-7), (6.2-9) und (6.2-10).

Die Zeitinkrementierung in einem Berechnungsschritt (STEP) verläuft automatisch, indem ein Toleranzwert UTOL definiert wird, welcher die maximale Änderung des Porenwasserdruckes in einem Zeitinkrement vorgibt. Infolge der zeitabhängigen Feuchteausbreitung im Modell ändern sich u. a. die mit dem Sättigungsgrad gekoppelten Porenwasserspannungen. Der Toleranzwert UTOL gibt vor in welchem Maß sich die Porenwasserspannungen in jedem Element pro Zeitinkrement ändern dürfen. Der Toleranzwert wird in den Berechnungschritten analog zu Abschnitt 6.4.3 angesetzt.

Der Beginn t_0 und das Ende t_{Ende} der jeweiligen Berechnungsschritte (STEPs) werden vordefiniert.

6.5.4 Ergebnisse und Diskussion

Exemplarisch ist in Abb. 6.5-1 das Resultat aus einem isotropen Quelldruckdehnungsversuch im Oedometer B mit der Approximation, nach Gleichung (5.2-9) mit $I_\varepsilon^{SW}/3 = \varepsilon_i^{SW}$ und $I_\sigma^{SW}/3 = \sigma_i^{SW}$, sowie dem Ergebnis aus der numerischen Simulation verglichen.

In der numerischen Berechnung im STEP 2 ist die Probe mit den initialen Parametern $e_0 = 0{,}78$ und $S_{r,0} = 0{,}7$ bei konstantem Volumen auf $S_{r,\infty} = 1{,}0$ aufgesättigt worden. Im STEP 3 wird eine isotrope Deformation zugelassenen.

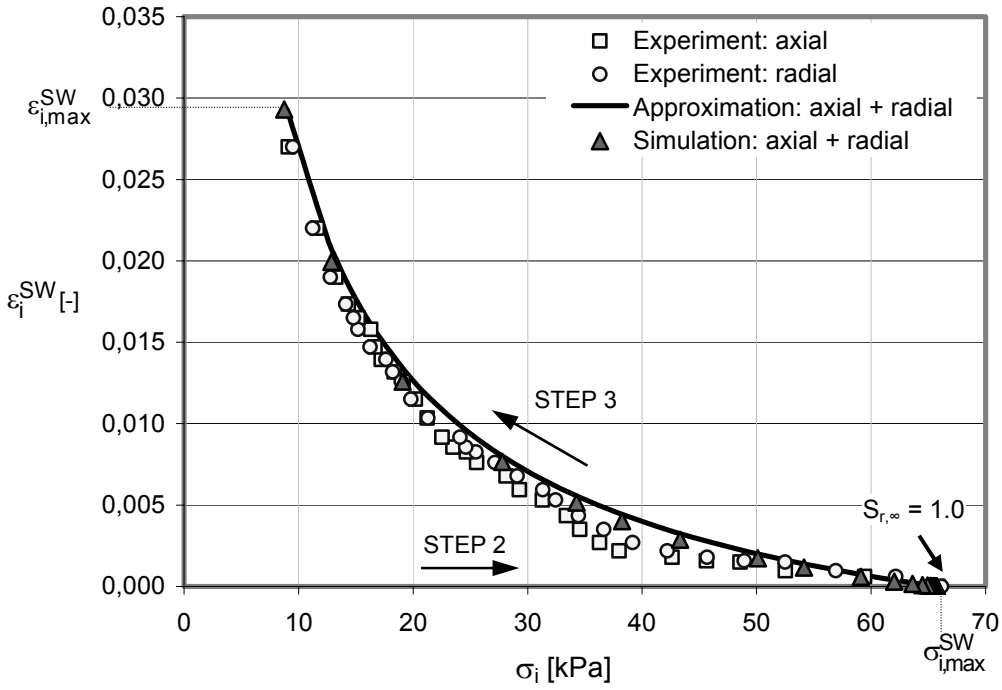


Abb. 6.5-1 Vergleich der σ_i - ε_i^{SW} - Beziehung aus dem isotropen Quelldruckdehnungsversuch mit der Simulation sowie der Approximation nach Gleichung (5.2-9), $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0} = 0{,}7$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $\sigma_{i0} = 9$ kPa.

Die in Abb. 6.5-1 gegenübergestellten Resultate belegen eine gute Übereinstimmung der Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen aus dem Versuch sowie der Approximation. Im STEP 2 stellt sich infolge der Durchfeuchtung von $S_{r,0}$ auf $S_{r,\infty}$ bei Volumenkonstanz der maximale Quelldruck $I_{\sigma,max}^{SW}/3 = \sigma_{i,max}^{SW}$ nach Gleichung (5.2-1) ein. Des Weiteren führt im STEP 2 und 3 der Quellmodul Q nach Gleichung (6.2-9) zu einem optimalen Resultat.

In Abb. 6.5-2 sind die Approximationen, nach den Gleichungen (5.2-9) bis (5.2-11) für isotrope Quelldruckdehnungsbeziehungen, mit den Ergebnissen aus den numerischen Berechnungen für verschiedene Parameterwerte zusammengestellt und verglichen. Dargestellt sind die Zusammenhänge in halblogarithmischer Form für die Porenzahlen a) $e_0 = 0{,}88$, b) $e_0 = 0{,}78$ sowie c) $e_0 = 0{,}68$, wobei die Spannungsinvariante I_σ auf die Invariante des maximalen Quelldrucks $I_{\sigma,max}^{SW}$ normiert ist. In den einzelnen Simulationen ist $S_{r,0}$ variiert worden und $S_{r,\infty} = 1{,}0$.

Die durchgehenden Linien stellen die Approximationen dar und die einzelnen Datenpunkte die numerischen Ergebnisse nach jedem Inkrement.

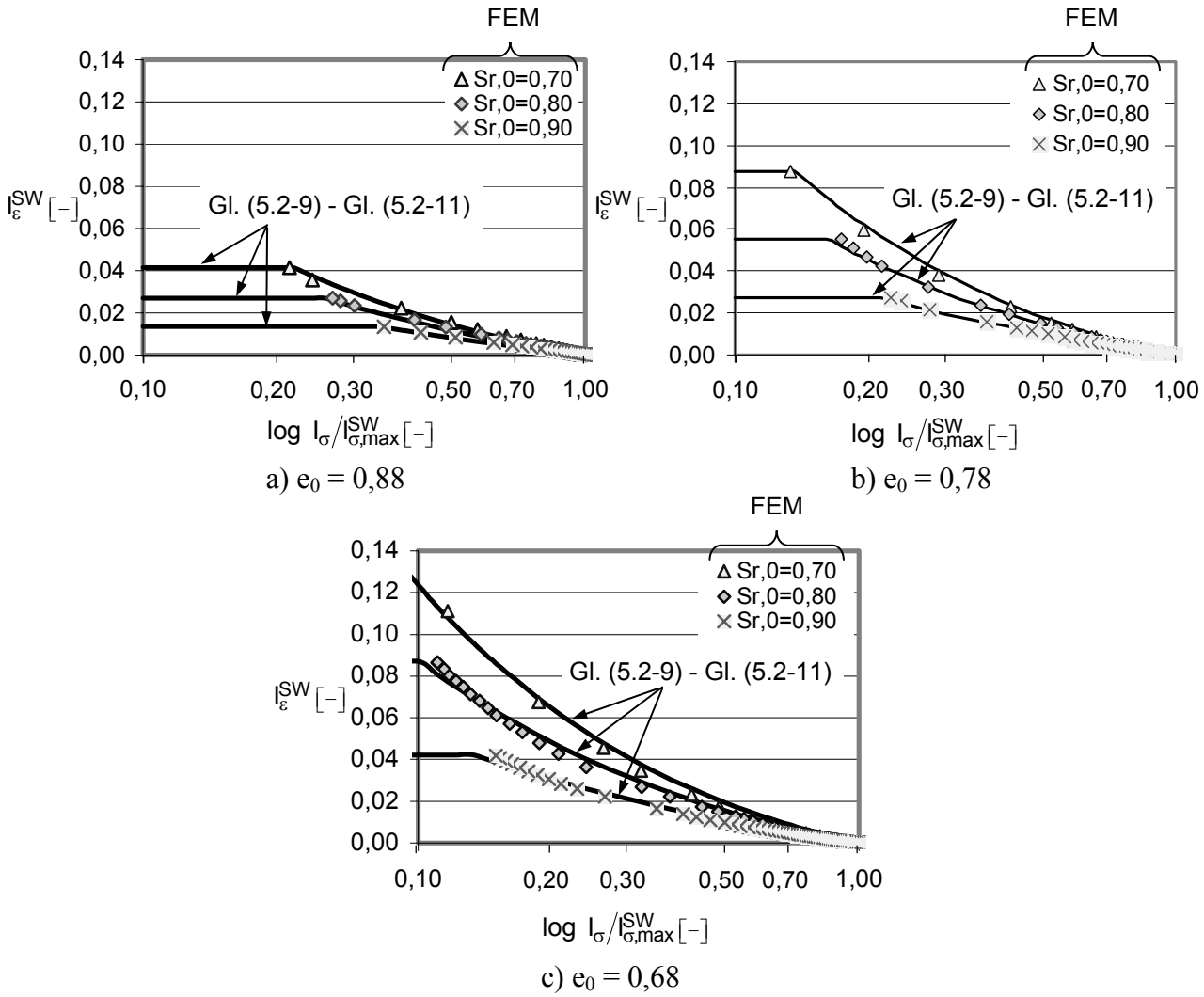


Abb. 6.5-2 Vergleich der isotropen Quelldruckdehnungsbeziehungen aus den Approximationen mit den Simulationen für variierende e_0 und $S_{r,0}$, $S_{r,\infty}$ =1,0 , σ_{i0} = 9 kPa.

Aus den in Abb. 6.5-2 verglichenen Resultaten ist erkennbar, dass für alle durchgeführten Simulationen, mit variierenden Porenzahlen e_0 und Anfangssättigungen $S_{r,0}$, eine gute Übereinstimmung der Ergebnisse erzielt wurde.

Der Vollständigkeit halber und zur exemplarischen Überprüfung der implementierten Quellbeziehungen für Endsättigungszustände $S_{r,\infty} < 1,0$ sind zwei Simulationen mit den initialen Parametern $e_0 = 0,78$ und $S_{r,0} = 0,7$ sowie den Endsättigungsgraden $S_{r,\infty} = 0,8$ und $S_{r,\infty} = 0,9$ durchgeführt worden.

Die Ergebnisse sind zusätzlich mit dem Resultat für $S_{r,\infty} = 1,0$ in Abb. 6.5-3 in halblogarithmischer Form zusammengestellt.Die kontinuierlich abgebildeten Linien stellen die Approximationen nach den Gleichungen (5.2-9) bis (5.2-11) dar und die einzelnen Datenpunkte beschreiben die numerischen Resultate nach jedem Inkrement.

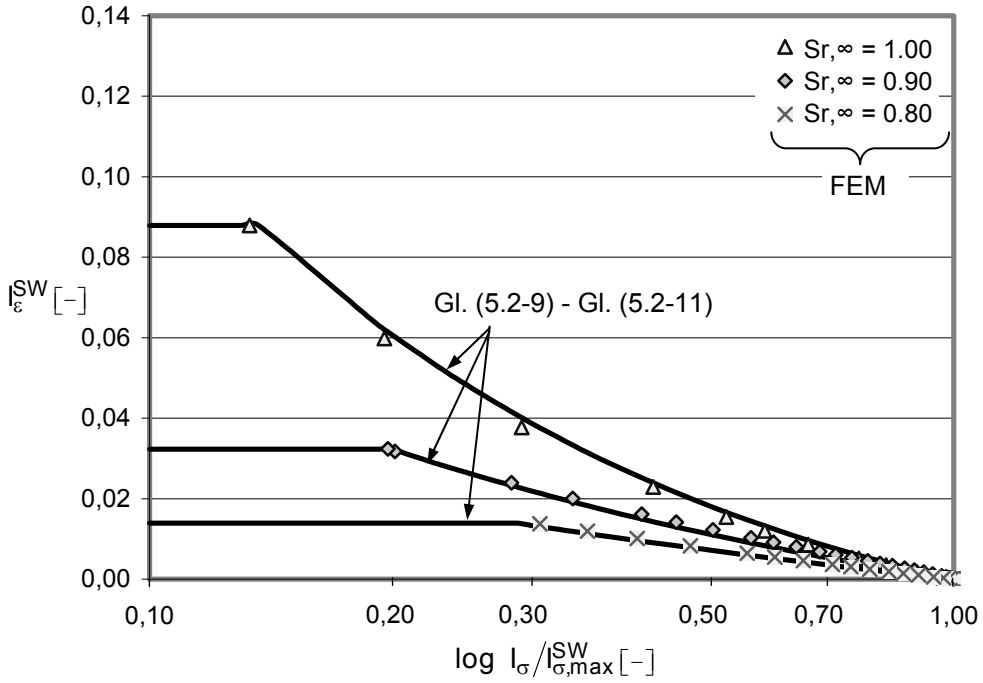


Abb. 6.5-3 Vergleich der isotropen Quelldruckdehnungsbeziehungen aus den Approximationen mit den Simulationen für verschiedene $S_{r,\infty}$, $e_0 = 0{,}78$, $S_{r,0} = 0{,}7$, $\sigma_{i0} = 9$ kPa.

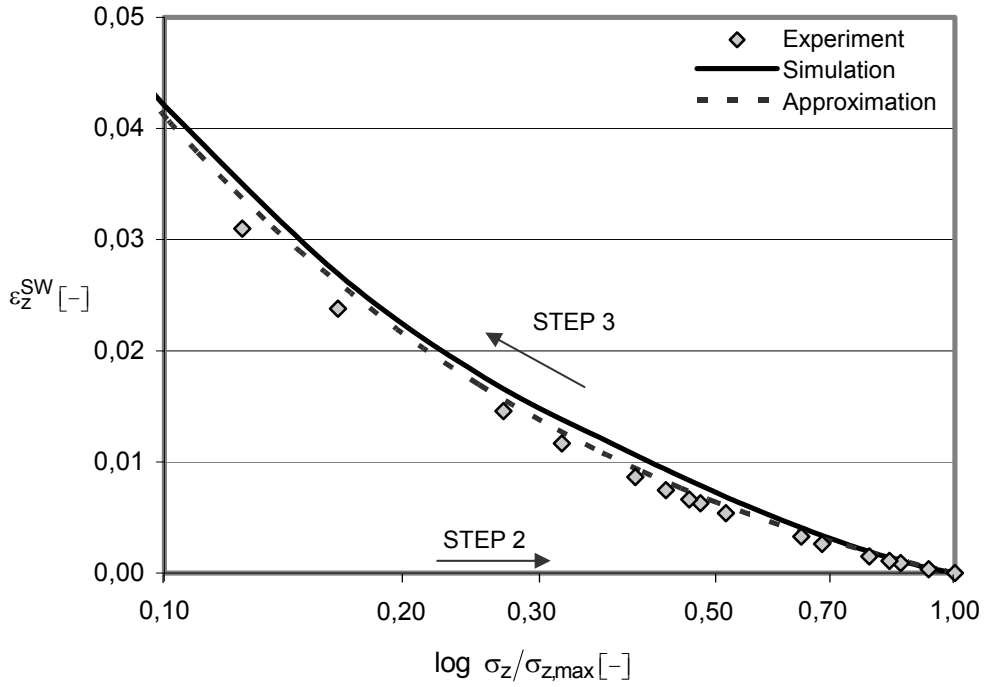
Es ist festzustellen, dass auch die Berechnungsergebnisse für Endsättigungen $S_{r,\infty} < 1{,}0$ gut mit den Approximationen übereinstimmen.

Zur genaueren Untersuchung, ob die für die Simulationen des einaxialen Quelldruckdehnungsverhaltens verwendete Querdehnzahl $\nu^{SW} = 0{,}30$, vergleiche Abschnitt 6.4.4, auch für anisotrope, triaxiale Spannungsdehnungszustände zu adäquaten Resultaten führt, wird ein anisotroper Quelldehnungsversuch im Oedometer B, vorgestellt im Abschnitt 5.2.3.5, mit der Querdehnzahl $\nu^{SW} = 0{,}30$ simuliert.

Hierzu ist das Modell mit den initialen Parametern $e_0 = 0{,}68$ und $S_{r,0} = 0{,}70$ im STEP 2 bei Volumenkonstanz auf $S_{r,\infty} = 1{,}0$ gesättigt worden. Nachdem sich infolge Bewässerung der maximale Quelldruck in Abhängigkeit von den Parametern eingestellt hat, wird in dem folgenden STEP 3 eine axiale und radiale Deformation am Kopf bzw. am Rand des Modells linear über die Berechnungszeit zugelassen, wobei $\Delta\varepsilon_r = 0{,}5 \cdot \Delta\varepsilon_z$.

Die Resultate der Simulation sind in Abb. 6.5-4 mit den Versuchsergebnissen sowie der Approximation nach Gleichung (5.2-9) mit $I_\varepsilon^{SW}/3 = \varepsilon_z^{SW}$ und $I_\sigma^{SW}/3 = \sigma_z^{SW}$ verglichen.

Oben ist die Quelldruckdehnungsbeziehung dargestellt und darunter der Zusammenhang zwischen dem radialen und dem axialen Quelldruck.



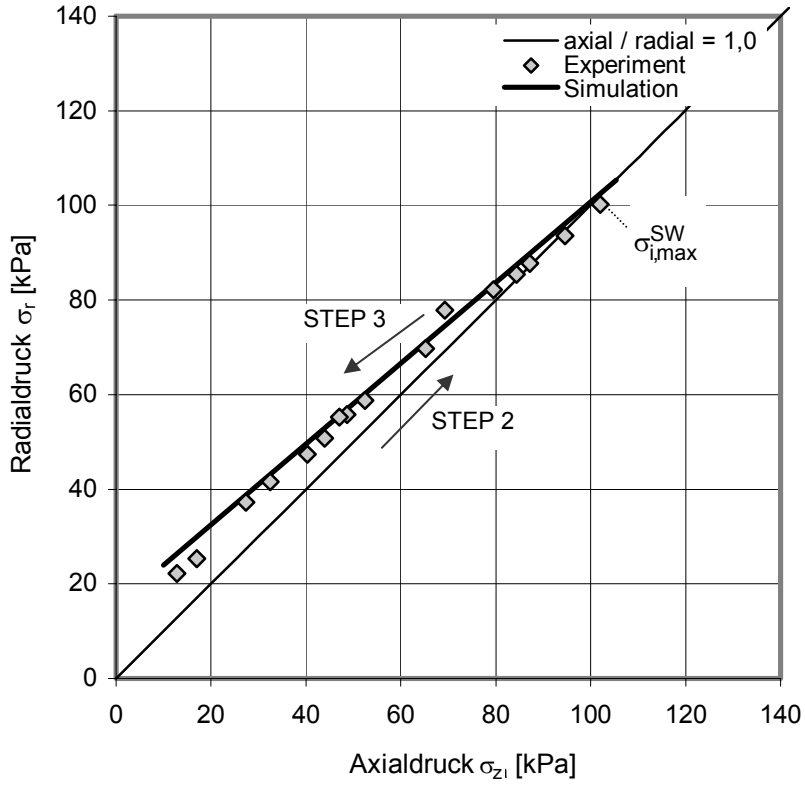


Abb. 6.5-4 Vergleich eines anisotropen Quelldruckdehnungsversuch mit der Simulation,
$\nu^{SW} = 0{,}3$, $\Delta\varepsilon_r = 0{,}5 \cdot \Delta\varepsilon_z$, $e_0 = 0{,}68$, $S_{r,0} = 0{,}70$, $S_{r,\infty} = 1{,}0$, $\sigma_{z0} \approx \sigma_{r0} \approx 9$ kPa.

Aus der Beziehung zwischen dem radialen und dem axialen Quelldruck in Abb. 6.5-4 ist zu erkennen, dass in der Simulation im STEP 2 der maximale Quelldruck $\sigma_{z,max}^{SW} = \sigma_{r,max}^{SW}$ bei konstantem Volumen, approximiert nach Gleichung (5.2-1), erreicht wird. Im STEP 3 werden die Dehnungen $\Delta\varepsilon_r = 0{,}5 \cdot \Delta\varepsilon_z$ zugelassen und die Quelldrücke in radialer und axialer Richtung nehmen mit zunehmender Dehnung ab. Die Quelldrücke in axialer Richtung bauen sich in einem größeren Maße ab als in radialer Richtung. Darüber hinaus ist in Abb. 6.5-4, unten, der Abbau des Quelldruckes im STEP 3, in jeweiliger Richtung, für das Ergebnis aus dem Experiment und dem Resultat der numerischen Simulation aufgetragen. Es wird deutlich, dass das Simulationsergebnis mit der verwendeten Querdehnzahl $\nu^{SW} = 0{,}3$ erneut zu einer guten Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen führt.

Des Weiteren wird festgestellt, dass für die axiale Quelldruckdehnungsbeziehung eine gute Konformität der Simulationsresultate mit den Versuchsergebnissen sowie der Approximation nach Gleichung (5.2-9) vorliegt.

Somit kann das Quellverhalten in jeweiliger Richtung, das näherungsweise nur von den Normalspannungen in der betreffenden Richtung abhängig ist, vergleiche Abschnitt 5.2.3.3 und 5.2.3.5, numerisch nachempfunden werden.

Die in ABAQUS implementierten Beziehungen sind für alle Parameterwerte überprüft worden.

Somit wurde erzielt, dass mittels der in den FEM - Code implementierten Quellzusammenhänge nun die Möglichkeit besteht das Quelldruckdehnungsverhalten teilgesättigter bindiger Böden infolge instationärer Feuchteausbreitung um Erdreich realitätsnah wiederzugeben.

Summarisch sind im Wesentlichen die folgenden Beziehungen in ABAQUS eingegeben und implementiert worden:

- Die Quellbeziehung (6.2-4) für volumetrisches Quellen ist in die ABAQUS - Inputdatei (*.inp) in Abhängigkeit von dem Anfangssättigungsgrad und dem Endsättigungsgrad in jedem Inkrement tabellarisch eingegeben worden. Diese Beziehung ist aus den Testergebnissen erhalten worden, indem in Gleichung (5.2-9) die Gleichung (5.2-1) mit einem variierenden Anfangssättigungsgrad $S_{r,0} = 0 \ldots 1{,}0$ und konstanter Porenzahl e_0 sowie konstantem Endsättigungsgrad $S_{r,\infty}$ eingesetzt worden ist.
- Neben dem mechanischen Modell, vorgestellt in Kapitel 3.6.1 bis 3.6.3, ist der variierende Quellmodul Q nach den Gleichungen (6.2-7), (6.2-9) und (6.2-10) in das elastische Spannungsdehnungsmodell der Benutzerroutine UMAT implementiert worden.

Der Quotient dI_σ zu dI_ε^{SW} in Gleichung (6.2-9) charakterisiert die Tangentensteigung in der Quelldruck- Quelldehnungsbeziehung, vergleiche Abb. 6.2-2, und ist aus den Versuchsergebnissen, Gleichung (5.2-9), abgeleitet worden. Der anhand der Versuchsresultate ausgewertete Quellmodul Q ist anschließend, entsprechend Abb. 6.2-3, spannungsabhängig in die Benutzerroutine implementiert worden.

- Zur Berechnung des Wassertransportes q im Bodenkörper sind die hydraulischen Beziehungen und die gesättigte sowie teilgesättigte Wasserleitfähigkeit in das Programm integriert worden. Hierzu wurde die Saugspannungssättigungsbeziehung des Versuchsmaterials, nach Gleichung (3.3-7) mit den ermittelten Konstantenwerten nach Tabelle 4.3-3, tabellarisch in die ABAQUS - Inputdatei (*.inp) eingegeben.

  Des Weiteren ist die gesättigte Wasserleitfähigkeit nach Tabelle 4.1-3 angesetzt worden und die Beziehung für die teilgesättigte Wasserleitfähigkeit nach Gleichung (3.4-4), in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad S_r , wurde tabellarisch in die ABAQUS - Inputdatei (*.inp) eingefügt.

6.6 Randwertproblem axialsymmetrische Pfahl - Plattengründung

In den folgenden Abschnitten wird anhand eines praxisorientierten Berechnungsbeispiels aus der Geotechnik die Anwendungsmöglichkeit des aufgestellten und in den Abschnitten 6.4 und 6.5 überprüften Quellmodels für die Praxis dargestellt.

6.6.1 Problemstellung

In Abb. 6.6-1 ist ein repräsentativer Querschnitt des verwendeten Berechnungsbeispiels aus der Geotechnik dargestellt. Betrachtet wird eine axialsymmetrische Monopfahl-Plattengründung mit dem Pfahl in der Achse.

Um die Gebrauchstauglichkeit des Bauwerks gewährleisten zu können, müssen die Setzungen infolge statischer mechanischer Belastung sowie die Hebungen des Bauwerks infolge Quellen des Baugrundes bzw. die Zwangsspannungen auf das Bauwerk infolge der Quellbelastung untersucht werden.

Die Gründungsplatte des zu untersuchenden Bauwerks hat einen Durchmesser $d_{Pl} = 4{,}0$ m sowie eine Dicke $h = 0{,}8$ m. Unter der Platte, in deren Achse, ist ein Bohrpfahl hergestellt, welcher kraftschlüssig mit der Platte verbunden ist. Der Monopfahl hat einen Durchmesser $d_{Pf} = 0{,}8$ m sowie eine Länge $L = 8{,}0$ m. Die Fundamentplatte ist auf einer 5,4 m mächtigen, quellfähigen Kaolinittonschicht gegründet, welche wenig tragfähig ist. Unter der teilgesättigten Kaolinitschicht steht ein tragfähiger Mittelsand an, welcher Grundwasser führend ist. Der Pfahl bindet 2,6 m in den tragfähigen Sand ein. Die Böden sind homogen und normalkonsolidiert.

Folgendes Szenario soll analysiert werden:

1. Die Gründungsplatte wird mit der statischen Vertikalspannung P belastet.
2. Das Grundwasser steigt in dem teilgesättigten Grundwasserleiter langsam auf bis zur Unterkante der ebenso teilgesättigten Tonschicht. Der Untersuchungszeitraum wird auf 1 Jahr festgelegt.

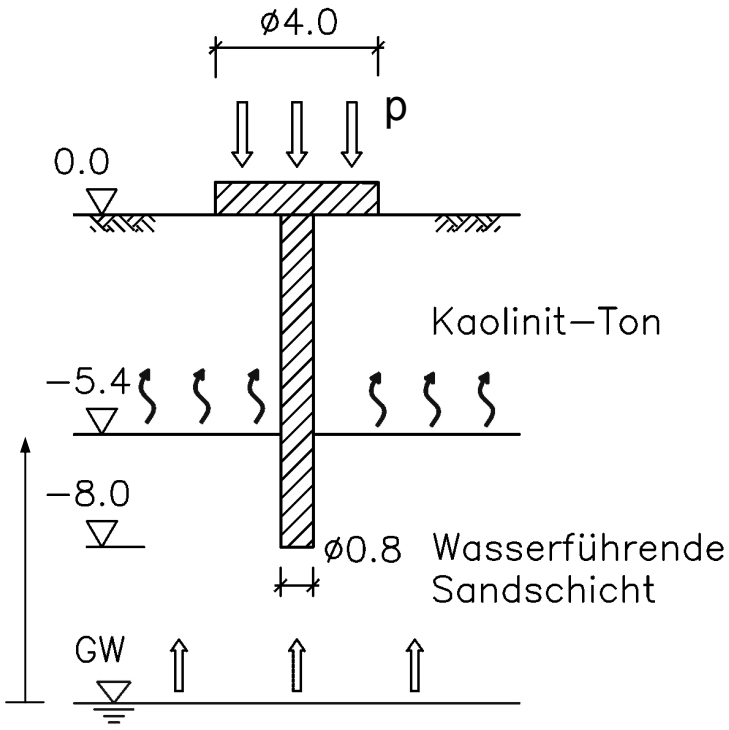


Abb. 6.6-1 Querschnitt des Berechnungsbeispiels.

6.6.2 Geometrie und FEM - Modell

Das Rechenmodell wird als ein axialsymmetrisches Randwertproblem betrachtet. Die axialsymmetrische Fundamentplatte des Bauwerks, mit einer Dicke von 80 cm, wird mit axialsymmetrischen Volumenelementen des Typs CAX4 (4-node bilinear displacement) aufgebaut. Mit diesen Elementen wird ebenso der 8 m lange Pfahl in der Achse modelliert. Der Durchmesser des Pfahles beträgt 80 cm.

Die Böden werden ebenso mit axialsymmetrischen Elementen abgebildet, jedoch mit Volumenelementen des Typs CAX4P (4-node bilinear displacement and pore pressure).

Die Symmetrie ausnutzend, wird nur der axialsymmetrische rechte Sektor des Randwertproblems im FEM - Modell betrachtet, siehe Abb. 6.6-2. Der Berechnungsausschnitt wird mit 2380 CAX4P - Elementen und 120 CAX4 - Elementen diskretisiert und das gesamte FEM - Netz enthält somit 2660 Knoten. Der Seitenrand der Bodenschicht wird als vertikal verschieblich und der untere Rand als horizontal verschieblich angenommen. Die unteren beiden Eckknoten bleiben dann in beide Richtungen unverschieblich. Es wird angenommen, dass die tragfähige Sandschicht ab 12 m unter Geländeoberkante unendlich steif ist.

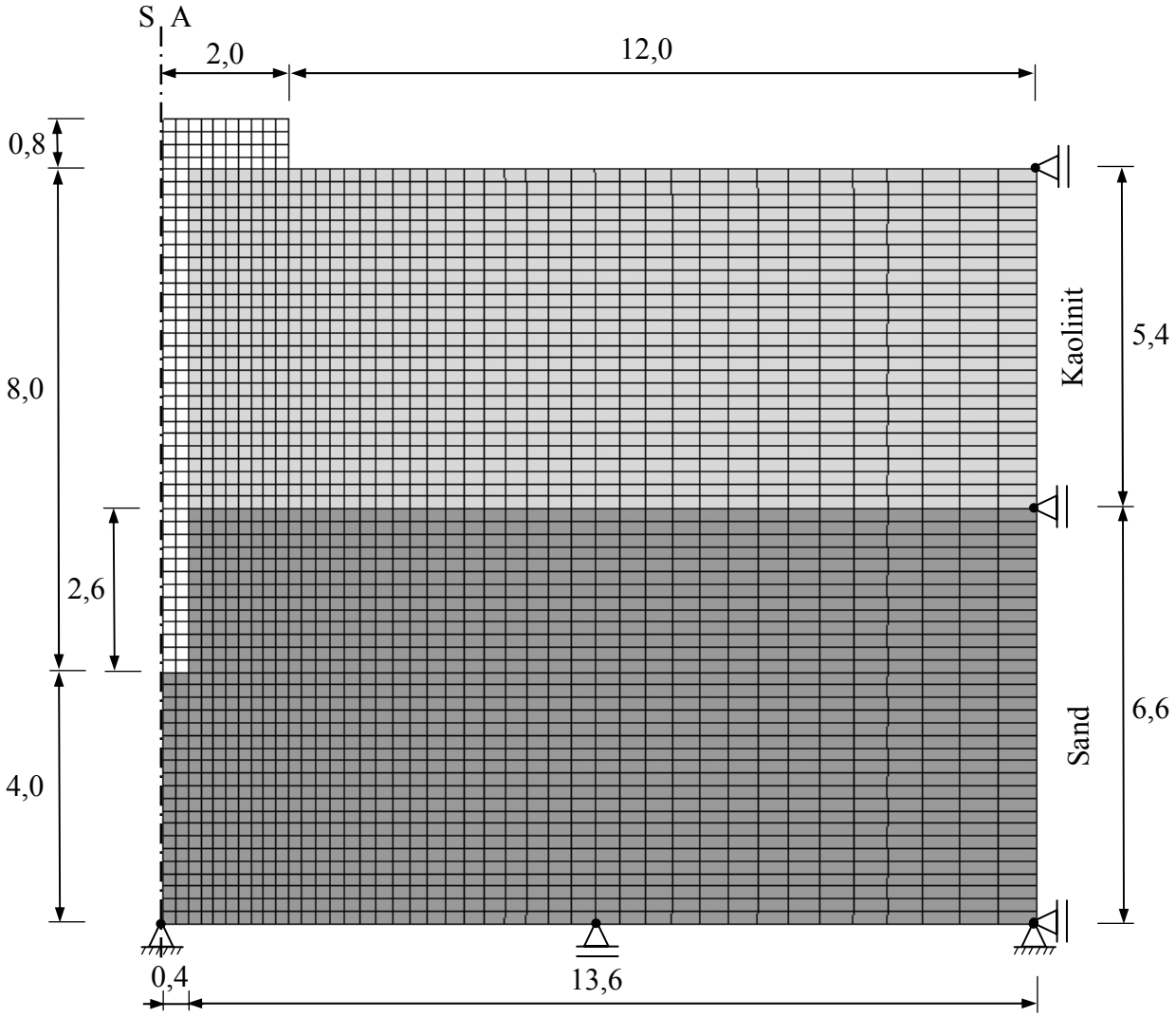


Abb. 6.6-2 Berechnungsausschnitt, Geometrie, FEM - Netz und Randbedingungen (Maße in Meter).

6.6.3 Modellierung des Kontaktverhaltens zwischen Boden und Bauwerk

Dem Übergangsbereich zwischen Pfahl und Boden kommt bei numerischen Simulationen eine zentrale Bedeutung zu. Dieser Bereich kann durch unterschiedliche Stoffansätze oder durch den Einbau verschiedener Kontaktbeziehungen und durch spezielle Interface-Elemente im FE-Netz berücksichtigt werden. In ABAQUS kann die Interaktion zwischen Pfahl und Boden u. a. durch idealen Kontakt und durch den Einbau von Kontaktflächen erfolgen.

Bei der Modellierung mit idealem Kontakt wird angenommen, dass das Überschreiten der Scherfestigkeit des Bodens in einer dünnen Schicht neben der direkten Kontaktfläche Pfahl-Boden erfolgt. Die Materialeigenschaften der Elemente im Übergangsbereich Pfahl-Boden entsprechen denen der Bodenelemente im umgebenen Erdreich oder bei Verwendung von

Interface-Elementen auch anderen stofflichen Eigenschaften. Die Abmessungen der Elemente im Übergangsbereich in Relation zu den Abmessungen des Pfahles spielen eine entscheidende Rolle. Dieser Bereich muss sehr fein diskretisiert werden. Im Allgemeinen kann eine Breite des Mantelelementes von 10 % des Pfahldurchmessers verwendet werden.

Bei Verwendung von Kontaktflächen können die zum Pfahl benachbarten Elemente weitaus größere Abmessungen besitzen, welches die Berechnungszeit erheblich verkürzt. Wehnert & Vermehr (2004) haben festgestellt, dass bei der Modellierung eines Bohrpfahles unter Verwendung spezieller Interface-Elemente, welche vergleichbar sind zu einer Modellierungen mit Kontaktflächen, der Einfluss auf den Pfahlmantelwiderstand infolge der Diskretisierung des Pfahl umgebenden Bodens vernachlässigbar klein ist.

Somit wird bei der Modellierung mit Kontaktflächen angenommen, dass bei Verwendung von Mantelelementen mit einer Breite von 25 % des Pfahldurchmessers hinreichend gute Ergebnisse erzielt werden.

Am Pfahlschaft werden im Zuge der Lastaufbringung Schubspannungen mobilisiert. Im Rahmen von Pfahlversuchen an Stahlpfählen mit geschlossenem Pfahlfuß in einem überkonsolidieren London Clay haben Bond & Jardine (1995) nachgewiesen, dass für die Kontaktfläche zwischen Boden und Pfahl Coulomb´sche Reibung angesetzt werden kann.

Für die numerische Modellierung des Kontaktes zwischen Baugrund und Tragwerk kommt das so genannte Master - Slave - Konzept zum Einsatz. Der Kontakt zwischen Bauwerk und Baugrund wird durch miteinander in Wechselwirkung stehenden Kontaktflächen modelliert. Dabei wird die Oberfläche des steiferen Volumenkörpers als die Master - Kontaktfläche und die der weicheren Oberfläche als Slave - Kontaktfläche definiert. Das Materialverhalten zwischen den Kontaktflächen wird mit Coulomb´scher Reibung als elasto - plastisch modelliert.

Das wesentliche Konzept des Modells beruht darauf, die maximal erlaubte, äquivalente Scherspannung τ mit der Kontaktspannung $\sigma_{\perp}$ in der Grenzfläche, normal zur Master - Oberfläche, in Beziehung zu setzen. Zwei in Kontakt stehende Flächen können Normalspannungen übertragen und auch Schubspannungen bis zu einer definierten Größe, bevor die Flächen relativ zueinander zu gleiten beginnen. Das Coulomb´sche Reibungsmodell definiert die kritische Scherspannung τ_{Peak}, ab der sich die Kontaktflächen relativ zueinander zu verschieben beginnen wie folgt:

$$\tau_{Peak} = \mu \cdot \sigma_{\perp} = \tan\delta \cdot \sigma_{\perp} \qquad (6.6\text{-}1)$$

Dabei ist $\mu = \tan\delta$ der Reibungskoeffizient zwischen den Berührungsflächen. In dem Modell wird davon ausgegangen, dass der Reibungskoeffizient $\mu = \tan\delta$ in allen Richtungen isotrop ist. Bei dreidimensionalen Analysen existieren zwei orthogonal zueinander stehende Komponenten an Schubspannungen, τ_1 und τ_2, in einer Kontaktfläche zwischen zwei Volumenkörpern. ABAQUS kombiniert diese zwei Schubspannungskomponenten in eine äquivalente Schubspannungskomponente wie folgt:

$$\tau_{vergl.} = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2} \tag{6.6-2}$$

Die Relativverschiebung $\Delta\gamma$ in der Kontaktfläche teilt sich in einen elastischen Anteil $\Delta\gamma^{el}$ und einen plastischen Anteil $\Delta\gamma^{pl}$:

$$\Delta\gamma = \Delta\gamma^{el} + \Delta\gamma^{pl} \tag{6.6-3}$$

Für den plastischen Anteil gilt die Scherspannung aus Gleichung (6.6-1) und für den elastischen Anteil gilt:

$$\tau = G_k \cdot \Delta\gamma^{el} \tag{6.6-4}$$

Die elastische Steifigkeit G_k ergibt sich aus der kritischen Scherspannung τ_{Peak} und der maximal zugelassenen, elastischen Relativverschiebung $\Delta\gamma_{Peak}$, vergleiche Abb. 6.6-3. Dieser Verschiebungswert wird auf $\Delta\gamma_{Peak} = 0{,}5$ cm festgelegt.

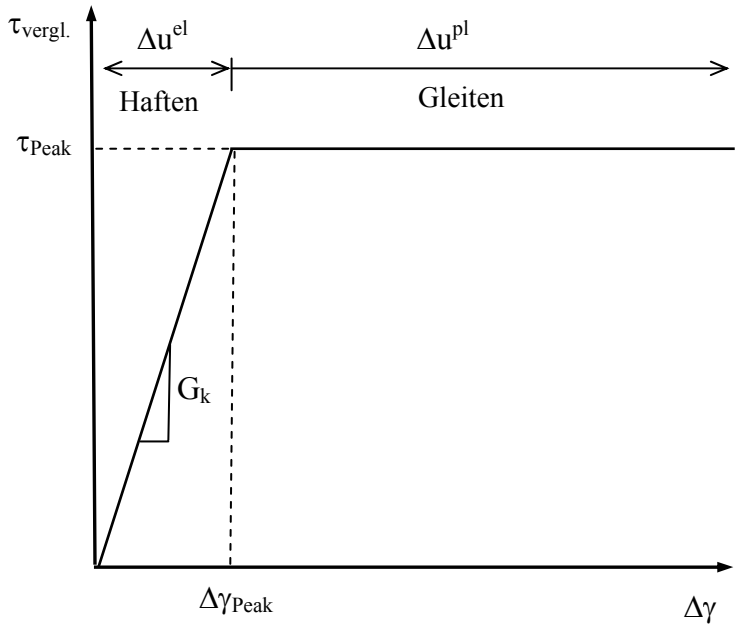


Abb. 6.6-3 Verwendetes Schermodell in der Kontaktfläche.

6.6.4 Eingehende Parameter und Beziehungen

Der im Randwertproblem betrachtete Boden ist homogen und normalkonsolidiert. Der Scherwiderstand von dem Kaolinit - Ton wird durch den Winkel der Gesamtscherfestigkeit beschrieben. In Tabelle 6.6-1 sind alle verwendeten Materialparameter und Rechengrößen für die ausgeführte numerische Berechnung angegeben.

Die Quellbeziehung (6.2-4) für volumetrisches Quellen wird in die ABAQUS - Inputdatei (*.inp) in Abhängigkeit von dem Anfangssättigungsgrad und dem Endsättigungsgrad eingegeben. Diese Beziehung wird aus den Testergebnissen erhalten, indem in Gleichung (5.2-9) die Gleichung (5.2-1) mit einem variierenden Anfangssättigungsgrad $S_{r,0} = 0 \ldots 1{,}0$ und konstanter Porenzahl e_0 sowie konstantem Endsättigungsgrad $S_{r,\infty}$ eingesetzt wird.

Neben dem mechanischen Materialgesetz, vorgestellt in Kapitel 3.6.1 bis 3.6.3, wird der variierende Quellmodul Q nach den Gleichungen (6.2-7), (6.2-9) und (6.2-10) in das elastische Spannungsdehnungsmodell der Benutzerroutine UMAT implementiert. Der Quotient dI_σ zu dI_ε^{SW} in Gleichung (6.2-9) charakterisiert die Tangentensteigung in der Quelldruck-Quelldehnungsbeziehung, vergleiche Abb. 6.2-2, und wird aus den Versuchsergebnissen nach Gleichung (5.2-9) für $S_{r,0} = 0{,}7$ und $e_0 = 0{,}78$, vorgestellt in Kapitel 5.2, erhalten. Der anhand der Versuchsresultate ausgewertete Quellmodul Q wird spannungsabhängig, veranschaulicht in Abb. 6.2-3, in die Benutzerroutine implementiert.

Zur Berechnung des Wassertransportes q im Bodenkörper werden die hydraulischen Beziehungen und die gesättigte sowie teilgesättigte Wasserleitfähigkeit in das Programm eingegeben. Hierzu wird die Saugspannungssättigungsbeziehung des Versuchsmaterials, nach Gleichung (3.3-7) für die Porenzahl $e_0 = 0{,}78$ mit den ermittelten Konstantenwerten nach Tabelle 4.3-3, tabellarisch in die ABAQUS - Inputdatei (*.inp) übertragen.

Da für den Sand keine Versuche durchgeführt worden sind, wird für dieses Material eine Saugspannungs - Sättigungsbeziehung nach Gleichung (3.3-7) mit den Tabellenwerten nach Tabelle 4.3-3 angenommen, jedoch mit 1/100 der Größe des für den Kaolinit ermittelten Parameters a_1. Dies resultiert relativ gut in eine typische Saugspannungs - Sättigungsrelation für Sandböden, vgl. Likos (2000).

Des Weiteren wird die gesättigte Wasserleitfähigkeit nach Tabelle 6.6-1 angesetzt und die Beziehung für die teilgesättigte Wasserleitfähigkeit nach Gleichung (3.4-4) für die im Randwertproblem betrachtete Porenzahl $e_0 = 0{,}78$, in Abhängigkeit vom Sättigungsgrad S_r , tabellarisch in die ABAQUS - Inputdatei (*.inp) eingefügt.

Tabelle 6.6-1: Materialparameter für das Berechnungsbeispiel

Kaolinit	Trockendichte ρ_d	1,49 g/cm³
	Initiale Porenzahl e_0	0,78
	Initialer Sättigungsgrad $S_{r,0}$	0,70
	Gesättigte Wasserleitfähigkeit K_f	3,3·E-10 m/s
	Teilgesättigte Wasserleitfähigkeit K_u	nach Gleichung (3.4-4)
	Initiale Saugspannung ψ_0	-203,4 kPa entspricht pF = 3,31 [-]
	Saugspannung ψ	nach Gl. (3.3-7) und Tab. 4.3-3
	Konsolidierverhältnis R_p	1,0
	Elastizitätsmodul E	30.000 kPa, nach Abschnitt 4.2.1
	Querdehnzahl für mech. Belastung ν^m	0,3
	Quellmodul Q	nach Gl. (6.2-7), (6.2-9) und (6.2-10) als f($I^{SW}_{\sigma,max}$)
	Querdehnzahl für Quellen ν^{SW}	0,3
	Reibungswinkel	29°, nach Tab. 4.2-1
	Kohäsion	87 kPa, nach Tab. 4.2-1
	Winkel der Gesamtscherfestigkeit φ_s	39° (c = 0), nach Tab. 4.2-1 als f($I_{\sigma,v}$)
	Reibungskoeffizient μ	tan 29°
Sand (Annahmen)	Trockendichte ρ_d	1,75 g/cm³
	Initiale Porenzahl e_0	0,51
	Initialer Sättigungsgrad $S_{r,0}$	0,09
	Wasserleitfähigkeit K_f	1,0·E-4 m/s
	Initiale Saugspannung ψ_0	-203,4 kPa entspricht pF = 3,31 [-]
	Saugspannung ψ	nach Gl. (3.3-7), Tab. 4.3-3 u. 1/100 · a_1
	Elastizitätsmodul E	100.000 kPa
	Querdehnzahl ν^m	0,3
	Reibungswinkel φ	35°
	Reibungskoeffizient μ	tan 35°
Beton	Dichte ρ	2,50 g/cm³
	Elastizitätsmodul E	30.000 MPa
	Querdehnzahl ν	0,2

6.6.5 Berechnungsablauf und Belastungsgeschichte

Im ersten Berechnungsschritt (STEP 1) erfolgt über einen Zeitabschnitt $\Delta t = 7$ h eine Gleichgewichtsanalyse. In dieser Analyse wird der Boden, mit den initialen Parametern $S_{r,0}$ und e_0, dem Eigengewicht und der porenzahl- und sättigungsgradabhängigen Saugspannung beaufschlagt. Der Primärspannungszustand wird mit $K_0 = \nu/(1-\nu)$ berechnet. Des Weiteren wird auch die Pfahlplattengründung mit dem Eigengewicht belastet.

Im Berechnungsschritt 2 (STEP 2) wird die Fundamentoberfläche mit dem vertikalen Belastungsdruck $p = 600$ kPa belastet. Die Größe der Auflast wird linear über die Berechnungszeit $\Delta t = 7$ h im STEP 2 aufgebracht.

In den nächsten Berechnungsschritten (STEP 3 bis STEP 13) steigt das Grundwasser vom Boden des Modells her allmählich bis zur Unterkante des Kaolinit - Tones auf. Dies erfolgt durch Definition des Porenwasserdruckes ($\psi = 0$) an der nach und nach aufsteigenden Grundwasseroberfläche im Modell. Jeder Berechnungsabschnitt überdauert hierbei $\Delta t = 24$ h.

In den folgenden Berechnungsschritten bleibt das Grundwasser drucklos direkt unter der Kaolinitschicht anstehen, welches zu einer zeitlich abhängigen Aufsättigung der Tonschicht führt. Die Berechnung des Wassertransportes q im Boden findet analog zu Kapitel 3.4 statt.

Dabei wird das System bis zu einem gewünschten Berechnungszeitpunkt arretiert. Infolge der Wasserausbreitung im Modell bei konstantem Volumen berechnet das Hauptprogramm ABAQUS die maximalen Quelldehnungsinkremente nach Gleichung (6.2-4) und übergibt diese in die Benutzerroutine UMAT. In diesem Berechnungsschritt resultieren, mittels der in die Routine implementierten Quellmatrix $[D^{el,SW}]$ und des darin enthalten Quellmoduls Q_0 nach Gleichung (6.2-7), die maximalen Quellspannungen $I^{SW}_{\sigma,max}$ nach Gleichung (5.2-1). Darauf folgend wird die Arretierung des Systems gelöst und somit eine Deformation zugelassen. Die sich einstellende Deformation $\Delta\varepsilon_z$ und $\Delta\varepsilon_r$ wird vom Hauptprogramm in die Benutzerroutine UMAT übergeben. In der Routine berechnet sich daraus der Quelldruckabbau in jeweiliger Richtung mittels der in die Routine implementierten Quellmatrix $[D^{el,SW}]$ nach Gleichung (6.2-5) sowie der darin enthalten Beziehungen für das spannungsabhängige Quellmodul Q nach den Gleichungen (6.2-7), (6.2-9) und (6.2-10). Dieser Berechnungsablauf kann beliebig oft wiederholt werden.

Da das Quellen in jeweiliger Richtung näherungsweise von der Normalspannung in der betreffenden Richtung abhängig ist $\Delta\varepsilon_i^{SW} \sim \sigma_i$, vergleiche Kapitel 5.2.3, ist das Quellmodul Q für Spannungszustände $\sigma_{i,0} < \sigma_i < \sigma_{i,max}^{SW}$ in Abhängigkeit von der Normalspannung σ_i einer Richtung

implementiert worden, vergleiche Abb. 6.2-3. Da das Modul in jedem Element nur von einer Hauptnormalspannung abhängig sein kann, ist σ_i in Richtung der maximal zu erwartenden Quelldeformation zu wählen, hier in Richtung der Geländeoberkante $\sigma_i = \sigma_z$.

In der Simulationen wird, für Spannungszustände $\sigma_{i,0} < \sigma_i < \sigma_{i,max}^{SW}$ der nichtlineare Quellmodul Q nach Gleichung (6.2-9) verwendet. Für Spannungszustände $\sigma_i \geq \sigma_{i,max}^{SW}$ tritt keine Quellverformung mehr auf und der Quellmodul bleibt konstant mit Q_0 nach Gleichung (6.2-7). Damit ist gewährleistet, dass der Quelldruck $\sigma_{i,max}^{SW}$ kleiner bzw. gleich dem vorherrschenden Spannungszustand σ_i bleibt und keine Quelldeformationen mehr eintreten. Für einen Spannungszustand kleiner bzw. gleich der minimale initiale Anfangsspannung $\sigma_{i,0}$ aus den Versuchen, d. h. $\sigma_{i,0} \geq \sigma_i$, wird das Quellmodul nach Gleichung (6.2-10) verwendet und es stellen sich die maximal möglichen Quelldehnungen, in Abhängigkeit der Parameter, in Richtung der minimalen Spannung ein.

Die Zeitinkrementierung eines Berechnungsschrittes verläuft in der Analyse automatisch, indem ein Toleranzwert UTOL definiert wird, welcher die maximale Änderung des Porenwasserdruckes in einem Element in jedem Zeitinkrement begrenzt. Die maximale Anzahl an Inkrementen pro Berechnungsschritt wird jedoch definiert. Der Beginn t_0 und das Ende t_{Ende} der Berechnungsschritte (STEPs) werden zeitlich vorgegeben.

6.6.6 Ergebnisse und Diskussion

In den Abb. 6.6-4 bis 6.6-9 sind deformierte Konturplots für den Sättigungsgrad im gesamten Modell für verschiedene Zeitpunkte abgebildet. Die Plots sind mit einer 10 - fachen Überhöhung der Deformation abgebildet. Dargestellt ist jeweils der axialsymmetrische Systemausschnitt. Zum Zeitpunkt t = 0, nach der Belastung der Fundamentoberfläche mit dem vertikalen Belastungsdruck p = 600 kPa, herrscht in der Sandschicht annähernd gleichmäßig eine Sättigung $S_r = 0{,}095$. Infolge der Belastung ändert sich die Sättigung unter dem Pfahlfuß nicht merklich. In der Kaolinitschicht besteht zu diesem Zeitpunkt eine Sättigung $S_r = 0{,}71$. Unter der Fundamentplatte nimmt der Sättigungsgrad partiell auf $S_r = 0{,}725$ infolge der Verdichtung zu.

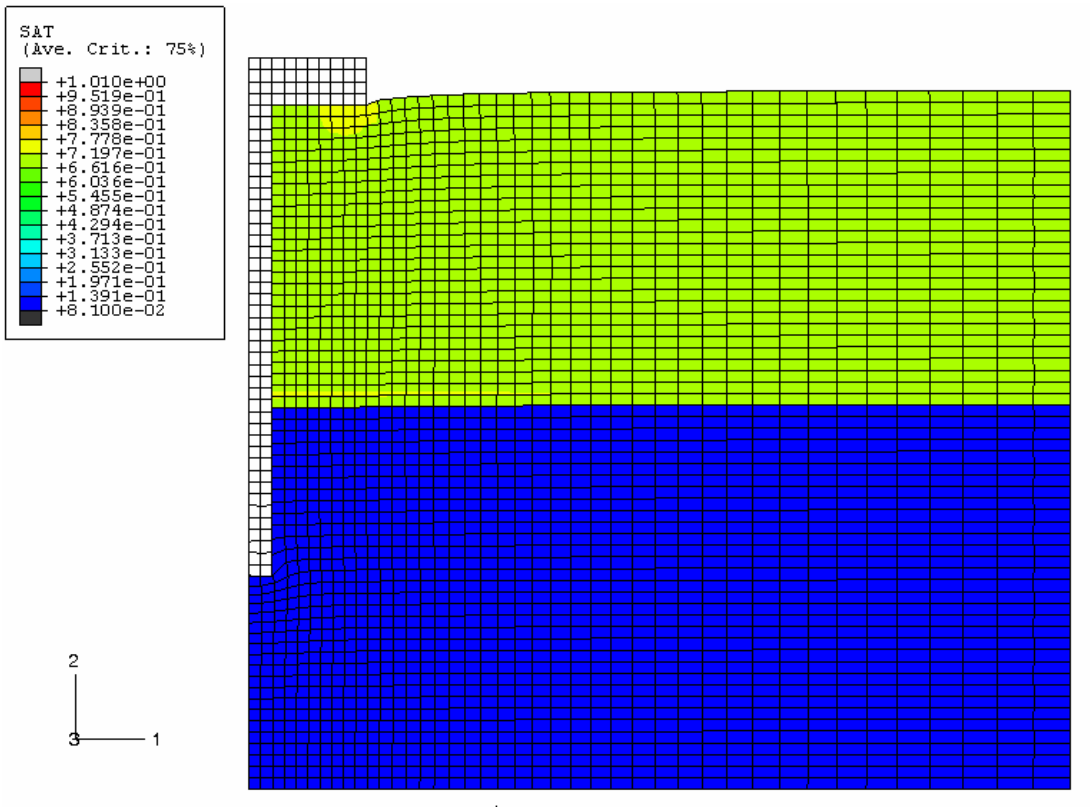


Abb. 6.6-4 Konturplot für den Sättigungsgrad im System zum Zeitpunkt t = 0 nach Aufbringen der Belastung p.

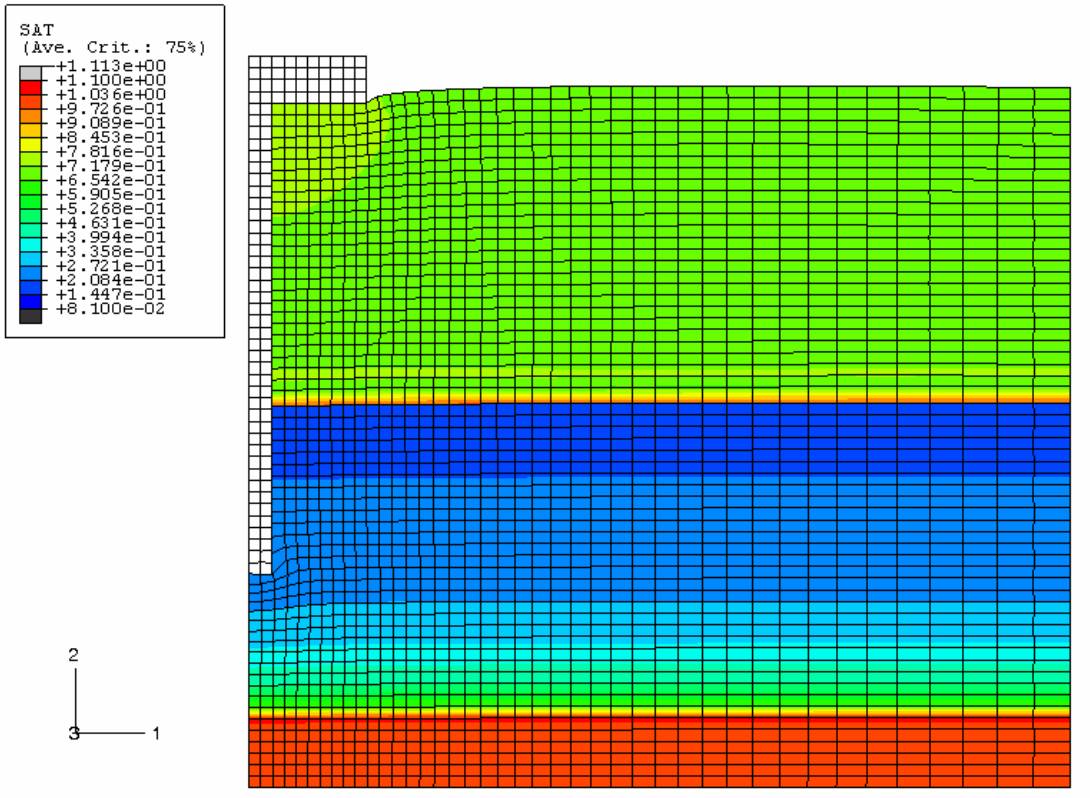


Abb. 6.6-5 Konturplot für den Sättigungsgrad im System zum Zeitpunkt t = 4 d nach Aufbringen der Belastung p.

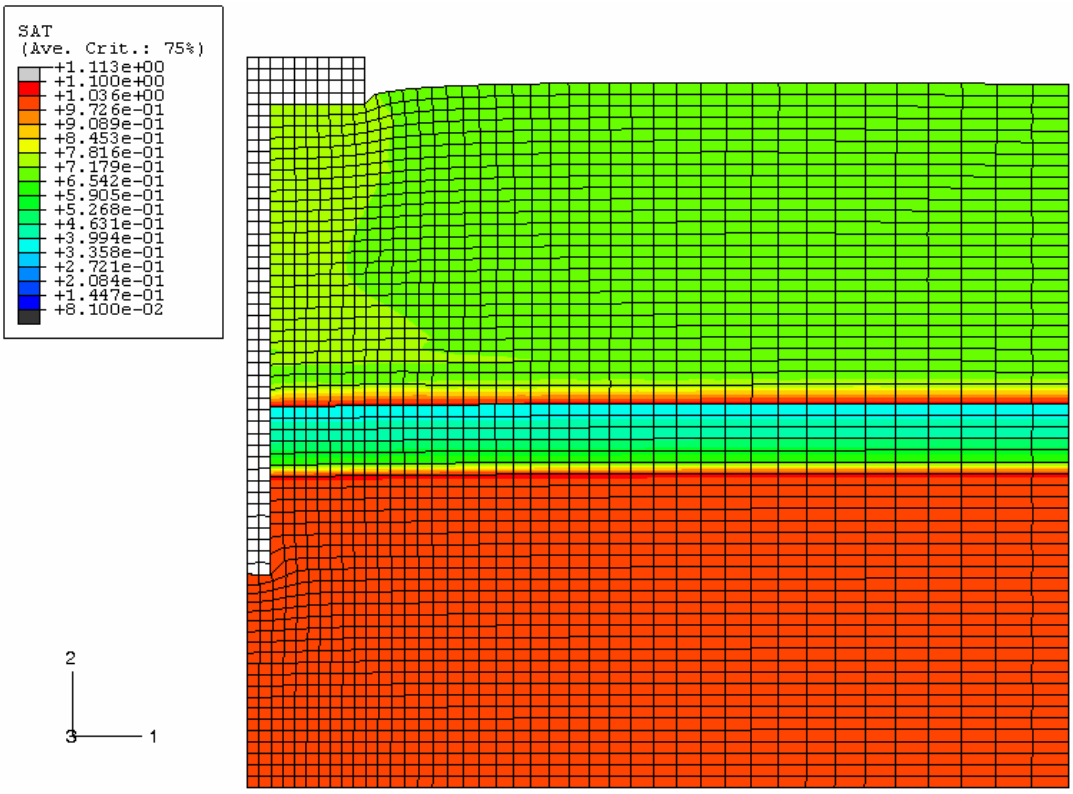


Abb. 6.6-6 Konturplot für den Sättigungsgrad im System zum Zeitpunkt t = 10 d nach Aufbringen der Belastung p.

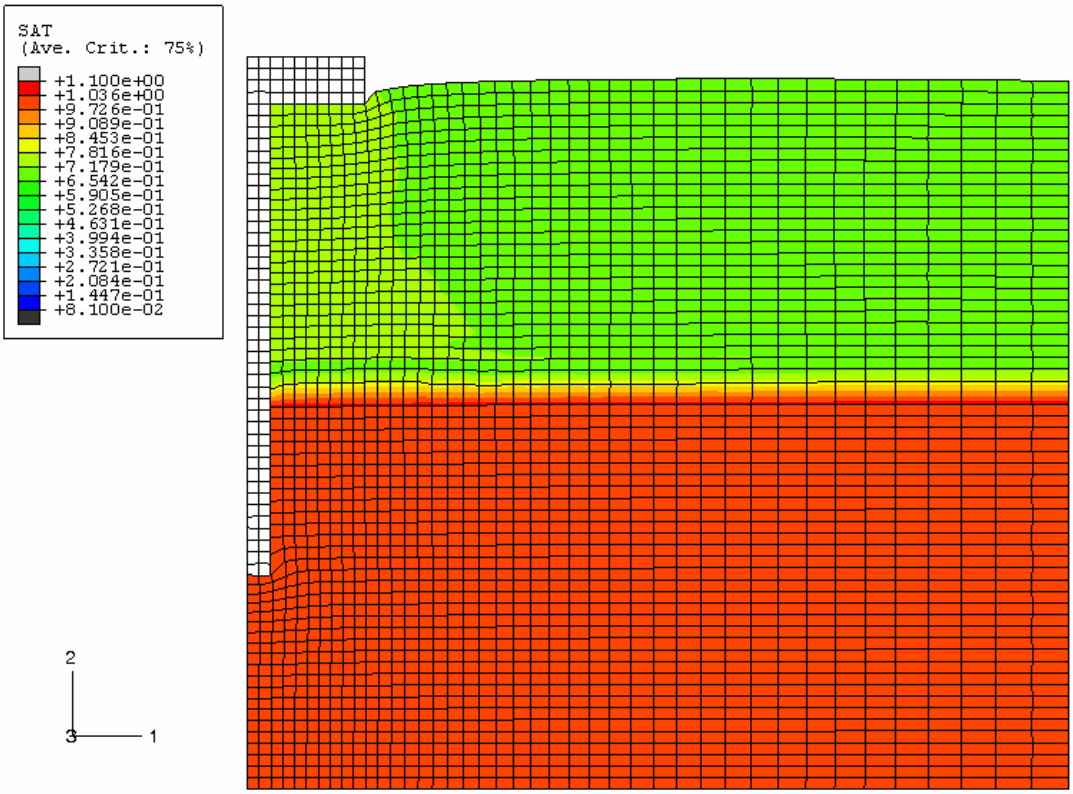


Abb. 6.6-7 Konturplot für den Sättigungsgrad im System zum Zeitpunkt t = 17 d nach Aufbringen der Belastung p.

In den Plots 6.6-5 bis 6.6-6 steigt nun das Grundwasser in der Sandschicht allmählich auf, bis dieses nach 11 Tagen die Tonschicht erreicht.

In Abb. 6.6-6 ist zu erkennen, dass die Tonschicht bereits zum Zeitpunkt $t = 10\ d$ nach aufbringen der Last p schon beginnt sich von der Basis her leicht aufzusättigen. Dies ist zu erklären durch eine bereits eintretende Änderung in der Saugspannung oberhalb des Grundwasserhorizontes in der Sandschicht. Damit die Saugspannungen im System am Übergang der Sandschicht zur Kaolinitschicht im Gleichgewicht bleiben, sättigt der Ton um ein gewisses Maß auf, um dieses Gleichgewicht zu erfüllen. Der Sand besitzt eine weitaus niedrigere Saugspannung als der Ton. Nähert sich solch ein kleiner Saugspannungswert, in einer anstehenden Schicht, einem bindigen Boden, so sättigt dieser bindige Boden auf, um ebenfalls diesem kleineren Saugspannungswert gerecht zu werden.

Infolge dieser Aufsättigung beginnt der Ton auch schon allmählich leicht zu Quellen. Vergleicht man die Plots 6.6-5 und 6.6-6 miteinander wird ersichtlich, dass der Sättigungsgrad S_r im Ton unterhalb des Fundamentes infolge der quellbedingten Verdichtung in diesem Areal zunimmt. Im Bereich neben der Fundamentplatte kann der Baugrund zur Oberfläche hin ausweichen.

In Abb. 6.6-7 steht das Grundwasser bereits 6 Tage an der Unterkante der Tonschicht an und das FE - Netz hat sich infolge des Quellenvorgangs schon merklich verformt. Die Verdichtung unterhalb der Fundamentplatte nimmt weiter zu und somit auch der Sättigungsgrad in diesem Bereich.

In Abb. 6.6-8 steht das Grundwasser bereits 76 Tage an dem Kaolinit an und zum Ende der Berechnung, dargestellt in Abb. 6.6-9, wird der Kaolinit bereits 1 Jahr durchfeuchtet. Das FE - Netz verformt sich infolge Quellen zunehmend mit der Dauer des an der Tonschicht anstehenden Grundwassers. Die Durchfeuchtung des Tones schreitet jedoch relativ langsam voran, da die Durchlässigkeit des quellfähigen Materials sehr gering ist.

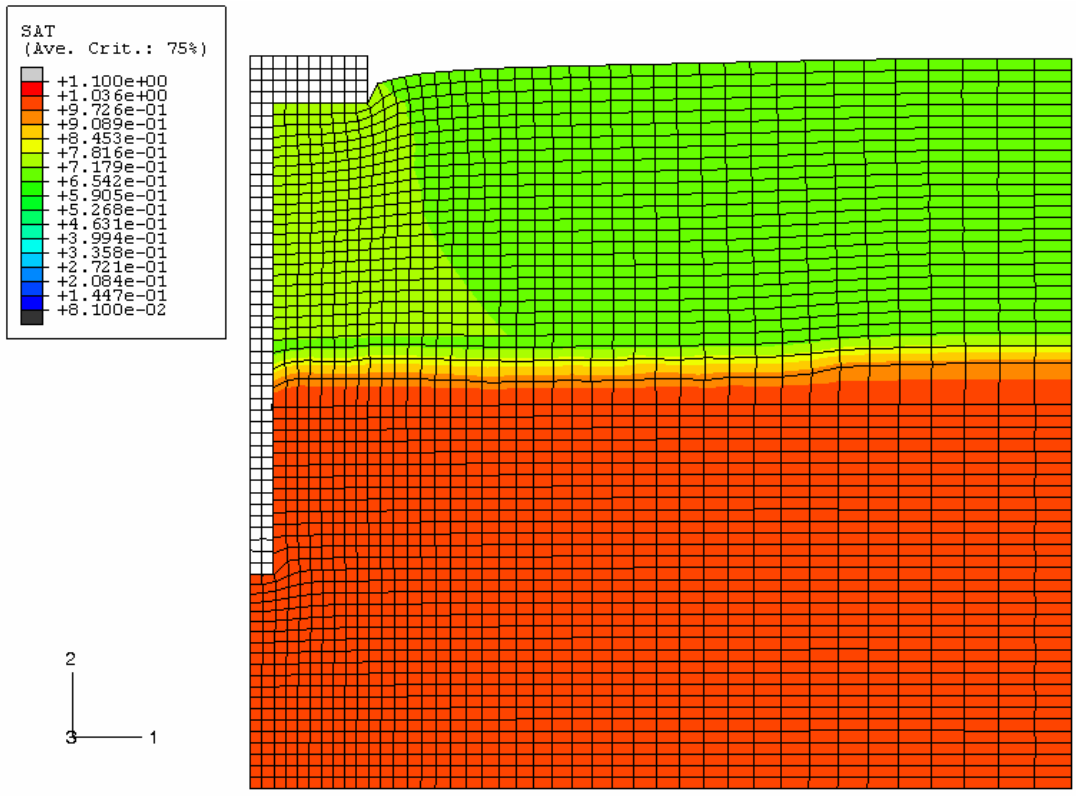


Abb. 6.6-8 Konturplot für den Sättigungsgrad im System zum Zeitpunkt t = 87 d nach Aufbringen der Belastung p.

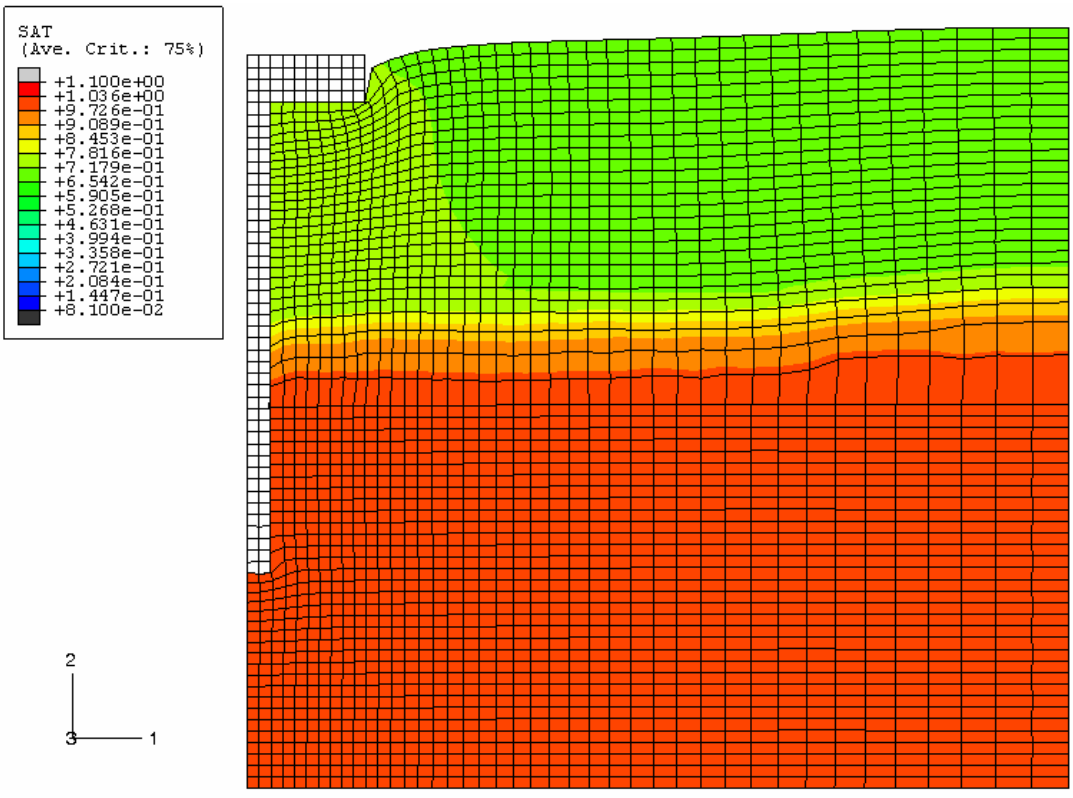


Abb. 6.6-9 Konturplot für den Sättigungsgrad im System zum Zeitpunkt t = 375 d nach Aufbringen der Belastung p.

Die Porenwasserdruckverteilung im Modell, zum Zeitpunkt t = 0 nach Aufbringen der Last p, ist in Abb. 6.6-10 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass im System annähernd die gleiche Saugspannung herrscht. Infolge der Belastung wird unter der Fundamentplatte bis 5,4 m unter der Geländeoberfläche die Saugspannung leicht herabgesetzt. Dieses Phänomen ist zurückzuführen auf eine Verdichtung des Bodenmaterials in diesem Bereich, wodurch sich die Sättigung erhöht und somit die Saugspannung abfällt. Ein dichteres Material hat zwar eine höhere Saugspannung, siehe Gleichung (3.3-7), jedoch ist der Einfluss der steigenden Sättigung infolge Verdichtung größer. Dieser stärkere Einfluss des Sättigungsgrades S_r, gegenüber der Porenzahl, auf die pF - Werte wird in Abschnitt 4.3.4 und Abb. 4.3-9 verdeutlicht. Die Saugspannungsverteilung im System korrespondiert größtenteils mit der Sättigungsgradverteilung.

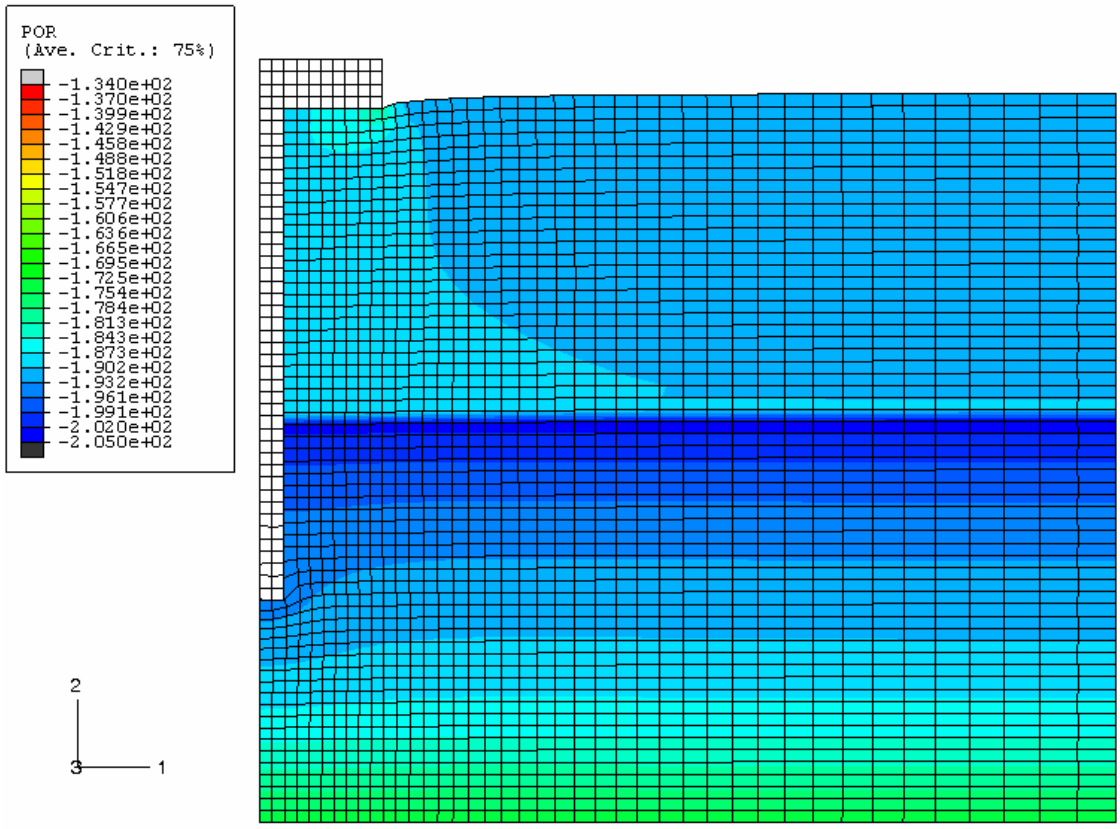


Abb. 6.6-10 Konturplot für die Porenwasserdruckverteilung im System zum Zeitpunkt t = 0 nach Aufbringen der Belastung p.

Im folgenden Konturplot in Abb. 6.6-11 ist die vertikale, effektive Spannungsverteilung zum Zeitpunkt t = 0 dargestellt und in Abb. 6.6-12 zum Zeitpunkt t = 375 Tage.

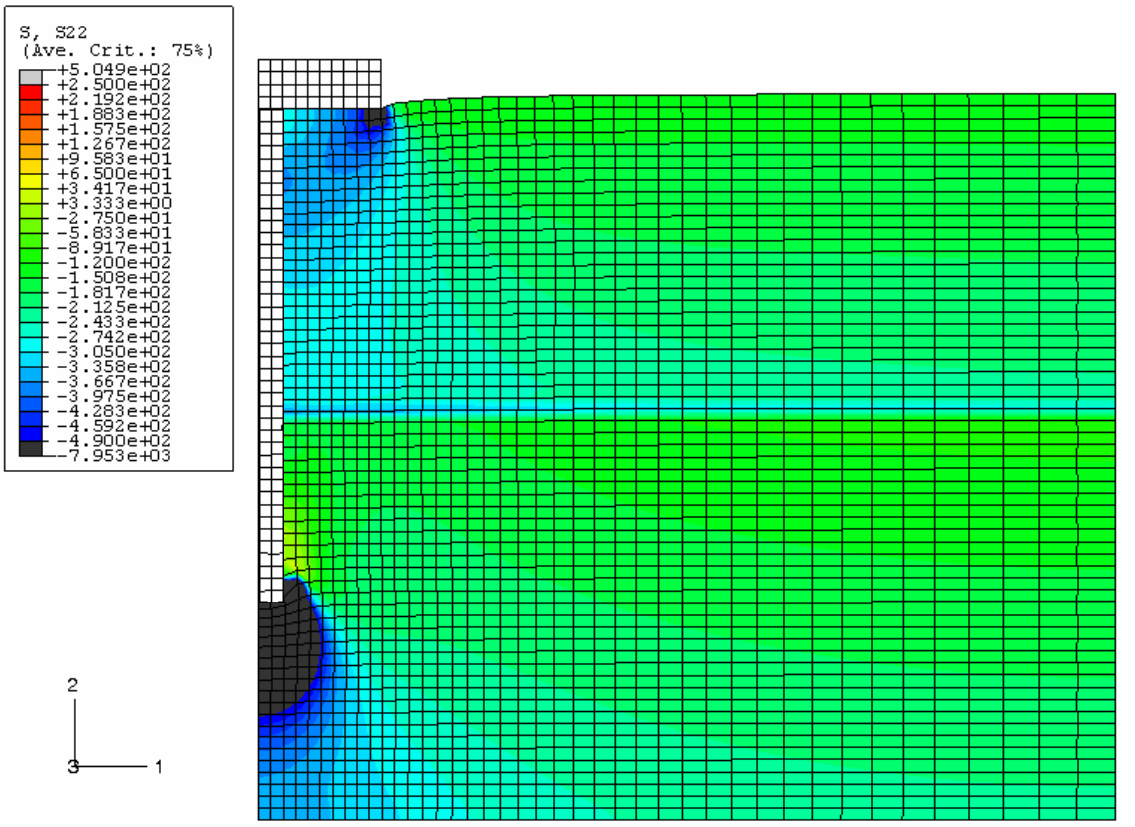


Abb. 6.6-11 Konturplot der effektiven, vertikalen Spannungen im System zum Zeitpunkt t = 0.

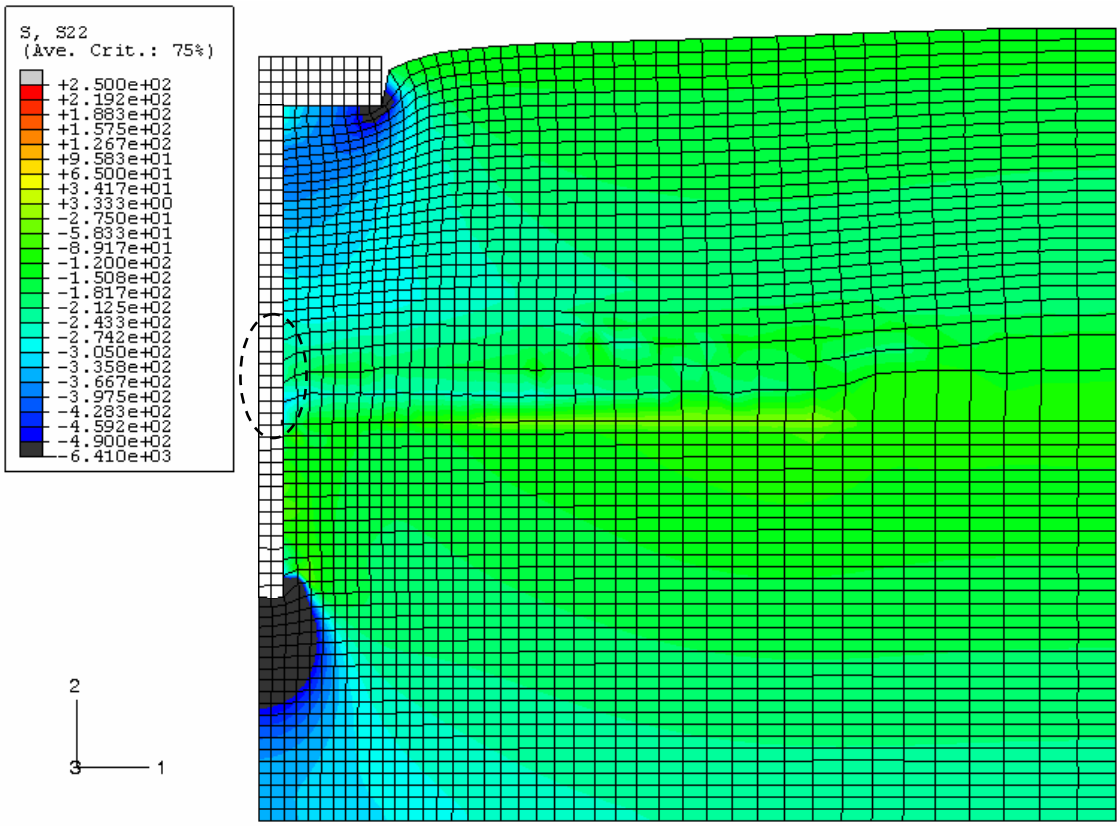


Abb. 6.6-12 Konturplot der effektiven, vertikalen Spannungen im System zum Zeitpunkt t = 375 d.

Im Vergleich der Abb. 6.6-11 und 6.6-12 ist zu erkennen, dass die vertikale, effektive Spannung unter der Fundamentplatte infolge Quellen zunimmt. Damit geht eine Entlastung des Pfahles und somit des Pfahlfußes einher. Des Weiteren wirkt infolge Quellbelastung, im gekennzeichneten Bereich der Abb. 6.6-12, erhöhte Mantelreibung auf den Pfahl. Dadurch wird der Pfahl im unteren Bereich weiter entlastet.

In Abb. 6.6-13 ist die totale Kontaktnormalspannung zwischen den Kontaktflächen Platte - Kaolinit in der Region der Knoten 188 - 194 über die Berechnungszeit aufgetragen. Der Knoten 188 liegt neben der Plattenaußenkante und der Knoten 194 neben dem Pfahl an der Plattensohle.

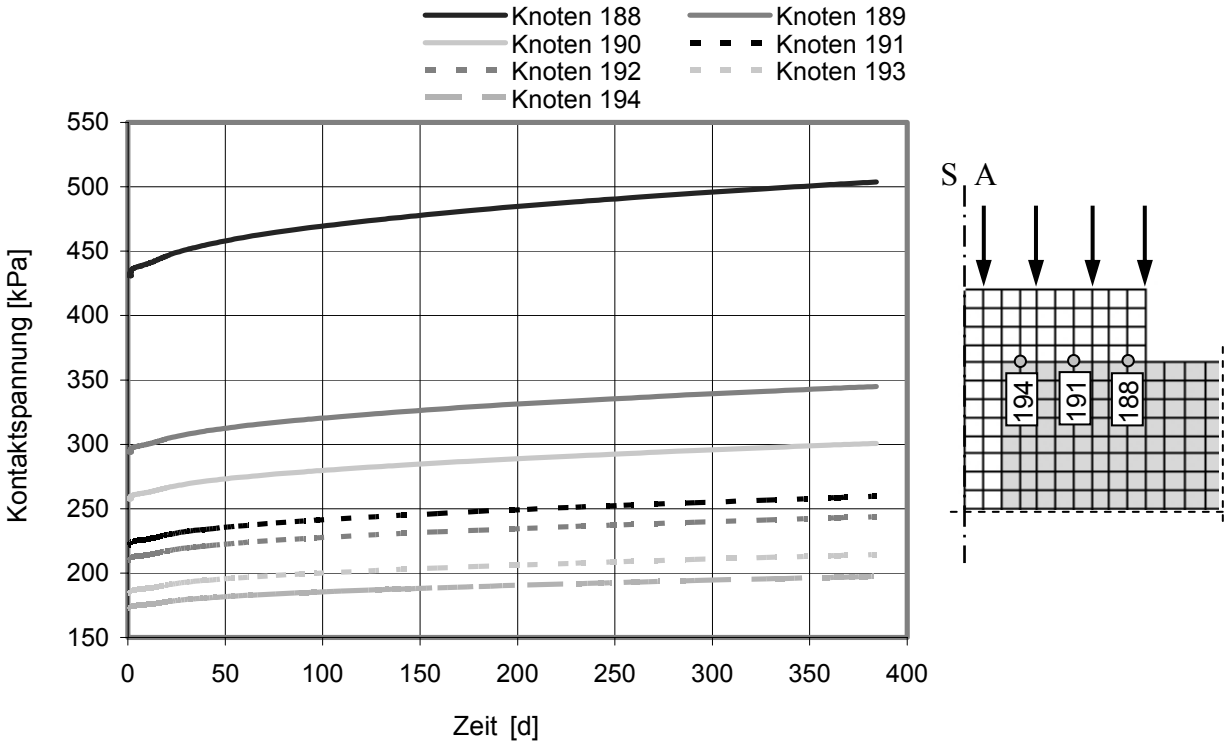


Abb. 6.6-13 Kontaktdruck in der Kontaktfläche Platte - Kaolinit im Bereich der Knoten 188 - 194 über die Berechnungszeit.

Es ist festzustellen, dass der Kontaktdruck zwischen den Kontaktflächen über die Dauer der Quelleinwirkung ansteigt. Infolge der äußeren mechanischen Belastung beträgt die mittlere Sohldrucknormalspannung $\tilde{p} = 253$ kPa. Aufgrund des Quellvorgangs erhöht sich diese mittlere Sohldrucknormalspannung über die Zeit auf $\tilde{p} = 295$ kPa, welches einer Erhöhung um 16,6 % entspricht.

In Abb. 6.6-14 ist die totale Kontaktspannung an der Kontaktfläche Pfahl - Kaolinit für den Bereich der Knoten 217 - 219 über die Zeit aufgetragen. Diese Knoten liegen in Abb. 6.6-12 in der gekennzeichneten Region.

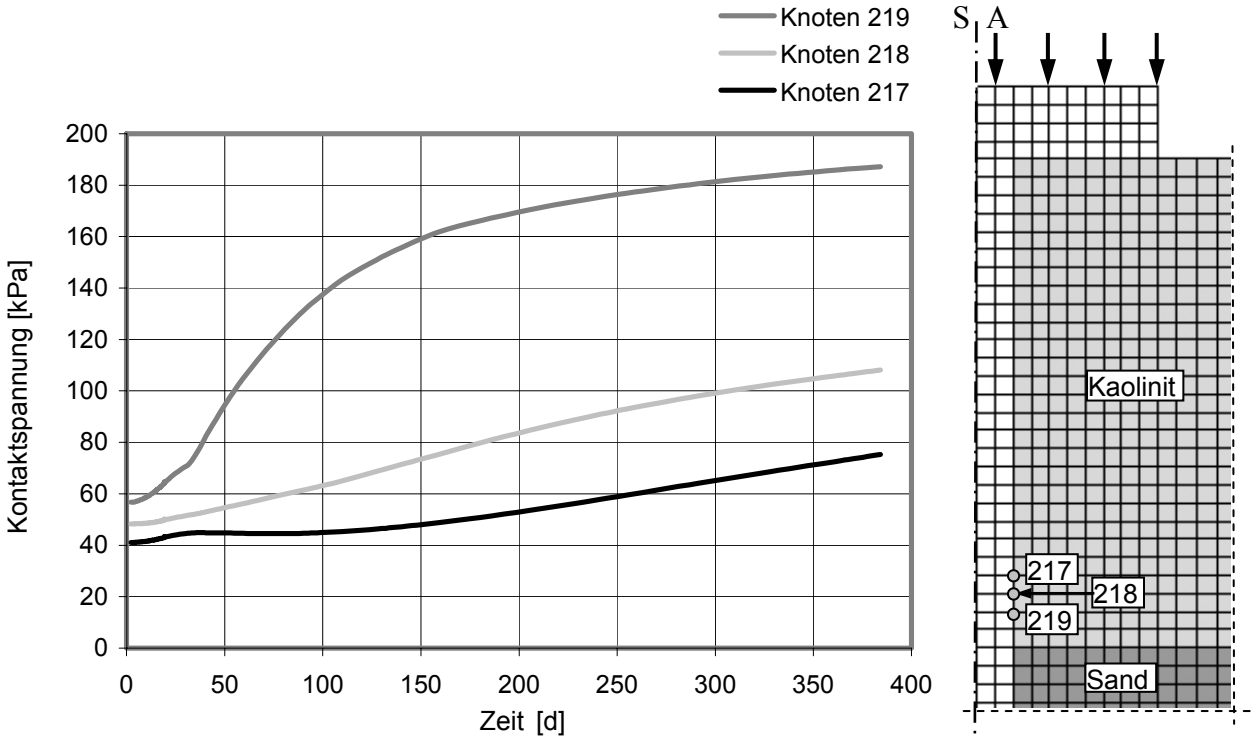


Abb. 6.6-14 Kontaktdruck in der Kontaktfläche Pfahl - Kaolinit im Bereich der Knoten 217 - 219 über die Berechnungszeit.

Nach Aufbringen der äußeren Belastung p auf der Fundamentoberkante (t = 0) hat sich zwischen den Kontaktflächen ein gewisser Anpressdruck eingestellt. In der Darstellung der Kontaktspannung zwischen dem Pfahl und dem Kaolinit, Abb. 6.6-14, ist zu erkennen, dass die Kontaktspannung signifikant ansteigt mit dem Quellen des Bodens. Dieser Einfluss wird geringer, je weiter der Kontakt von der Bewässerungsfront entfernt ist. Dies spiegelt den Infiltrationsprozess wieder und somit auch die Intensität der Quellbeanspruchung.

Infolge der höheren Kontaktspannung in der Kontaktfläche erhöht sich auch die kritische Scherspannung τ_{Peak}, nach Gleichung (6.6-1), ab der die Kontaktflächen beginnen, sich relativ zueinander zu verschieben. Die mobilisierte Scherspannung τ über die Berechnungszeit in der Kontaktfläche im Bereich der Knoten 217 - 219 ist in Abb. 6.6-15 dargestellt.

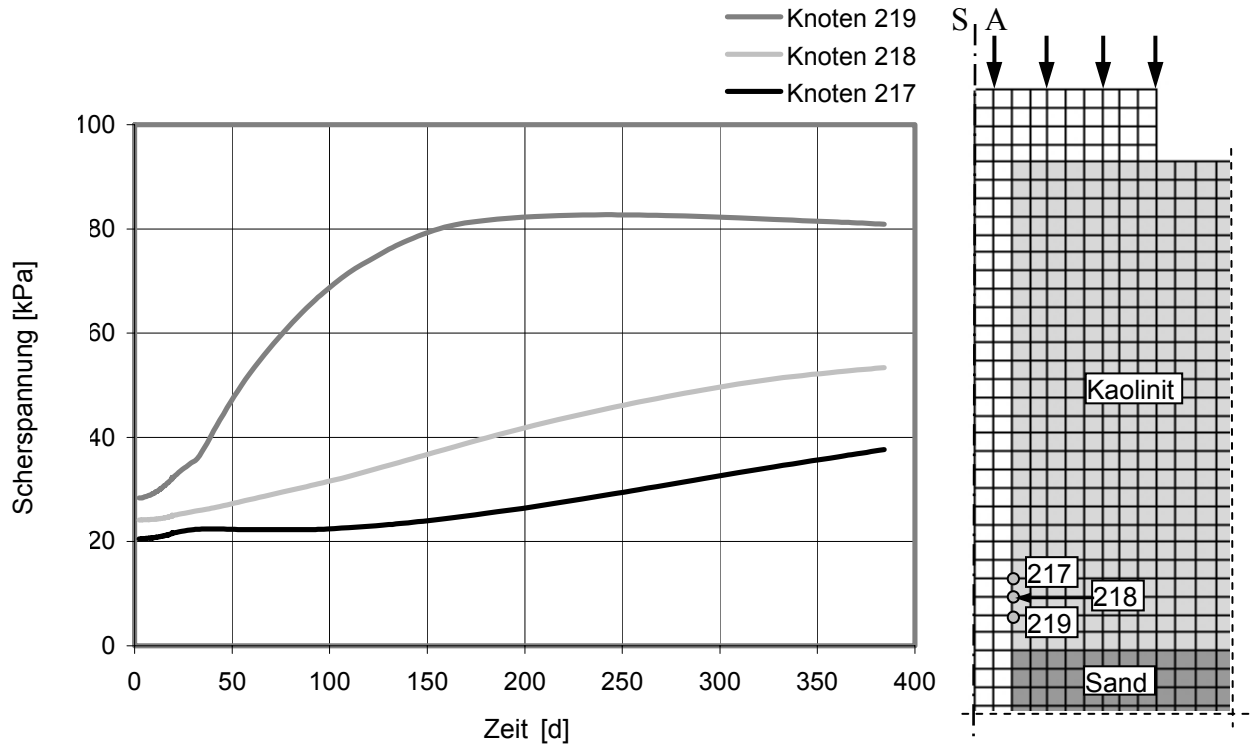


Abb. 6.6-15 Mobilisierte Scherspannung in der Kontaktfläche Pfahl - Kaolinit im Bereich der Knoten 217 - 219 über die Berechnungszeit.

Aus Abb. 6.6-15 wird ersichtlich, dass die mobilisierte Scherspannung τ in der Kontaktfläche Pfahl - Kaolinit mit dem Quellen zunimmt bis ein Plateau erreicht ist. Dies ist auf die mit dem Quellen zunehmende Kontaktspannung in der Kontaktfläche zurückzuführen. Vergleicht man für den Knoten 219 die Kurve der Kontaktnormalspannung in der Kontaktfläche, Abb. 6.6-14, mit der Kurve der mobilisierten Scherspannung τ, Abb. 6.6-15, so wird ersichtlich, dass an dieser Stelle (219) bereits die kritische Scherspannung τ_{Peak} zum Zeitpunkt t = 200 d überschritten ist, da der definierte Verschiebungswert $\Delta\gamma_{Peak}$ in der Scherfuge erreicht wird, vergleiche Abb. 6.6-3. Hierdurch nimmt die Scherspannung in der Fuge an der Stelle des Knotens 219, trotz steigender Kontaktspannung, nicht weiter zu. Des Weiteren ist aus Abb. 6.6-15 die Größe der zunehmenden Pfahlmantelreibung infolge des Quellenvorgangs abzulesen.

Durch die zunehmende Pfahlmantelreibung sowie durch die steigende Sohldrucknormalspannung unter der Platte wird der Pfahlfuß entlastet. Es treten jedoch noch keine Zugkräfte im Pfahl auf. Würde ein Material anstehen mit höherem Quellpotential, wie zum Beispiel ein Ton mit hauptsächlich Smektit - Tonmineralien, sind Zugspannungen im Pfahl möglich und auch ein Herausziehen des Pfahles aus der Sandschicht infolge Quellen denkbar.

In Abb. 6.6-16 ist die mittlere, orthogonale Kontaktspannung zwischen der Pfahlfußoberfläche und der Kontaktfläche zur Sandschicht über die Berechnungsdauer dargestellt.

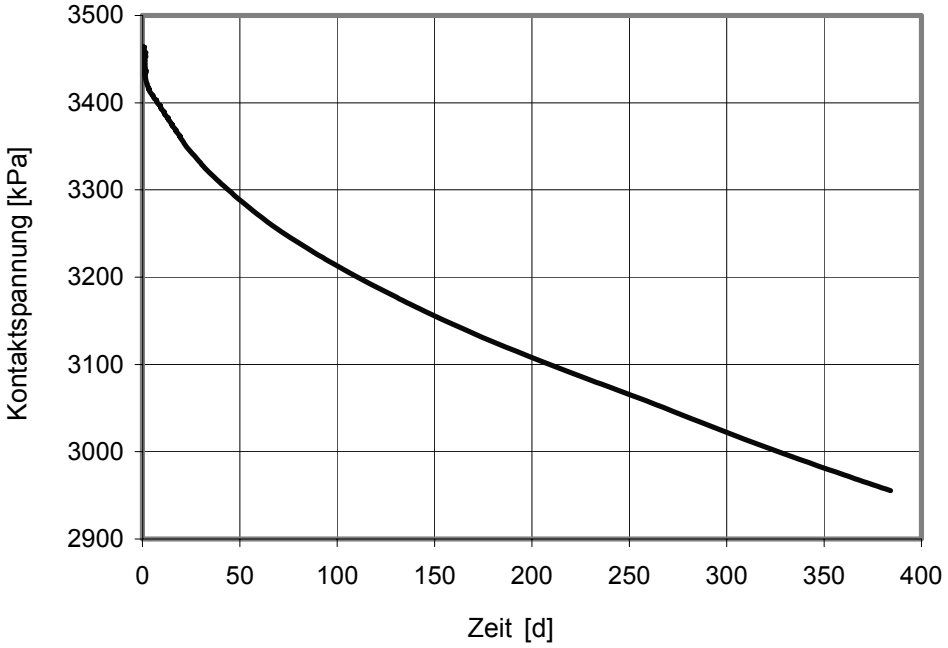


Abb. 6.6-16 Mittlerer Kontaktdruck in der Kontaktfläche Pfahlfuß - Sandschicht über die Berechnungszeit.

Infolge mechanischer Belastung stellt sich ein mittlerer Pfahlspitzendruck $q_b = 3445$ kPa ein, was einem Pfahlfußwiderstand $R_b = 1731$ kN entspricht. Es ist zu bemerken, dass der mittlere Pfahlspitzendruck mit zunehmendem Quellen bedeutend abnimmt. Am Ende der Berechnungszeit ergibt sich ein mittlerer Pfahlspitzendruck $q_b = 2955$ kPa, was einem Abbau um 14,2 % entspricht. Dieses Phänomen wird ausgelöst durch die quellbedingten Zunahmen in der Pfahlmantelreibung sowie der Sohldrucknormalspannung unter der Platte.

In den nachfolgenden Abb. 6.6-17 bis 6.6-20 sind die vertikalen Verschiebungen im System zu verschiedenen Zeitpunkten veranschaulicht. In Abb. 6.6-17 sind die Verschiebungen zum Zeitpunkt $t = 0$ nach dem Aufbringen der vertikalen Belastung p auf die Fundamentoberkante wiedergegeben. Es wird ersichtlich, dass sich das Bauwerk infolge Belastung gleichmäßig setzt, wobei im Boden unter der Platte sowie unter dem Pfahlfuß erhöhte Verschiebungswerte abzulesen sind.

In den nachfolgenden Abb. 6.6-18 bis 6.6-20 ist zur besseren Verdeutlichung der Quellhebungen der Konturmaßstab gegenüber der Abb. 6.6-17 verändert worden.

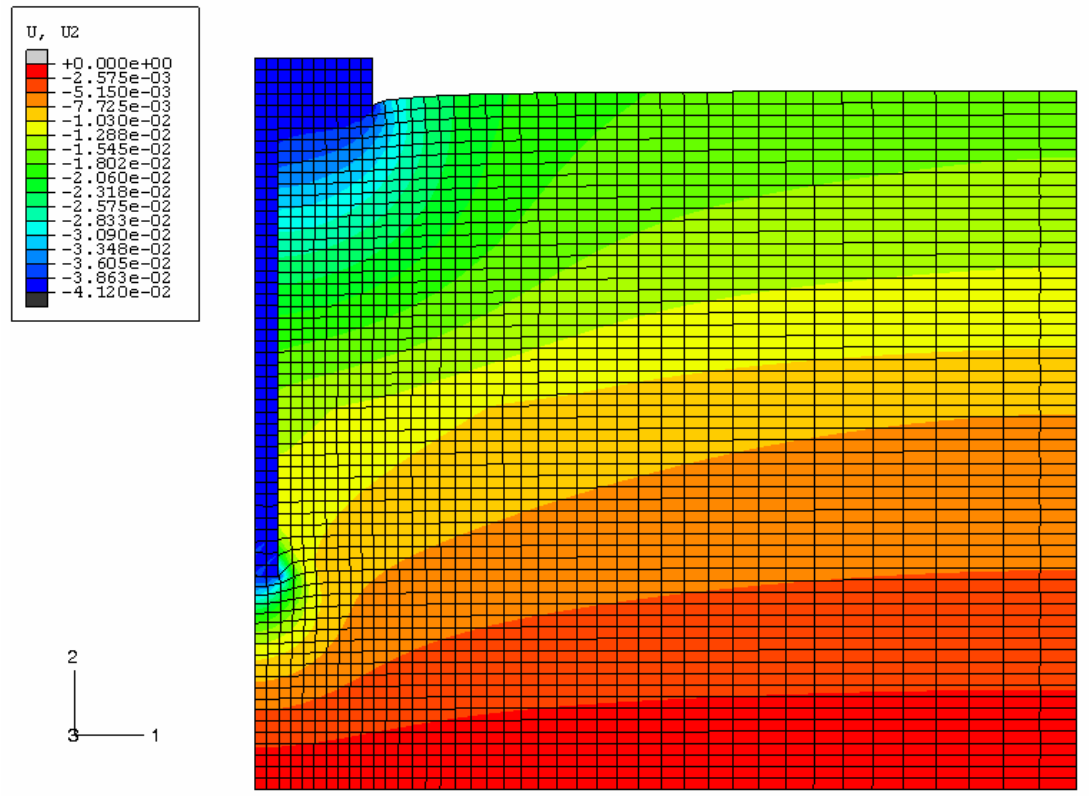


Abb. 6.6-17 Konturplot der Vertikalverschiebung zum Zeitpunkt t = 0 nach Aufbringen der Belastung p.

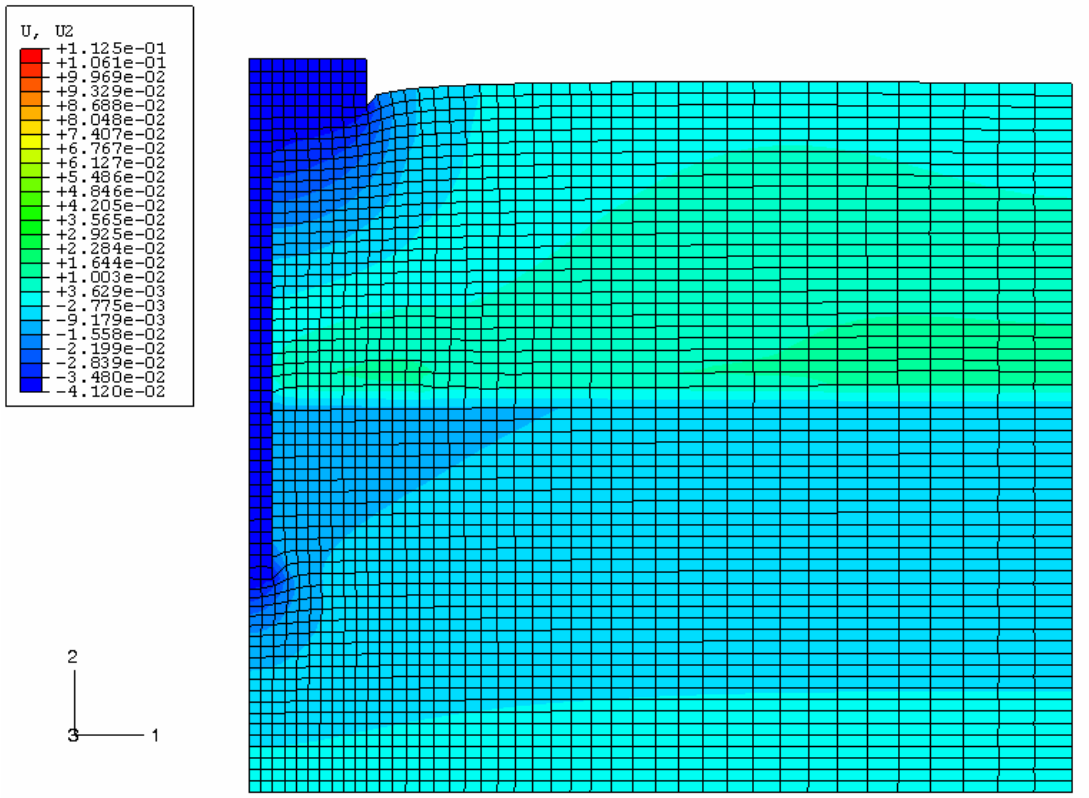


Abb. 6.6-18 Konturplot der Vertikalverschiebung zum Zeitpunkt t = 17 d nach Aufbringen der Belastung p.

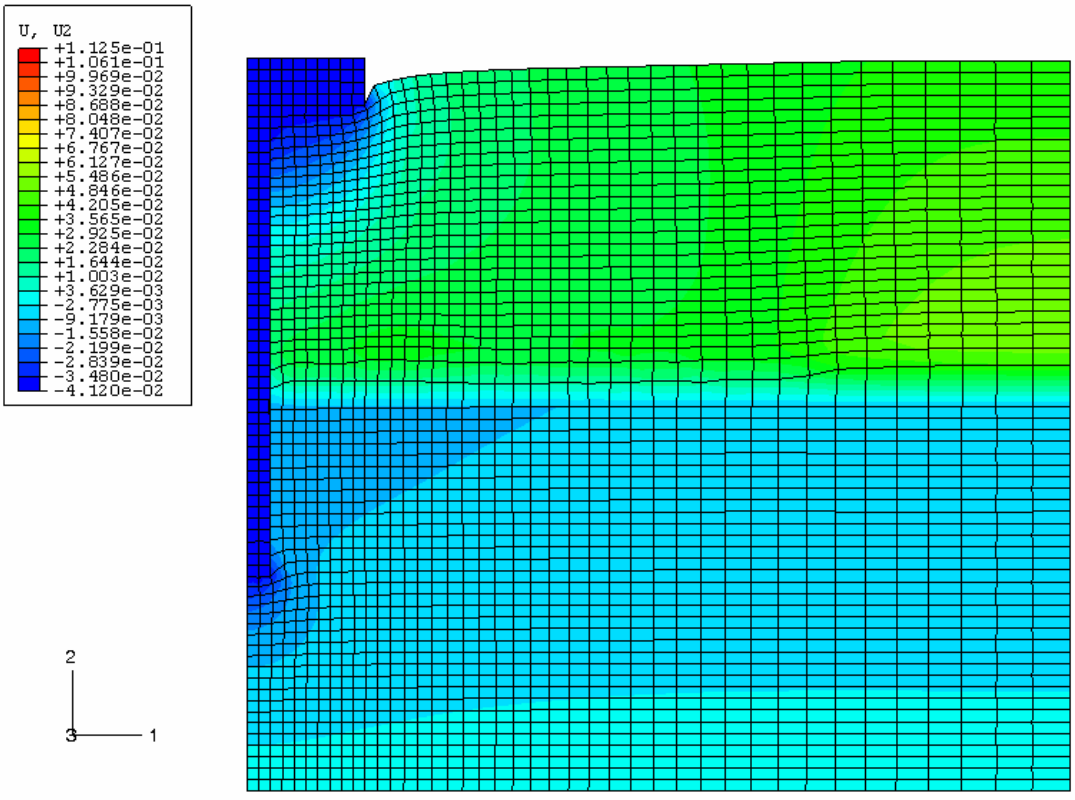


Abb. 6.6-19 Konturplot der Vertikalverschiebung zum Zeitpunkt t = 87 d nach Aufbringen der Belastung p.

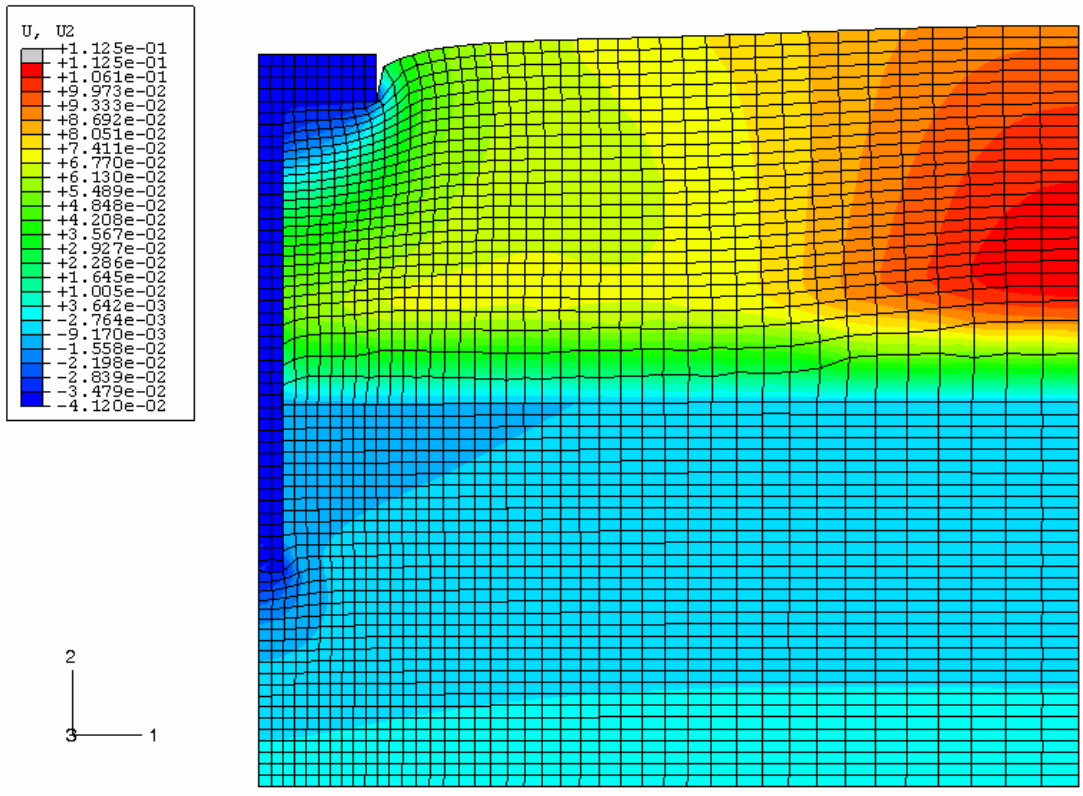


Abb. 6.6-20 Konturplot der Vertikalverschiebung zum Zeitpunkt t = 375 d nach Aufbringen der Belastung p.

In Abb. 6.6-18 sind die vertikalen Verschiebungswerte zum Zeitpunkt t = 17 Tage dargestellt. Das Grundwasser steht zu diesem Zeitpunkt bereits 6 Tage drucklos unter der Kaolinitschicht an. Bereits zu diesem Zeitpunkt sind im Vergleich zum Plot in Abb. 6.6-17, Zeitpunkt t = 0, Hebungen der Knoten von über 2 cm im Modell zu erkennen. Im Randbereich (rechte Seite) des Modells erscheinen die Hebungen leicht geringer als in der Mitte des Modells. Dies ist jedoch auf die horizontale Einspannung am rechten Rand des Modells zurückzuführen.

Nach t = 87 Tagen, dargestellt im Konturplot der Abb. 6.6-19, betragen die maximalen vertikalen Verschiebungen im System schon über 6 cm im Vergleich zum Zeitpunkt t = 0. Im rechten Randbereich, der Region mit den niedrigsten Spannungswerten in der Kaolinitschicht infolge mechanischer Belastung, sind die Verschiebungen der Knoten am größten.

Dieses Phänomen verstärkt sich erheblich gegen Ende der Berechnung zum Zeitpunkt t = 375 Tage, wiedergegeben in Abb. 6.6-20.

Es ist auch eine leichte Verdichtung im pfahlnahen, oberen Bereich der Sandschicht festzustellen. Auf Grund der hohen Dichte und Steifigkeit der Schicht ist diese jedoch nicht wesentlich.

In Abb. 6.6-21 ist die vertikale Verschiebung des Pfahlkopfes und der Geländeoberkante am rechten äußeren Rand des Modells über die Berechnungszeit dargestellt.

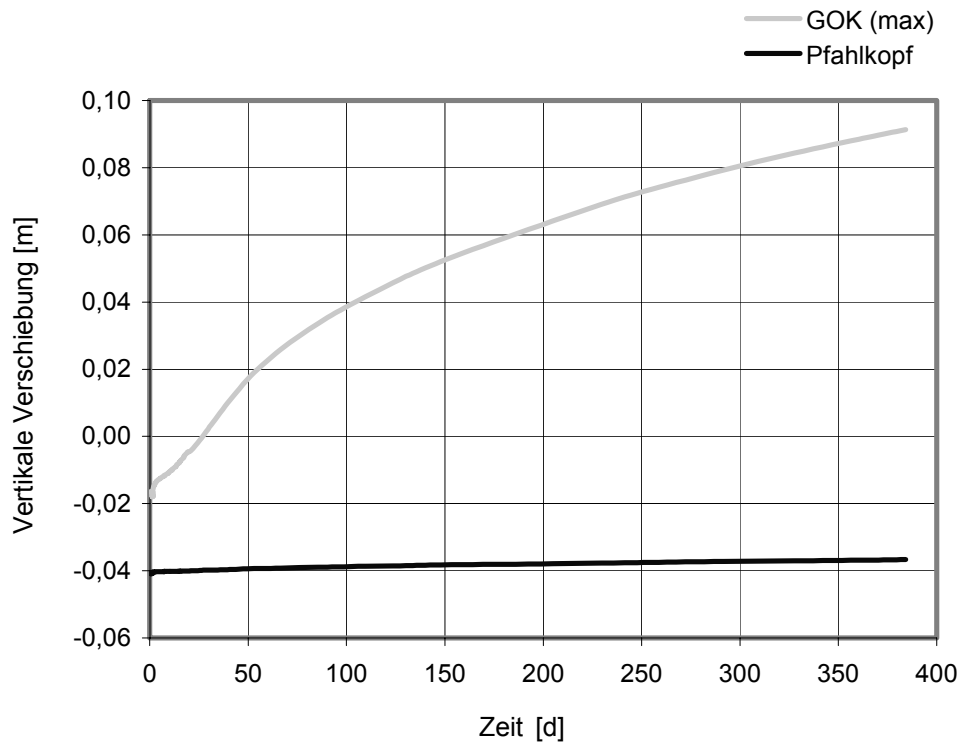


Abb. 6.6-21 Vertikalverschiebung des Pfahlkopfes und der GOK über die Berechnungszeit

Der Pfahlkopf hebt sich in der Berechnung um nur 0,4 cm. Die Hebung der Geländeoberkante (GOK) am äußeren Rand des Modells ist jedoch bemerkenswert mit insgesamt 10,8 cm zum Ende der Berechnung.

Das numerische Berechnungsbeispiel in diesem Kapitel zeigt die relevanten Effekte infolge Quellen auf ein praxisnahes, geotechnisches Randwertproblem. Des Weiteren ist die Anwendungsmöglichkeit des aufgestellten und implementierten Quellmodels für die Praxis dargelegt worden.

7 Zusammenfassung und Ausblick

Hauptziel der vorliegenden Arbeit war die Bestimmung des Volumenänderungsverhaltens sowie der Änderung des Quelldruckes von quellfähigen, teilgesättigten, bindigen Böden infolge instationärer Feuchteausbreitung im Erdreich. Die infolge dieser quellbedingten Zwangsbeanspruchungen resultierenden Verformungen auf geotechnische Bauwerke sollten betrachtet und bewertet werden.

Hierfür wurden eine Vielzahl sowohl experimenteller Untersuchungen als auch numerischer Berechnungen durchgeführt.

Im Rahmen der experimentellen Untersuchungen sind zwei Versuchsstände entwickelt worden, mit dem Ziel, die ein- und dreidimensionalen Quelldruck-Quelldehnungsbeziehungen des verwendeten Versuchsmaterials in Abhängigkeit vom initialen Sättigungsgrad, dem Endsättigungsgrad und der Porenzahl, zu bestimmen.

Mittels des ersten, neuentwickelten Versuchsapparates, eines modifizierten Oedometergerätes, ist es möglich, radiale und axiale Quelldrücke getrennt voneinander zu erfassen sowie axiale Dehnungen zuzulassen. Die axialen Spannungen werden mit Hilfe einer Kraftmessdose ermittelt, während die radialen über Dehnungsmessstreifen, die an der Außenfläche des Oedometerringes befestigt sind, bestimmt werden. Mit den Dehnungsmessstreifen wird die Radialverformung des Ringes gemessen, woraus die Ringkraft und somit der Radialdruck, der auf der Probe wirkt, ermittelt wird.

Ein weiteres Oedometergerät ist speziell für die vorliegende Problematik entwickelt und eingesetzt worden. Dieser Apparat ist bis auf den Oedometerring baugleich zu dem bereits erwähnten. Auf der Innenseite des Oedometerringes ist eine Membran angebracht, über die kontrolliert Radialdrücke erzeugt und gemessen werden können. Der Raum zwischen dem Ring und der Membran ist mit einem Fluid gefüllt. Durch Regulierung des im Fluidreservoir befindlichen Fluidvolumens kann die Radialdehnung gesteuert werden. Somit ist dieses modifizierte Oedometergerät mit einem triaxialen Apparat vergleichbar.

In den genannten Geräten wurden umfangreiche Untersuchungen an quellfähigem Boden durchgeführt. Dabei wurden der Anfangs- und der Endsättigungsgrad sowie die Porenzahl variiert.

Aus den Quellversuchen bei Volumenkonstanz ergab sich, dass sich der Quelldruck isotrop ausbildet. Die Quelldrücke nehmen mit zunehmender Anfangssättigung sowie zunehmender Porenzahl signifikant ab. Die gleiche Tendenz besteht für abnehmende finale Sättigungsgrade.

Die Quelldruck - Quelldehnungsversuche führten zu einem nichtlinearen Quelldruck - Quelldehnungszusammenhang. Es war festzustellen, dass für die isotrope sowie anisotrope Quelldehnungsbeziehung eine leicht gekrümmte Linie in halblogarithmischer Darstellung resultiert. Dies steht im Kontrast zu der in der Praxis häufig verwendeten Formulierung, welche die Relation im halblogarithmischen Maßstab durch eine Gerade beschreibt.

Es wurde verdeutlicht, dass eine signifikante Abnahme der Größe der Quelldehnung mit abnehmender finaler Sättigung einhergeht. Enorm verstärkt wird dieses Phänomen mit größer werdender Porenzahl sowie Anfangssättigung. Darüber hinaus nimmt die Steigung in der Quelldruckdehnungsbeziehung mit größer werdendem finalen Sättigungsgrad, kleiner werdendem Anfangssättigungsgrad sowie höherer Dichte beträchtlich zu. Im Allgemeinen gilt, dass mit zunehmendem Quellpotential die Krümmung in der Quelldruck - Dehnungsbeziehung ausgeprägter erscheint. Des Weiteren wurde festgestellt, dass die Hauptquelldehnungen in den jeweiligen Richtungen näherungsweise von den Hauptnormalspannungen der betreffenden Richtung abhängig sind. Bei den isotropen Quelldruck - Quelldehnungsversuchen ergab sich ein isotroper Abbau der Quelldrücke. Bei den anisotropen Quelldruck - Quelldehnungsversuchen baute sich der Druck in der Richtung in einem größeren Maße ab, in der auch eine größere Quelldehnung zugelassen wurde. Der Zusammenhang zwischen dem radialen und dem axialen Quelldruck bildete sich dabei jedoch linear aus, welches in den numerischen Simulationen mit einer konstanten Querdehnzahl beschrieben werden konnte.

Darüber hinaus ergab sich aus den Versuchen, dass das nichtlineare Quellverhalten des Versuchsmaterials als elastisch angesehen werden kann.

Anhand dieser Ergebnisse sind Approximationen für dieses Quellverhalten aufgestellt und in den FEM - Code ABAQUS mittels einer Subroutine implementiert worden.

Außerdem sind zur Bestimmung des Wassertransportes in einem Bodenkörper u. a. die hydraulischen Beziehungen (pF-Kurven) bestimmt worden. Zur Ermittlung der pF-Kurven kamen drei verschiedene Verfahren zum Einsatz. Für die Saugspannungsmesswerte in dem Bereich $pF = 0$ bis ca. 3 wurde die Tensiometermethode zur direkten Bestimmung der Matrixsaugspannung verwendet. Für den Saugspannungsmessbereich $pF = 3$ bis ca. 4 wurde die sogenannte „axis-translation“- Methode verwendet. Hierfür wurde ein kommerzieller sowie ein speziell entwickelter Drucktopf mit Keramikplatten, mit einem Lufteintrittspunkt bei 15 bar,

genutzt. Für die Versuche des höheren Messbereiches, pF > 4, wurde ein Vakuum - Austrocknungs - Apparat, mit Hilfe der Korrelation von der relativen Luftfeuchte mit den totalen Saugspannungen, verwendet. Zur Approximation der pF - Kurven in Abhängigkeit von der Porenzahl und dem Sättigungsgrad wurde ein modifiziertes van Genuchten Modell angewendet. Die Transportkenngrößen sind von Wendling (2004) übernommen und zusammen mit den hydraulischen Beziehungen in das Finite - Elemente - Programm implementiert worden.

In der numerischen Simulation wurden die nichtlinearen, elastischen Quelldeformationen mit den mechanischen Deformationen überlagert. Für die mechanische Beanspruchung ist eine linear elastische - ideal plastische Spannungsdehnungsbeziehung mit einer Fließbedingung nach Drucker - Prager angenommen worden. Es ist bekannt, dass dieses Materialgesetz nur bedingt zur Beschreibung des Materialverhaltens teilgesättigter, bindiger Böden geeignet ist. Es war jedoch relativ einfach zu handhaben und adäquat genug um zu demonstrieren, dass die implementierten Quellbeziehungen mit diversen mechanischen Spannungsdehnungs-beziehungen verwendet werden können.

Zur Überprüfung der Güte der in ABAQUS eingegebenen und implementierten Beziehungen wurden die experimentellen Ergebnisse aus den Versuchen nachgerechnet und mit den Simulationen verglichen. Es ist aufgezeigt worden, dass die Variation des Quellmoduls für alle variierten Parameterwerte zu einer guten Übereinstimmung in den Ergebnissen führt. Somit ist es nun möglich, mittels der in den FEM - Code implementierten Quellzusammenhänge das Quelldruckdehnungsverhalten teilgesättigter bindiger Böden infolge instationärer Feuchteausbreitung im Erdreich realitätsnah wiederzugeben.

Anhand eines praxisorientierten Berechnungsbeispiels aus der Geotechnik, einer axialsymmetrischen Pfahlplattengründung mit einer Belastung von 600 kPa auf der Oberkante der Fundamentplatte, ist die Anwendungsmöglichkeit des aufgestellten und implementierten Quellmodels für die Praxis sowie der Effekt des Quellens auf ein realitätsnahes Randwertproblem aufgezeigt worden.

In zukünftigen Forschungsarbeiten zu der vorgestellten Problematik sollten Langzeiteffekte, wie zum Beispiel eine mögliche Umlagerung bzw. ein möglicher Abbau von Quellspannungen im Bodenkörper, untersucht werden. Ebenso sollten auch nicht isotrope Quellverformungen als Zwangsbeanspruchung betrachtet werden.

Darüber hinaus wäre es auch sinnvoll das aufgestellte Quellmodell mit einem zeit- (Kriecheffekte) und temperatur- gekoppelten sowie für teilgesättigte, bindige Böden geeigneten Stoffgesetz zu koppeln und unter Labor- sowie Feldbedingungen zu validieren.

8 Literaturverzeichnis

Alonso E. E., Gens, A. & Josa, A. (1990): A constitutive model for partially saturated soils, *Geotechnique* 40, 405-430.

Baumgartl, Th. (2003): Prediction and modeling of tensile stresses and shrinkage, Unsaturated soils: Experimental studies, *Proc. Int. Conf. From Experimental towards Numerical Modeling of Unsaturated Soils*, Weimar, 383-394.

Bishop, A.W. (1959): The principle of effective stress, *Teknisk Ukeblad I Samarbeide Med Teknikk*, Oslo, Norway, 106 (39), 859-863.

Bohne, K., Stüdemann, B. & Timm, D. (1982): Vergleichende Anwendung verschiedener Methoden zur Berechnung der Wasserretentionskurve und der hydraulischen Leitfähigkeit des Bodens, *Wiss. Z. Universität Rostock, Naturwissenschaftliche Reihe*, Heft 7, 29-33.

Bond, A.J. & Jardine, R.J. (1995): Shaft capacity of displacement piles in a high OCR clay, *Geótechnique* 45, 3-23.

Brooks, R.H. & Corey, A.T. (1964): Hydraulic properties of porous media, *Colorado State University, Hydrology Paper No. 3.*

Chen, W.F. & Mizuno, E. (1990): *Nonlinear Analysis in Soil Mechanics*, Elsevier, Amsterdam, Netherlands.

Dobrowolsky, M. & Vrettos, C. (2005): Swell and shrink tests in modified oedometer apparatuses, *Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics - EXPERUS 2005*, Tarantino, A., Romero, E., Cui, Y.J. (Eds), Balkema, 163-168.

Fredlund, D.G. & Rahardja, H. (1993): *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons Inc., NY.

Fredlund, D.G. & Xing, A. (1994): Equations for the soil – water characteristic curve, *Canadian Geotechnical Journal*, 31, 521-532.

Gadre, A.D. & Chandrasekaran, V.S. (1994): Swelling of black cotton soil using centrifuge modelling, *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE*, 120, 914-919.

Gattermann, J. (1998): Theorie und Modellversuch für ein Abdichtungsbauwerk aus hochverdichteten Bentonitformsteinen, *Geotechnik in Forschung und Praxis, WBI-PRINT 2*, Essen: Verlag Glückauf GmbH.

Gens, A. & Alonso E. E. (1992): A framework for the behaviour of unsaturated expansive clays, *Canadian Geotechnical Journal* 29, 1013-1032.

Grob, H. (1972): Schwelldruck im Blechtunnel. *Proc. Internationales Symposium für Untertagebau*, Luzern, 99-119.

Gudehus, G.; Külzer, M. & Meier, T. (2003): Zustandsgrenzen und Anisotropie aufbereiteter Seetone ohne und mit Salz, *Geotechnik* 26, 10-17.

Hibbit, Karlson & Sorensen, Inc. (2002): *ABAQUS / Standard User's Manual*, Version 6-4, Pawtucket, RI, USA.

Hiltmann, W. & Sribrny, B. (1998*): Tonminerale und Bodenphysik*, Band 5, Springer Verlag.

IBECO Bentonit-Technologie GmbH, Technisches Datenblatt Tonmehl IBECO-Uniton, Mannheim.

Katti, R.K. & Katti, A.R. (1994): *Behaviour of Saturated Expansive Soil and Control Methods*, A.A. Balkama/Rotterdam.

Kiehl, J.R. (1990): A three-dimensional constitutive law for swelling rock and its application for underground constructions, *9. Nationales Felsmechanik Symposium der DGGT*, Sonderheft der Zeitschrift Geotechnik, Aachen, 185-207.

Kierzkowski, P. (2007): Oedometer creep tests of a partially saturated kaolinite clay, *Experimental Unsaturated Soil Mechanics*, Schanz, T. (Ed.) , Springer, 301-307.

Kolymbas, D. (1998): *Geotechnik - Bodenmechanik und Grundbau*, Springer Verlag, Berlin.

Komine, H. & Ogata, N. (1999): Experimental study on swelling characteristics of sand-bentonite mixture for nuclear waste disposal, *Soils and Foundations* 39(2), 83-97.

Li, T. (2002): Zweiflächen-Stoffmodell für wassergesättigte bindige Böden unter zyklischer Beanspruchung, *Veröffentlichungen des Fachgebietes Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Kaiserslautern*, Heft 7.

Likos, W.J. (2000): *Total suction – moisture content characteristics for expansive soils*, Ph.D. Dissertation, Colorado School of Mines, Golden, Colorado.

Lu, N. & Likos, W.J. (2004): *Unsaturated Soil Mechanics*, Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA.

Meißner, H., (1983): Tragverhalten axial oder horizontal belasteter Bohrpfähle in körnigen Böden, *Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana in Karlsruhe*, Heft 39.

Menétrey, Ph. & Willam, K. J. (1995): Triaxial failure criterion for concrete and its generalization, *ACI Structural Journal*, 92, 311-318.

Padilla, J.M.; Perera, Y.Y.; Houston, W.N. & Fredlund, D.G, 2005: A new soil water characteristic curve device, *Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics - EXPERUS 2005*, Tarantino, A., Romero, E., Cui, Y.J. (Eds), Balkema, 15-22.

Pimentel E. (1996): Quellverhalten von diagenetisch verfestigtem Tongestein, *Veröffentlichung des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik, Universität Fridericiana Karlsruhe,* Heft 139.

Pregl, O., Fuchs, M., Müller, H., Pretschl, G., Riedmüller, G. & Schwaigerhofer, B. (1980): Dreiaxiale Quellversuche an Tongesteinen, *Geotechnik*, 1, 1-7.

Richards, B.G. (1977) Pressure on a retaining wall by an expansive clay, *9th International Conference in Soil Mechanics and Foundation Engineering,* Tokyo, 705-710.

Richards, B.G. (1979): A method of analysis of the effects of volume change in unsaturated expansive clay on engineering structures, *Australian Geomechanics Journal*, G9, 27-41.

Richards, B.G., Peter, P. & Martin, R. (1984): The determination of volume change properties in expansive soils, *5th International Conference on Expansive Soils*, Adelaide, 179-186.

Schofield, R.K. (1935): The pF of the water in soil, *Transactions of the 3rd International Congress of Soil Science,* 2, 37-48.

Soilmoisture Equipment Corp. (2002): Operation Instructions; 15 bar Pressure Plate Extractor, Soilmoisure Equipment Corp., Santa Barbara, California 93130 USA.

Solomon, T.A. (2002): Foundation Pits in Saturated Highly Expansive Soils, *Veröffentlichungen des Fachgebietes Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Kaiserslautern,* Heft 8.

Steiger, R.P. (1993): Advanced triaxial swelling tests on preserved shale cores. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr.* 30(7), 681-685.

Terzaghi, K. (1943): *Theoretical Soil Mechanics*, John Wiley and Sons, New York.

Tombolato, S.; Tarantino, A. & Mongiovi, L. (2005): Investigation water retention characteristics upon wetting paths using water – undrained compression tests, *Advanced Experimental Unsaturated Soil Mechanics - EXPERUS 2005*, Tarantino, A., Romero, E., Cui, Y.J. (Eds), Balkema, 397-400.

UMS (2004): Datenkatalog 1.0, T5 Tensiometer, UMS GmbH München.

van Genuchten, M.T. (1980): A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils, *Soil Science Society of America Journal*, 44, 892-898.

von Wolffersdorff, P.-A. Rosner, S. & Wegener, P. (2004): Planung von bautechnischen Lösungen in den quellgefährdeten Einschnitten der Hochgeschwindigkeitsstrecke Nürnberg-Ingolstadt, *Vorträge der Baugrundtagung 2004 in Leipzig*, 221-228.

Wehnert, M. & Vermehr, P.A. (2004): Numerical Analyses of Load Tests on Bored Piles, 9th *NUMOG 2004*, Ottawa, Canada

Wendling, S. (2004): Untersuchungen zur Entstehung von Austrockungsrissen in mineralischen Deponieabdichtungen, *Veröffentlichungen des Fachgebietes Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Kaiserslautern,* Heft 10.

Wittke, M. & Wittke W. (2004): Bemessung von Tunneln in quellfähigen Gebirge unter Berücksichtigung der Selbstabdichtung, *Geotechnik* 27, 136-141.

Wittke, M. (2003): Begrenzung der Quelldrücke durch Selbstabdichtung beim Tunnelbau in anhydritführenden Gebirge, *Geotechnik in Forschung und Praxis, WBI-PRINT 13,* Essen, Verlag Glückauf GmbH.

Veröffentlichungen des Fachgebietes Bodenmechanik und Grundbau der Technischen Universität Kaiserslautern

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. H. Meißner

Nr. 1 Johannes Vogt (1992)
Tragverhalten von Schlitzwandelementen

Nr. 2 Frank Rogmann (1992)
Untersuchungen zum Stoffverhalten von Kohle im Hinblick auf Hohlraumstandsicherheiten

Nr. 3 Wolfgang Weckbecker (1993)
Beitrag zur Berechnung oberflächennaher Tunnel

Nr. 4 Egbert Adam (2001)
Untersuchungen zum temperaturabhängigen Materialverhalten kristalliner und sedimentärer Gesteine

Nr. 5 Andreas Becker (2002)
Stoffmodell und numerisches Modell für zyklisch beanspruchte, teilgesättigte Sande

Nr. 6 Katja Abel (2002)
Zugspannungen in Kunststoffdichtungsbahnen geneigter Deponiebasisabdichtungen

Nr. 7 Tao Li (2002)
Zweiflächen-Stoffmodell für wasssergesättigte bindige Böden unter zyklischer Beanspruchung

Nr. 8 Solomon Taye Abebe (2002)
Foundation pits in saturated highly expansive soils

Nr. 9 Festschrift anlässlich des 65. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. habil. Helmut Meißner und dem 20-jährigen Bestehen des Fachgebietes Bodenmechanik und Grundbau an der Technischen Universität Kaiserslautern

Herausgegeben von Prof. Dr.-Ing. habil. C. Vrettos

Nr. 10 Sanaa Wendling (2004)
Untersuchungen zur Entstehung von Austrocknungsrissen in mineralischen Deponieabdichtungen

Nr. 11 Yilei Shen (2006)
Unterfangung belasteter Fundamente durch Bohrpfähle

Nr. 12 Stefan Jung (2007)
Nichtlinearer horizontaler Bettungsmodulansatz für Trägerbohlwände in mitteldicht gelagertem Sand

Nr. 13 Markus Dobrowolsky (2008)
Quellverhalten teilgesättigter bindiger Böden mit mittlerem Quellpotential