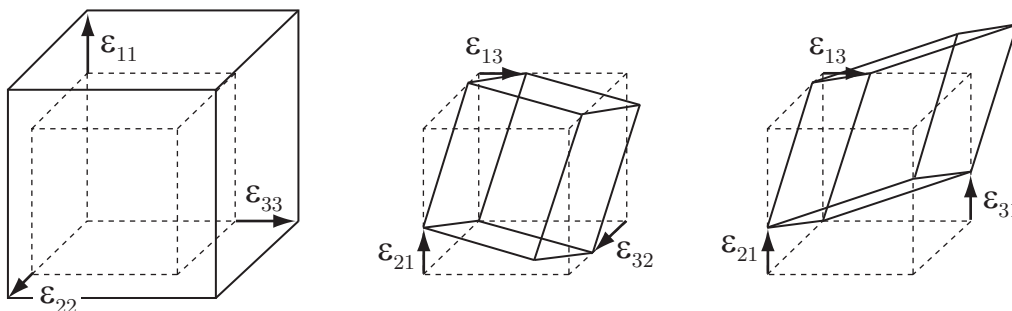


# VERÖFFENTLICHUNGEN

des Grundbauinstitutes  
der Technischen Universität Berlin  
Herausgegeben von S.A. Savidis

## HEFT 66

Zum Verhalten von Sand unter zyklischer  
Beanspruchung mit Polarisationswechsel im  
Einfachscherversuch



Viet Hung Le

Berlin 2015

**Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek**

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Zugl.: Berlin, Techn. Univ., Diss., 2015

Adresse des Instituts:

Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik - Degebo  
Technische Universität Berlin  
Skr. TIB1-B7  
Gustav-Meyer-Allee 25  
13355 Berlin

Telefon: (030) 314-72341  
Telefax: (030) 314-72343  
E-Mail: [info@grundbau.tu-berlin.de](mailto:info@grundbau.tu-berlin.de)  
Internet: <http://www.grundbau.tu-berlin.de>

Das Titelbild ist der Abbildung 2.2 entnommen.

Copyright Shaker Verlag 2015

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4081-4  
ISSN 0342-3905

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen  
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9  
Internet: [www.shaker.de](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Dissertation

**Zum Verhalten von Sand unter zyklischer  
Beanspruchung mit Polarisationswechsel im  
Einfachserversuch**

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Viet Hung Le  
aus Ha Tay, Vietnam

An der Fakultät VI – Planen Bauen Umwelt  
Technische Universität Berlin  
zur Erlangen des akademischen Grades

Doktor der Ingenieurwissenschaften  
– Dr.-Ing. –

genehmigte Dissertation

Promotionsausschuss:

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Stavros Savidis  
Prof. Dr.-Ing. Frank Rackwitz  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Theodoros Triantafyllidis  
Vorsitzender: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Yuri Petryna

Tag der wissenschaftlichen Aussprache: 23.03.2015

Berlin 2015  
D83





# Vorwort des Herausgebers

Die sichere und wirtschaftliche Dimensionierung zyklisch beanspruchter Gründungen stellt für die planenden Ingenieure eine enorme Herausforderung dar. Bisher muss in der Praxis meist auf empirische Bemessungsmodelle zurückgegriffen werden. Diese Modelle haben jeweils einen sehr eng begrenzten Einsatzbereich, weil sie auf Korrelationen aus speziellen Labor- oder Modellversuchen beruhen. Komplexe geotechnische Strukturen können damit kaum abgebildet werden.

Eine vielversprechende Alternative stellt die Finite-Elemente-Methode (FEM) dar. Mit ihr können auch komplexe Randbedingungen und Bauwerksgeometrien modelliert werden. Das Spannungs-Dehnungs-Verhalten des Bodens muss im FE-Modell durch leistungsfähige Stoffgesetze abgebildet werden. Im Hinblick auf Stoffgesetze für hochzyklische Vorgänge mit mehreren zehntausend Lastzyklen besteht aktuell noch immenser Forschungsbedarf. Dazu leistet die Dissertation von Herrn Dr.-Ing. V. H. Le einen wichtigen Beitrag.

In der Arbeit wird der Frage nachgegangen, inwiefern sich die Änderung der Belastungsrichtung auf das zyklische Verhalten von Sand auswirkt. Diesbezüglich wurden umfangreiche experimentelle und numerische Untersuchungen durchgeführt. Herr Dr.-Ing. Le erweiterte ein Einzelschergerät so, dass die Richtung der zyklischen Belastung im Laufe des Versuches geändert werden konnte, was einem sogenannten Polarisationswechsel entspricht. So konnte der Einfluss einer Vielzahl von Faktoren wie der Lagerungsdichte, der Amplitude oder der mittleren Spannung auf die Entwicklung der akkumulierten Dehnung unter einem Polarisationswechsel untersucht werden. Dabei konnten neue Erkenntnisse über das zyklische Verhalten von Sand gewonnen werden.

Der zweite Schwerpunkt der Arbeit bestand darin, das hochzyklische Akkumulationsmodell (HCA-Modell) weiterzuentwickeln. Anhand der Ergebnisse der Laborversuche wurde der Ansatz des HCA-Modells zur Berücksichtigung von Polarisationsänderungen erweitert. Anschließend wurde das erweiterte Modell im FE-Programmsystem ANSYS implementiert und durch Nachrechnung von Versuchsspuren validiert. Hierbei konnte eine sehr gute Übereinstimmung der Simulationen mit den Versuchsergebnissen erzielt werden.

Insgesamt ist der Ansatz, den Herr Le aufzeigt, ausgesprochen vielversprechend. Er sollte in weiteren Forschungsarbeiten experimentell und theoretisch intensiv weiterverfolgt werden.

Stavros A. Savidis  
Berlin, September 2015



# Vorwort des Autors

Die vorliegende Arbeit entstand zwischen 2010 und 2014 während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik - Degebo an der Technischen Universität Berlin.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. S. Savidis und Herrn Professor Dr.-Ing. F. Rackwitz für den Vorschlag des interessanten Themas meines Promotionsvorhabens sowie für die Betreuung und Unterstützung während der Bearbeitung. Für das Interesse an meiner Arbeit und die Erstellung des Zweitgutachtens danke ich Herrn Professor Dr.-Ing. T. Triantafyllidis. Für die Übernahme des Vorsitzes der Promotionskommission möchte ich Herrn Professor Dr.-Ing. Y. Petryna danken.

Ich bedanke mich ganz herzlich bei meinen Kollegen für die freundschaftliche und produktive Zusammenarbeit sowie für die große Hilfsbereitschaft und die persönliche Unterstützung. Herrn Dr.-Ing. R. Glasenapp möchte ich für die fachliche, konstruktive Diskussion und die Motivation während der gesamten Dauer meiner Promotion danken. Herrn M.Sc. C. Carow und Herrn Dr.-Ing. D. Aubram danke ich für die Einarbeitung in die Programmierung und für die fachliche Diskussion. Ich bedanke mich bei Herrn B. Grzedzinski, Herrn H. Podeswa und den anderen Labormitarbeitern für die Unterstützung bei den Laborversuchen und für eine gute, freundschaftliche Arbeitsatmosphäre.

Für die zur Verfügung gestellten Berechnungsalgorithmen möchte ich Herrn Dr.-Ing. Habil. A. Niemunis besonders bedanken. Für die Begleitung während meines Studiums und die Zeit danach sowie für die persönliche Unterstützung danke ich ganz herzlich Herrn Dr.-Ing. D. Struck. Herrn Dipl.-Ing. C. Greis danke ich für das Korrekturlesen meiner Arbeit.

Nicht zuletzt bedanke ich mich bei meinen Eltern und meinen Schwiegereltern für das Verständnis und die Geduld sowie für das Vertrauen in mich. Über allem danke ich meine Frau, die mich jederzeit in allen Belangen unterstützt und mich durch alle Höhen- und Tiefpunkte begleitet hat, ohne ihre große Unterstützung hätte ich diese Arbeit nicht fertigstellen können.

Viet Hung Le  
Berlin, September 2015



# Kurzfassung

Das Verhalten von Boden unter zyklischer Beanspruchung ist sehr komplex. Neben der bleibenden Verformung aus dem statischen Lastanteil kommt bei der zyklischen Belastung noch eine akkumulierte Verformung dazu, die aus den nicht vollständig geschlossenen Spannungs-Dehnungsschleifen resultiert. Die Akkumulationsdehnung ist von der Dehnungsamplitude, vom mittleren Spannungszustand und der Porenzahl abhängig. Darüber hinaus kommt jedoch der Richtung der Belastung erhebliche Bedeutung zu. Eine Änderung der Belastungsrichtung beansprucht den Boden zusätzlich. Das ist generell ein dreidimensionales Problem, welches jedoch bisher bei Laboruntersuchungen sowie Bemessungs- und Simulationsansätzen meistens auf eine zweidimensionale Fragestellung reduziert worden ist.

Zur Untersuchung des zyklischen Bodenverhaltens wurde ein umfangreiches Laborprogramm mit Triaxial- und Einfachscherversuchen durchgeführt. Dabei wurde das Bodenverhalten unter Einwirkung der multidirektionalen Belastung in einem umgebauten Einfachschergerät mit veränderbarer Scherrichtung untersucht. Der Einfluss der Polarisationsänderung auf das Verformungsverhalten von Sand stand im Mittelpunkt der vorliegenden Arbeit.

Für die FE-Berechnung von Randwertproblemen unter hochzyklischer Belastung ist das explizite Akkumulationsmodell (HCA-Modell) sehr gut geeignet. Dabei wird die Akkumulationsdehnung infolge einer zyklischen Belastung explizit berechnet. Dadurch wird der Rechenaufwand und der aufsummierte Fehler des Rechenalgorithmus weitgehend reduziert. Die Ansätze für die Berechnung der akkumulierten Dehnung beim HCA-Modell werden anhand der Ergebnisse der Triaxialversuche kalibriert. Für die Überprüfung dieser Ansätze werden die unidirektionalen Einfachscherversuche nachgerechnet.

Im HCA-Modell wird die Änderung der Polarisierung über eine Teilfunktion berücksichtigt. Im Falle eines Polarisationswechsels erhöht diese die Akkumulationsrate um einen aus der Teilfunktion sich ergebenden Faktor, welche anhand von Laborversuchen modifiziert wurde. Die Validierung des HCA-Modells erfolgt durch die Nachrechnung der multidirektionalen Einfachscherversuche. Dafür wird das Modell im FEM-Programm ANSYS<sup>®</sup> implementiert.

**Schlagerworte:** *zyklisches Verhalten; Akkumulation; multidirektionale Belastung; multiaxiale Belastung; explizites Akkumulationsmodell; HCA-Modell; multidirektionaler Einfachscherversuch; Labortechnik; Bodenmechanik; Polarisierung; Polarisationswechsel*



# Abstract

The behaviour of soil under cyclic loading is very complex. In addition to the plastic deformation due to the static load component cyclic loading will cause further accumulating deformations. This is the result of not exactly overlapping stress-strain-hysteresis. The accumulated strain is depending upon the strain amplitude, average cyclic stress and void ratio. Further to this, the direction of cyclic loading is very important as this has a significant effect on the plastic deformation of the soil. Although this is a three dimensional problem laboratory testing as well as design and simulation approaches have often been simplified to be a two dimensional problem.

In order to research the soil behaviour under cyclic loading further, an extensive laboratory program with a large number of triaxial and simple shear tests has been undertaken. A specially modified simple shear testing apparatus was used to investigate the cyclic behaviour of the soil under multi directional loading. Within this testing program, the direction of polarization and the deformation behaviour of sandy soils have therefore been thoroughly researched in this present research work.

For the numerical investigation of boundary value problems und high-cyclic loading the Hight Cyclic Accumulation model (HCA-Model) has proven to be adequate. The accumulated strain due to the cyclic loading was explicitly computed. This ensures that the computing time and the cumulative error is kept as small as possible. The computation of the accumulated strain with the HCA-Model was calibrated using the results of triaxial tests. Unidirectional simple shear tests have been used to validate the obtained results.

In the HCA-Model the change in polarization is accounted for within a function. In case of a change in polarization the increase in the rate of accumulation is determined by a factor obtain in this function. This factor in turn was calibrated in a number of laboratory tests. The process of validation of the HCA-model was done by recalculation the performed multi directional simple shear test. This was done by implementing the HCA-Model into the FEM-Program ANSYS®.

**Key words:** *cyclic behaviour; accumulation; multi directional loading; multi axial loading; explicit accumulation model; HCA-Model; multi directional simple shear test; laboratory technique; soil mechanics*





# Inhaltsverzeichnis

|                                                                       |              |
|-----------------------------------------------------------------------|--------------|
| <b>Vorwort des Herausgebers</b>                                       | <b>v</b>     |
| <b>Vorwort des Autors</b>                                             | <b>vii</b>   |
| <b>Kurzfassung</b>                                                    | <b>ix</b>    |
| <b>Abstract</b>                                                       | <b>xi</b>    |
| <b>Inhaltsverzeichnis</b>                                             | <b>xiii</b>  |
| <b>Abbildungsverzeichnis</b>                                          | <b>xvi</b>   |
| <b>Tabellenverzeichnis</b>                                            | <b>xxiv</b>  |
| <b>Symbolverzeichnis</b>                                              | <b>xxvii</b> |
| <b>1 Einführung</b>                                                   | <b>1</b>     |
| 1.1 Motivation und Ziele der Arbeit . . . . .                         | 1            |
| 1.2 Gliederung der Arbeit . . . . .                                   | 2            |
| <b>2 Definitionen</b>                                                 | <b>5</b>     |
| 2.1 Spannungen und Dehnungen im dreidimensionalen Raum . . . . .      | 5            |
| 2.2 Triaxialversuch . . . . .                                         | 7            |
| 2.2.1 Spannungen im Triaxialversuch . . . . .                         | 7            |
| 2.2.2 Dehnungen im Triaxialversuch . . . . .                          | 9            |
| 2.3 Einfachscherversuch . . . . .                                     | 10           |
| 2.3.1 Spannungen im Einfachscherversuch . . . . .                     | 10           |
| 2.3.2 Dehnungen im Einfachscherversuch . . . . .                      | 11           |
| 2.4 Resonant Column Versuch . . . . .                                 | 13           |
| 2.5 Porenvolumen . . . . .                                            | 14           |
| 2.6 Begriffe . . . . .                                                | 14           |
| 2.6.1 Zyklische und dynamische Belastung . . . . .                    | 14           |
| 2.6.2 Hochzyklische und polyzyklische Belastung . . . . .             | 15           |
| 2.6.3 Wechsellast und Schwelllast . . . . .                           | 15           |
| 2.6.4 Unidirektionale und multidirektionale Belastung . . . . .       | 15           |
| 2.6.5 Polarisation . . . . .                                          | 18           |
| <b>3 Stand der Forschung</b>                                          | <b>19</b>    |
| 3.1 Bodenmechanische Elementversuche mit zyklischen Belastungen . . . | 19           |
| 3.1.1 Torsionsscherversuch an Hohlzylinderproben . . . . .            | 20           |

|          |                                                                                |           |
|----------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1.2    | Triaxialversuch an zylindrischen Proben . . . . .                              | 21        |
| 3.1.3    | Echter Triaxialversuch an kubischen Proben . . . . .                           | 21        |
| 3.1.4    | Rahmenscherversuch . . . . .                                                   | 22        |
| 3.1.5    | Rütteltischversuch . . . . .                                                   | 22        |
| 3.1.6    | Resonant Column Versuch . . . . .                                              | 22        |
| 3.1.7    | Einfachscherversuch . . . . .                                                  | 24        |
| 3.2      | Zyklisches Bodenverhalten unter unidirektionaler Belastung . . . . .           | 25        |
| 3.2.1    | Intensität der Akkumulation . . . . .                                          | 25        |
| 3.2.2    | Akkumulationsrichtung $\omega$ . . . . .                                       | 30        |
| 3.3      | Bodenverhalten unter multidirektionaler Belastung . . . . .                    | 33        |
| 3.3.1    | Versuche unter undrännierter Bedingung . . . . .                               | 33        |
| 3.3.2    | Versuche unter drännierter Bedingung . . . . .                                 | 35        |
| 3.3.3    | Modellversuche . . . . .                                                       | 38        |
| 3.4      | Ansätze zur Abschätzung der Bodenverformung . . . . .                          | 39        |
| <b>4</b> | <b>Testgeräte und Versuchsdurchführung</b>                                     | <b>41</b> |
| 4.1      | Triaxialversuch . . . . .                                                      | 41        |
| 4.1.1    | Testgerät . . . . .                                                            | 41        |
| 4.1.2    | Probenpräparation . . . . .                                                    | 43        |
| 4.1.3    | Versuchsdurchführung . . . . .                                                 | 45        |
| 4.2      | Einfachscherversuch . . . . .                                                  | 46        |
| 4.2.1    | Testgerät . . . . .                                                            | 46        |
| 4.2.2    | Probenpräparation . . . . .                                                    | 48        |
| 4.2.3    | Versuchsdurchführung . . . . .                                                 | 48        |
| 4.2.4    | Spannungs- und Verformungsverteilung im Einfachscherversuch                    | 51        |
| 4.3      | Resonant Column Versuch . . . . .                                              | 56        |
| 4.3.1    | Testgerät . . . . .                                                            | 56        |
| 4.3.2    | Probenpräparation . . . . .                                                    | 57        |
| 4.3.3    | Versuchsdurchführung . . . . .                                                 | 58        |
| <b>5</b> | <b>Experimentelle Untersuchungen mit Berliner Sand</b>                         | <b>59</b> |
| 5.1      | Versuchsmaterial . . . . .                                                     | 59        |
| 5.2      | Materialverhalten unter monotoner Belastung . . . . .                          | 59        |
| 5.2.1    | Dränierter Triaxialversuche . . . . .                                          | 60        |
| 5.2.2    | Ödometerversuche . . . . .                                                     | 61        |
| 5.2.3    | Einfachscherversuche unter konstanter Vertikalspannung . . .                   | 63        |
| 5.2.4    | Spannungszustand im monotonen Einfachscherversuch . . . .                      | 64        |
| 5.2.5    | Ermittlung des Reibungswinkels im monotonen Einfachscher-<br>versuch . . . . . | 68        |
| 5.3      | Zyklisches Bodenverhalten im Triaxialversuch . . . . .                         | 70        |
| 5.3.1    | Verdichtungsverhalten von Berliner Sand . . . . .                              | 70        |
| 5.3.2    | Akkumulation der totalen Dehnung $\varepsilon^{\text{acc}}$ . . . . .          | 72        |
| 5.3.3    | Akkumulationsrichtung $\omega$ . . . . .                                       | 73        |
| 5.4      | Einfluss der mittleren Spannung auf die Steifigkeit . . . . .                  | 75        |
| 5.4.1    | Schubmodul und Grenzscherdehnungsamplituden im RC-<br>Versuch . . . . .        | 75        |

|          |                                                                                                      |            |
|----------|------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 5.4.2    | Schubmodul und volumetrische Grenzscherdehnungsamplitude im Einfeldscherversuch . . . . .            | 77         |
| 5.5      | Zyklisches Bodenverhalten im unidirektionalen Einfeldscherversuch . . . . .                          | 79         |
| 5.5.1    | Verdichtungsverhalten von Berliner Sand . . . . .                                                    | 81         |
| 5.5.2    | Akkumulation der totalen Dehnung $\varepsilon^{\text{acc}}$ . . . . .                                | 84         |
| 5.5.3    | Akkumulationsrichtung $\omega$ . . . . .                                                             | 95         |
| 5.6      | Zyklisches Verhalten im multidirektionalen Einfeldscherversuch . . . . .                             | 97         |
| 5.6.1    | Akkumulation der Volumendehnung . . . . .                                                            | 98         |
| 5.6.2    | Akkumulation der totalen Dehnung unter Polarisationsänderung                                         | 101        |
| <b>6</b> | <b>Stoffmodelle</b>                                                                                  | <b>113</b> |
| 6.1      | Basis des expliziten Akkumulationsmodells für Sand unter zyklischer Beanspruchung . . . . .          | 113        |
| 6.2      | Testberechnungen mit dem ursprünglichen HCA-Modell . . . . .                                         | 114        |
| 6.3      | Das HCA-Modell und seine Modifikation . . . . .                                                      | 116        |
| 6.3.1    | Allgemeine Formulierung . . . . .                                                                    | 116        |
| 6.3.2    | Teilfunktionen $f_{\text{ampl}}$ , $f_e$ , $f_p$ , $f_Y$ und $f_N$ . . . . .                         | 117        |
| 6.3.3    | Modifikation des Ansatzes von $f_\pi$ . . . . .                                                      | 120        |
| 6.3.4    | Wirkungsweise der „back polarization“ und der Polarisation der aktuellen Zyklen in $f_\pi$ . . . . . | 122        |
| 6.3.5    | Akkumulationsrichtung $\mathbf{m}$ . . . . .                                                         | 123        |
| 6.3.6    | Definition der Dehnungsamplitude $A_\varepsilon$ . . . . .                                           | 124        |
| 6.3.7    | Elastische Steifigkeit $\mathbb{E}$ . . . . .                                                        | 126        |
| 6.3.8    | Plastische Dehnungsrate $\mathbf{D}^{\text{pl}}$ . . . . .                                           | 126        |
| 6.4      | Konventionelles Stoffgesetz für die implizite Berechnung . . . . .                                   | 127        |
| 6.4.1    | Hypoplastisches Stoffgesetz . . . . .                                                                | 127        |
| 6.4.2    | Hypoplastisches Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung . . . . .                                    | 128        |
| 6.5      | Bestimmung der Materialkonstanten . . . . .                                                          | 129        |
| 6.5.1    | Parameter für das Akkumulationsmodell . . . . .                                                      | 129        |
| 6.5.2    | Parameter für das hypoplastische Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung . . . . .                   | 136        |
| 6.5.3    | Überprüfung der Materialkonstanten . . . . .                                                         | 139        |
| <b>7</b> | <b>Numerische Untersuchung</b>                                                                       | <b>143</b> |
| 7.1      | Numerische Umsetzung . . . . .                                                                       | 143        |
| 7.1.1    | Rechenablauf . . . . .                                                                               | 143        |
| 7.1.2    | Implementierung des HCA-Modells im Programm ANSYS® . . . . .                                         | 143        |
| 7.2      | Verifizierung der Implementierung des HCA-Modells . . . . .                                          | 145        |
| 7.2.1    | Materialkonstanten . . . . .                                                                         | 145        |
| 7.2.2    | Randbedingungen der FE-Berechnung . . . . .                                                          | 146        |
| 7.2.3    | Ergebnisse . . . . .                                                                                 | 147        |
| 7.3      | Validierung des modifizierten HCA-Modells . . . . .                                                  | 148        |
| 7.3.1    | Versuche ohne Änderung der Belastungsrichtung . . . . .                                              | 149        |
| 7.3.2    | Versuche mit Änderung der Belastungsrichtung . . . . .                                               | 152        |
| <b>8</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                                                  | <b>159</b> |
| 8.1      | Zusammenfassung . . . . .                                                                            | 159        |

## *Inhaltsverzeichnis*

|                             |            |
|-----------------------------|------------|
| 8.2 Ausblick . . . . .      | 162        |
| <b>Literaturverzeichnis</b> | <b>164</b> |
| <b>Anhang</b>               | <b>175</b> |

# Abbildungsverzeichnis

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Komponenten des Spannungstensors . . . . .                                                                                                                                                                                                                                      | 5  |
| 2.2  | Schematische Darstellung der Komponenten eines Dehnungstensors .                                                                                                                                                                                                                | 6  |
| 2.3  | Spannungen und Dehnungen im Triaxialversuch . . . . .                                                                                                                                                                                                                           | 7  |
| 2.4  | Dräniertes Triaxialversuch: Spannungspfad in der $p$ - $q$ -Ebene, nach Wichtmann [108] . . . . .                                                                                                                                                                               | 8  |
| 2.5  | Akkumulierte Dehnung einer zyklischen Belastung im Triaxialversuch                                                                                                                                                                                                              | 9  |
| 2.6  | Spannungen und Dehnungen im Einfachscherversuch . . . . .                                                                                                                                                                                                                       | 11 |
| 2.7  | Morscher Dehnungskreis für den Verformungszustand im Einfachscherversuch . . . . .                                                                                                                                                                                              | 12 |
| 2.8  | Probendehnung im Resonant Column Versuch, nach Rackwitz [85] . .                                                                                                                                                                                                                | 13 |
| 2.9  | Schematische Darstellung der Wechsellast und Schwelllast . . . . .                                                                                                                                                                                                              | 16 |
| 2.10 | Unidirektionale Zyklen (links) und multidirektionale Zyklen (rechts) .                                                                                                                                                                                                          | 16 |
| 2.11 | Variation der Spannungen im multidirektionalen Einfachscherversuch                                                                                                                                                                                                              | 17 |
| 3.1  | Schematische Darstellung von Laborversuchen zur Untersuchung des zyklischen Bodenverhaltens: a) Torsionsscherversuch, b) Triaxialversuch, c) Echter Triaxialversuch, d) Rahmenscherversuch, e) Rütteltischversuch, f) Resonant Column Versuch, g) Einfachscherversuch . . . . . | 20 |
| 3.2  | Typische Verzerrungsbereiche für unterschiedliche Versuche. a) Nach Klein, Grundbau Taschenbuch [57], b) Nach Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugrunddynamik“ [24], c) Nach Wichtmann [108] . .                                                                               | 23 |
| 3.3  | Zyklische Triaxialversuche: Einfluss der mittleren Spannung, nach Wichtmann [108] . . . . .                                                                                                                                                                                     | 26 |
| 3.4  | Zyklische Triaxialversuch: Einfluss der mittleren Spannung, nach Wichtmann [111] . . . . .                                                                                                                                                                                      | 27 |
| 3.5  | Zyklisches Schubmodul $G$ und Dämpfung $D$ in verschiedener Bereiche der Scherdehnungsamplitude, nach Vucetic [106] . . . . .                                                                                                                                                   | 28 |
| 3.6  | Zyklische Einfachscherversuche mit unterschiedlichen Zyklenpaketen, nach Glasenapp [32] . . . . .                                                                                                                                                                               | 30 |
| 3.7  | Einfachscherversuch: Dilatantes – kontraktantes Verhalten unter zyklischer Belastung in Abhängigkeit von der mittleren Schubspannung, nach Glasenapp [32] . . . . .                                                                                                             | 32 |
| 3.8  | Deviatorische Dehnung $\varepsilon_q^{acc}$ in Abhängigkeit der volumetrischen Dehnung $\varepsilon_v^{acc}$ bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen $\eta^{av}$ , Wichtmann [108] . . . . .                                                                               | 33 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |    |
|------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.9  | Rütteltischversuch: horizontale Beschleunigung im multidirektionalen Versuch (links) und Vergleich uni- und multidirektionaler Beanspruchung (rechts), nach Pyke et al. [83] . . . . .                                                                                                             | 34 |
| 3.10 | Ergebnisse der rotierenden Scherung (links) und abwechselnder Scherung (rechts), nach Ishihara & Yamazaki [46] . . . . .                                                                                                                                                                           | 35 |
| 3.11 | Multidirektionale Einfachscherversuch, nach Kammerer [50] . . . . .                                                                                                                                                                                                                                | 35 |
| 3.12 | Volumetrische Dehnung mit Polarisationsänderung im echten Triaxialversuch, nach Yamada & Ishihara [119] . . . . .                                                                                                                                                                                  | 36 |
| 3.13 | Akkumulierte Dehnung in multidirektionalen Einfachscherversuchen, nach Wichtmann [108] . . . . .                                                                                                                                                                                                   | 37 |
| 3.14 | Akkumulierte Dehnung in multidirektionalen Einfachscherversuchen, nach Wichtmann [108] . . . . .                                                                                                                                                                                                   | 37 |
| 3.15 | Spannungspfade in der $P$ - $Q$ -Ebene in zyklischen Triaxialversuchen, nach Wichtmann [108] . . . . .                                                                                                                                                                                             | 38 |
| 3.16 | Ergebnisse der Modellversuche mit veränderlichen Lastangriffsrichtungen, nach Peralta [78] . . . . .                                                                                                                                                                                               | 38 |
| 3.17 | Schematische Darstellung des Versuchsprogramms nach Rudolph & Grabe [89] . . . . .                                                                                                                                                                                                                 | 39 |
| 3.18 | Ergebnisse von Modellversuchen mit veränderlichen Lastangriffsrichtungen, nach Rudolph & Grabe [89] . . . . .                                                                                                                                                                                      | 40 |
| 4.1  | Schematische Darstellung des zyklischen Triaxialgeräts . . . . .                                                                                                                                                                                                                                   | 42 |
| 4.2  | Probenpräparation im Triaxialgerät: a) Stülpen der Membran über den Sockel, b) Einbau der Halbschalen und die Abfangschale, c) Sandeinrieseln, d) Glätten der Probenoberfläche, e) Befestigung des oberen Stempels mit der Einbauhilfe, f) eingebaute Probe in der Druckzelle .                    | 44 |
| 4.3  | Schematische Darstellung des zyklischen Einfachschergeräts und Fotoaufnahme der Probenzelle . . . . .                                                                                                                                                                                              | 46 |
| 4.4  | Probenpräparation im Einfachschergerät: a) unterer Laststempel mit geklemmter Membran und Stützringen, b) Ansaugen der Membran an den Ringen und Halbschalen mit Vakuum, c) Sandeinrieseln, d) Glätten der Probenoberfläche, e) Anbringen der Probe am Gerät, f) fertig eingebaute Probe . . . . . | 49 |
| 4.5  | Haltevorrichtung für das Drehen der Probenzelle . . . . .                                                                                                                                                                                                                                          | 49 |
| 4.6  | Reproduzierbarkeit der multidirektionalen Einfachscherversuche: Versuch mit zwei Wiederholungen. Verlauf der Volumendehnungen $\varepsilon_v$ (links) und Verlauf der normierten Volumendehnungen $\varepsilon_v/\varepsilon_{v,N=1000}$ (rechts) . . . . .                                        | 51 |
| 4.7  | a) Ideale einfache Scherung („ <i>Pure Shear</i> “), b) Einfachscherversuch im Labor, c) qualitative Darstellung der Normalspannungsverteilung, d) qualitative Darstellung der Schubspannungsverteilung. Nach: Airey et al. [3], Vucetic & Lacasse [107], DeGroot et al. [23] . . . . .            | 52 |
| 4.8  | Schematische Darstellung der Randbedingungen des Einfachscherversuchs in der FE-Berechnung . . . . .                                                                                                                                                                                               | 52 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                   |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 4.9  | Normalspannung im Einfachscherversuch mit verschiedenen Probenabmessungen, FE-Berechnung (2D) mit hypoplastischem Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung . . . . .                                                                                                                                                                               | 53 |
| 4.10 | Schubspannung im Einfachscherversuch mit verschiedenen Probenabmessungen, FE-Berechnung (2D) mit hypoplastischem Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung . . . . .                                                                                                                                                                                | 53 |
| 4.11 | Verformung des Probenrands bei dichter Lagerung, Messung mit der PIV Methode . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                            | 54 |
| 4.12 | Grenze bei der ebenen Probenverformung . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                  | 55 |
| 4.13 | Schematische Darstellung des Resonant Column Geräts . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                     | 56 |
| 4.14 | Verwendete Kalibrierbalken und Kalibriergewichte . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                        | 57 |
| 5.1  | Kornverteilungskurve Berliner Sand . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                                      | 60 |
| 5.2  | Monotone Triaxialversuche mit dichter Lagerung und unterschiedlicher Konsolidierungsspannung $\sigma_3$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                 | 61 |
| 5.3  | Monotone Triaxialversuche mit unterschiedlicher Lagerungsdichte bei einer Seitenspannung $\sigma_3 = 200$ kPa . . . . .                                                                                                                                                                                                                           | 62 |
| 5.4  | Peak-Reibungswinkel in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                             | 63 |
| 5.5  | Ödometerversuche mit locker gelagerter Probe (links) und dichter Probe (rechts) . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                         | 63 |
| 5.6  | Nicht volumenkonstante, monotone Einfachscherversuche mit unterschiedlichen Normalspannungen $\sigma_{yy}$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                              | 64 |
| 5.7  | Nicht volumenkonstanter, monotoner Einfachscherversuch mit unterschiedlichen Lagerungsdichten $I_{D0}$ . . . . .                                                                                                                                                                                                                                  | 65 |
| 5.8  | Mögliche Spannungszustände im Einfachscherversuch . . . . .                                                                                                                                                                                                                                                                                       | 66 |
| 5.9  | Mohr'sche Spannungskreis (oben) und Mohr'sche Dehnungsinkrementkreis (unten) nach Cole [22] und Oda [77] . . . . .                                                                                                                                                                                                                                | 67 |
| 5.10 | Verhältnis der Dehnungsinkremente $\dot{\gamma}_{yx}/\dot{\epsilon}_{yy}$ im Einfachscherversuch mit unterschiedlicher Normalspannung (links) und unterschiedlicher Lagerungsdichte (rechts) . . . . .                                                                                                                                            | 69 |
| 5.11 | Ermittelter Reibungswinkel aus Einfachscherversuch mit unterschiedlicher Normalspannung (links) und unterschiedlicher Lagerungsdichte (rechts) . . . . .                                                                                                                                                                                          | 70 |
| 5.12 | Volumetrische Änderung im zyklischen Triaxialversuch mit Variation von: a) Amplitude $q^{\text{ampl}}$ , b) Spannungsverhältnis $\eta^{\text{av}}$ , c) mittlerer Spannung $p^{\text{av}}$ und d) Anfangslagerungsdichte $I_{D0}$ . . . . .                                                                                                       | 71 |
| 5.13 | Totale Dehnung im zyklischen Triaxialversuch mit Variation von: a) Amplitude $q^{\text{ampl}}$ , b) Spannungsverhältnis $\eta^{\text{av}}$ , c) mittlerer Spannung $p^{\text{av}}$ und d) Anfangslagerungsdichte $I_{D0}$ . . . . .                                                                                                               | 73 |
| 5.14 | Deviatorische Dehnung $\varepsilon_q^{\text{acc}}$ in Abhängigkeit von volumetrischer Dehnung $\varepsilon_v^{\text{acc}}$ in zyklischen Triaxialversuchen mit Variation von: a) Amplitude $q^{\text{ampl}}$ , b) Spannungsverhältnis $\eta^{\text{av}}$ , c) mittlerer Spannung $p^{\text{av}}$ und d) Anfangslagerungsdichte $I_{D0}$ . . . . . | 74 |
| 5.15 | Triaxialversuche, Akkumulationsrichtung in Abhängigkeit der Zyklenanzahl $N$ im normalgeteilten Koordinatensystem (links) und im einfach-logarithmisch geteilten Koordinatensystem (rechts) . . . . .                                                                                                                                             | 75 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                 |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 5.16 | Schubmodul $G$ im RC-Versuch bei unterschiedlichen Drücken $p$ (links) und unterschiedlicher Lagerungsdichte $I_{D0}$ (rechts) . . . . .                                                                                                                        | 76 |
| 5.17 | RC-Versuche: Druckabhängigkeit des Schubmoduls $G$ für unterschiedliche Lagerungsdichten $I_{D0}$ (links), Ermittlung der volumetrischen Grenzscherdehnungsamplitude (rechts) . . . . .                                                                         | 76 |
| 5.18 | Weggesteuerte Einzelscherversuche: Schubmodul $G$ in Abhängigkeit des mittleren Drucks $p$ . . . . .                                                                                                                                                            | 78 |
| 5.19 | Einzelscherversuch: Entwicklung der Volumendehnung mit der Scherdehnungsamplitude für unterschiedliche Zyklenanzahlen $N$ im normalgeteilten Koordinatensystem (links) und im einfachlogarithmisch geteilten Koordinatensystem (rechts) . . . . .               | 79 |
| 5.20 | Konsolidierungsspannungen der unidirektionalen Einzelscherversuche                                                                                                                                                                                              | 80 |
| 5.21 | Volumenänderung im Einzelscherversuch mit unterschiedlicher: a) Schubspannungsamplitude $\tau_{yx}^{ampl}$ , b) Mittelschubspannung $\tau_{yx}^{av}$ , c) Normalspannung $\sigma_{yy}$ und d) Anfangslagerungsdichte $I_{D0}$ . . . . .                         | 81 |
| 5.22 | Schubverzerrungsamplitude (bei $N = 10^4$ ) in Einzelscherversuchen mit unterschiedlichen mittleren Schubspannungen $\tau_{yx}^{av}$ (links) und unterschiedlichen Normalspannungen $\sigma_{yy}$ (rechts) . . . . .                                            | 82 |
| 5.23 | Einzelscherversuche: volumetrische Dehnung $\varepsilon_v^{acc}$ bei $10^3$ Zyklen (links) und bei $10^4$ Zyklen (rechts) in Abhängigkeit der Schubverzerrungsamplitude $\bar{\gamma}_{yx}^{ampl}$ für unterschiedliche Normalspannungen $\sigma_{yy}$ .        | 84 |
| 5.24 | Einzelscherversuche: Dehnungsamplitude $\varepsilon^{ampl}$ in Abhängigkeit der Zyklenanzahl $N$ (links); mittlere Dehnungsamplituden aus $10^4$ Zyklen für verschiedene Spannungsamplituden (rechts) . . . . .                                                 | 85 |
| 5.25 | Akkumulation der totalen Dehnung $\varepsilon^{acc}$ in Abhängigkeit der Zyklenanzahl $N$ für verschiedene Spannungsamplituden $\tau_{yx}^{ampl}$ um die Nulllage $\tau_{yx}^{av} = 0$ kPa (links) und um $\tau_{yx}^{av} = 40$ kPa (rechts) . . . . .          | 86 |
| 5.26 | Abhängigkeit der normierten Akkumulationsdehnung $\varepsilon^{acc}/\bar{f}_e$ auf die gemittelte Dehnungsamplitude $\bar{\varepsilon}^{ampl}$ in Versuche um die Nulllage $\tau_{yx}^{av} = 0$ kPa (links) und um $\tau_{yx}^{av} = 40$ kPa (rechts) . . . . . | 87 |
| 5.27 | Dehnungsamplitude als Mittelwert aus $10^4$ Zyklen gegen die Anfangslagerungsdichte $I_{D0}$ . . . . .                                                                                                                                                          | 88 |
| 5.28 | Akkumulierte Dehnung $\varepsilon^{acc}$ in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl $N$ (links) und normierte Akkumulationsdehnung $\varepsilon^{acc}/\bar{f}_{ampl}$ gegenüber Porenzahl $\bar{e}$ (rechts) . . . . .                                                | 88 |
| 5.29 | Schematische Darstellung der getesteten Spannungszustände (links), Mittelwerte der Dehnungsamplituden aus $10^4$ Zyklen für verschiedenen mittleren Druck $p$ (rechts) . . . . .                                                                                | 89 |
| 5.30 | Akkumulierte Dehnung $\varepsilon^{acc}$ in Abhängigkeit der Zyklenanzahl $N$ für unterschiedliche Normalspannungen unter der Belastung $\tau_{yx}^{ampl}/\sigma_{yy} = 0,15$ (links) und $\tau_{yx}^{ampl}/\sigma_{yy} = 0,2$ (rechts) . . . . .               | 89 |
| 5.31 | Normierte akkumulierte Dehnung $\varepsilon^{acc}/\bar{f}_e\bar{f}_{ampl}$ in Abhängigkeit vom mittleren Druck $p$ . . . . .                                                                                                                                    | 90 |
| 5.32 | Schematische Darstellung der getesteten Spannungszustände (links), Dehnungsamplituden $\bar{\gamma}_{yx}^{ampl}$ , $\bar{\varepsilon}_v^{ampl}$ und $\bar{\varepsilon}^{ampl}$ für verschiedene mittlere Schubspannungen $\tau_{yx}^{av}$ (rechts) . . . . .    | 91 |



|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.33 | Akkumulierte Dehnung $\varepsilon^{\text{acc}}$ in Abhängigkeit der mittleren Schubspannung $\tau_{yx}^{\text{av}}$ bei Normalspannung $\sigma_{yy} = 100 \text{ kPa}$ (links), $200 \text{ kPa}$ (Mitte) und $300 \text{ kPa}$ (rechts) . . . . .                                                     | 91  |
| 5.34 | Schematische Darstellung der Spannungspfade im monotonen Einfachscherversuch . . . . .                                                                                                                                                                                                                 | 92  |
| 5.35 | Normierte Akkumulationsdehnung $\varepsilon^{\text{acc}}/\bar{f}_{\text{ampl}}\bar{f}_e f_p$ und Nachrechnung mit der Funktion in Gleichung 5.22 . . . . .                                                                                                                                             | 93  |
| 5.36 | Akkumulationsdehnung $\varepsilon^{\text{acc}}/\bar{f}_{\text{ampl}}\bar{f}_e f_p$ in Einfachscherversuche bis $10^5$ Zyklen . . . . .                                                                                                                                                                 | 94  |
| 5.37 | Akkumulierte Dehnung $\varepsilon^{\text{acc}}$ in Einfachscherversuchen bis $10^5$ Zyklen mit Variation von $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$ (links) und Variation von $\tau_{yx}^{\text{av}}$ (Mitte und rechts) . . . . .                                                                                  | 95  |
| 5.38 | Akkumulationsrichtung als Funktion der Zyklenanzahl $N$ im Einfachscherversuch mit Wechsellast um die Nulllage (links) und mit unterschiedlicher mittleren Schubspannung $\tau_{yx}^{\text{av}}$ (rechts) . . . . .                                                                                    | 95  |
| 5.39 | Deviatordehnung $\varepsilon_q^{\text{acc}}$ in Abhängigkeit der volumetrischen Dehnung $\varepsilon_v^{\text{acc}}$ in Wechsellastversuchen mit Variation von: Amplitude (links), Normalspannung (Mitte) und Lagerungsdichte (rechts) . . . . .                                                       | 96  |
| 5.40 | Deviatordehnung $\varepsilon_q^{\text{acc}}$ in Abhängigkeit der volumetrischen Dehnung $\varepsilon_v^{\text{acc}}$ in Schwellastversuchen ( $\tau_{yx}^{\text{av}} = 40 \text{ kPa}$ ) mit Variation von: Amplitude (links), Normalspannung (Mitte) und Lagerungsdichte (rechts) . . . . .           | 97  |
| 5.41 | Einfachscherversuch: $\varepsilon_q^{\text{acc}}$ - $\varepsilon_v^{\text{acc}}$ -Dehnungspfade für $\sigma_{yy} = 200 \text{ kPa}$ und unterschiedliche mittlere Schubspannung $\tau_{yx}^{\text{av}}$ . . . . .                                                                                      | 98  |
| 5.42 | Schematische Darstellung des Versuchsablaufs bei multidirektionalen Einfachscherversuchen . . . . .                                                                                                                                                                                                    | 99  |
| 5.43 | Multidirektionale Einfachscherversuche: Volumetrische Dehnung bei Polarisationswechseln nach $5.000$ Zyklen mit Variation der Lagerungsdichte $I_{D0}$ (links) und der Schubspannungsamplitude $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$ (rechts) . . . . .                                                            | 99  |
| 5.44 | Multidirektionale Einfachscherversuche: Volumetrische Dehnung bei Polarisationswechseln unter unterschiedlicher Normalspannung $\sigma_{yy}$ . . . . .                                                                                                                                                 | 100 |
| 5.45 | Normierte Volumendehnung $\varepsilon_v^{\text{acc}}/\varepsilon_{v,N=5000}^{\text{acc}}$ bei unterschiedlichen Polarisationswechsel $\alpha_P$ mit einer Schubspannungsamplitude $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 20 \text{ kPa}$ (links) und $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 30 \text{ kPa}$ (rechts) . . . . . | 101 |
| 5.46 | Multidirektionale Einfachscherversuche: Volumetrische Dehnung bei Polarisationswechseln nach unterschiedlicher Zyklenanzahl $N_P$ . . . . .                                                                                                                                                            | 102 |
| 5.47 | Verlauf der normierten Dehnung $\varepsilon^{\text{acc}}/\varepsilon_{N=5000}^{\text{acc}}$ (links) und der Akkumulationsrate $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}$ (rechts) über die Zyklenanzahl $N$ in multidirektionalen Einfachscherversuchen mit Variation des Drehwinkels $\alpha_P$ . . . . .       | 103 |
| 5.48 | $f_\pi$ direkt nach einem Polarisationswechsel bei (links) und Verlauf von $f_\pi$ mit Zyklenanzahl $N$ (rechtes) in Versuchen mit unterschiedlichen Drehwinkel $\alpha_P$ . . . . .                                                                                                                   | 104 |
| 5.49 | Abnahme von $f_\pi$ für verschiedene Drehwinkel $\alpha_P$ in Abhängigkeit der Zyklenanzahl nach der Polarisationsänderung $\Delta N_P$ im normalgeteilten Koordinatensystem (links) und im einfach-logarithmisch geteilten Koordinatensystem (rechts) . . . . .                                       | 105 |
| 5.50 | Akkumulationsrate $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}$ als Funktion der Zyklenanzahl $N$ in Versuche mit $90^\circ$ -Polarisationsänderung bei verschiedener $N_P$ . . . . .                                                                                                                               | 106 |

|      |                                                                                                                                                                                                                                                                                            |     |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.51 | $f_\pi$ bei Variation des Zeitpunkts der Polarisationsänderung $N_P$ im multidirektionalen Einfachscherversuch mit $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 10 \text{ kPa}$ (oben), $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 20 \text{ kPa}$ (mittel) und $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 30 \text{ kPa}$ (unten) . . . . . | 107 |
| 5.52 | Abhängigkeit der Funktion $f_\pi$ von der Zyklusanzahl nach dem Polarisationswechsel $\Delta N_P$ bei unterschiedlichen Zeitpunkt für die Drehung $N_P$ in Versuchen mit $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 20 \text{ kPa}$ (links) und $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 30 \text{ kPa}$ (rechts)        | 108 |
| 5.53 | Akkumulation der totalen Dehnung $\varepsilon^{\text{acc}}$ (links) und Dehnungsamplitude $\varepsilon^{\text{ampl}}$ (rechts) bei unterschiedlichen Amplituden $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$ im Versuch mit $90^\circ$ -Polarisationswechsel . . . . .                                        | 108 |
| 5.54 | Akkumulationsrate $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}$ als Funktion der Zyklusanzahl $N$ für unterschiedliche Amplituden $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$ (links) und $f_\pi$ in Abhängigkeit der Zyklusanzahl nach dem Polarisationswechsel $\Delta N_P$ (rechts) . . . . .                          | 109 |
| 5.55 | Akkumulationsrate $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}$ als Funktion der Zyklusanzahl $N$ für unterschiedliche Normalspannungen $\sigma_{yy}$ (links) und Funktion $f_\pi$ in Abhängigkeit der Zyklusanzahl nach dem Polarisationswechsel $\Delta N_P$ (rechts) . . . . .                       | 110 |
| 5.56 | Akkumulationsrate $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}$ als Funktion der Zyklusanzahl $N$ für unterschiedliche Lagerungsdichte $I_{D0}$ (links) und $f_\pi$ in Abhängigkeit der Zyklusanzahl nach dem Polarisationswechsel $\Delta N_P$ (rechts) . . . . .                                      | 111 |
| 6.1  | Akkumulierte Dehnung bei einer $90^\circ$ -Wechsel in den Laborversuchen (links) und in den Nachrechnungen mit dem ursprünglichen HCA-Modell (rechts), Parameter gemäß Tabelle 6.1 und 6.4 . . . . .                                                                                       | 115 |
| 6.2  | Akkumulierte Dehnung bei einer $90^\circ$ -Wechsel in den Laborversuchen (links) und in den Nachrechnungen mit dem ursprünglichen HCA-Modell (rechts), Parameter gemäß Tabelle 6.1 und 6.4 . . . . .                                                                                       | 116 |
| 6.3  | Schematische Darstellung des Verlaufs der Akkumulationsrate $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}$ (a), Funktion $f_\pi$ (b) und Winkel $\alpha$ (c) bei einer Polarisationsänderung nach $N_P$ Zyklen . . . . .                                                                                 | 121 |
| 6.4  | Adaption der „back polarization“ $\pi$ an die aktuelle Polarisation $\vec{A}_\varepsilon$ , nach Niemunis et al. [76] . . . . .                                                                                                                                                            | 122 |
| 6.5  | Projektion der Dehnungsschleife: a) Projektion der 3D-Schleife zu 2D-Schleife ( $\epsilon^{(3)} \rightarrow \epsilon^{(2)}$ ); b) Projektion der 2D-Schleife zu 1D-Schleife ( $\epsilon^{(2)} \rightarrow \epsilon^{(1)}$ ), nach Niemunis et al. [76] . . . . .                           | 125 |
| 6.6  | Schematische Darstellung der Spannungspfade im zyklischen Triaxialversuch. a) Variation der Amplitude, b) Variation der Lagerungsdichte, c) Variation der Spannungsverhältnis, d) Variation der mittleren Druck . . . . .                                                                  | 130 |
| 6.7  | Ergebnisse der dränierten zyklischen Triaxialversuche mit Berliner Sand, Variation der Amplitude (a), Lagerungsdichte (b), Spannungsverhältnis (c), mittleren Druck (d) . . . . .                                                                                                          | 132 |
| 6.8  | Ermittlung der Parameter $C_{N1}$ , $C_{N2}$ und $C_{N3}$ für Berliner Sand mit der Anpassungsfunktion $f_N$ (Gleichung 6.56, durchgezogene Kurve) .                                                                                                                                       | 133 |
| 6.9  | Ermittlung vom $C_{\pi 1}$ für Berliner Sand . . . . .                                                                                                                                                                                                                                     | 134 |
| 6.10 | Ermittlung vom $C_{\pi 2}$ für Berliner Sand . . . . .                                                                                                                                                                                                                                     | 135 |

|      |                                                                                                                                                                                                            |     |
|------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.11 | Zweiter Zyklus der Nachrechnung von Triaxialversuchen, Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung, Stoffparameter nach Tabelle 6.4                                                                        | 138 |
| 6.12 | Nachrechnung dräniert monotoner Triaxialversuche mit dem hypoplastischen Stoffgesetz für Berliner Sand, Parameter entspricht Tabelle 6.4                                                                   | 139 |
| 6.13 | Amplitude der zyklischen Triaxialversuche aus den FE-Berechnungen (Parameter entspricht Tabelle 6.4) und aus den Laborversuchen (Mittelwert von $10^5$ Zyklen)                                             | 140 |
| 6.14 | Nachrechnung der zyklischen Triaxialversuche mit dem Akkumulationsmodell: FE-Berechnung in Kombination mit Hypoplastizität, Parameter nach Tabelle 6.3 und 6.4; Handrechnungen, Parameter nach Tabelle 6.3 | 142 |
| 7.1  | Schematische Darstellung des Rechenablaufs eines Einzelscherversuchs mit dem Akkumulationsmodell                                                                                                           | 144 |
| 7.2  | Abmessungen des Versuchsbehälters des Zentrifugenmodellversuchs mit 20g, nach Helm et al. [37]                                                                                                             | 145 |
| 7.3  | FE-Diskretisierung mit Randbedingungen (links) und Felder der vertikalen Verschiebung nach $10^5$ Zyklen in m (rechts)                                                                                     | 147 |
| 7.4  | Akkumulierte Setzung des Fundamentes aus der eigenen FE-Berechnung im Vergleich mit dem Versuchsergebnis nach Helm et al. [37] (links) und mit den Ergebnissen von Wichtmann [108], Niemunis et al. [76]   | 148 |
| 7.5  | Volumetrische Dehnung in Abhängigkeit der Lastamplitude $\tau_{yx}^{ampl}$ in Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)                                                                          | 149 |
| 7.6  | Volumetrische Dehnung in Abhängigkeit der Anfangslagerungsdichte $I_{D0}$ in Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)                                                                           | 150 |
| 7.7  | Volumetrische Dehnung in Abhängigkeit der mittleren Schubspannung $\tau_{yx}^{av}$ in Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)                                                                  | 151 |
| 7.8  | Totale Dehnung in Abhängigkeit der mittleren Schubspannung $\tau_{yx}^{av}$ in Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)                                                                         | 151 |
| 7.9  | Volumetrische Dehnung in Abhängigkeit der Normalspannung $\sigma_{yy}$ in Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)                                                                              | 152 |
| 7.10 | Volumetrische Dehnung bei einem Polarisationswechsel mit $\alpha_P = 90^\circ$ für unterschiedliche Lastamplitude $\tau_{yx}^{ampl}$ aus Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)               | 153 |
| 7.11 | Volumetrische Dehnung bei einem Polarisationswechsel mit $\alpha_P = 90^\circ$ für unterschiedliche Lagerungsdichte $I_{D0}$ aus Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)                       | 154 |
| 7.12 | Volumetrische Dehnung bei einem Polarisationswechsel mit $\alpha_P = 90^\circ$ für unterschiedliche Normalspannung $\sigma_{yy}$ aus Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)                   | 155 |
| 7.13 | Volumetrische Dehnung bei einem Polarisationswechsel mit $\alpha_P = 90^\circ$ bei unterschiedlicher Zyklenanzahl $N_P$ aus Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)                            | 156 |
| 7.14 | Volumetrische Dehnung bei unterschiedlicher Polarisationsänderung $\alpha_P$                                                                                                                               | 157 |

|                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| 7.15 Volumetrische Dehnung bei unterschiedlicher mittlerer Schubspan- |     |
| nungen $\tau_{yx}^{\text{av}}$ . . . . .                              | 157 |

# Tabellenverzeichnis

|     |                                                                                                                              |     |
|-----|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 2.1 | Frequenzbereiche der Beanspruchungen, nach Gotschol [33] . . . . .                                                           | 15  |
| 6.1 | Materialkonstanten für das ursprüngliche HCA-Modell für Berliner Sand . . . . .                                              | 115 |
| 6.2 | Zusammenstellung der Teilfunktionen und der Materialkonstanten des HCA-Modells nach Niemunis et al. [76] . . . . .           | 118 |
| 6.3 | Zusammenstellung der Materialkonstanten für Berliner Sand . . . . .                                                          | 135 |
| 6.4 | Zusammenstellung der Stoffkonstanten der Hypoplastizität mit intergranularen Dehnung für Berliner Sand . . . . .             | 138 |
| 7.1 | Zusammenstellung der Stoffkonstanten der Hypoplastizität mit intergranularen Dehnung für Zentrifugenfeinsand (ZFS) . . . . . | 146 |
| 7.2 | Zusammenstellung der Parameter für das HCA-Modell für den ZFS .                                                              | 146 |
| A.1 | Tensornotation . . . . .                                                                                                     | 175 |



# Symbolverzeichnis

## Lateinische Buchstaben:

| Symbol                         | Einheiten | Bedeutung                                       |
|--------------------------------|-----------|-------------------------------------------------|
| $A$                            | -         | Konstante der Kompressionsmodul                 |
| $\mathbb{A}_\varepsilon$       |           | Tensor der Dehnungsamplitude, 4. Stufe          |
| $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon$ |           | Polarisation, Tensor 4. Stufe                   |
| $b$                            | m         | Breite                                          |
| $B$                            | -         | Faktor für den Ort des repräsentativen Radius   |
| $C$                            | m         | Repräsentativer Radius im RC-Versuch            |
| $C_{\text{ampl}}$              | -         | Stoffkonstante für die Amplitude                |
| $C_e$                          | -         | Stoffkonstante für die Porenzahl                |
| $C_{N1}, C_{N2}, C_{N3}$       | -         | Stoffkonstante für die Zyklenanzahl             |
| $C_p$                          | -         | Stoffkonstante für den mittleren Druck          |
| $C_Y$                          | -         | Stoffkonstante für das Spannungsverhältnis      |
| $C_{\pi1}, C_{\pi2}$           | -         | Stoffkonstante für den Polarisationswechsel     |
| $d$                            | m         | Probenhöhe                                      |
| $\mathbf{D}$                   |           | Tensor der Dehnungsrate, 2. Stufe               |
| $D_r$                          | -         | Lagerungsdichte                                 |
| $\mathbf{D}^{\text{acc}}$      |           | Tensor der akkumulierten Dehnungsrate, 2. Stufe |
| $\mathbf{D}^{\text{pl}}$       |           | Tensor der plastischen Dehnungsrate, 2. Stufe   |
| $e$                            | -         | Porenzahl                                       |
| $\mathbb{E}$                   |           | Elastischer Steifigkeitstensor, 4. Stufe        |
| $E$                            | MPa       | Elatizitätsmodul                                |
| $e_{c0}$                       | -         | Porenzahl bei kritischem Zustand bei $p = 0$    |
| $e_{d0}$                       | -         | Porenzahl bei dichtester Lagerung bei $p = 0$   |
| $e_{i0}$                       | -         | Porenzahl bei lockerster Lagerung bei $p = 0$   |
| $e_{\min}, e_{\max}$           | -         | Minimale und maximale Porenzahl                 |

| Symbol             | Einheiten    | Bedeutung                                  |
|--------------------|--------------|--------------------------------------------|
| $e_{\text{ref}}$   | -            | Referenzporenzahl                          |
| $f$                | Hz           | Frequenz                                   |
| $F$                |              | Parameter des hypolpatsichen Stoffgesetzes |
| $f_{\text{ampl}}$  | -            | Teilfunktion für die Amplitude             |
| $f_b, f_e, f_d$    |              | Skalare Faktoren beim hypopl. Stoffgesetz  |
| $f_e$              | -            | Teilfunktion für die Porenzahl             |
| $f_N$              | -            | Teilfunktion für die Zyklenanzahl          |
| $\dot{f}_N^A$      | -            | Teilfunktion für die Belastungsgeschichte  |
| $\dot{f}_N^B$      | -            | Grundrate der Akkumulation                 |
| $f_p$              | -            | Teilfunktion des HCA-Modells für $p$       |
| $f_R$              | Hz           | Resonanzfrequenz                           |
| $f_Y$              | -            | Teilfunktion für das Spannungsverhältnis   |
| $f_\pi$            | -            | Teilfunktion für die Polarisationsänderung |
| $G$                | MPa          | Schubmodul                                 |
| $g^A$              |              | Historiotrope Variable                     |
| $h$                | m            | Probenhöhe                                 |
| $\mathbf{h}$       |              | Intergranulare Dehnung                     |
| $\vec{\mathbf{h}}$ |              | Intergranulare Dehnungsrichtung            |
| $h_s$              | MPa          | Glanulathärte                              |
| $I$                | $\text{m}^4$ | Polare Trägheitsmoment                     |
| $\mathbb{I}$       |              | Identitätstensor 4. Stufe                  |
| $I_0$              | $\text{m}^4$ | Polare Trägheitsmoment des Systems         |
| $I_1, I_2, I_3$    |              | Basis-Invarianten der Spannung             |
| $I_{D0}$           | -            | Bezogene Anfangslagerungsdichte            |
| $\mathcal{J}$      |              | Identitätstensor 8. Stufe                  |
| $J_1, J_2$         |              | Hauptinvarianten des Spannungsdeviators    |
| $K$                | MPa          | Kompressionsmodul                          |
| $k$                |              | Verfestigungsmodul                         |
| $K_0$              | -            | Erdruhedruckbeiwert                        |
| $k_N$              | -            | Anpassungskonstante                        |
| $\mathbb{L}$       |              | Nichtlinearer Steifigkeitstensor 4. Stufe  |
| $\mathbf{m}$       |              | Fließregel                                 |



| Symbol             | Einheiten        | Bedeutung                                       |
|--------------------|------------------|-------------------------------------------------|
| $M$                | -                | Neigung der Grenzgerade                         |
| $\mathbb{M}$       |                  | Erhöhte Steifigkeit                             |
| $M_c$              | -                | Neigung der Grenzgerade bei Kompression         |
| $M_e$              | -                | Neigung der Grenzgerade bei Extension           |
| $m_R$              | -                | Materialkonst. der intergranularen Dehnung      |
| $m_T$              | -                | Materialkonst. der intergranularen Dehnung      |
| $M_T$              | Nm               | Torsionsmoment                                  |
| $n$                | -                | Materialkonstante der Hypoplastisität           |
| $n$                | -                | Konstante Kompressionsmodul                     |
| $N$                | -                | Zyklusanzahl                                    |
| $\mathbf{N}$       |                  | Nichtlinearer Steifigkeitstensor 2. Stufe       |
| $N_P$              | -                | Zyklusanzahl bei dem Polarisationswechsel       |
| $p$                | kPa              | Invariant für mittleren Druck                   |
| $p^{\text{ampl}}$  | kPa              | Amplitude der mittleren Druck                   |
| $p_{\text{atm}}$   | kPa              | Atmosphärischer Druck                           |
| $p^{\text{av}}$    | kPa              | Mittlerer Druck                                 |
| $p_{\text{ref}}$   | kPa              | Referenzdruck                                   |
| $q$                | kPa              | Deviatorspannung                                |
| $q^{\text{ampl}}$  | kPa              | Amplitude der Deviatorspannung                  |
| $q^{\text{av}}$    | kPa              | Mittlere Deviatorspannung                       |
| $R$                | -                | Materialkonst. der intergranularen Dehnung      |
| $R$                | -                | Spannungsverhältnis $R = \tau_{yx}/\sigma_{yy}$ |
| $\mathcal{R}$      |                  | Rotationsoperator, Tensor 8. Stufe              |
| $t$                | s                | Zeit                                            |
| $t$                | m                | Tiefe                                           |
| $\dot{\mathbf{T}}$ |                  | Jaumann'sche Spannungsrate                      |
| $u$                |                  | Akkumulation der Porenwasserdruck               |
| $v_s$              | m/s <sup>2</sup> | Scherwellengeschwindigkeit                      |
| $Y$                | -                | Spannungsverhältnis nach Matsuoka & Nakai       |
| $\bar{Y}$          | -                | Zustandsvariable                                |

## Griechische Buchstaben:

| Symbol                                        | Einheiten         | Bedeutung                                                           |
|-----------------------------------------------|-------------------|---------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$                                      | -                 | Materialkonstante der Hypoplastisität                               |
| $\alpha_P$                                    | °                 | Winkel der Polarisationsänderung                                    |
| $\beta$                                       | -                 | Iterative Parameter                                                 |
| $\beta$                                       | -                 | Materialkonstante der Hypoplastisität                               |
| $\beta_R$                                     | -                 | Materialkonst. der intergranularen Dehnung                          |
| $\gamma$                                      | -                 | Scherdehnung                                                        |
| $\gamma$                                      | kN/m <sup>3</sup> | Wichte                                                              |
| $\gamma_{yx}^{av}$                            | -                 | Mittlere Schubverzerrung                                            |
| $\gamma_{yx}^{ampl}$                          | -                 | Schubverzerrungsamplitude                                           |
| $\gamma_{tl}$                                 | -                 | Lineare Grenzscherdehnung                                           |
| $\gamma_{tv}$                                 | -                 | Volumetrische Grenzscherdehnung                                     |
| $\gamma_{yx}$                                 | -                 | Schubverzerrung                                                     |
| $\Delta N_P$                                  | -                 | Zyklenanzahl ab dem Polarisationswechsel                            |
| $\epsilon$                                    |                   | Dehnungstensor, 2. Stufe                                            |
| $\varepsilon$                                 | -                 | Dehnungsintensität, totale Dehn., $\varepsilon = \varepsilon_{tot}$ |
| $\varepsilon_1, \varepsilon_2, \varepsilon_3$ | -                 | Hauptdehnungen                                                      |
| $\varepsilon_a$                               | -                 | Axiale Dehnung                                                      |
| $\varepsilon^{acc}$                           | -                 | Akkumulation der totalen Dehnungsinvariante                         |
| $\varepsilon^{ampl}$                          | -                 | Amplitude der Dehnungsintensität                                    |
| $\dot{\varepsilon}^{acc}$                     | -                 | Rate der akk. Dehnungsintensität                                    |
| $\varepsilon_q$                               | -                 | Deviatordehnung                                                     |
| $\varepsilon_{tot}$                           | -                 | Totale Dehnungsinvariante (Dehnungsintensität)                      |
| $\varepsilon_v$                               | -                 | Volumetrische Dehnung                                               |
| $\varepsilon_{yy}, \varepsilon_{zz}$          | -                 | Horizontale Dehnung                                                 |
| $\zeta$                                       | -                 | Amplitudenverhältnis                                                |
| $\eta$                                        | -                 | Spannungsverhältnis                                                 |
| $\eta^{av}$                                   | -                 | Mittleres Spannungsverhältnis                                       |
| $\theta$                                      | °                 | Drehwinkel in RC                                                    |
| $\theta_i$                                    | °                 | Winkel der Phasenverschiebung                                       |
| $\kappa$                                      | -                 | Materialkonstante                                                   |

| Symbol                         | Einheiten         | Bedeutung                                      |
|--------------------------------|-------------------|------------------------------------------------|
| $\lambda$                      | -                 | Lemé-Konstante                                 |
| $\mu$                          | -                 | Reibungsbeiwert                                |
| $\mu$                          | -                 | Lemé-Konstante                                 |
| $\nu$                          | °                 | Dilatanzwinkel                                 |
| $\nu$                          | -                 | Querkontraktionszahl                           |
| $\xi$                          | °                 | Drehwinkel der Dehnungsinkremente              |
| $\pi$                          |                   | <i>Back polarization</i> , Tensor 4. Stufe     |
| $\rho$                         | kN/m <sup>3</sup> | Probendichte                                   |
| $\rho$                         | -                 | Mobilisierungsgrad der intergranularen Dehnung |
| $\sigma$                       |                   | Cauchy Spannungstensor, 2. Stufe               |
| $\sigma_1, \sigma_3, \sigma_3$ | kPa               | Hauptspannungen                                |
| $\sigma_{yy}$                  | kPa               | Normalspannung                                 |
| $\sigma_{xx}$                  | kPa               | Horizontale Normalspannung                     |
| $\tau_{yx}^{av}$               | kPa               | Mittlere Schubspannung                         |
| $\tau_{yx}$                    | kPa               | Schubspannung                                  |
| $\tau_{yx}^{ampl}$             | kPa               | Schubspannungsamplitude                        |
| $\phi$                         | °                 | Drehwinkel der Hauptspannungsrichtung          |
| $\varphi$                      | °                 | Reibungswinkel                                 |
| $\varphi_c$                    | °                 | Kritischer Reibungswinkel                      |
| $\varphi_m$                    | °                 | Mobilisierte Reibungswinkel                    |
| $\varphi_P$                    | °                 | Peak-Reibungswinkel                            |
| $\chi$                         | -                 | Materialkonstante der intergranularen Dehnung  |
| $\psi$                         | °                 | Drehwinkel der Hauptspannungsrichtung          |
| $\omega, \Omega$               | -                 | Akkumulationsrichtung                          |



# 1 Einführung

## 1.1 Motivation und Ziele der Arbeit

Die zyklische Belastung einer Gründung kann durch die Überfahrt von Fahrzeugen (z. B. Eisenbahnen, Kranbahnen), durch Wind und Wellen (z. B. bei Offshore Windenergieanlagen) oder Unwuchten von Maschinen verursacht werden. Hier sind die Bemessungen für die Gebrauchstauglichkeit und für die Tragfähigkeit großen Unsicherheiten unterworfen. Eine sichere, wirtschaftliche Planung und Bemessung dieser Gründungen ist nur möglich, wenn genügend Kenntnisse über das zyklische Verhalten des Bodens vorhanden sind.

Unter einer zyklischen Belastung kommt neben der bleibenden Bodenverformung aus dem statischen Lastanteil noch eine mit der Zyklenzahl zunehmende Verformung hinzu. Diese ist auf die nicht vollständig geschlossenen Dehnungsschleifen infolge der geschlossenen Spannungsschleifen aus der zyklischen Belastung zurückzuführen. In den meisten praktischen geotechnischen Fragestellungen sind die Belastungsamplituden betragsmäßig im Vergleich zu dem statischen Anteil oder der Bruchspannung oft sehr klein. Die Akkumulationsdehnung ist infolgedessen für wenige Zyklen oft vernachlässigbar gering. In einem langen Betrachtungszeitraum (große Anzahl von Zyklen  $N > 10^3$ ) könnte diese wiederholte kleine Amplitude jedoch zu einer signifikanten bleibenden Verformung führen.

Das Verformungsverhalten des Bodens unter zyklischer Belastung ist von der Lastamplitude, von der mittleren Spannung sowie von der Anzahl der Zyklen abhängig. Darüber hinaus kommt jedoch auch der Richtung der Belastung erhebliche Bedeutung zu. Eine Änderung der Belastungsrichtung beansprucht den Boden zusätzlich. Das ist generell ein dreidimensionales Problem, welches jedoch bisher bei Laboruntersuchungen sowie Bemessungs- und Simulationsansätzen meistens auf zweidimensionale Fragestellungen reduziert worden ist. Der Einfluss der Lastrichtungsänderung blieb dabei meistens unberücksichtigt.

Es ist in vielen Fällen wichtig, die Verformung der zyklisch belasteten Gründung in der Entwurfsphase zu prognostizieren, um eventuell Gegenmaßnahmen zu treffen oder Änderungen in der Gründung vorzunehmen. Hierfür wurden einige einfache Ingenieurmodelle mit Hilfe von Labor- oder Modellversuchen entwickelt. Diese Modelle sind jedoch nur auf spezielle und einfache Gründungsstrukturen beschränkt. Die FE-Methode bietet die Möglichkeit komplexe Randwertprobleme zu untersuchen. Dazu sind hochwertige Stoffmodelle für die Beschreibung des Bodenverhaltens unter zyklischer Beanspruchung notwendig. Hier kommen zwei grundsätzlich unterschiedliche Rechenweisen zum Einsatz, zum einen die *implizite* Methode (z. B.: hypoplas-

tisches Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung nach Niemunis & Herle [74] oder CSSA-Modell nach Savidis et al. [91]), und zum anderen die *explizite* Methode (Niemunis et al. [76], Wichtmann [108]). Bei einer impliziten Vorgehensweise wird die zyklische Belastung bei jedem Zyklus mit der Beziehung der Spannung-Dehnungsrate in vielen Inkrementen berechnet. Die akkumulierte Dehnung resultiert aus den nicht vollständig geschlossenen Dehnungsschleifen infolge der plastischen Dehnung bei der Ent-, und Belastung. Diese Methode ist aufgrund der systematischen Fehler der Materialmodelle und der numerischen Fehler der Integrationsroutine nur auf wenige Zyklen ( $N < 50$ ) anwendbar (Niemunis [73]). Für die Belastung mehrerer Zyklen (hochzyklische Belastung) ist die explizite Rechenweise besser geeignet. Dabei wird die bleibende Dehnung explizit gerechnet, ohne die Dehnungspfade der einzelnen Zyklen zu verfolgen. Die Akkumulation unter einer zyklischen Belastung wird analog zum Dehnungsvorgang eines viskosen Materials behandelt. Anstelle der Zeit  $t$  tritt die Zyklenanzahl  $N$  auf.

Die experimentellen Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit sollen dazu beitragen, das Verformungsverhalten von Böden unter zyklischer multidirektionaler Beanspruchung besser zu verstehen und damit die Bodenverformung mit den Stoffmodellen genauer prognostizieren zu können. Dazu dient ein umfangreiches Laborprogramm mit zyklischen Triaxialversuchen und unidirektionalen sowie multidirektionalen Einfachscherversuchen zur Analyse unterschiedlicher Einflussparameter. Für die numerische Untersuchung wird das hochzyklische Akkumulationsmodell (Niemunis et al. [76]) verwendet. Anhand der Erkenntnisse der experimentellen Untersuchungen wird das hochzyklische Akkumulationsmodell für die Beschreibung des Bodenverhaltens bei einem Polarisationswechsel modifiziert. Die Versuchsergebnisse werden für die Validierung des modifizierten Stoffmodells verwendet.

## 1.2 Gliederung der Arbeit

Im Kapitel 2 werden die in der vorliegenden Arbeit am häufigsten verwendeten Definitionen zusammengestellt und erläutert.

Das Kapitel 3 verschafft einen Überblick über die experimentellen Untersuchungen zum zyklischen Verhalten an nichtbindigen Böden in der Literatur. Dabei werden unterschiedliche Versuchstypen zur Untersuchung des Materialverhaltens unter zyklischer Beanspruchung vorgestellt. Anschließend werden typische Verhalten von rolligen Böden unter den Einflüssen der wesentlichen Parameter diskutiert. Im Weiteren wird auf das Verhalten von Böden unter der multidirektionalen Belastung eingegangen. Auch einige Modellversuche zur Untersuchung des Einflusses der zyklischen Belastung werden vorgestellt.

Die für die experimentelle Untersuchung verwendeten Versuchsgeräte werden im Kapitel 4 vorgestellt. Dabei werden der jeweilige Geräteaufbau, die Testrandbedingungen, die Probenpräparation und die Versuchsabläufe beschrieben.

Im nächsten Kapitel werden die Ergebnisse der Laborversuche mit Berliner Sand präsentiert (Kapitel 5). Zuerst wird das Verhalten von Berliner Sand in mono-

tonen Versuchen dargestellt. Die Ergebnisse dieser Versuche wurden auch für die Bestimmung der Parameter für das hypoplastische Stoffgesetz verwendet. Anschließend werden aus den zyklischen Triaxialversuchen die Parameter für das hochzyklische Akkumulationsmodell (HCA-Modell) ermittelt. Weiterhin wird das zyklische Verformungsverhalten von Sand im zyklischen unidirektionalen Einzugsversuch besprochen. Dabei werden die Ergebnisse hinsichtlich der Formulierung des HCA-Modells dargestellt. Danach werden die Ergebnisse der multidirektionalen Einzugsversuche zur Untersuchung der Polarisationsänderung präsentiert. Diese Ergebnisse werden für die Modifikation der Funktion  $f_\pi$  vom HCA-Modell verwendet.

Die für die numerische Untersuchung verwendeten Stoffmodelle werden im Kapitel 6 dargestellt. Zuerst wird das ursprüngliche Akkumulationsmodell nach Niemunis et al. [76] und Wichtmann [108] erläutert. Die Modifikation des Ansatzes für die Beschreibung des Bodenverhaltens bei einer Polarisationsänderung im HCA-Modell wird danach präsentiert. Anschließend wird das für die implizite Berechnung verwendete hypoplastische Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung vorgestellt. Die Prozedur für die Bestimmung und die Validierung der Materialparameter des ursprünglichen Modells anhand der Laborversuche wird ebenfalls in diesem Kapitel vorgestellt.

Die Ergebnisse der numerischen Untersuchungen werden im Kapitel 7 präsentiert. Am Anfang dieses Kapitels wird der Rechenablauf mit dem HCA-Modell und der Hypoplastizität erläutert. Danach wird die Implementierung der Stoffmodelle im Programm ANSYS<sup>®</sup> beschrieben. Die Verifizierung der Implementierung erfolgt mit der FE-Berechnung des Zentrifugenversuchs eines zyklisch belasteten Fundaments nach Helm et al. [37]. In den weiteren FE-Berechnungen werden die uniaxialen und multidirektionalen Einzugsversuche nachgerechnet.

Die wesentlichen Erkenntnisse der experimentellen und numerischen Untersuchungen dieser Arbeit und die daraus weiterführenden Forschungsarbeiten werden im letzten Kapitel zusammengefasst.





## 2 Definitionen

Dieser Abschnitt stellt die in der vorliegenden Arbeit am häufigsten verwendeten Definitionen und Begriffe dar. Dabei ist zu unterscheiden zwischen der Vorzeichenkonvention in der Mechanik (Zugspannungen und Dehnungen sind positiv) und der in der Bodenmechanik (Druckspannungen und Stauchungen sind positiv). In den meisten Veröffentlichungen zu experimentellen Arbeiten wird die Vorzeichenkonvention der Bodenmechanik benutzt, während in der Literatur zu Stoffmodellen diejenige der Mechanik üblich ist. In der vorliegenden Arbeit wird die Vorzeichenkonvention der Bodenmechanik angewendet: Druckspannungen und Stauchungen sind positiv.

### 2.1 Spannungen und Dehnungen im dreidimensionalen Raum

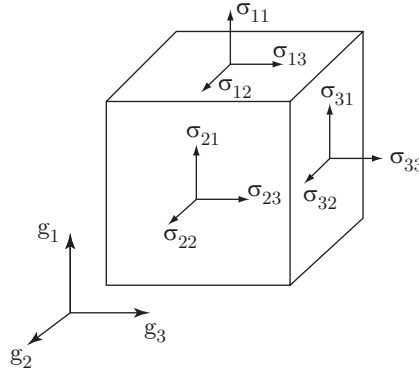


Abbildung 2.1: Komponenten des Spannungstensors

Für die Formulierung des Stoffgesetzes werden die Spannungszustände allgemein in voller tensorieller Notation beschrieben. Die effektiven Spannungen eines Bodenelements im dreidimensionalen Raum werden durch den Cauchy-Spannungstensor  $\sigma$  dargestellt:

$$\sigma = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad (2.1)$$

Die Berechnung der Invarianten  $p$ ,  $q$ ,  $I_1$ ,  $I_2$ ,  $I_3$ ,  $J_2$ ,  $J_3$  und  $\tau_{otc}$  aus dem Spannungstensor  $\sigma$  wird im Anhang detailliert erläutert.

## 2 Definitionen

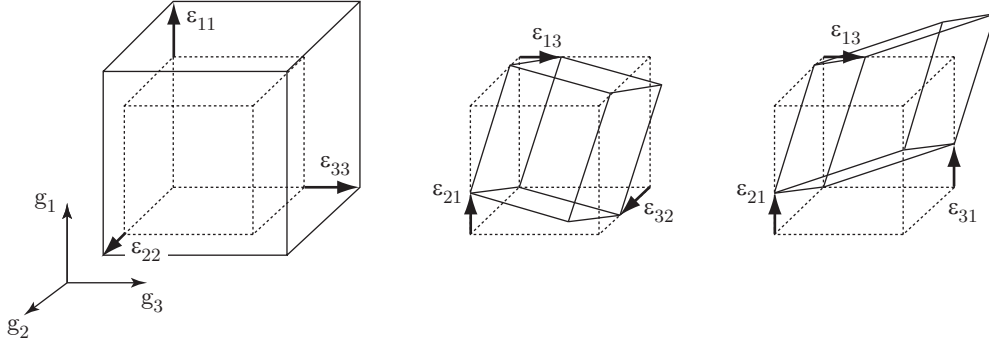


Abbildung 2.2: Schematische Darstellung der Komponenten eines Dehnungstensors

Der Dehnungszustand wird durch den Dehnungstensor  $\epsilon$  dargestellt:

$$\epsilon = \begin{pmatrix} \epsilon_{11} & \epsilon_{12} & \epsilon_{13} \\ \epsilon_{21} & \epsilon_{22} & \epsilon_{23} \\ \epsilon_{31} & \epsilon_{32} & \epsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (2.2)$$

Die Berechnung der Dehnungsinvarianten  $\epsilon_v$ ,  $\epsilon_q$  und  $\gamma$  aus dem Dehnungstensor  $\epsilon$  wird im Anhang beschrieben. Im expliziten Akkumulationsmodell (nach Wichtmann [108], Niemunis et al. [76]) wird die Invariante  $\epsilon_{\text{tot}}$  verwendet und als totale Dehnung bezeichnet. Die totale Dehnungsinvariante  $\epsilon_{\text{tot}}$  bezeichnet die Intensität des Dehnungstensors (nach Kolymbas [58]) und wird aus dem Dehnungstensor wie folgt ermittelt:

$$\epsilon_{\text{tot}} = \|\epsilon\| = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \epsilon_{ij}^2} \quad (2.3)$$

Bei einer zyklischen Belastung kann ein zeitabhängiger Dehnungstensor  $\epsilon(t)$  aus einem Teil für den mittleren Zustand  $\epsilon^{\text{av}}$  und einem zyklischen Anteil  $\epsilon^{\text{ampl}}$  in der Form:

$$\epsilon(t) = \epsilon^{\text{av}} + \epsilon^{\text{ampl}}(t) = \epsilon^{\text{av}} + \begin{pmatrix} \epsilon_{11}^{\text{ampl}} f_{11}(t) & \epsilon_{12}^{\text{ampl}} f_{12}(t) & \epsilon_{13}^{\text{ampl}} f_{13}(t) \\ \epsilon_{21}^{\text{ampl}} f_{21}(t) & \epsilon_{22}^{\text{ampl}} f_{22}(t) & \epsilon_{23}^{\text{ampl}} f_{23}(t) \\ \epsilon_{31}^{\text{ampl}} f_{31}(t) & \epsilon_{32}^{\text{ampl}} f_{32}(t) & \epsilon_{33}^{\text{ampl}} f_{33}(t) \end{pmatrix} \quad (2.4)$$

beschrieben werden (Niemunis et al. [76]). Darin ist  $\epsilon_{ij}^{\text{ampl}}$  die Amplitude und  $f_{ij}(t)$  die periodische Funktion der  $ij$ -Komponente. Die Dehnungskomponenten oszillieren durch die Funktionen  $-1 \leq f_{ij}(t) \leq 1$  in der Zeit  $t$  (z.B.:  $f_{ij}(t) = \sin(t)$ ). Die Intensität der Amplitude wird durch die totale Dehnungsinvariante  $\epsilon_{\text{tot}}^{\text{ampl}}$  dargestellt und berechnet sich aus:

$$\epsilon_{\text{tot}}^{\text{ampl}} = \|\epsilon^{\text{ampl}}\| = \sqrt{\sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 (\epsilon_{ij}^{\text{ampl}})^2} \quad (2.5)$$

Die totale Dehnung  $\epsilon_{\text{tot}}$  wird in den nachfolgenden Abschnitten bei der Darstellung der Laborergebnisse nur mit  $\epsilon$  (ohne Indizes) bezeichnet.

## 2.2 Triaxialversuch

### 2.2.1 Spannungen im Triaxialversuch

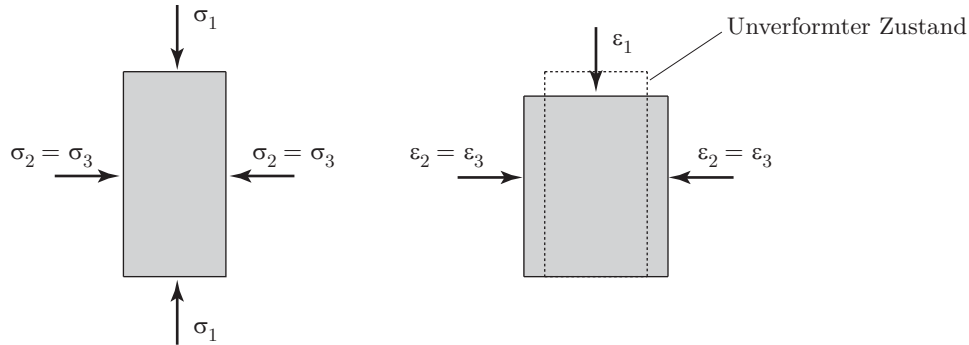


Abbildung 2.3: Spannungen und Dehnungen im Triaxialversuch

Im Triaxialversuch wird die axiale Spannungskomponente mit  $\sigma_1$  und die radialen Komponenten mit  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  bezeichnet. Es handelt es sich hier um einen axial-symmetrischen Spannungszustand. Der Spannungstensor wird mit den Hauptspannungen belegt:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_3 \end{pmatrix} \quad (2.6)$$

In der Literatur wird oft für die Kennzeichnung der effektiven Spannungskomponente ein hochgestelltes Komma verwendet. Bei der vorliegenden Arbeit werden die effektiven Spannungen generell ohne Apostroph bezeichnet (alle Spannungen sind effektiv). Es werden die Roscoe-Invarianten  $p$  (mittlerer Druck) und  $q$  (Deviatorspannung) verwendet:

$$p = \frac{1}{3}(\sigma_1 + 2\sigma_3) \quad (2.7)$$

$$q = \sigma_1 - \sigma_3 \quad (2.8)$$

Die Lage des Spannungszustandes in der  $p$ - $q$ -Ebene kann durch das Spannungsverhältnis

$$\eta = q/p \quad (2.9)$$

beschrieben werden (Abbildung 2.4). Im kritischen Zustand ist das Spannungsverhältnis  $\eta = M_c(\varphi_c)$  (im Kompressionsbereich) und  $\eta = M_e(\varphi_c)$  (im Extensionsbereich). Die Neigungen  $M_c$  und  $M_e$  der Grenzgeraden können nach folgenden

## 2 Definitionen

Gleichungen berechnet werden:

$$M_c = \frac{6 \sin \varphi}{3 - \sin \varphi} \quad \text{und} \quad M_e = -\frac{6 \sin \varphi}{3 + \sin \varphi} \quad (2.10)$$

Darin ist  $\varphi = \varphi_c$  der Reibungswinkel im kritischen Zustand (engl. *critical state line*, CSL) und  $\varphi = \varphi_p$  der „Peak“-Reibungswinkel (Zustand mit der maximalen Scherfestigkeit).

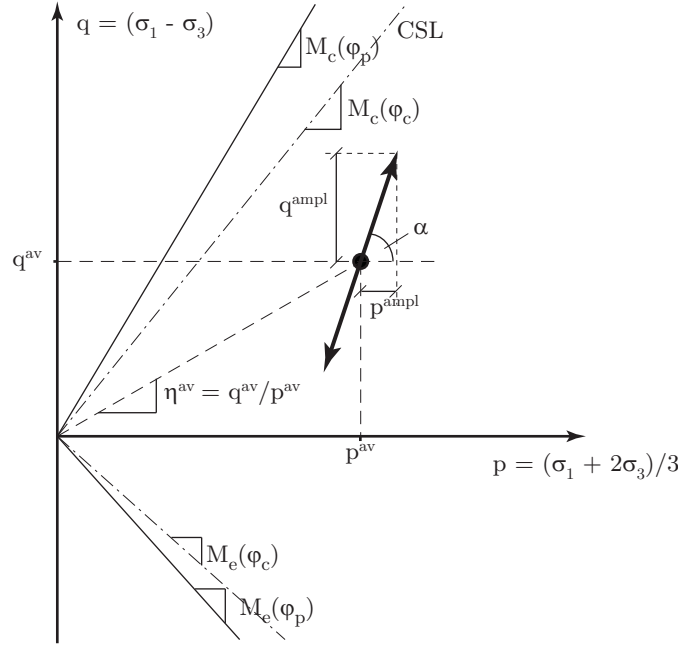


Abbildung 2.4: Dräniertes Triaxialversuch: Spannungspfad in der  $p$ - $q$ -Ebene, nach Wichtmann [108]

Die Abbildung 2.4 stellt einen Spannungspfad in der  $p$ - $q$ -Ebene dar, der für einen zyklischen dränierten Triaxialversuch typisch ist. Dabei wird ein mittlerer Spannungszustand (Zustand der Probe nach der Konsolidierung) mit einem zyklischen Lastanteil überlagert. Der Anfangszustand wird durch die mittlere Deviatorspannung  $q^{av}$  und den mittleren Druck  $p^{av}$  bzw.  $\eta^{av}$  beschrieben. Der Spannungspfad ist eine Gerade mit der Neigung  $\tan \alpha = q^{ampl}/p^{ampl}$  (Abbildung 2.4), wenn die Spannungen in axialer und radialer Richtung  $\sigma_1(t)$  und  $\sigma_3(t)$  ohne Phasenversatz in der Zeit  $t$  oszillieren. Bei den meisten Fällen wird die radiale Spannung konstant gehalten ( $\sigma_3^{ampl} = 0$ ), hier gilt  $\tan \alpha = 3$  und das Amplitudenverhältnis ist

$$\zeta = \frac{q^{ampl}}{p^{av}} = \frac{\sigma_1^{ampl}}{p^{av}} \quad (2.11)$$

Wenn bei zyklischer Belastung die Spannungen  $\sigma_1(t)$  und  $\sigma_3(t)$  mit einer Phasenverschiebung in der Zeit  $t$  aufgebracht werden, können komplexere Spannungspfade getestet werden, z. B. Ellipsen in der  $p$ - $q$ -Ebene (Abschnitt 2.6.4).

### 2.2.2 Dehnungen im Triaxialversuch

Im Triaxialversuch wird die Dehnung in axialer Richtung mit  $\varepsilon_1$  und diejenige in radialer Richtung mit  $\varepsilon_2 = \varepsilon_3$  bezeichnet. In der vollen tensoriellen Notation wird ein Dehnungszustand nach folgender Form:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_1 & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_2 & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_3 \end{pmatrix} \quad (2.12)$$

beschrieben. Für die Darstellung der Laborergebnisse werden unterschiedliche Dehnungsinvarianten verwendet:

$$\text{Volumendehnung:} \quad \varepsilon_v = \varepsilon_1 + 2\varepsilon_3 \quad (2.13)$$

$$\text{Deviatordehnung:} \quad \varepsilon_q = \frac{2}{3}(\varepsilon_1 - \varepsilon_3) \quad (2.14)$$

$$\text{Scherdehnung:} \quad \gamma = \varepsilon_1 - \varepsilon_3 \quad (2.15)$$

$$\text{Totale Dehnung:} \quad \varepsilon = \sqrt{(\varepsilon_1)^2 + (\varepsilon_2)^2 + (\varepsilon_3)^2} \quad (2.16)$$

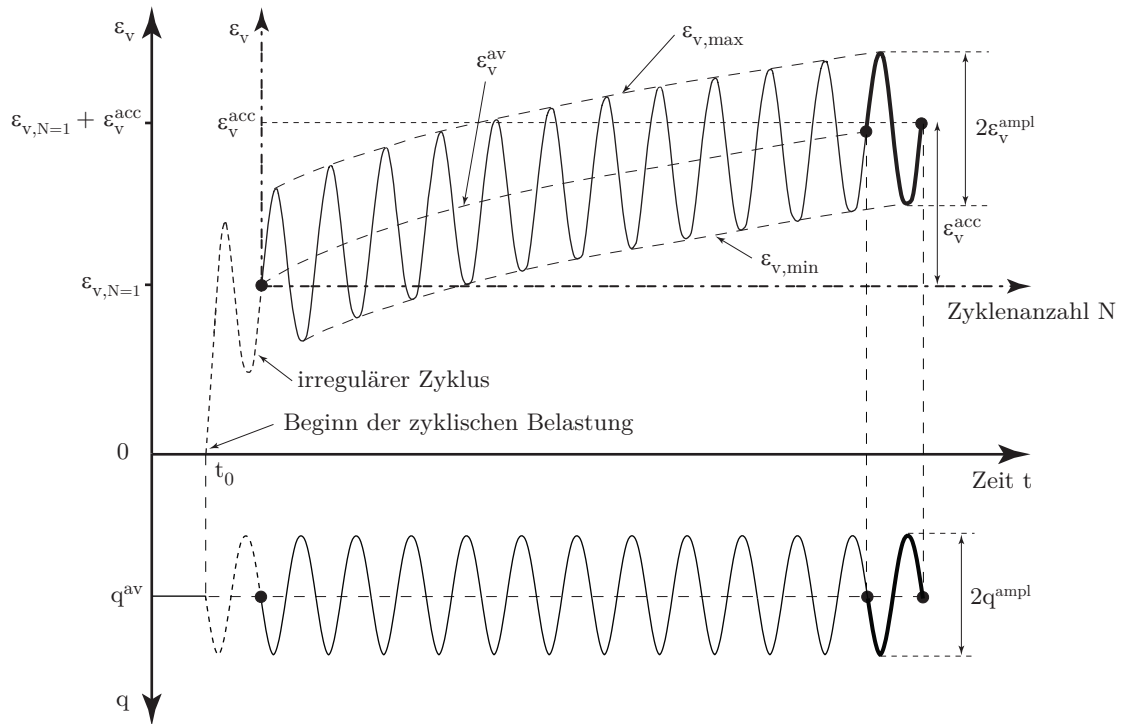


Abbildung 2.5: Akkumulierte Dehnung einer zyklischen Belastung im Triaxialversuch

## 2 Definitionen

Infolge einer zyklischen Beanspruchung setzt sich die gesamte Dehnung aus einem bleibenden Anteil (akkumulierte Dehnung) und einem elastischen Anteil (zyklische Amplitude) zusammen. Die Akkumulation resultiert aus der nicht vollständig geschlossenen Dehnungsschleife. Die Abbildung 2.5 zeigt schematisch diese Anteile für die volumetrische Dehnung eines typischen dränierten Triaxialversuchs. Der Versuchsanfang ( $t_0$ ) wird im Zeitpunkt, wo die zyklische Belastung aufgebracht wird, definiert. Die Dehnungen  $\varepsilon_v$  und  $\varepsilon_1$  beziehen sich auf die Abmessungen der Probe ( $V_0$  und  $h_0$ ) in diesem Zeitpunkt.

Die Dehnungsrate bei einer zyklischen Belastung wird als Ableitung der Dehnung nach der Anzahl der Zyklen berechnet ( $\dot{\varepsilon} = \partial\varepsilon/\partial N$ ). Die diskrete Zyklenanzahl  $N$  wird als „geglättete“ kontinuierliche Variable betrachtet. Der erste Zyklus eines Versuchs verursacht aufgrund der geringen Steifigkeit der Probe bei der monotonen Erstbelastung eine viel größere Verformung im Vergleich zu den nachfolgenden Zyklen (Abbildung 2.5). Dieser Zyklus wird als „irregulärer Zyklus“ bezeichnet und wird besonders behandelt. Im Akkumulationsmodell werden nur die „regulären Zyklen“ berücksichtigt, d.h. der Zyklenzähler  $N = 0$  fängt mit dem zweiten Zyklus an. Im nachfolgenden Abschnitt wird der akkumulierte Dehnungsanteil ohne den ersten Zyklus mit dem hochgestellten Index „acc“ gekennzeichnet.

Allgemein kann der Dehnungszustand unter zyklischer Beanspruchung durch die Akkumulationsintensität  $\varepsilon^{\text{acc}}$  (Akkumulation der totalen Dehnungsinvariante) und die Akkumulationsrichtung  $\omega$  (das Verhältnis der volumetrischen und der deviatorischen Dehnung) beschrieben werden.

$$\omega = \frac{\varepsilon_v^{\text{acc}}}{\varepsilon_q^{\text{acc}}} \quad (2.17)$$

## 2.3 Einfachscher Versuch

### 2.3.1 Spannungen im Einfachscher Versuch

Die Einfachscher Versuche in der vorliegenden Arbeit wurden an trockenen Proben durchgeführt. Dabei entsteht kein Porenwasserdruck. Somit liegen sämtliche Spannungen als effektive Spannungen vor und werden nicht durch ein hochgestelltes Komma bezeichnet. Die im Laborversuch gemessenen Spannungskomponenten sind die Normalspannung  $\sigma_{yy}$  und die Schubspannung  $\tau_{yx}$ . Die horizontale Normalspannung  $\sigma_{xx}$  während der Konsolidierungsphase kann mit

$$\sigma_{xx} = K_0 \cdot \sigma_{yy} \quad (2.18)$$

abgeschätzt werden (Silver & Seed [98]). Darin ist  $K_0$  der Erdruchdruckbeiwert. Dieser Faktor ist in den meisten Fällen unbekannt und wird mit der Jaky-Formel  $K_0 = 1 - \sin(\varphi)$  angesetzt (Jaky [47]). Wegen der fehlenden Information über die Normal- und Schubspannung an den Seitenflächen, kann der Spannungszustand während der Scherbeanspruchung nur mit Hilfe einiger Annahmen dargestellt werden. Darauf wird im Abschnitt 5.2.4 detailliert eingegangen.

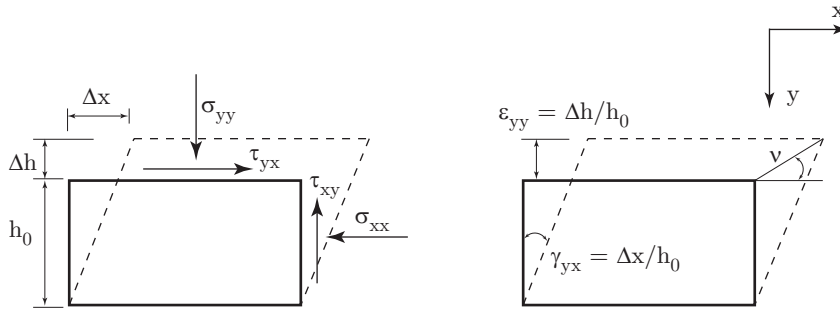


Abbildung 2.6: Spannungen und Dehnungen im Einfeldscherversuch

In einem zyklischen Einfeldscherversuch wird meistens entweder die Schubspannung  $\tau_{yx}$  (kraftgesteuert) oder die Schubverzerrung  $\gamma_{yx}$  (weggesteuert) oszilliert. Nach der Konsolidierung wird eine zyklische Belastung mit  $\tau^{\text{ampl}}$  (oder  $\gamma^{\text{ampl}}$ ) dem mittleren Zustand  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  (oder  $\gamma_{yx}^{\text{av}}$ ) überlagert.

Die Spannungs- und Dehnungsamplitude werden nach folgenden Gleichungen berechnet:

$$\tau_{yx}^{\text{ampl}} = \frac{(\tau_{yx,\text{max}} - \tau_{yx,\text{min}})}{2}, \quad \gamma_{yx}^{\text{ampl}} = \frac{(\gamma_{yx,\text{max}} - \gamma_{yx,\text{min}})}{2} \quad (2.19)$$

### 2.3.2 Dehnungen im Einfeldscherversuch

Der Name *Einfache Scherung* („Simple Shear“) bezeichnet die Art der Probenverformung während einer Scherbeanspruchung. Dabei wird der Probe eine ebene Verformung aufgezwungen. Die Schubverzerrung  $\gamma_{yx}$  und die axiale Dehnung  $\varepsilon_{yy}$  (Abbildung 2.6) können aus den gemessenen Verschiebungen des Probenrandes wie folgt berechnet werden:

$$\gamma_{yx} = \Delta x/h_0 \quad \varepsilon_{yy} = \Delta h/h_0 \quad (2.20)$$

Es ist dabei wichtig, dass in der horizontalen Richtung keine Verformungen zugelassen werden ( $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{zz} = 0$ ). Aus dieser Bedingung hat der Dehnungstensor einer Bodenprobe im Einfeldscherversuch nachfolgende Belegung:

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} 0 & \gamma_{yx}/2 & 0 \\ \gamma_{yx}/2 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.21)$$

Die Dehnungsinvarianten Volumendehnung  $\varepsilon_v$  und deviatorische Dehnung  $\varepsilon_q$  können aus dem Dehnungstensor nach folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$\varepsilon_v = \text{tr} \boldsymbol{\varepsilon} = \varepsilon_{yy} \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \|\boldsymbol{\varepsilon}^*\| = \frac{2}{3} \sqrt{\varepsilon_{yy}^2 + \frac{3}{4} \gamma_{yx}^2} \quad (2.23)$$

## 2 Definitionen

Die totale Dehnungsinvariante lässt sich aus  $\gamma_{yx}$  und  $\varepsilon_{yy}$  berechnen:

$$\varepsilon = \|\boldsymbol{\varepsilon}\| = \sqrt{\varepsilon_{yy}^2 + \frac{\gamma_{yx}^2}{2}} \quad (2.24)$$

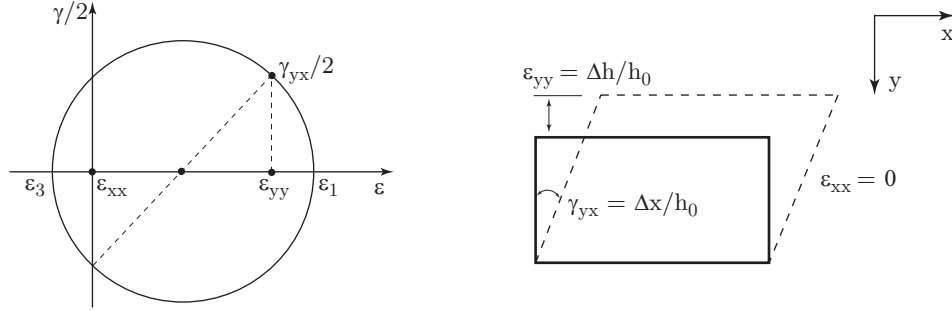


Abbildung 2.7: Morscher Dehnungskreis für den Verformungszustand im Einfachscherversuch

Mit der Voraussetzung  $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{zz} = 0$  kann der Morsche Dehnungskreis für den Dehnungszustand in der Probe konstruiert werden (Abbildung 2.7). Die Hauptkomponenten der Dehnung  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_3$  können anhand des Dehnungskreises über die Gleichung

$$\varepsilon_1 = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{yy}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{yx}}{2}\right)^2} + \frac{\varepsilon_{yy}}{2} \quad \text{und} \quad \varepsilon_3 = -\sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{yy}}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{yx}}{2}\right)^2} + \frac{\varepsilon_{yy}}{2} \quad (2.25)$$

ermittelt werden (ebener Dehnungszustand:  $\varepsilon_2 = 0$ ). Damit kann der Verformungszustand der Probe direkt über die Schubverzerrung  $\gamma_{yx}$  und die axiale Dehnung  $\varepsilon_{yy}$  dargestellt werden.

Im Einfachscherversuch wird bei einer zyklischen Beanspruchung der Dehnungstensor für die Amplitude  $\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{ampl}}$  (in der Gleichung 2.4) mit den Komponenten:

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{ampl}} = \begin{pmatrix} 0 & \gamma_{yx}^{\text{ampl}}/2 & 0 \\ \gamma_{yx}^{\text{ampl}}/2 & \varepsilon_{yy}^{\text{ampl}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \quad (2.26)$$

belegt. Die Intensität der Amplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  (skalare Größe, Amplitude der totalen Dehnungsinvariante) berechnet sich aus der Norm der Dehnungsmatrix:

$$\varepsilon^{\text{ampl}} = \|\boldsymbol{\varepsilon}^{\text{ampl}}\| = \sqrt{(\varepsilon_{yy}^{\text{ampl}})^2 + \frac{(\gamma_{yx}^{\text{ampl}})^2}{2}} \quad (2.27)$$

Ähnlich wie beim zyklischen Triaxialversuch wird der erste Zyklus aufgrund der signifikant größeren Dehnung (irregulärer Zyklus) gesondert behandelt (Abbildung 2.5). Die Dehnungen werden auf die Anfangshöhe ( $h_0$ ), d.h. auf die Höhe der Probe direkt vor dem Anfang der zyklischen Belastung, bezogen.



## 2.4 Resonant Column Versuch

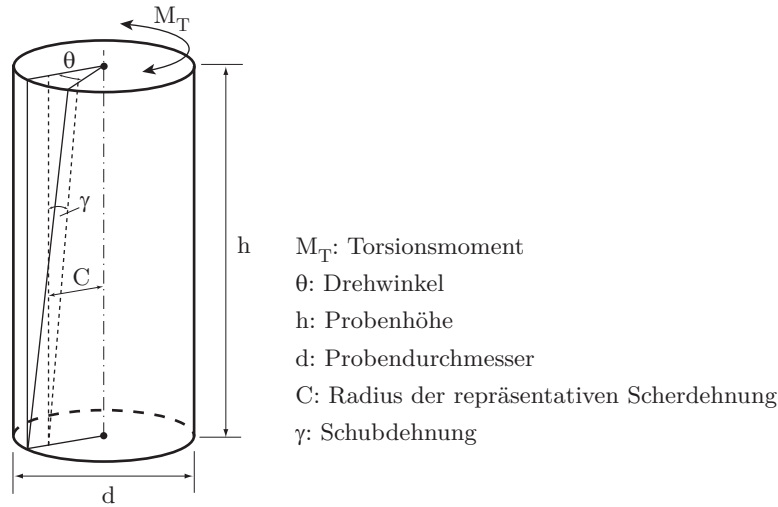


Abbildung 2.8: Probendehnung im Resonant Column Versuch, nach Rackwitz [85]

Die Schubdehnung  $\gamma$  an einer Vollzylinderprobe beim Resonant Column Versuch ist über den Radius nicht gleichmäßig und wird daher an einem repräsentativen Radius berechnet (Abbildung 2.8). Diese repräsentative Schubdehnung wird als Mittelwert über das Probenvolumen behandelt. Die Schubdehnung  $\gamma$  lässt sich aus der Probenhöhe  $h$ , dem Probendurchmesser  $d$  und dem Drehwinkel  $\theta$  am repräsentativen Radius  $C$  berechnen:

$$\gamma = \frac{B \cdot d \cdot \theta}{2h} \quad \text{und} \quad B = \frac{2C}{d} \quad (2.28)$$

Der Faktor  $B$  übermittelt der Ort des repräsentativen Radius. Er wird in der Literatur oft mit  $B = 0,8$  (ASTM [8]) oder teilweise auch mit  $B = 0,7$  (Haupt [36]) angesetzt.

Die Berechnung des Schubmoduls  $G$  basiert auf dem Prinzip der Scherwellenausbreitung in einem elastischen Zylinder. Aus dem gemessenen Resonanzzustand mit der Resonanzfrequenz  $f_R$ , der Probenhöhe  $h$  und der Probendichte  $\rho$  wird die Scherwellengeschwindigkeit  $v_s$  und damit der Schubmodul  $G$  aus folgenden Gleichungen ermittelt:

$$v_s = \frac{2\pi f_R h}{\beta} \quad \text{und} \quad G = \rho \cdot v_s^2 \quad (2.29)$$

Der Parameter  $\beta$  wird iterativ aus der Gleichung

$$\frac{I}{I_0} = \beta \tan \beta \quad (2.30)$$

berechnet. Darin ist  $I$  das polare Massenträgheitsmoment der Probe und  $I_0$  das polare Massenträgheitsmoment des Antriebssystems, das anhand von Kalibrierproben experimentell ermittelt wird.

Die volumetrische Grenzscherdehnungsamplitude  $\gamma_{tv}$  (engl. „*volumetric cyclic threshold shear strain*“) nach Vucetic [106] kann anhand der axialen Dehnung der Probe im Resonant Column Versuch bestimmt werden. Die irreversible vertikale Dehnung markiert den Übergang von elastischem zu inelastischem Verhalten der Probe. Ermittelt wird die Scheramplitude, bei der eine messbar bleibende Dehnung der Probe festgestellt wird.

## 2.5 Porenvolumen

Die Änderung des Porenvolumens während der Belastung ist ein entscheidendes Kriterium für das Verhalten des Bodens. Mit der Zunahme oder Abnahme des Porenraums ändern sich auch andere Eigenschaften (z. B.: Schubmodul, Reibungswinkel usw.). Die Größe des Porenraums wird in der vorliegenden Arbeit mit der Porenzahl  $e$  beschrieben. Der Zustand der Probe kann durch die relative Lagerungsdichte  $I_D$  dargestellt werden. Mit  $I_{D0}$  wird der Anfangswert der Lagerungsdichte zu Beginn eines Versuchs bezeichnet. Die Lagerungsdichte  $I_D$  berechnet sich aus den Porenzahlen  $e_{\min}$ ,  $e_{\max}$  oder aus Trockendichten  $\varrho_{d,\max}$ ,  $\varrho_{d,\min}$  (nach DIN 18126 [26]) bei dichtester, lockerster Lagerung und der Porenzahl  $e$  (oder Trockendichte  $\varrho_d$ ) wie folgt:

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{\varrho_{d,\max}}{\varrho_d} \frac{\varrho_d - \varrho_{d,\min}}{\varrho_{d,\max} - \varrho_{d,\min}} \quad (2.31)$$

## 2.6 Begriffe

### 2.6.1 Zyklische und dynamische Belastung

Allgemein werden in der Literatur die Begriffe „zyklische“ und „dynamische“ Beanspruchung häufig verwendet. Dabei ist eine eindeutige Zuordnung der beiden Begriffe oft schwierig. Hinsichtlich des bodenmechanischen Verhaltens und der Wechselwirkung Bauwerk-Baugrund-System hat Gotschol [33] folgende Definitionen für „zyklisch“ und „dynamisch“ vorgestellt:

- Der Begriff „zyklische Beanspruchung“ bezeichnet den langanhaltenden Belastungswechsel mit elastischen und plastischen Dehnungsanteilen. Dabei sind die Trägheitskräfte nicht wirksam oder können vernachlässigt werden. Das Materialverhalten kann mit elastisch-plastischen Modellvorstellungen beschrieben werden.
- „Dynamische Beanspruchung“ bezeichnet die zeitlich veränderlichen Belastungen von begrenzter Dauer mit dominierendem elastischen Bodenverhalten. Die Trägheitskräfte sind wirksam und müssen berücksichtigt werden. Der plastische Dehnungsanteil ist vernachlässigbar klein, so dass das Bodenverhalten als rein elastisch betrachtet werden kann.

Für verschiedene Anregungen, die nicht eindeutig nach der o.g. Definitionen der dynamischen und zyklischen Beanspruchungen zugeordnet werden können, wurde außerdem der Begriff „zyklisch-dynamisch“ eingeführt. Dies ist notwendig, da eine klare Abgrenzung zwischen dynamisch und zyklisch praktisch nicht erfolgen kann. Nach der Empfehlung von Gotschol [33] können die Beanspruchungen abhängig von der Lastfrequenz nach der Tabelle 2.1 zugeordnet werden. Die Einteilung des Frequenzbereichs wurde unter Berücksichtigung der Trägheitskräfte und der plastischen sowie der elastischen Dehnungen des Baugrundmaterials getroffen.

| zyklisch                    | zyklisch-dynamisch           | dynamisch           |
|-----------------------------|------------------------------|---------------------|
| $0 < f \leq 1,0 \text{ Hz}$ | $1,0 < f \leq 10 \text{ Hz}$ | $f > 10 \text{ Hz}$ |

Tabelle 2.1: Frequenzbereiche der Beanspruchungen, nach Gotschol [33]

## 2.6.2 Hochzyklische und polyzyklische Belastung

Der Begriff „hochzyklische“ oder „polyzyklische“ Belastung wurde vor allem in Verbindung mit dem Akkumulationsmodell (Niemunis et al. [76]) geprägt. Hinsichtlich des Anwendungsbereichs dieses Modells kann eine zyklische Beanspruchung hochzyklisch genannt werden, wenn das Randwertproblem aufgrund des großen akkumulierten Fehlers der numerischen Berechnung unter Anwendung eines inkrementellen Stoffgesetzes nicht behandelt werden kann. Eine exakte Grenzzyklenzahl wurde bisher nicht definiert. Nach Triantafyllidis et al. [105] wird eine zyklische Belastung ab  $10^2$  Zyklen „polyzyklisch“ genannt, und nach Niemunis et al. [76] oder Wichtmann et al. [111] ab  $10^3$  Zyklen.

## 2.6.3 Wechsellast und Schwelllast

Die Begriffe Wechsellast und Schwelllast werden oft in den Modellversuchen verwendet. In der Abbildung 2.9 wird beispielsweise anhand der Dehnungszyklen die Wechsellast und Schwelllast erklärt. Allgemein versteht man unter einer Schwellbelastung eine Beanspruchung, bei der die Probe periodisch abwechselnd nur mit einer Zug- oder einer Druckbelastung beaufschlagt wird. Im Fall einer zyklischen Belastung mit konstanter Amplitude kann zwischen Wechsel- und Schwelllast wie folgt unterschieden werden: eine zyklische Belastung wird als Schwelllast bezeichnet, wenn die Amplitude betragsmäßig kleiner als die mittlere Lage ist ( $|\varepsilon^{\text{ampl}}| \leq |\varepsilon^{\text{av}}|$  mit  $\varepsilon^{\text{av}} = (\varepsilon_{\text{max}} - \varepsilon_{\text{min}})/2$ ). Bei  $|\varepsilon^{\text{ampl}}| > |\varepsilon^{\text{av}}|$  spricht man dagegen von einer Wechselbeanspruchung.

## 2.6.4 Unidirektionale und multidirektionale Belastung

Mit unterschiedlichen Begriffen wie „Multiaxial“, „Multidimensional“ oder „Multidirektional“ wird die Form der Belastungen in experimentellen Untersuchungen

## 2 Definitionen

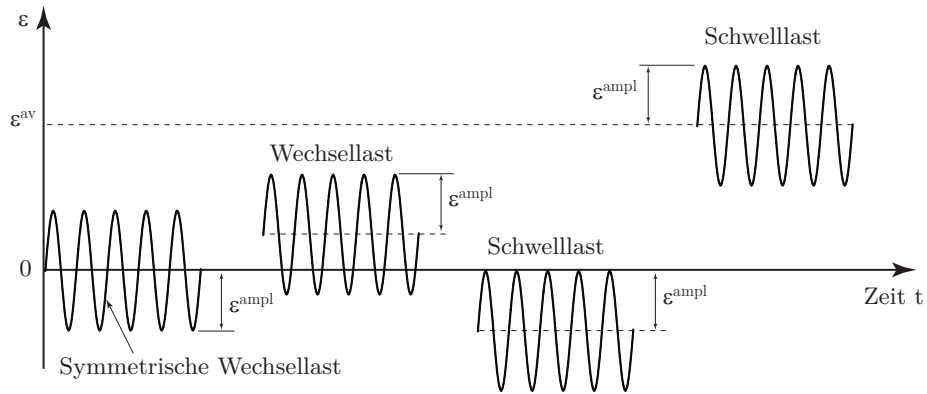


Abbildung 2.9: Schematische Darstellung der Wechsellast und Schwelllast

bezeichnet, in denen sich die Belastungsrichtung (oder Polarisation der zyklischen Beanspruchung) ändert. In der vorliegenden Arbeit wird in den nachfolgenden Abschnitten generell der Begriff „Multidirektional“ verwendet. Abhängig von den Versuchstypen wird die Belastungsform unterschiedlich definiert. Anhand der Spannung wird hier die Definition einer multidirektionalen Belastung erläutert (Abbildung 2.10).

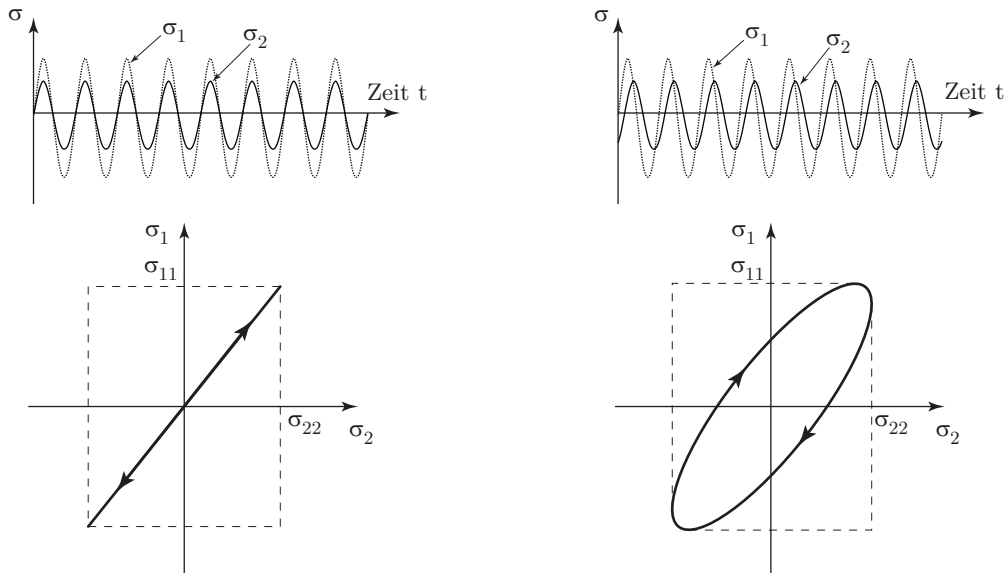


Abbildung 2.10: Unidirektionale Zyklen (links) und multidirektionale Zyklen (rechts)

Allgemein kann ein zyklischer Spannungszustand in der Form  $\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^{\text{av}} + \boldsymbol{\sigma}^{\text{ampl}}$  dargestellt werden. Hierbei wird für die Definition der multidirektionalen Belastung nur der zyklische Anteil  $\boldsymbol{\sigma}^{\text{ampl}}$  betrachtet. Durch die Hauptachsentransformation

kann der Spannungstensor in einem diagonalen Tensor dargestellt werden:

$$\boldsymbol{\sigma}(t) = \boldsymbol{\sigma}^{\text{av}} + \begin{pmatrix} \sigma_1^{\text{ampl}} f_1(t) & & \\ & \sigma_2^{\text{ampl}} f_2(t) & \\ & & \sigma_3^{\text{ampl}} f_3(t) \end{pmatrix} \quad (2.32)$$

Die Komponenten des zyklischen Spannungstensors bestehen aus den skalaren Beträgen  $\sigma_i^{\text{ampl}}$  und den periodischen Funktionen  $f_i(t)$ . Die Spannungskomponenten oszillieren durch die Funktionen  $-1 \leq f_i(t) \leq 1$  in der Zeit  $t$  (z. B.: mit  $f_i(t) = \sin(t)$ ). Im Fall der unidirektionalen Belastung variieren sämtliche Komponenten des zyklischen Spannungsanteils  $\boldsymbol{\sigma}^{\text{ampl}}$  mit der gleichen Funktion  $f(t)$ :

$$\boldsymbol{\sigma}(t) = \boldsymbol{\sigma}^{\text{av}} + \begin{pmatrix} \sigma_1^{\text{ampl}} & & \\ & \sigma_2^{\text{ampl}} & \\ & & \sigma_3^{\text{ampl}} \end{pmatrix} f(t) \quad (2.33)$$

Wenn die Komponenten mit unterschiedlichen periodischen Funktionen variieren oder untereinander mit einer Phasenverschiebung  $\theta_i$  in der Zeit oszillieren, spricht man von einer multidirektionalen Belastung:

$$\boldsymbol{\sigma}(t) = \boldsymbol{\sigma}^{\text{av}} + \begin{pmatrix} \sigma_1^{\text{ampl}} f(t + \theta_1) & & \\ & \sigma_2^{\text{ampl}} f(t + \theta_2) & \\ & & \sigma_3^{\text{ampl}} f(t + \theta_3) \end{pmatrix} \quad (2.34)$$

Nach dieser Definition wird beim Triaxialversuch ein Zyklus als multidirektional bezeichnet, wenn die Spannungskomponenten  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  mit einer Phasenverschiebung variieren (Abbildung 2.10 rechts). Diese wurde von Niemunis „*out-of-phase*“ Zyklen genannt (OOP-Zyklen, Niemunis et al. [76]).

Beim Einfachscherversuch wird ein Zyklus als multidirektional bezeichnet, wenn die Normalspannung  $\sigma_{yy}$  und die Schubspannung  $\tau_{yx}$  gleichzeitig oszillieren oder die Schubspannung auch periodisch in  $x$ - und  $z$ -Richtung variationsfähig ist (Abbildung 2.11).

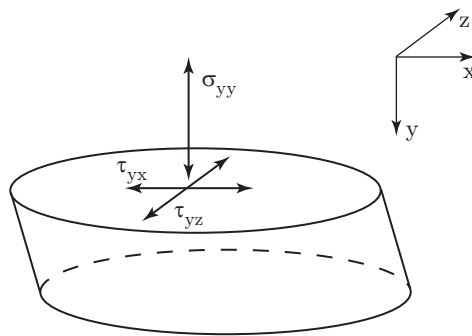


Abbildung 2.11: Variation der Spannungen im multidirektionalen Einfachscherversuch

### 2.6.5 Polarisation

Der Begriff „Polarisation“ wird in der Mechanik, elektromagnetischer Physik sowie in der Kern- und Teilchenphysik verwendet. Generell beschreibt dieser Begriff die Richtung der Schwingung einer Welle. Bei der Transversalwelle schwingt das Teilchen in einer Ebene senkrecht zu der Wellenausbreitungsrichtung.

In der Bodenmechanik bezeichnet der Begriff „Polarisation“ nach Niemunis et al. [76] die Richtung der zyklischen Beanspruchung. Bei einer unidirektionalen Belastung (Abbildung 2.10 links) bleibt die Polarisation unverändert und bei multidirektionaler Belastung (Abbildung 2.10 rechts) ändert die Polarisation sich ständig.

# **3 Stand der Forschung zum Verhalten des Bodens unter zyklischer Beanspruchung**

## **3.1 Bodenmechanische Elementversuche mit zyklischen Belastungen**

Das Verhalten des Bodens bzw. die Wechselwirkung zwischen Boden und Bauwerk wurde bisher in vielen Studien auf verschiedene Art und Weise untersucht. Hierzu sind die experimentellen Untersuchungen in folgende Bereiche gegliedert:

- Elementversuche im Labor
- Klein- und großmaßstäbliche Modellversuche
- Modellversuche im erhöhten Schwerfeld (Zentrifugenversuche)
- Messungen auf realem Baufeld

Darunter sind Elementversuche die wichtigste und häufigste verwendete Technik, um das Bodenverhalten zu untersuchen. Hinsichtlich der zyklischen Belastung kommen hierfür verschiedene Geräte zum Einsatz. Die meisten Versuchstypen können sowohl Verformungen (Weggesteuert) als auch Spannungen oder Kräfte (Kraftgesteuert) auf die Proben einprägen. Verschiedene Randbedingungen können auch simuliert werden, z. B.: konstante mittlere Spannung, vollständig dränierte Bedingung, Volumenkonstanz oder undräßierte Bedingung, konstante Steifigkeit usw. Das Ziel ist es, die Böden für die Untersuchung im Labor so herzustellen, dass die Spannungszustände, die Belastungen, das Korngerüst sowie andere Umstände Realitätsgetreu abgebildet werden können. Gleichzeitig sollen die Laborversuche gut reproduzierbar sein, die Fehlerquellen bei der Versuchsdurchführung müssen minimiert werden oder müssen bei der Auswertung und Präsentation der Ergebnisse berücksichtigt werden. Die Annahme bzw. Vereinfachung bei der Versuchsauswertung muss repräsentativ sein. Im Folgenden werden die für die Untersuchung des zyklischen Verhaltens von Böden gängigsten verwendeten Geräte vorgestellt.

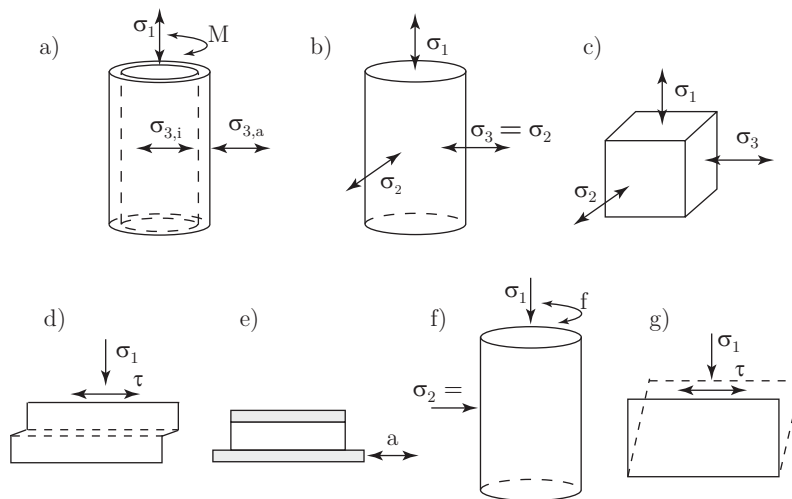


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung von Laborversuchen zur Untersuchung des zyklischen Bodenverhaltens: a) Torsionsscherversuch, b) Triaxialversuch, c) Echter Triaxialversuch, d) Rahmenscherversuch, e) Rütteltischversuch, f) Resonant Column Versuch, g) Einfachscherversuch

#### 3.1.1 Torsionsscherversuch an Hohlzylinderproben

Der Torsionsscherversuch an Hohlzylinderproben (Abbildung 3.1a) ist einer der anspruchsvollsten Versuche hinsichtlich des Probeneinbaus, der Versuchstechnik sowie der Versuchsdurchführung. Beim Torsionsscherversuch kann man die innere und äußere Spannung ( $\sigma_{3,i}$  und  $\sigma_{3,a}$ ) sowie die axiale Spannung und das Torsionsmoment ( $\sigma_1$  und  $M$ ) zyklisch kontrollieren. Durch die umfangreichen Steuerungsmöglichkeiten lassen sich die Proben mit dreidimensionalen Spannungspfaden belasten, hierbei kann auch ein sehr großer Verformungszustand bei der Torsionsbelastung erreicht werden.

Die Probe erfährt im Torsionsscherversuch eine Belastung ähnlich wie bei der einfachen Scherung (engl. „*simple shear deformation*“). Im Gegensatz zum Einfachscherversuch (engl. „*simple shear test*“), bei welchem in der Regel die horizontale Normalspannung nicht gemessen wird, können hier anhand der gemessenen Parameter der Spannungs- und Dehnungszustand genau berechnet werden (Prandel et al. [80], Pradhan et al. [81]). Ein entscheidender Vorteil des Torsionsscherversuchs gegenüber dem Triaxialversuch liegt darin, dass die Richtungen der Hauptspannungen während des Versuchs sich ständig verändern, was vielen praktischen geotechnischen Fragestellungen entspricht. Wegen der aufwendigen Versuchstechnik und der komplizierten Randbedingungen wird der Torsionsscherversuch an Hohlzylindern nur begrenzt eingesetzt. Beispielsweise wurde der Torsionsscherversuch von Hosono & Yoshimine [42], Tatsuoka et al. [103] oder Towhata & Ishihara [104] für die Untersuchung des Verflüssigungsverhaltens von Böden verwendet. Bei Ishibashi et al. [44] oder Shahnazari & Towhata [95] kam der Torsionsscherversuch zur Untersuchung des Verdichtungsverhaltens von Sand zum Einsatz.



#### 3.1.2 Triaxialversuch an zylindrischen Proben

Das Triaxialgerät bietet die Möglichkeit, die Probe unter der Bedingung des gleich bleibenden Seitendrucks und der unbehinderten Seitendehnung zu untersuchen. Im Triaxialversuch (Abbildung 3.1b) sind die Spannungen  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  die Hauptspannungen. Aus den Messungen von axialer und volumetrischer Verformung können die Hauptdehnungen  $\varepsilon_1$  und  $\varepsilon_3$  (Kapitel 2.2.1) berechnet werden. Dadurch sind der Spannungs- und Verformungszustand der Probe zu jedem Zeitpunkt des Versuchs bekannt.

Die Hauptspannungsrichtung bleibt während der Belastung unverändert oder kann um  $90^\circ$  drehen (Falls  $\sigma_3 > \sigma_1$ ). Im Triaxialversuch mit zylindrischen Proben wird meistens nur die Spannungskomponente  $\sigma_1$  zyklisch variiert, während der Zelldruck  $\sigma_2 = \sigma_3$  konstant gehalten wird. Demzufolge werden nur gerade Spannungspfade mit einer Neigung von 1:3 in der  $p$ - $q$ -Ebene getestet (Abbildung 2.4). Selten wird auch die radiale Spannung  $\sigma_3$  oszilliert (z. B. Wichtmann [108]). Falls  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  mit gleichen Phasen oszillieren, können gerade Spannungspfade mit verschiedenen Neigungen getestet werden. Wenn  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  mit unterschiedlichen Phasen schwingen, ergibt sich ein elliptischer Spannungspfad in der  $p$ - $q$ -Ebene. Durch den Versuch an rotations-symmetrischen Proben ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) kann hier allerdings nur ein zweidimensionaler Spannungszustand simuliert werden, da die Spannungspfade im Spannungsraum in einer Ebene liegen. Trotz des komplizierten Aufbaus und der Versuchsdurchführung wurde der Triaxialversuch wegen seiner einfachen Möglichkeit zur Darstellung des Spannungs- und Verformungszustands sehr häufig verwendet. Die zyklischen Triaxialversuche wurden bei Luong [64], Chang & Whitmann [21], Helm et al. [37] sowie in zahlreichen Untersuchungen von Wichtmann [108], Wichtmann et al. [109, 110, 111] zur Untersuchung des Verdichtungsverhalten von Böden eingesetzt.

#### 3.1.3 Echter Triaxialversuch an kubischen Proben

Obwohl sich der Begriff „Triaxialversuch“ bei der Prüfung zylindrischer Proben allgemein durchgesetzt hat, handelt es sich bei dieser Versuchstechnik nicht um einen „echten“ Triaxialversuch (engl. „*true triaxial test*“), da die beiden kleineren Hauptspannungen identisch sind ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ). Im „echten Triaxialversuch“ (Abbildung 3.1c) lassen sich alle drei Spannungskomponenten  $\sigma_1$ ,  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  separat unabhängig voneinander steuern. Dadurch können auch dreidimensionale Spannungspfade getestet werden.

Diese Versuche können nur an einem kubischen Prüfkörper durchgeführt werden. Dabei werden die Spannungen an den Probenflächen beispielsweise mittels Druckkissen aufgebracht. Die Probe kann wie beim Triaxialversuch an zylindrischen Proben unter dräniert oder undräniert bedingung getestet werden. Die Versuchstechnik sowie die Durchführung und Ergebnispräsentation eines echten Triaxialversuchs sind relativ aufwendig. Daher kommt dieser Versuchstyp nur in wenigen Untersuchungen zum Einsatz. Yamada & Ishihara [119] untersuchten den Einfluss der Richtungsänderung von Spannungspfaden auf das zyklische Verhalten von Sand mit

einem echten Triaxialgerät. Das Verformungs- und Verflüssigungsverhalten wurde mit dem gleichen Gerät an gesättigten Sandproben unter undrännierten Bedingungen untersucht (Yamada & Ishihara [120]).

#### 3.1.4 Rahmenscherversuch

Beim Rahmenscherversuch (Abbildung 3.1d) wird die Hälfte der Probe seitlich gehalten und die andere Hälfte wird auf einer horizontalen Fläche durch eine translatorische Bewegung des Scherrahmens zum Bruch gebracht. Der Spannungszustand in der Probe wird durch die Messung der Auflast und der Scherkraft vereinfacht über den Anfangsprobenquerschnitt berechnet (nach DIN 18137-3 [28]). Beim Rahmenscherversuch ist bekannt, dass durch das Einprägen einer Scherfuge in der Probe die Wirklichkeit der Beanspruchung auf Böden nicht korrekt abgebildet wird. Das Erzwängen einer Bruchfuge hat zur Folge, dass die Normal- und Schubspannungen an den Rändern sehr ungleichförmig und daher nur schwer zu beschreiben sind. Deswegen wird dieser Versuchstyp zur Untersuchung des zyklischen Bodenverhaltens nur selten eingesetzt. Der zyklische Rahmenscherversuch wurde in einigen Studien verwendet um den Kontaktbereich zwischen Boden und Gründungselementen zu untersuchen (Tabucanon [101], Malkus [65]). Im Helm et al. [37] wurden Verformungsverhalten und die Orientierung der Körner nach einer zyklischen Belastung im Rahmenscherversuch untersucht.

#### 3.1.5 Rütteltischversuch

Die Erdbebenbelastung einer Sandschicht kann im Rütteltischversuch simuliert werden (Abbildung 3.1e). Dabei wird eine flache gesättigte Bodenschicht eingebaut und unter undrännierter Bedingung getestet (de Alba et al. [4]). Durch die Anregung des Rütteltischs wird eine definierte Beschleunigung am Fuß der Bodenschicht eingeleitet. Anhand der Beschleunigung und der gemessenen Auslenkung des Probenkopfs sowie der Masse des Ballastgewichts kann die einwirkende Schubspannung auf der Bodenschicht berechnet werden.

Der Rütteltischversuch wurde hauptsächlich zur Untersuchung des Verflüssigungsverhaltens von Sandschichten unter Erdbebenbelastungen verwendet (de Alba et al. [4, 5]). Durch die Anordnung mehrerer Rütteltische aufeinander kann eine mehrdimensionale Belastung eines Erdbebens simuliert werden (Pyke et al. [83]).

#### 3.1.6 Resonant Column Versuch

Der Resonant Column Versuch (Abbildung 3.1f) ist ein Standardversuch zur Bestimmung der dynamischen Parameter von Bodenproben (dynamischer Schubmodul  $G_d$  und Dämpfung  $D$ ). Dabei wird eine zylindrische Probe durch harmonische Anregung in Torsionsschwingung um die Längsachse versetzt. Die Berechnung des Schubmoduls beruht auf der eindimensionalen Wellenausbreitung in einem elastischen Me-

### 3.1 Bodenmechanische Elementversuche mit zyklischen Belastungen

dium. Durch die dynamische Anregung breiten sich in der Probe Scherwellen aus. Anhand der Resonanzfrequenz und der Abmessungen der Probe wird die Wellenausbreitungsgeschwindigkeit berechnet, daraus kann der Schubmodul ermittelt werden. Zur Bestimmung der Materialdämpfung wird nach der Resonanzanregung der Probe die Abnahme der Amplitude infolge der Energiedissipation aufgezeichnet. Die Dämpfung lässt sich aus der Ausschwingungskurve über das logarithmischen Dekrement  $\delta$  ermitteln (Rackwitz [85]).

Der Resonant Column Versuch wurde auch zur Untersuchung der bleibenden Bodenverformung unter kleiner Dehnung verwendet. Nach Vucetic [106] werden der Übergangsbereich vom linearen zum nicht linearen Verhalten durch die sog. linear zyklische Grenzscherdehnung  $\gamma_{tl}$  und der Übergang von elastischen zum plastischen Verhalten durch die volumetrische zyklische Grenzscherdehnung  $\gamma_{tv}$  charakterisiert (siehe Abbildung 3.5, Abschnitt 3.2.1). Aus den Ergebnissen des Resonant Column Versuchs werden die Grenzscherdehnungen  $\gamma_{tl}$  und  $\gamma_{tv}$  durch die Abhängigkeit des Schubmoduls und der axialen Dehnung von der Scherdehnungsamplitude bestimmt. Außerdem wurde der Resonant Column Versuch für die Untersuchung des Einflusses der zyklischen Vorbelastung eingesetzt (Bai [12], Wichtmann & Triantafyllidis [114]).

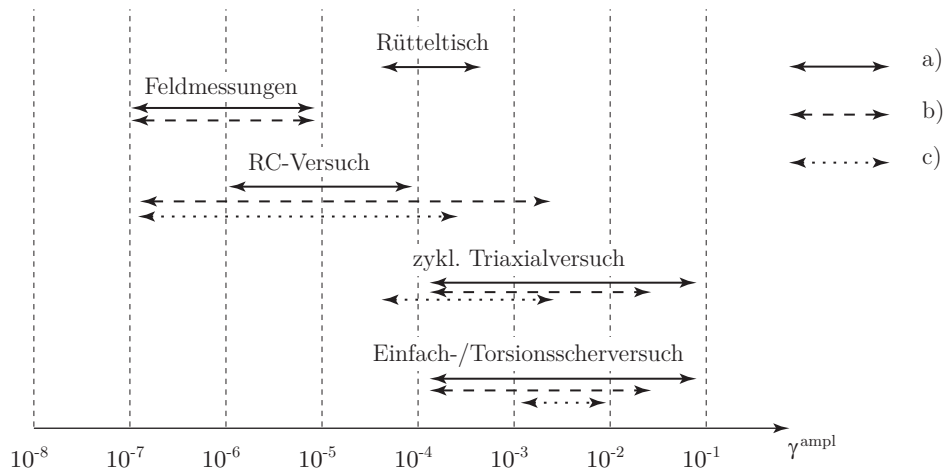


Abbildung 3.2: Typische Verzerrungsbereiche für unterschiedliche Versuche. a) Nach Klein, Grundbau Taschenbuch [57], b) Nach Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugrunddynamik“ [24], c) Nach Wichtmann [108]

Beim Resonant Column Versuch werden meistens nur sehr kleine Dehnungsamplituden hervorgerufen. Hier gibt es die Möglichkeit, die Probe in den Dehnungsbereichen zu testen, die durch andere Versuchstypen wegen der Genauigkeit der Messung oder der Steuerung meist nicht erreicht werden können (Abbildung 3.2). Mit einer Amplitude von ca.  $\gamma^{ampl} < 10^{-5}$  kann die Probe als nicht gestört angesehen werden (elastisches Materialverhalten). Dadurch können mit einer einzelnen Probe die Parameter für verschiedene Konsolidierungsspannungen bestimmt werden.

### 3.1.7 Einfeldscherversuch

Beim Einfeldscherversuch wird eine einfache Scherung auf die Probe eingeprägt (Abbildung 3.1g). Im Gegensatz zum Rahmenscherversuch, bei dem eine Bruchfuge in der Probe erzwungen wird, entsteht hier keine ausgeprägte Bruchfuge. Es wird vorausgesetzt, dass während der Konsolidierungsphase die  $K_0$ -Bedingung in der Probe herrscht. Das bedeutet, eine seitliche Dehnung der Probe muss ausgeschlossen werden (Abbildung 2.6:  $\varepsilon_{xx} = \varepsilon_{zz} = 0$ ). Während der Konsolidierungsphase ist die größere Hauptspannung gleich der vertikalen Auflast  $\sigma_1 = \sigma_{yy}$  und die horizontale Spannung, d. h. die kleinere Hauptspannung, ist  $\sigma_3 = \sigma_{xx} = K_0 \cdot \sigma_{yy}$ , die Schubspannung ist  $\tau_{yx} = 0$ . Beim Abscheren baut sich die Schubspannung  $\tau_{yx}$  auf der Probenoberfläche auf und führt dazu, dass sich die Hauptspannungen verändern. Dadurch können viele praktische geotechnische Fragestellungen realitätsnah abgebildet werden, z. B. eine Beanspruchung eines Bodenelements entlang der Bruchfuge (Airey et al. [3], Anderson et al. [6]) oder die Belastung des Bodenelements an einem axial belasteten Pfahl (Randolph & Wroth [87]).

Seit den 50er Jahren wurden zahlreiche Forschungen veröffentlicht, die das Verhalten des Bodens mit dem Einfeldschergerät untersucht haben. Dabei wurden viele Gerätetypen entwickelt, die in den Probenabmessungen und dem Zellaufbau unterschiedlich waren. Der Einfeldscherversuch wurde erstmals im Jahre 1936 am damaligen Königlichen Schwedischen Geotechnischen Institut (SGI) von Kjellman [56] entwickelt und in diversen Testreihen mit bindigen Böden eingesetzt. Roscoe [88] stellte im Jahr 1953 das Gerät Typ *Cambridge* mit starren Seitenwänden aus Stahl vor. Dieses Gerät wurde mehrmals optimiert und für zahlreiche Untersuchungen von Cole [22] und Stroud [100] eingesetzt. Daneben wurde von Bjerrum & Landva [16] das NGI-Gerät (eine Erweiterung des Gerätetyps SGI) entwickelt, das durch seine einfache Handhabung auch oft kommerziell eingesetzt wurde und in den Laboratorien in vielen Variationen vorhanden ist. Zu der Erweiterung des SGI-Geräts gehört auch das Gerät der BAW (Franke et al. [31]) und das von Kovacs & Leo [60].

Ein bekanntes Problem des Einfeldscherversuchs ist die ungleichmäßige Spannungs- und Verformungsverteilung in der Probe. Die inhomogene Spannungsverteilung nimmt mit zunehmender Probenverformung zu. Durch viele Verbesserungen an der Probenzelle konnte dieser Nachteil nur teilweise behoben werden. Daher wird der Einfeldscherversuch nur für Versuche bis zu einer bestimmten Verformung empfohlen. Diese Problematik wird in der vorliegenden Arbeit im Abschnitt 4.2.4 detailliert erläutert. Außerdem wird die horizontale Spannung  $\sigma_{xx}$  nur selten gemessen, so dass der Spannungszustand in der Probe nicht direkt aus den gemessenen Parametern dargestellt werden kann. Jedoch kann der Spannungszustand mit Hilfe einiger Annahmen ermittelt werden (Abschnitt 5.2.4).

Die meisten Einfeldschergeräte sind nur für die Scherbelastung in einer Achse konzipiert. Damit kann nur ein zweidimensionaler Zustand abgebildet werden. Durch die Erweiterung der Belastungsmechanismen um eine weitere horizontale Achse ist es möglich, komplexere Spannungspfade zu testen. Der multidirektionale Einfeldscherversuch wurde bisher nur in einigen Untersuchungen verwendet. Bei Kammerer [50], Ishihara & Nagase [45] sowie Nagase & Ishihara [71] wurde das multidirektionale Ein-

fachschergerät für die Untersuchung des Verflüssigungsverhaltens von Böden unter Erdbebenbelastung eingesetzt. Wichtmann [108] untersuchte die Volumenänderung von rolligen Böden unter kreisförmigen zyklischen Scherbelastungen mit einem multidimensionalen Einfeldschersgerät (CMDSS-Gerät).

## 3.2 Zyklisches Bodenverhalten unter unidirektionaler Belastung

In diesem Abschnitt wird der Kenntnisstand über das allgemeine Verformungsverhalten von nichtbindigen Böden unter unidirektionaler zyklischer Belastung (ohne Änderung der Lastrichtung) zusammengefasst. Hinsichtlich der bleibenden Verformungen wird hier das zyklische Bodenverhalten unter unterschiedlichen Einflüssen vorgestellt. Die wesentlichen Ergebnisse aus der Literatur bezüglich der Intensität der Akkumulation, der Akkumulationsrichtung werden vorgestellt und diskutiert.

### 3.2.1 Intensität der Akkumulation

#### Einfluss der mittleren Spannung

Die Einwirkung der mittleren Spannung auf die Dehnungsakkumulation wurde in verschiedenen Studien umfangreich untersucht. Es wurden dabei hauptsächlich dränierte Triaxialversuche oder dränierte Einfeldscherversuche (Versuch mit konstanter Auflast oder „nicht volumenkonstanter“ Versuch) eingesetzt.

In einer der ersten Studien haben Silver & Seed [98, 97] und Youd [121] das Verdichtungsverhalten von Sand im Einfeldscherversuch untersucht. Die zyklische Belastung wurde hier weggesteuert aufgebracht und hatte eine Amplitude in einem breiten Bereich von ca.  $10^{-4}$  bis  $10^{-1}$ . Es wurde festgestellt, dass die axiale Dehnung nicht von der Normalspannung  $\sigma_{yy}$  abhängig ist. In der späteren Studie von Sawicki & Swidzinski [93] wurde die Unabhängigkeit der Volumenänderung von der Normalspannung nochmals bestätigt.

Im Gegensatz zu den Ergebnissen des Einfeldscherversuchs zeigt die Verformung von Sand im kraftgesteuerten zyklischen Triaxialversuch widersprüchliches Verhalten. Marr & Christian [66] untersuchten das zyklische Verformungsverhalten von Sand im dränierten Triaxialversuch. Die Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlicher mittlerer Spannung bei vergleichbarer zyklischer Beanspruchung zeigen, dass die Akkumulation bei axialer sowie bei volumetrischer Dehnung mit der steigenden Mittelspannung zunimmt, d. h. die größere Mittelspannung verstärkt die Verformung der Probe.

In einer späteren Studie von Wichtmann [108] wurde ein umfangreiches Testprogramm mit zyklischen dränierten Triaxialversuchen durchgeführt. Um den Einfluss der mittleren Spannung auf das Verformungsverhalten zu untersuchen, wurden dichte Sandproben unter verschiedenen Drücken von  $p^{av} = 50 - 300$  kPa getestet, dabei

### 3 Stand der Forschung

wurden die andere Parameter ( $\eta^{\text{av}}$ ,  $\zeta$  und  $I_{\text{D0}}$ ) konstant gehalten. In der Abbildung 3.3 sind die totalen Dehnungen  $\varepsilon^{\text{acc}}$  über die Zyklenanzahl  $N$  aufgetragen. Es ist offensichtlich, dass die akkumulierte Dehnung von der mittleren Spannung abhängig ist, besonders im Bereich von  $10^4$  bis  $10^5$  Zyklen. Je größer der Druck ist, desto geringer ist die Akkumulation.

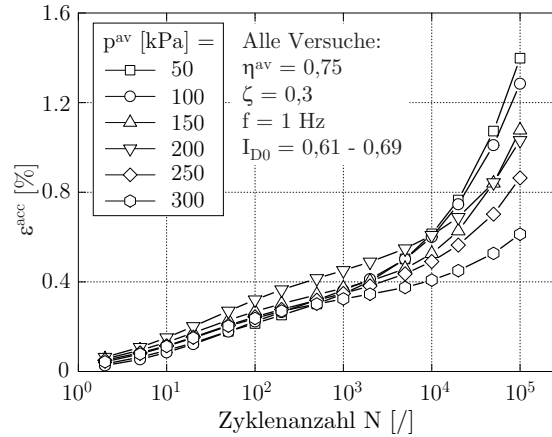


Abbildung 3.3: Zyklische Triaxialversuche: Einfluss der mittleren Spannung, nach Wichtmann [108]

In einer anderen Untersuchung von Wichtmann et al. [111] am weit gestuften Feinsand bis Feinkies hat sich heraus gestellt, dass die mittlere Spannung bei der Akkumulationsdehnung keine Rolle spielt (Abbildung 3.4). Das entspricht den Ergebnissen im Einzelscherversuch (Youd [121], Silver & Seed [98]). Es steht jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen der Triaxialversuche von Marr & Christian [66] und Wichtmann [108]. Die uneindeutigen Trends des Bodenverhaltens im Triaxialversuch aus den Publikationen basieren vermutlich auf den unterschiedlichen Eigenschaften verschiedener Böden und der unterschiedlichen Anfangslagerungsdichte. Die Untersuchung von Marr & Christian [66] wurde am lockeren Feinsand durchgeführt, während die Versuche bei Wichtmann [108], Wichtmann et al. [111] am dichten Mittel- bis Grobsand und dichten Feinsand bis Feinkies getestet wurde. Außerdem wird hier der Unterschied zwischen weggesteuerten und kraftgesteuerten Versuchen erwähnt. Alle zyklischen Einzelscherversuche in den Studien von Silver & Seed [98] und Youd [121] wurden weggesteuert gefahren. Dagegen wurden die zyklischen Triaxialversuche der Untersuchungen von Marr & Christian [66] und von Wichtmann [108] sowie Wichtmann et al. [111] kraftgesteuert durchgeführt. Die vergleichbare Belastung zwischen den weggesteuerten Versuchen erfolgt durch das Aufbringen der identischen Dehnungsamplitude. Stattdessen wird bei den kraftgesteuerten Versuchen die Spannungsamplitude proportional zum mittleren Druck oder zur Bruchspannung aufgebracht. Wegen der Druckabhängigkeit der Steifigkeit entstehen in den kraftgesteuerten Versuchen unterschiedliche resultierende Dehnungsamplituden. Um den Einfluss der mittleren Spannung auf das Verformungsverhalten besser zu verstehen, sind weitere Untersuchungen notwendig.



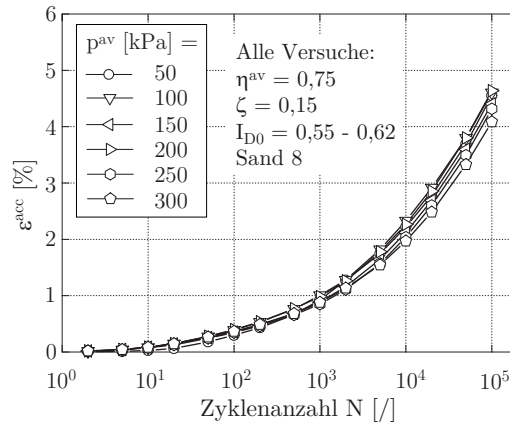


Abbildung 3.4: Zyklische Triaxialversuch: Einfluss der mittleren Spannung, nach Wichtmann [111]

#### Einfluss des Spannungsverhältnisses

In einer Versuchsreihe im Triaxialgerät bei Wichtmann [108] wurde der Einfluss des Spannungsverhältnisses auf die Akkumulation untersucht. Dabei wurde sowohl im Kompressions- als auch im Extensionsbereich getestet. Es wurde festgestellt, dass die totale Akkumulationsdehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$  zunimmt, wenn sich das mittlere Spannungsverhältnis in Richtung der kritischen Grenzgerade nähert (d.h.  $\eta^{\text{av}} = q/p$  betragsmäßig zunimmt). In einer anderen Studie beobachteten Marr & Christian [66] das Verformungsverhalten von Sand in zyklischen Triaxialversuchen. In den Versuchen mit gleicher Amplitude  $\sigma_1^{\text{ampl}}$  und mittlerer Spannung  $p^{\text{av}}$  steigt die axiale Dehnung mit zunehmendem Spannungsverhältnis  $\eta^{\text{av}}$ . Die volumetrische Dehnung nimmt zunächst mit steigendem  $\eta^{\text{av}}$  ab und bei größeren Spannungsverhältnissen wieder zu.

#### Einfluss der Belastungsamplitude

Die Lastamplitude spielt erwartungsgemäß immer eine entscheidende Rolle bei der Akkumulationsintensität. Die Versuchsergebnisse der Einfeldversuche an einem Feinsand von Sawicki & Swidzinski [93] zeigen eine stärkere Verdichtung bei größerer Dehnungsamplitude  $\gamma^{\text{ampl}}$ . In den experimentellen Untersuchungen von Youd [121], Silver & Seed [98, 97] ist zu beobachten, dass die Rate der axialen Dehnung sowie der Porenvolumenänderung mit zunehmender Schubverzerrungsamplitude  $\gamma^{\text{ampl}}$  stark ansteigt. Die Ergebnisse im zyklischen Triaxialversuch zeigen ebenfalls ein ähnliches Verhalten. In zahlreichen Publikationen von Helm et al. [37], Gotschol [33], Wichtmann [108], Wichtmann et al. [111] oder Marr & Christian [66] wurde das gleiche Verhalten wie im Einfeldversuch festgestellt. Je größer die Lastamplitude ist, desto höher ist die Akkumulationsdehnung.

Youd [121] und Silver & Seed [98] haben in ihren Untersuchungen gezeigt, dass eine Lastamplitude unterhalb einer Scherdehnung von ca.  $\gamma^{\text{ampl}} = 10^{-4}$  keine bleibende

Dehnung verursacht. Diese Grenze wurde von Vucetic [106] volumetrische Grenzscherdehnungsamplitude  $\gamma_{tv}$  (engl. „*volumetric cyclic threshold shear strain*“) genannt. Außerdem wurde von Vucetic [106] die lineare Grenzscherdehnungsamplitude  $\gamma_{tl}$  (engl. „*linear cyclic threshold shear strain*“) definiert. Mit diesen beiden Grenzwerten  $\gamma_{tv} > \gamma_{tl}$  kann das zyklische Bodenverhalten in verschiedene Bereiche eingeteilt werden (Abbildung 3.5). Für die kleine Scherdehnungsamplitude  $\gamma^{ampl} < \gamma_{tl}$  besitzt der Boden quasi die Eigenschaft eines linear elastischen Materials. In dem Bereich  $\gamma_{tl} < \gamma^{ampl} < \gamma_{tv}$  verhält sich der Boden offenbar nicht linear aber weiterhin elastisch. In diesem Bereich tritt bei der zyklischen Belastung noch keine bleibende Verformung auf. Für die Scherdehnungsamplitude  $\gamma^{ampl} > \gamma_{tv}$  reagiert der Boden zunehmend nicht linear und inelastisch.  $\gamma_{tv}$  markiert die Amplitude, ab der eine zyklische Scherung eine irreversible Veränderung in der Struktur des Korngerüsts verursacht. Die beiden Parameter  $\gamma_{tl}$  und  $\gamma_{tv}$  sind vom Bodentyp bzw. der Plastizitätszahl  $I_P$  abhängig.

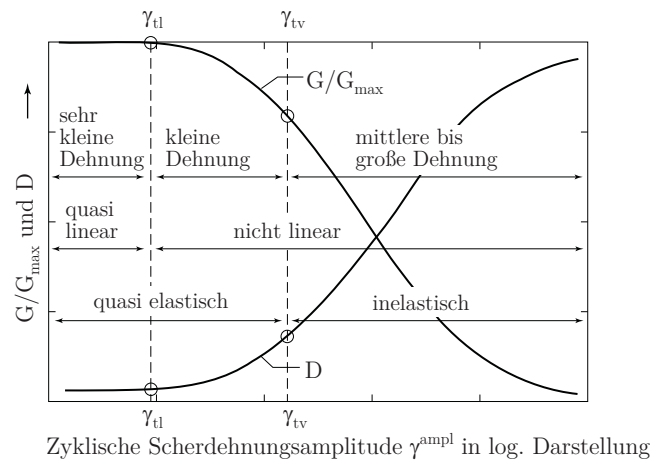


Abbildung 3.5: Zyklisches Schubmodul  $G$  und Dämpfung  $D$  in verschiedener Bereiche der Scherdehnungsamplitude, nach Vucetic [106]

### Einfluss der Lagerungsdichte

Bei den Ergebnissen der Einfeldversuche von Silver & Seed [98] ist deutlich zu beobachten, dass die Anfangslagerungsdichte einen signifikanten Einfluss auf das Verdichtungsverhalten von Böden hat. Youd [121] konnte in seinen Einfeldversuchen beobachten, dass die Proben unter einer zyklischen Belastung immer die Tendenz haben, sich zu verdichten. Dabei stellte sich heraus, dass die durch das Standardverfahren ermittelte minimale Porenzahl  $e_{min}$  in den zyklischen Versuchen stark unterschritten werden kann.

In der Untersuchung mit zyklischen Triaxialversuchen von Wichtmann [108] wurde ein ähnlicher Einfluss der Lagerungsdichte auf das Verformungsverhalten von Böden festgestellt.



### Einfluss der Belastungsfrequenz

Der Einfluss der Belastungsfrequenz auf das zyklische Verhalten von Böden wurde von Youd [121] an einem Einfachschergerät im Bereich von  $ca. 0,2 < f < 1,9$  Hz untersucht. Es wurde dabei beobachtet, dass die Porenvolumenänderung unter zyklischer Belastung nicht von der Frequenz abhängig ist. Im gleichen Frequenzbereich hat Wichtmann [108] unterschiedliche Triaxialversuche durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen, dass die Belastungsfrequenz auch bei der akkumulierten Dehnung im Triaxialversuch keine Rolle spielt.

Die getestete Frequenzen in den Versuchen von Youd [121] und Wichtmann [108] lagen zum größten Teil im Bereich „*zyklisch*“ (Tabelle 2.1). In der Studie von Glasenapp [32] wurden trockenen Proben unter im Bereich „*zyklisch-dynamisch*“ liegenden Frequenzen im Einfachschergerät getestet. Dabei wurden Versuche mit einer Frequenz bis zu 4 Hz durchgeführt. Es stellte sich heraus, dass die Versuche bis zu 2 Hz fast die gleiche Volumenänderung aufweisen. Bei dem Versuch mit 4 Hz ist die volumetrische Dehnung im Vergleich zu dem Versuch mit niedrigerer Frequenz (bis 2 Hz) merklich kleiner. Bei diesem Versuch wurde außerdem eine Abnahme der Dämpfung festgestellt.

Ein deutlicher Einfluss der Belastungsfrequenz auf das Verformungsverhalten von Schotter im zyklischen Triaxialversuch wurde von Kempfert et al. [52] berichtet. Dabei wurde der Bahnschotter aus Basalt mit der Körnung 30/60 unter den Belastungsfrequenzen von 1, 5 und 10 Hz untersucht. Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass die Verformung des ersten Zyklus mit zunehmender Belastungsfrequenz ansteigt. Während der weiteren Zyklen führt die größere Frequenz zu kleineren Verformungen. Dieser Trend stimmt mit den Ergebnissen von Glasenapp [32] überein.

Die vorgestellten Versuchsergebnisse aus unterschiedlichen Publikationen deuten darauf hin, dass eine kleinere Belastungsfrequenz (*zyklische* Belastung) keine Einwirkung auf das Verformungsverhalten von Böden hat. Hingegen vermindert die zunehmende Belastungsfrequenz einer *zyklisch-dynamischen* Belastung (mit  $f > 4$  Hz) die Bodenverformung.

### Einfluss der Reihenfolge von Zyklenpaketen

Die zyklischen Belastungen in der Realität (beispielsweise aus Verkehrsbelastung, Wind, Wellen) sind meistens mit stochastischem Verlauf aus unterschiedlicher Frequenz und Amplitude. Diese Belastung mit variierender Amplitude wird mit Hilfe von Klassierungsverfahren durch Zyklenpakete mit jeweils konstanter Amplitude und Frequenz ersetzt (Glasenapp [32]). Diese Sortierung der Belastung nach der Größe der Amplitude setzt voraus, dass die Abfolge dieser Zyklenpakete kaum Einfluss auf den Endwert der bleibenden Verformung besitzt (s.g. Miner'sche Regel [68]).

In einer Versuchsreihe im Triaxialgerät untersuchten Kaggwa et al. [49] den Einfluss der Variation von Zyklenpaketen auf das Verformungsverhalten vom Sand. Es ist dabei zu erkennen, dass die Reihenfolge großen Einfluss auf die Akkumulationsrate

eines Zyklenpakets hat. Hingegen spielt die Reihenfolge bei der Endverformung nach drei unterschiedlichen Zyklenpaketen nur eine untergeordnete Rolle. Kaggwa et al. [49] stellten außerdem ein Konzept zur Nachrechnung des Verlaufs der Dehnungen bei Zyklenpaketen vor.

Die Ergebnisse von Kaggwa et al. [49] wurden durch Untersuchungen von Wichtmann et al. [110] und Glasenapp [32] bestätigt. In den zyklischen dränierten Triaxialversuchen wurden bei Wichtmann vier Zyklenpakete mit jeweils 25.000 Zyklen und bei Glasenapp drei Pakete mit 200 Zyklen aufgebracht. Außerdem wurde diese Thematik von Glasenapp auch im Einfachschergerät untersucht. Dabei wurden Stufenversuche mit konstanter Auflast  $\sigma_{yy} = 200 \text{ kPa}$  und verschiedener Amplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 10, 20, 30$  und  $40 \text{ kPa}$  durchgeführt. Die Zyklenpakete sind mit jeweils 2.500 Zyklen und in unterschiedlicher Reihenfolge aufgebracht worden (Abbildung 3.6). Die Ergebnisse zeigen, dass die Paketreihenfolge nahezu keinen Einfluss auf die bleibende Verformung am Ende hat. Die Akkumulation eines Zyklenpakets ist hingegen deutlich von der Reihenfolge abhängig. Ein Lastpaket verursacht deutlich kleinere Verformungen, wenn es auf ein anderes Lastpaket mit größerer Amplitude folgt. Generell ist zu beobachten, dass je früher ein Paket aufgebracht wird, die von ihm verursachte Verformung umso größer ist. Dieses Phänomen wurde von Niemunis [73] und Wichtmann [108] als „*Historiotropie*“ bezeichnet.

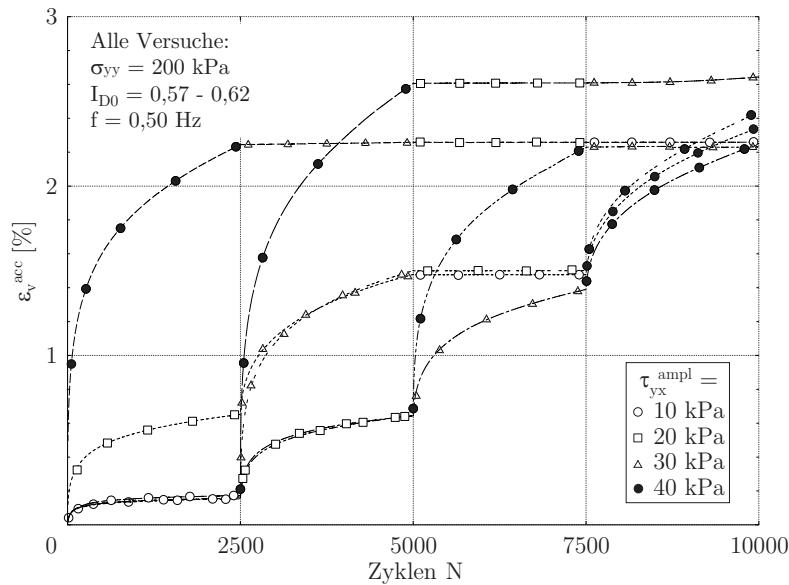


Abbildung 3.6: Zyklische Einfachscherversuche mit unterschiedlichen Zyklenpaketen, nach Glasenapp [32]

#### 3.2.2 Akkumulationsrichtung $\omega$

Hinsichtlich der Akkumulationsrichtung  $\omega = \varepsilon_v^{\text{acc}} / \varepsilon_q^{\text{acc}}$  hat das Spannungsverhältnis eine entscheidende Rolle. In der Studie von Luong [64] wurde festgestellt, dass es vom Spannungsverhältnis abhängt, ob sich ein Sand unter zyklischer Belastung di-

latant oder kontraktant verhält. Es stellte sich heraus, dass die sich Probe unterhalb einer bestimmten Spannung  $q^{\text{av}}$  kontraktant und oberhalb dieses Grenzwertes dilatant verhält. Dieser Grenzwert wurde von Luong mit der CT-Linie („*characteristic threshold line*“) in der  $p$ - $q$ -Ebene definiert. Für die mittleren Spannungszustände  $\sigma^{\text{av}}$  unterhalb dieser Linie verdichtet sich die Probe infolge zyklischer Belastung und oberhalb der CT-Linie ist eine Auflockerung der Probe zu erwarten.

In der Studie von Glasenapp [32] wurden ähnliche Versuche wie bei der Studie von Luong [64] am zyklischen Triaxialgerät durchgeführt. Die Ergebnisse von Glasenapp bestätigten die Feststellung von Luong. Außerdem wurde ein zyklischer mehrstufiger Einfachscherversuch mit einem ähnlichen Belastungsschema durchgeführt (Abbildung 3.7). Dabei wurden bei einer konstanten Normalspannung  $\sigma_{yy}$  Zyklenpakete mit einer Amplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  und jeweils 20 Zyklen hintereinander bei unterschiedlicher mittlerer Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  aufgebracht. Durch die Aufbringung von verschiedenen Schubspannungen  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  wurde im Einfachscherversuch das mittlere Spannungsverhältnis variiert. Es ist zu beobachten, dass die zyklische Scherung oberhalb einer bestimmten  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  nicht zu einer Verdichtung, sondern zu einer Auflockerung der Probe führt. Offensichtlich existiert auch hier eine Grenzlinie, die das dilatante und kontraktante Materialverhalten voneinander abgrenzt.

Diese CT-Linie von Luong [64] ist nach Chang & Withman [21] identisch mit der kritischen Grenzgerade  $\eta^{\text{av}} = M_c(\varphi_c)$ . Anhand eines monotonen Versuchs kann der Spannungszustand bei der CT-Linie ermittelt werden. Die Neigung der Grenzgerade  $M_c(\varphi_c)$  ist das Spannungsverhältnis  $q/p$  in dem Zustand, wo die volumetrische Dehnungsrate bei zyklischer Belastung verschwindet. Das markiert den Punkt, in dem die Probe unter monotoner Belastung von Verdichtung zur Auflockerung wechselt (Scheitelpunkt bei der Volumenänderungskurve). Der Übergang vom Dilatanz zum Kontraktanzverhalten wurde auch „Phasentransformation“ genannt. Im Einfachscherversuch kann dieser Grenzwert der mittleren Schubspannung in ähnlicher Weise aus einem monotonen Versuch ermittelt werden (Glasenapp [32]).

In weiteren Versuchen von Chang & Withman [21] wurde die Akkumulationsrichtung untersucht. Die Ergebnisse dieser Studie zeigt, dass das Verhältnis  $\gamma^{\text{acc}}/\varepsilon_v^{\text{acc}}$  mit steigendem Spannungsverhältnis  $\eta = q/p$  zunimmt. Die gemessene Akkumulationsrichtung kann durch die Fließregel des modifizierten Cam Clay Modells  $\omega = (M_c^2 - (\eta^{\text{av}})^2)/(2\eta^{\text{av}})$  approximiert werden.

Die Akkumulationsrichtung wurde auch von Wichtmann [108] intensiv untersucht. In einer Versuchsreihe wurden dichte Proben unter gleicher Mittelspannung  $p^{\text{av}} = 200 \text{ kPa}$  und unterschiedlicher  $q^{\text{av}}$  durchgeführt. Es wurde sowohl im Kompressions- als auch im Extensionsbereich getestet ( $-0,88 < \eta^{\text{av}} < 1,375$ ). In den Versuchen im Kompressionsbereich  $\eta^{\text{av}} > 0$  wurden Amplitudenverhältnisse  $\zeta = q^{\text{ampl}}/p^{\text{av}} = 0,3$  getestet, und im Extensionsbereich wurde  $\zeta = 0,2$  gewählt. Bei den Versuchen mit  $q^{\text{av}}$  in der Nähe der Bruchfläche wurde die Amplitude auf  $\zeta = 0,1$  und  $\zeta = 0,05$  reduziert. In der Abbildung 3.8 ist die Abhängigkeit der bleibenden deviatorischen Dehnung  $\varepsilon_q^{\text{acc}}$  von der volumetrischen Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  für verschiedene Spannungsverhältnisse  $\eta^{\text{av}}$  dargestellt. Die gezeigten Datenpunkte korrespondieren mit den Zyklen  $N = 2, 5, 20 \dots 50.000$  und  $100.000$ . Es ist offensichtlich, dass die Akku-

### 3 Stand der Forschung

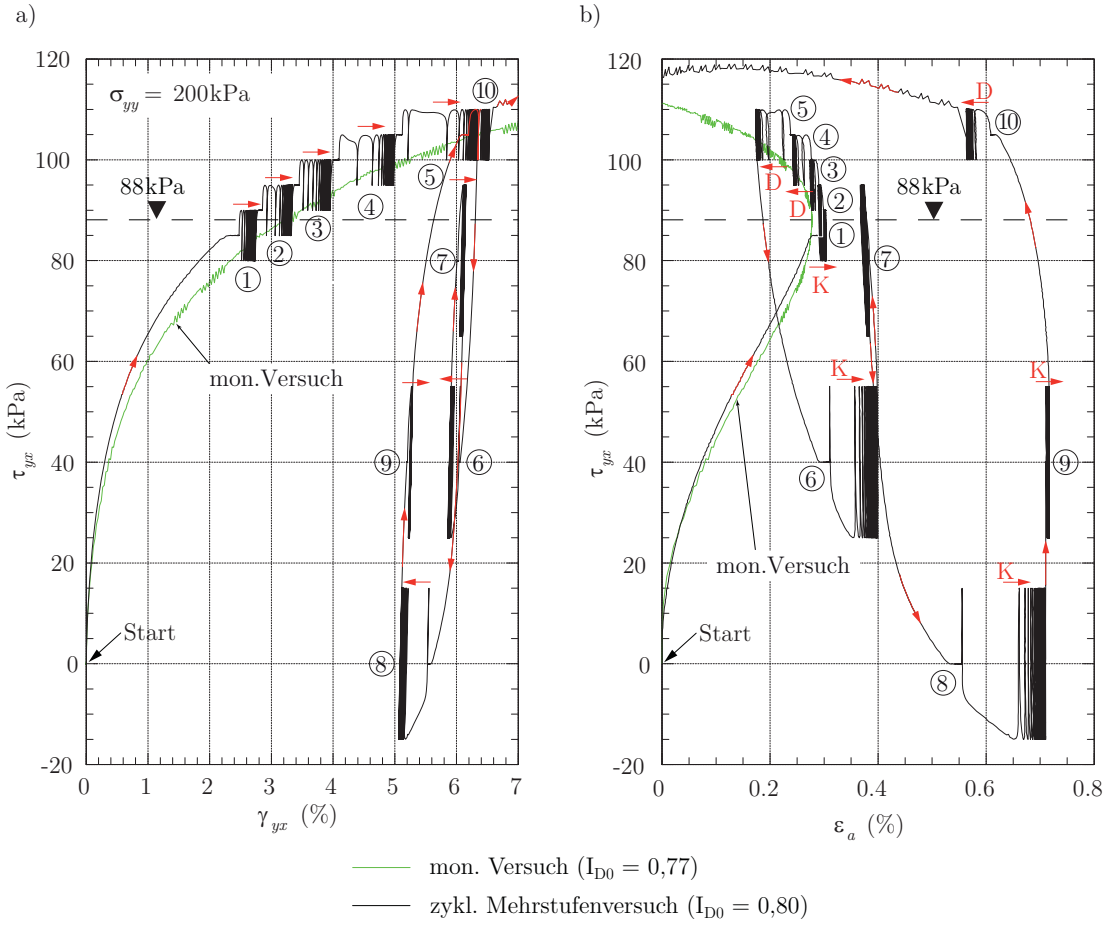


Abbildung 3.7: Einfachscherversuch: Dilatantes – kontraktantes Verhalten unter zyklischer Belastung in Abhängigkeit von der mittleren Schubspannung, nach Glasenapp [32]

mulationsrichtung  $\omega = \varepsilon_q^{\text{acc}} / \varepsilon_v^{\text{acc}}$  signifikant vom Spannungsverhältnis beeinflusst wird. Für eine symmetrische Wechsellast (isotrope Konsolidierung  $\eta^{\text{av}} = 0$ ) findet reine volumetrische Akkumulation statt, die Deviatordehnung ist in diesem Fall  $\varepsilon_q^{\text{acc}} = 0$ . Die deviatorische Dehnung nimmt im Vergleich zu dem volumetrischen Anteil mit steigendem Spannungsverhältnis  $|\eta^{\text{av}}| = |q^{\text{av}} / p^{\text{av}}|$  zu. Im kritischen Zustand  $\eta^{\text{av}} = M_c(\varphi_c) = 1,25$  und  $\eta^{\text{av}} = M_e(\varphi_c) = -0,88$  finden nur deviatorische Dehnungen statt, die volumetrische Dehnung ist dabei  $\varepsilon_v^{\text{acc}} = 0$ . Im Bereich zwischen den Grenzlinien  $M_e(\varphi_c) < \eta^{\text{av}} < M_c(\varphi_c)$  wird die Probe in Folge der zyklischen Belastung verdichtet. Bei dem Spannungsverhältnis größer als die kritischen Grenzlinie ( $\eta^{\text{av}} = 1,375$ ) wurde beobachtet, dass die Probe sich während der zyklischen Belastung auflockert. Die Ergebnisse der Untersuchung von Wichtmann [108] stimmen gut mit den Ergebnissen von Chang & Withman [21] überein.

Die Untersuchung von Wichtmann [108] hat außerdem ergeben, dass die Akkumulationsrichtung nicht von der Belastungsamplitude, der Lagerungsdichte, der mittleren Spannung, der Belastungsfrequenz, der Variation der Amplitude sowie der Korngröße abhängig ist.

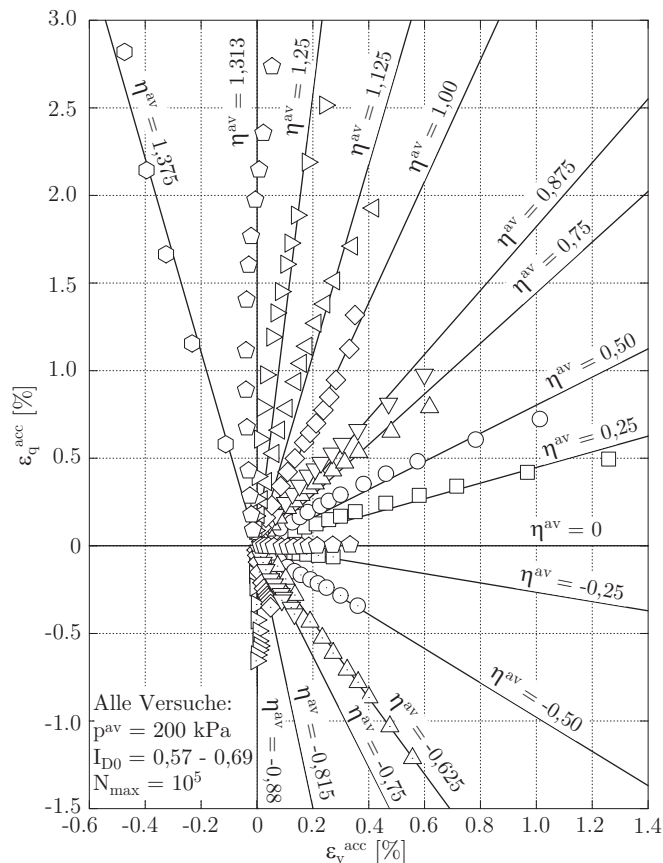


Abbildung 3.8: Deviatorische Dehnung  $\varepsilon_q^{acc}$  in Abhängigkeit der volumetrischen Dehnung  $\varepsilon_v^{acc}$  bei unterschiedlichen Spannungsverhältnissen  $\eta^{av}$ , Wichtmann [108]

### 3.3 Bodenverhalten unter multidirektionaler Belastung

In diesem Abschnitt werden einige vorhandene Laboruntersuchungen mit „*multidirektionaler Beanspruchung*“ vorgestellt. Die Veröffentlichungen wurden nach der Definition einer multidirektionalen Belastung wie im Abschnitt 2.6.4 ausgewählt und in drei Kategorien eingeteilt: Versuche unter undrännierter Bedingung, Versuche unter drännierter Bedingung und Modellversuche.

#### 3.3.1 Versuche unter undrännierter Bedingung

Seit den 70er Jahren wurde die Problematik der Bodenverflüssigung insbesondere in den von Erdbeben gefährdeten Regionen intensiv erforscht. Für die Untersuchung des Verflüssigungsverhaltens wurden die Proben unter undrännierter oder volumenkonstanter Bedingung getestet. Es ist bekannt, dass die Erschütterung eines Erdbebens nicht nur in einer Richtung vorkommt. Nach Li [62] wurden in dem Erdbeben von Lotung, Taiwan im November 1986 Beschleunigungen sowohl in Richtung Nord-Süd als auch in Richtung West-Ost gemessen. Es ist generell ein dreidimensionales

### 3 Stand der Forschung

Problem. Dazu wurden Torsionsscherversuche an Hohlzylinderproben, Einzelscherversuche oder Rütteltischversuche eingesetzt.

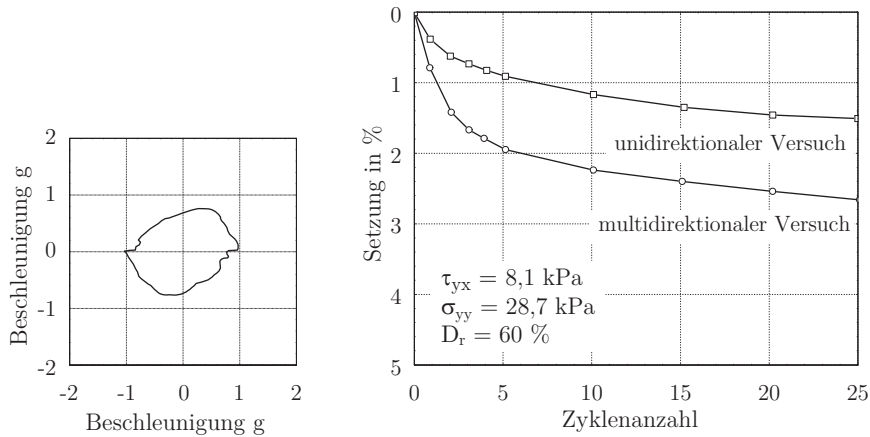


Abbildung 3.9: Rütteltischversuch: horizontale Beschleunigung im multidirektionalen Versuch (links) und Vergleich uni- und multidirektionaler Beanspruchung (rechts), nach Pyke et al. [83]

Eine der ersten Studien über die Thematik der Bodenverflüssigung unter multidirektionaler Belastung wurde von Pyke et al. [83] durchgeführt. Dabei wurde die Bodenverformung an einem Rütteltisch untersucht, an dem Beschleunigungen in zwei Richtungen unabhängig voneinander gesteuert werden können. Die sinusförmigen Bewegungen in den horizontalen Richtungen wurden mit einer Phasenverschiebung von  $90^\circ$  gestartet. In der Abbildung 3.9 wurden die Ergebnisse der Versuche mit uni- und multidirektionaler Belastung dargestellt. Die Setzungskurven auf dem Diagramm rechts zeigen, dass eine multidirektionale Beanspruchung bei gleicher Belastungsintensität größere Verformungen hervorruft als eine unidirektionale. Bezogen auf die einaxiale Anregung ist die bei einem zyklischen Spannungsverhältnis von ca. 30% resultierende Setzung nach 10 Zyklen fast doppelt so groß. Außerdem wurde Erdbeben mit irregulärer Beanspruchung auch von Pyke et al. [83] untersucht.

Casagrande [19] studierte die Verteilung der Lagerungsdichte innerhalb einer Probe nach der kreiselnden Belastung in einem Einzelschergerät („*Gyratory Shear Apparatus*“). Dabei wurden Unterschiede der Verdichtungsverteilung zwischen den Proben unter uni- und multidirektionaler Belastung festgestellt. Der Aufbau dieses Versuchsgeräts wurde von Casagrande & Randon [20] detailliert beschrieben.

In einer späteren Studie untersuchten Ishihara & Yamazaki [46] die Verflüssigung von Sand in einem multidirektionalen Einzelschergerät. Die Erweiterung des Einzelschergeräts um einen weiteren horizontalen Schermotor ermöglichte es, komplexere Scherbelastungen zu testen. Dabei wurde die Probe unter elliptischen und abwechselnden Spannungspfaden belastet. Die Abbildung 3.10 stellt die Ergebnisse dieser Versuche dar. Im Diagramm ist das zyklische Spannungsverhältnis  $\tau_{yx}/\sigma'_{yy}$  gegen die Zyklanzahl bis 3% der Scherdehnung aufgetragen. Es ist bei beiden Belastungsformen festzustellen, dass mit gleichem Spannungsverhältnis  $\tau_{yx}/\sigma'_{yy}$  die Probe 3% Scherdehnung mit abnehmender  $\tau_{yz}/\tau_{yx}$  später erreicht. Die Ergebnisse der Versuche



### 3.3 Bodenverhalten unter multidirektionaler Belastung

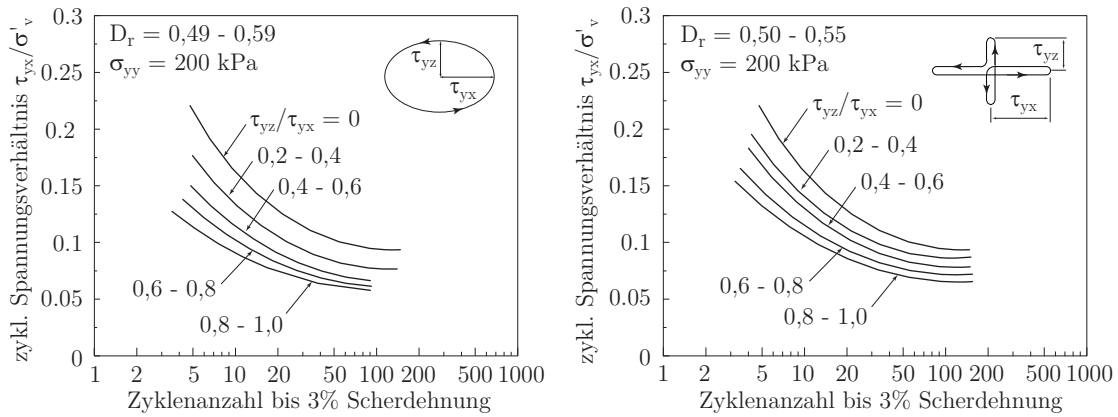


Abbildung 3.10: Ergebnisse der rotierenden Scherung (links) und abwechselnder Scherung (rechts), nach Ishihara & Yamazaki [46]

von Ishihara und Yamazaki am Einfeldschersgerät passen mit den von Pyke et al. [83] am Rütteltisch sehr gut zusammen.

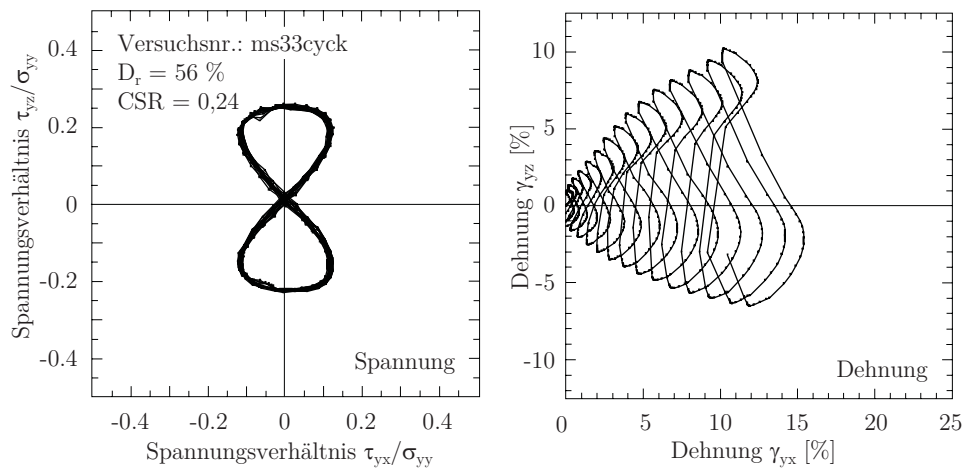


Abbildung 3.11: Multidirektionale Einfeldscherversuch, nach Kammerer [50]

Kammerer [50], Kammerer et al. [51] studierten das Verhalten von Monterey Sand unter multidirektionaler Belastung im Einfeldscherversuch. Das hier verwendete Testgerät hat ein ähnliches Prinzip wie das von Ishihara & Yamazaki [46]. Kammerer hat für die Studien des Verflüssigungsverhaltens von Sand ein umfangreiches Versuchsprogramm mit teilweise sehr komplexen Spannungs-pfaden durchgeführt (beispielsweise Abbildung 3.11). Die Feststellungen von Ishihara & Yamazaki [46] und Pyke et al. [83] wurde dabei nochmals bestätigt.

#### 3.3.2 Versuche unter dräniertter Bedingung

Während das Verhalten von Sand unter undrännierten Bedingungen intensiv untersucht wurde, sind nur einzelne Studien über die Bodenverformung unter drännierten

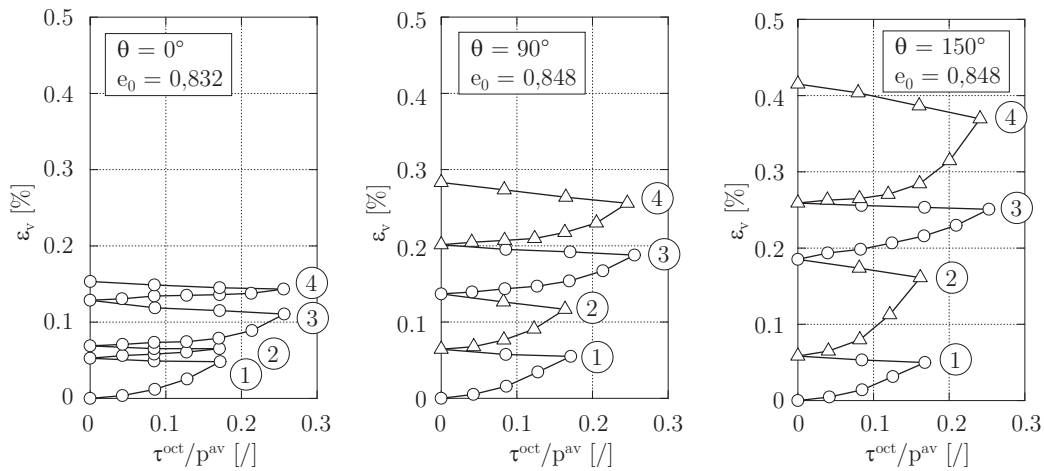


Abbildung 3.12: Volumetrische Dehnung mit Polarisationsänderung im echten Triaxialversuch, nach Yamada & Ishihara [119]

Bedingungen vorhanden. Yamada & Ishihara [119] studierten den Einfluss einer Änderung der Lastrichtung in dränierten und undränierten Versuchen an lockerem, gesättigtem Sand im echten Triaxialversuch. Dabei wurden nach der isotropen Konsolidierung der Probe vier Zyklen aufgebracht. Der erste und der zweite Zyklus haben die gleichen Amplituden. Beim ersten Zyklus wurde die erste Hauptspannung  $\sigma_1$  bis zum Erreichen einer oktaedrischen Schubspannung  $\tau_{oct}$  erhöht und anschließend wieder auf Null reduziert (Definition von  $\tau_{oct}$  im Anhang, Gleichung A.17). Die zwei anderen Spannungskomponenten ( $\sigma_2$  und  $\sigma_3$ ) wurden dabei so variiert, dass der mittlere Druck  $p$  immer konstant gehalten wurde. Die Lastrichtung des zweiten Zyklus wurde mit einem Winkel  $\theta$  gegen die Richtung des ersten Zyklus gedreht. Der dritte und vierte Zyklus wurden mit dem gleichen Schema wie in den ersten beiden Zyklen, aber mit einer höheren Amplitude, durchgeführt.

Yamada & Ishihara [119] stellten fest, dass die bleibende volumetrische Dehnung nach dem zweiten und vierten Zyklus mit zunehmendem Winkel  $\theta$  ansteigt, d.h. mit zunehmender Drehung der Scherrichtung im zweiten und vierten Zyklus im Vergleich zu der Richtung im Zyklus vorher. Dies wurde auch bei der Akkumulation des Porenwasserüberdrucks im undränierten Versuch beobachtet.

Mit dem multidimensionalen Einfachschergerät (CMDSS-Gerät) studierte Wichtmann [108] die Einflüsse der Polarisationsänderung auf das Verformungsverhalten von Böden. Das Gerät ermöglicht eine Scherbelastung in alle Richtungen in der  $x$ - $y$ -Ebene. In der Abbildung 3.13 sind die Ergebnisse des Versuchs mit kreisförmiger Scherbelastung im Vergleich mit einem unidirektionalen Versuch dargestellt. Die bleibende Verformung in dem multidirektionalen Versuch ist fast doppelt so groß wie die des unidirektionalen Versuchs. Außerdem wurde in einem Versuch der Einfluss des Umlaufsinn der kreisförmigen Zyklen untersucht. Dabei wurde der Umlaufsinn der Spannungsschleifen nach 500 Zyklen geändert. Es stellte sich heraus, dass der Umlaufsinn eines Zyklus keine Auswirkung auf das Verformungsverhalten eines Bodens hat. Die Dehnungsrate vor und nach der Änderung des Umlaufsinn



### 3.3 Bodenverhalten unter multidirektionaler Belastung

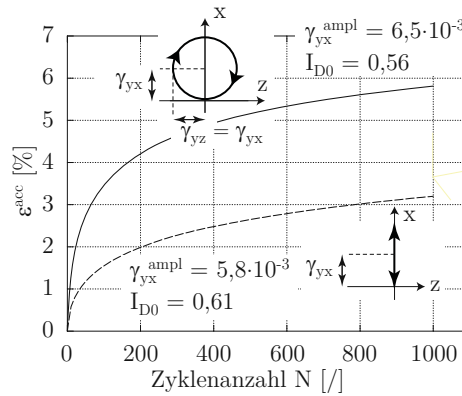


Abbildung 3.13: Akkumulierte Dehnung in multidirektionalen Einzelscherversuchen, nach Wichtmann [108]

ist unverändert.

In einer weiteren Versuchsreihe von Wichtmann [108] wurden vier Proben mit unterschiedlichen Anfangslagerungsdichten mit jeweils zwei Lastpaketen unter dränierter Bedingung belastet. Nach dem ersten Lastpaket mit 1.000 Zyklen wurde die Scherichtung um  $90^\circ$  gedreht und danach folgte das zweite Zyklenpaket. Es ist zu beobachten, dass direkt nach dem Wechseln der Scherrichtung die Dehnungsrate sprunghaft ansteigt (Abbildung 3.14). Die Rate nimmt danach mit weiteren Zyklen wieder ab und ist unabhängig von der Lagerungsdichte.

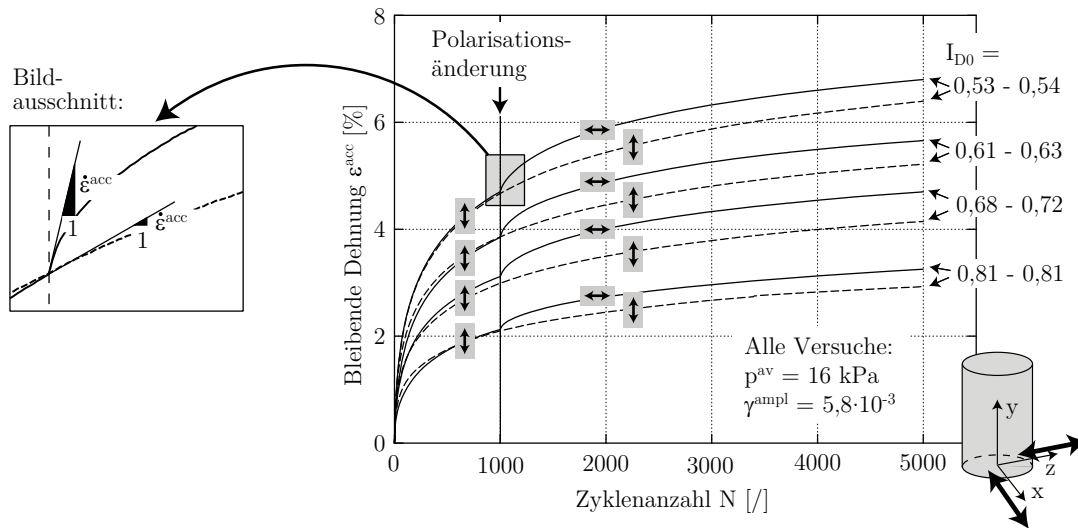


Abbildung 3.14: Akkumulierte Dehnung in multidirektionalen Einzelscherversuchen, nach Wichtmann [108]

Wichtmann [108] untersuchte auch das akkumulierte Dehnungsverhalten unter multidirektionaler Beanspruchung im dränierten Triaxialversuch. In diesen Triaxialversuchen wurden die axiale und die radiale Spannung  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  mit einer Phasenverschiebung zyklisch variiert, so dass sich elliptische Spannungszyklen in der  $P$ - $Q$ -Ebene

### 3 Stand der Forschung

( $P = \sqrt{3}p$  und  $Q = \sqrt{2/3}q$ : „isomorphen“ Variablen) ergaben. Dabei wurden unterschiedliche Zyklusformen mit elliptischen Spannungspfaden getestet (Abbildung 3.15). Es ist bei den Versuchen festzustellen, dass die größeren Spannungsschleifen zu größeren Akkumulationsraten führen. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Akkumulationsraten sowohl in uni- als auch in multidirektionalen Versuchen aus der Dehnungsamplitude mit der Beziehung  $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}} \sim (\varepsilon^{\text{ampl}})^2$  beschrieben werden können.

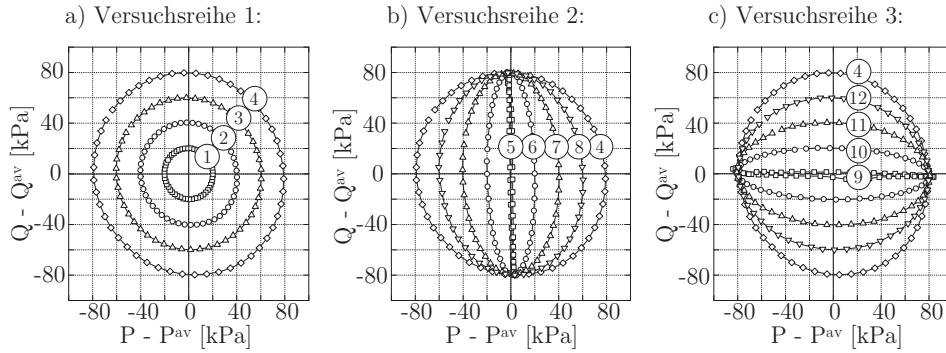


Abbildung 3.15: Spannungspfade in der  $P$ - $Q$ -Ebene in zyklischen Triaxialversuchen, nach Wichtmann [108]

### 3.3.3 Modellversuche

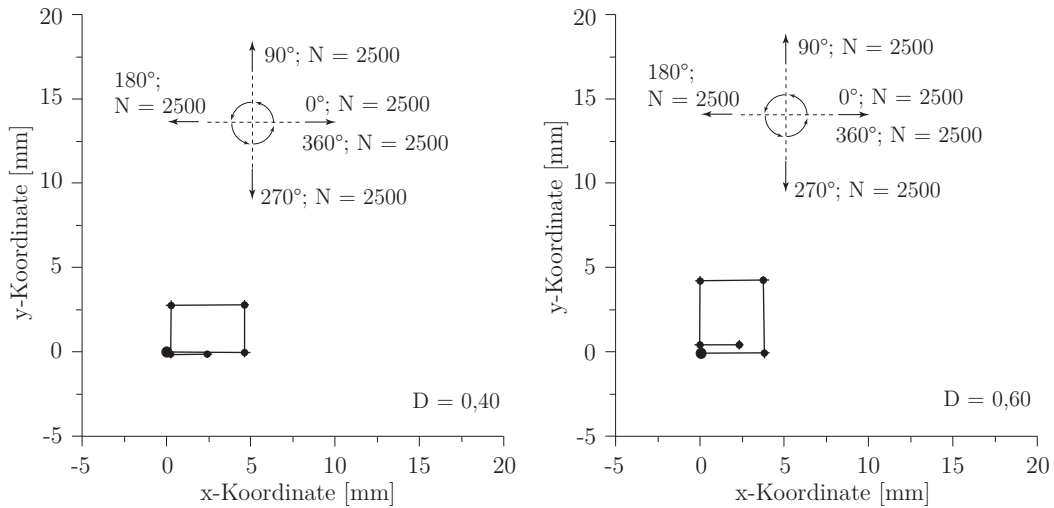


Abbildung 3.16: Ergebnisse der Modellversuche mit veränderlichen Lastangriffsrichtungen, nach Peralta [78]

In einem kleinmaßstäblichen Modellversuch untersuchten Achmus et al. [1] und Peralta [78] das Verformungsverhalten eines Monopiles unter horizontaler zyklischer Beanspruchung. Peralta [78] führte vier Versuche mit veränderlichen Lastrichtungen durch. Dabei wurde nach jedem Zyklenpaket die Lastrichtung um  $90^\circ$  gedreht. Die Abbildung 3.16 stellt die Ergebnisse der zwei Versuche mit starren Pfahl und

Eindringtiefe  $L = 20$  cm dar. Ein signifikanter Einfluss der Lastrichtung auf das Verformungsverhalten wurde nicht festgestellt. Aufgrund der kleinen Anzahl der Versuche wurde nur vermutet, dass die Veränderung der Lastrichtung günstige Einwirkung auf die Neigung des Pfahls hat.

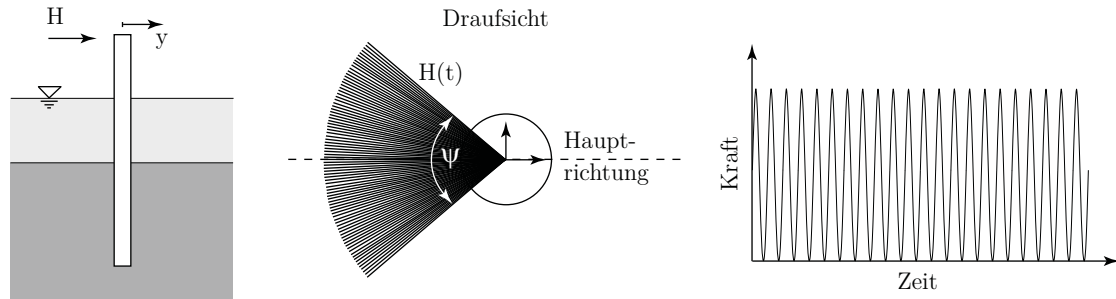


Abbildung 3.17: Schematische Darstellung des Versuchsprogramms nach Rudolph & Grabe [89]

Rudolph & Grabe [89] testeten den Einfluss der kontinuierlichen Änderung der Lastangriffsrichtung in einem kleinmaßstäblichen Modellversuch mit horizontal belasteten Pfählen. Es werden Versuche mit einer Schwelllast mit konstanter Amplitude von  $F_{max} = 12$  N, aber veränderlicher Richtung durchgeführt. Die Lastrichtung wird während 1.000 Zyklen sinusförmig geändert (Abbildung 3.17). Der gesamte Winkel der Lastrichtungsänderung  $\psi$  wird je Versuch konstant gehalten. In der Abbildung 3.18 wurde die normierte Verschiebungszunahme gegen den Lastrichtungswinkel aufgetragen. Es ist zu beobachten, dass die auf die Verschiebung des ersten Zyklus normierte Verschiebung  $v_N/v_1$  eine Zunahme der Akkumulation bei veränderlicher Richtung zeigt. Es ist übereinstimmend mit dem Ergebnis von Dührkop [25] erkennbar, dass der Effekt einer veränderlichen zyklischen Lastrichtung nicht vernachlässigt werden sollte, da dieser vergrößerte Verschiebungsakkumulationen hervorrufen kann.

## 3.4 Ansätze zur Abschätzung der Bodenverformung

Die Prognose der bleibenden Bodenverformung infolge zyklischer Belastung ist für die Formulierung der Stoffmodelle und das Erstellen der Bemessungsansätze von großer Bedeutung. Die bleibende Verformung wird meistens anhand von empirischen Formeln abgeschätzt, die das plastische Verhalten von Böden in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl beschreiben. Der größte Teil der Ansätze basiert auf den Ergebnissen von Laboruntersuchungen. Dabei wurden sowohl die Daten aus den Elementversuchen (zyklischer Triaxialversuch, Einfachscherversuch) als auch aus Modellversuchen analysiert. Im Folgenden werden einige Ansätze aus den zahlreichen Publikationen vorgestellt.

Die bleibende Verformung kann mittels einer logarithmischen Funktion in der Form

$$\varepsilon_N = a_1 + a_2 \cdot \log N \quad (3.1)$$

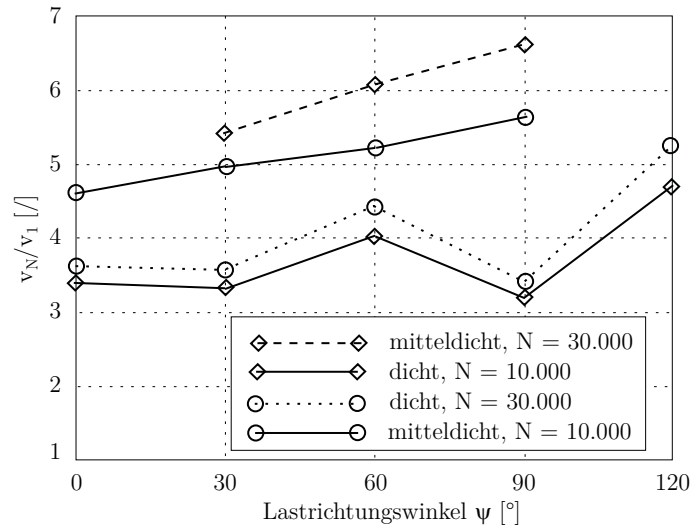


Abbildung 3.18: Ergebnisse von Modellversuchen mit veränderlichen Lastangriffsrichtungen, nach Rudolph & Grabe [89]

beschrieben werden. Darin sind  $a_1$  und  $a_2$  die von Boden und Belastung abhängigen Parameter,  $N$  die Anzahl der Zyklen. Diese Funktion wurde z. B. in den Ansätzen von Barksdale [13], Shenton [96], Lentz & Baladi [61], Hettler [39] oder Kempfert & Hu [53] verwendet.

Ein weiterer Ansatz, der sehr häufig angewendet wurde, ist der exponentielle Ansatz:

$$\varepsilon_N = a_1 \cdot N^{a_2} \quad (3.2)$$

Dieser Ansatz kam bei Monismith et al. [69], Poulsen & Substad [79], Khedr [54], Huurman [43], Kempfert & Hu [53], Gotschol [33] und Hinz [40] zur Anwendung.

Niemunis et al. [76], Wichtmann [108] und Triantafyllidis et al. [105] verwendeten eine logarithmische Funktion mit einem linearen Anteil, um die Akkumulation der Bodenverformung zu beschreiben:

$$\varepsilon_N \sim C_1 [\ln(1 + C_2 N) + C_3 N] \quad (3.3)$$

Darin sind  $C_1$ ,  $C_2$  und  $C_3$  die Materialkonstanten,  $N$  ist die Zyklenanzahl. Im Einzelfall kamen auch andere Formeln zum Einsatz, die nicht den oben beschriebenen Funktionen zugeordnet werden konnten (z. B. Kirsch & Richter [55], Hodjera [41], Wolff & Visser [117]).

## 4 Testgeräte und Versuchsdurchführung

Für die experimentelle Untersuchung des zyklischen Bodenverhaltens in der vorliegenden Arbeit kommen eine hydraulisch gesteuerte Triaxialanlage, ein zyklisches Einfachschergerät und ein Resonant Column Gerät zum Einsatz. Für die Untersuchung mit multidirektionaler Belastung wurde die Probenzelle des Einfachschergeräts modifiziert. Die monotonen Triaxialversuche wurden in einem zweiten Testgerät mit elektronischer Steuerung durchgeführt. Im Folgenden wird der Aufbau der zyklischen Versuchsgeräte, die Probenpräparation sowie die Testprozedur des jeweiligen Versuchstyps vorgestellt.

### 4.1 Triaxialversuch

#### 4.1.1 Testgerät

In der Abbildung 4.1 ist die Druckzelle der Triaxialanlage mit dem hydraulischen Belastungssystem und die Volumenmesseinheit (Bürette) schematisch dargestellt. Die axialen Belastungen (statische Mittelspannung und zyklische Belastung) werden mit einem servohydraulischen System aufgebracht. Die Versuchssteuerung sowie die Messdatenerfassung erfolgen mit einem angeschlossenen Computer. Über einen externen Funktionsgenerator werden die zyklischen Parameter (Frequenz oder Periode, Amplitude, Formfunktion) geregelt. Das ermöglicht verschiedene Formen von Zeitfunktionen (Sinus, Rechteck, Rampe, Impuls . . . ) zu testen. Die Versuche in der vorliegenden Arbeit wurden mit einer Sinus-Funktion und einer Frequenz von 0,5 Hz belastet.

Die Axialbelastung wird über zwei Kraftübertragungsstangen und die Traverse oberhalb der Triaxialzelle aufgebracht. Die Kraftmessung erfolgt mit einer inneren Kraftmessdose, die sich zwischen dem Belastungskolben und dem Probenkopf befindet. Die vertikale Kraft wird direkt oberhalb der Probe gemessen, dadurch wird die Verfälschung der Kraftmessung durch die Reibung bei der Durchführung des Lastkolbens vermieden. Die äußere Kraftmessdose dient lediglich nur für den Abschaltungsmechanismus der Anlage. Der Belastungskolben wird über reibungsarme Kugellager und einen Dichtungsring am Zellendeckel in die Zelle eingeführt. Der Kolben wird mit der inneren Kraftmessdose und den Krallen fest miteinander verbunden (Abbildung 4.1: 16 und 17). Die Krallen passen genau auf den oberen Laststempel

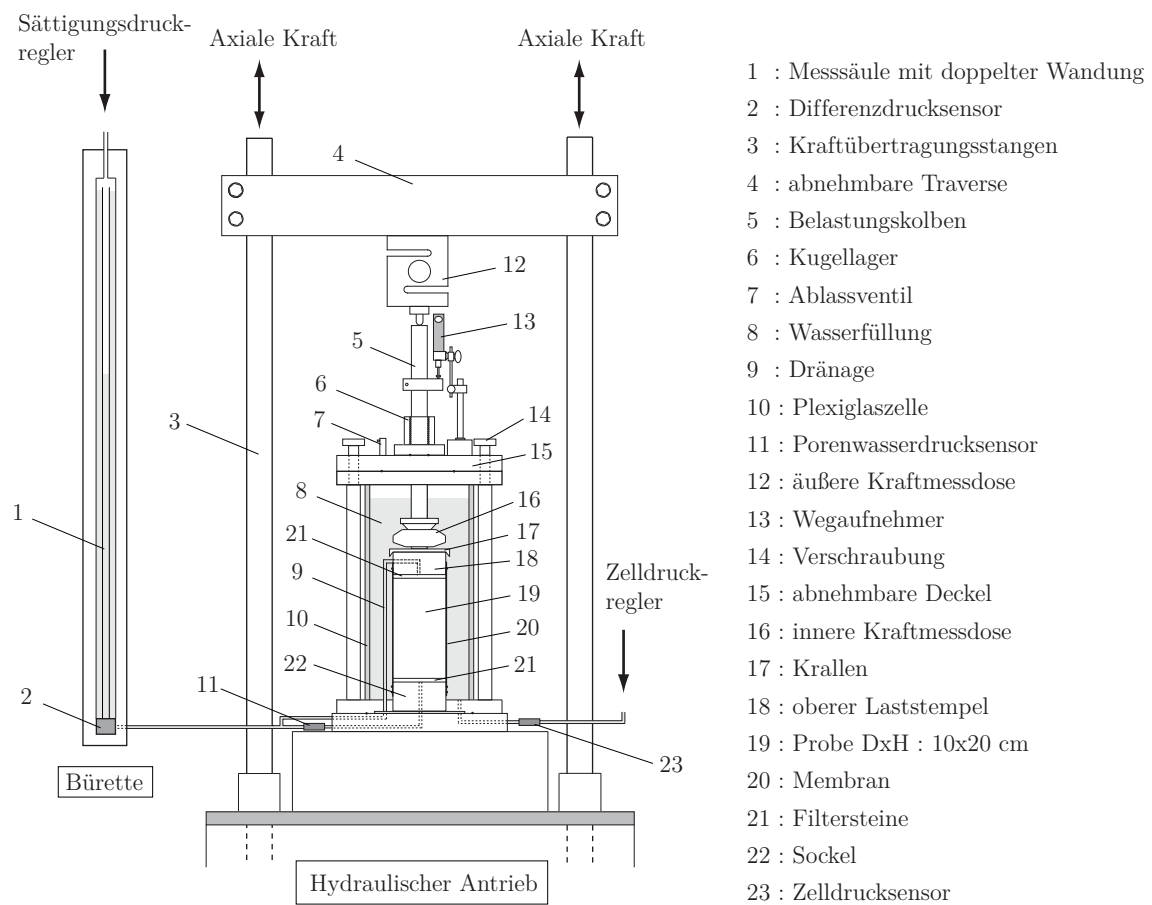


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des zyklischen Triaxialgeräts

und verhindert dabei eine Verkipfung und Verschiebung der Probe während des Versuchs.

Die Konsolidierungsspannung und der Sättigungsdruck werden durch pneumatische Druckregler auf das Zellwasser und das Porenwassermesssystem aufgebracht. Die Porenwasserdruckmessung erfolgt mit einem Sensor am Fuß der Probe (Abbildung 4.1: 11). Der Zelldruck wird mit einem Sensor am Boden der Zelle erfasst (Abbildung 4.1: 23).

Die axiale Dehnung wird über einen hoch auflösenden Wegaufnehmer oberhalb der Zelle anhand der Bewegung des Belastungskolbens ermittelt. Es handelt sich hier um einen inkrementellen Wegaufnehmer. Die Wegänderung wird mittels optoelektronischer Abtastung eines Glasmaßstabes erfasst und sehr genau in elektrische Impulse umgewandelt. Durch Verwendung eines temperaturstabilen Glasmaßstabes bleibt die Erfassung der Zählimpulse auch bei Temperaturänderung präzise. Der hier verwendete Aufnehmer hat eine Arbeitslänge von 30 mm und einer Genauigkeit von  $\pm 1 \mu\text{m}$ .

Die Volumenänderung der Probe wird bei der Bürette über das aus- und einströmende Porenwasser gemessen. Die Bürette besitzt einen Differenzdrucksensor, der den hydrostatischen Druck der Wassersäule in einem Messrohr misst. Das Volumen des ein- und ausströmenden Porenwassers verändert die Höhe der Wassersäule und wird durch den kalibrierten Drucksensor erfasst.

### 4.1.2 Probenpräparation

Die Präparation der Probe ist ein wichtiger Bestandteil eines Laborversuchs. Sie soll gewährleisten, dass eine homogene Probe mit gezielter und gut wiederherstellbarer Lagerungsdichte entsteht. Außerdem soll die präparierte Probe den Zustand des Korngerüsts in der Realität bestmöglich abbilden. Nach Mulilis et al. [70] weisen die Proben mit gleicher Lagerungsdichte aber unterschiedlichen Einbaumethoden erhebliche Abweichungen in den Ergebnissen auf. Um den Zustand in-situ möglichst realistisch abzubilden, werden die Proben in der vorliegenden Arbeit eingerieselt.

Vor der Probenpräparation wurde der Sand im Ofen mit  $105^\circ\text{C}$  für ca. einen Tag getrocknet und auf Raumtemperatur abgekühlt. Zuerst wurde eine Membran mit einer Dicke von ca. 0,8 mm über den Sockel gestülpt und mit zwei O-Ringen befestigt. Der Kontakt zwischen Membran und Sockel wurde mit Vakuumsilikon versehen, um eine bessere Dichtigkeit zu gewährleisten. Um die Membran wurden die Halbschalen und eine Abfangschale (Abbildung 4.2b) montiert. Mit einem Vakuum von ca.  $-0,3$  bar wurde die Membran an die Halbschalen angesaugt. Anschließend wurde der trockene Sand durch einen Trichter in die Halbschalen eingerieselt (Abbildung 4.2c). Die verschiedenen Lagerungsdichten wurden durch Variation des Durchmessers der Trichteröffnung und der Fallhöhe des Sandes erreicht. Je kleiner die Trichteröffnung und je größer die Fallhöhe ist, desto dichter ist die eingebaute Probe. Beim Einrieseln wurde der Trichter langsam hoch gezogen um die Fallhöhe zwischen Trichteröffnung und Sandoberfläche konstant zu halten. Nach dem Einrieseln wurde die Probeno-





Abbildung 4.2: Probenpräparation im Triaxialgerät: a) Stülpen der Membran über den Sockel, b) Einbau der Halbschalen und die Abfangschale, c) Sandeinrieseln, d) Glätten der Probenoberfläche, e) Befestigung des oberen Stempels mit der Einbauhilfe, f) eingebaute Probe in der Druckzelle



berfläche mit einer stumpfen Klinge geglättet. Danach wurde die Abfangschale mit überflüssigem Sand vorsichtig abmontiert. Der obere Laststempel wurde mit Hilfe einer Einbauhilfe an der Traverse befestigt und langsam auf die Probenoberfläche abgesenkt (Abbildung 4.2e). Die Einbauhilfe hat die Funktion, die Zelle zu zentrieren und einen störungsfreien Einbau zu gewährleisten. Die Membran wurde um den mit Vakuumsilikon geschmierten Laststempel gerollt und mit O-Ringen befestigt. Ein Vakuum von ca.  $-0,3$  bar wurde in die Probe eingeleitet, um sie zu stabilisieren. Danach konnten die Halbschalen und die Einbauhilfe entfernt werden. Nach der Vermessung der Probe wurde die Zelle montiert und mit destilliertem entlüftetem Wasser gefüllt. Ein Stützdruck von 30 kPa ersetzte schrittweise das Vakuum in der Probe.

Die Proben sollen unter vollständig wassergesättigtem Zustand getestet werden. Eine Teilsättigung kann zur Verfälschung der Ergebnisse führen. Beispielsweise kann ein komprimierbarer Lufteinschluss in der Probe die Porenwasserüberdruckentwicklung eines undrännierten Versuchs beeinflussen oder die Volumenänderung eines drännierten Versuchs verfälschen. Daher wird dem Sättigungsvorgang besondere Aufmerksamkeit gewidmet. In den Versuchen der vorliegenden Arbeit wurden die Proben zunächst mit Kohlendioxid  $\text{CO}_2$  gesättigt. Mit  $\text{CO}_2$  kann der Sättigungsvorgang erheblich beschleunigt werden (Savidis & Schuppe [92]). Dabei wurde  $\text{CO}_2$  durch die Probe von unten nach oben mit einer kleinen Geschwindigkeit in ca. einer Stunde geleitet. Mit ähnlicher Vorgehensweise wurde danach die Probe mit entlüftetem Wasser gefüllt. Nach Durchströmen der Probe mit Wasser wurde das Leitungssystem von Luftblasen befreit und an die Probe angeschlossen. Danach wurde über die Bürette ein Sättigungsdruck („Back Pressure“) von 300 kPa auf die Probe aufgebracht. Der Zelldruck wurde dabei ständig mit 15 kPa bis 30 kPa größer als der Sättigungsdruck gehalten. Nach ca. einem Tag Standzeit wurde der B-Wert bestimmt. Der B-Wert nach Skempton [99] ist ein Kriterium für den Sättigungsgrad der Probe. Für einen B-Wert  $B \geq 0,95$  ist die Probe ausreichend gesättigt. Nach dem erfolgreichen B-Test war die Probenpräparation abgeschlossen und der Versuch Startbereit.

### 4.1.3 Versuchsdurchführung

Ausgang für den Versuch war der Zustand nach der Sättigung der Probe: Zelldruck von 330 kPa und Porenwasserdruck (Back Pressure) von  $u = 300$  kPa. Zunächst wurde die Kralle vorsichtig an den oberen Laststempel herangefahren. Eine kleine Kontaktspannung wurde aufgebaut (ca. 1–2 kPa). Der Wegaufnehmer wurde am Belastungskolben so positioniert, dass ein maximaler Messbereich erzielt werden kann. Der Bürettenstand wurde auch abgesenkt, um eine maximale resultierende Volumenänderung der Probe messen zu können. Vor dem Start der Konsolidierung wurde die Messdatenerfassung eingeschaltet. Alle Messwerte (axiale Kraft, Zelldruck, Porenwasserdruck, axiale Verformung und Volumenänderung) wurden in einem separaten Computer mit der Datenerfassungssoftware NextView aufgenommen. Die Daten wurden mit einer Rate von 10 Messwerten pro Sekunde aufgezeichnet.

Um einen mittleren Spannungszustand mit  $p^{\text{av}}$  und  $q^{\text{av}}$  zu erzielen, wird zunächst

eine isotrope Spannung  $\sigma_3 = p^{\text{av}} - q^{\text{av}}/3$  mittels Erhöhung des Zelldrucks aufgebracht. Anschließend wurde die axiale Spannung um den Betrag  $\Delta\sigma_1 = q^{\text{av}}$  erhöht. Die Kraftsteuerung erfolgte über die Kraftmessdose innerhalb der Druckzelle. Nach einer Konsolidierungszeit von ca. einer Stunde wurde ein Leckagetest durchgeführt.

Bei erfolgreichem Leckagetest wurde der zyklische Belastungsanteil  $q^{\text{ampl}}$  mit Hilfe des externen Funktionsgenerators aufgebracht. Der erste Zyklus wurde aufgrund der großen Verformung mit einer kleinen Frequenz von 0,01 Hz gefahren. Die weiteren 200 Zyklen wurden mit 0,25 Hz und der Rest der  $10^5$  Zyklen mit 0,5 Hz durchfahren.

## 4.2 Einfeldscherversuch

### 4.2.1 Testgerät

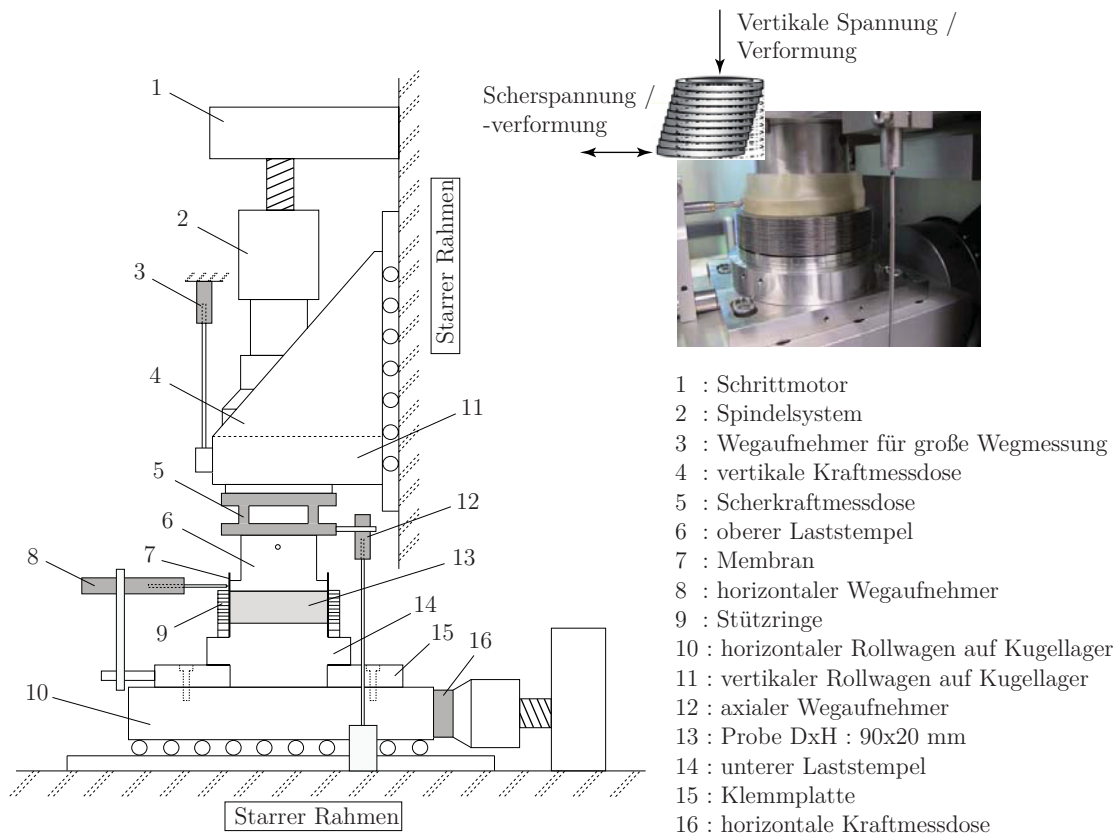


Abbildung 4.3: Schematische Darstellung des zyklischen Einfeldschergeräts und Fotoaufnahme der Probenzelle

Zur experimentellen Untersuchung des Bodenverhaltens unter multidirektionaler Belastung in der vorliegenden Arbeit steht ein zyklisches Einfeldschergerät des Fachgebiets Grundbau und Bodenmechanik der Technischen Universität Berlin zur Verfügung (Savidis [90]). Es handelt sich um ein modifiziertes Gerät vom Typ NGI. Die Probenzelle dieses Geräts besteht aus einer Gummimembran (Stärke ca. 0,4

mm), die durch die aufeinander gestapelten Metallringe gestützt wird (Abbildung 4.3: 7 und 9). Die Ringe sind mit Teflon beschichtet, um die Reibung zu minimieren. Es liegen drei Sätze von den Ringen für die Probe mit den Durchmessern von 50 mm, 70 mm und 90 mm vor. Mit der Variation der Ringanzahl können verschiedene Probenhöhen getestet werden (Dicke des einzelnen Rings  $t = 1$  mm). Nach eigener Untersuchung (Abschnitt 4.2.4) wurde für alle Versuche in der vorliegenden Arbeit die Probenabmessung mit D x H: 90 mm x 20 mm gewählt.

Die Normalspannung wird über den oberen Laststempel auf die Probe aufgebracht. Der Laststempel wird an einem Rollwagen mit Kugellager befestigt und vertikal geführt (Abbildung 4.3: 11). Das Kugellager des Rollwagens ist mit einem starren Rahmen aus massivem Stahl verbunden. Dadurch kann eine Verkipfung des oberen Stempels verhindert werden. Die vertikale Kraft wird durch einen Schrittmotor und ein Spindelsystem (Abbildung 4.3: 1, 2) erzeugt und über die Messwerte der Kraftmessdose (Abbildung 4.3: 4) gesteuert. Die Bewegung des Stempels während des Einbauvorgangs wird mit einem Wegaufnehmer mit einem großen Messbereich (100 mm) erfasst (Abbildung 4.3: 3). Für die kleine axiale Dehnung der Probe während des Versuchs steht noch ein zweiter Präzisionswegaufnehmer mit hoher Auflösung zur Verfügung (Messbereich 2,5 mm; Abbildung 4.3: 12).

Die Abscherung der Probe erfolgt über die Verschiebung des unteren Laststempels gegenüber dem oberen Stempel. Der untere Laststempel ist auf einem Rollwagen befestigt, der über Kugellager geführt wird. Der Wagen ermöglicht eine reibungsarme Bewegung und verhindert die Verkipfung des Stempels während des Schervorgangs. Die horizontale Bewegung wird über einen zweiten Schrittmotor erzeugt. Die Schubspannung in der Probe wird durch die Kraftmessdose oberhalb des Laststempels erfasst. Es handelt sich hier um eine spezielle Kraftmessdose, die die Messung in senkrechter Richtung zu ihrer Achse ermöglicht. Mit der Messung der Schubkraft oberhalb der Probe wird die horizontale Reibung am Rollwagen nicht erfasst. Um die Übertragung der Schubkraft vom Stempel in die Probe zu gewährleisten, werden die Oberflächen der Laststempel mit Sandpapier beklebt. Die zweite horizontale Kraftmessdose (Abbildung 4.3: 16) wird für die horizontale Steuerung und Abschaltung der Anlage während des Einbauvorgangs verwendet. Die horizontale Verschiebung wird mit einem inkrementellen Wegaufnehmer gemessen. Dieser hoch präzise Aufnehmer arbeitet mit dem gleichen Prinzip wie der vom Triaxialgerät (Abschnitt 4.1.1). Die Verschiebung wird direkt am Stempel gemessen, damit die Verformung des Geräts die Messergebnisse nicht beeinflusst.

Mit zwei Schrittmotoren können die vertikale und horizontale Achse unabhängig voneinander zyklisch gesteuert werden. Abhängig von der Amplitude kann man die Probe mit einer Frequenz bis zu 5 Hz belasten. Mit dem Gerät ist es möglich, die Proben unter konstanter Normalspannung (drainierte Bedingung), konstantem Volumen (undrainierte Bedingung) oder konstanter Steifigkeit („*Constant Normal Stiffness*“) zu testen.

Das Gerät wurde ursprünglich nur für die Scherbelastung in einer Richtung konzipiert. In diesem Zustand kann die Scherbelastung auf die Probe nur in der Richtung des horizontalen Spindelsystems aufgebracht werden. Durch die Modifikation an der

Zelle ist es möglich, während des Versuchs die Probe zu drehen und damit die Richtung der Scherbelastung entsprechend zu ändern. Für die Drehung der Probe muss der obere Laststempel von der Kraftmessdose getrennt werden (Abbildung 4.3: 5 und 6). Um jedoch den Spannungszustand auch während des Drehvorgangs aufrecht zu halten, wird zusätzlich an der Probenzelle eine Haltevorrichtung installiert (Abbildung 4.5). Mit dieser Vorrichtung lässt sich der obere Laststempel fixieren und eine axiale Kraft auf die Probe einstellen. Im Abschnitt 4.2.3 wird dieser Vorgang detailliert beschrieben.

### 4.2.2 Probenpräparation

Zuerst wurde die Gummimembran über den unteren Stempel gestülpt und mit einem O-Ring und zwei Anpressringen fest geklemmt. Für einen sauberen und kontrollierten Einbau der Probe wurde eine Einbauhilfe aus zwei Halbschalen verwendet. Die Halbschalen passen zum Durchmesser des unteren Stempels und der Stützringe und halten die Ringe während des Einbauvorgangs fest. Dadurch konnte ein gerader und senkrechter Probenrand erreicht werden. Mit einem Vakuum von -0,3 bar wurde die Membran an die Ringe angesaugt (Abbildung 4.4b).

Nach der Trocknung des Sandes im Ofen wird für die Proben mit einer Höhe von 20 mm der Kornanteil größer als 2 mm abgetrennt (nach Empfehlung von ASTM D6528 [9]). Ähnlich wie die Probenpräparation beim Triaxialversuch wird der Sand hier eingerieselt. Dabei wurde eine Rieselvorrückung angewendet, mit der man den Sand gleichmäßig in die Halbschalen einregnen kann (Abbildung 4.4c). Durch die Variation der Maschenweite und der Fallhöhe konnten verschiedene Lagerungsdichten erreicht werden. Nach dem Einrieseln des Sandes wurde die Probeoberfläche mit einem Messer glatt gezogen. Anschließend wurde die Probe in das Gerät gestellt und mit einer Klemmplatte fixiert (Abbildung 4.3: 15). Mit Hilfe der Steuerungssoftware wurde der obere Laststempel an die Probe herangefahren. Nach der Abschaltung des Vakuums wurde die Membran hochgezogen und die Halbschalen abmontiert. Die Wegaufnehmer wurden in die vorgesehene Position gebracht und genullt.

### 4.2.3 Versuchsdurchführung

Nach dem Einbau wurde zuerst eine Normalspannung  $\sigma_{yy}$  auf die Probe aufgebracht, dabei wurde die horizontale Kraft auf Null gehalten. Abhängig von dem Belastungsprogramm wurde die Probe anschließend bis zur mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{av}$  oder der mittleren Schubverzerrung  $\gamma_{yx}^{av}$  abgeschert (bei symmetrischen Wechsellastversuchen ist  $\tau_{yx}^{av}$  oder  $\gamma_{yx}^{av} = 0$ ). Nach der Konsolidierung wurde der zyklische Anteil der Belastung dem mittleren Zustand überlagert. Alle Versuche in dieser Arbeit wurden mit einer Frequenz von 1 Hz gefahren. Die Messwerte (vertikale und horizontale Verformung, Normal- und Schubspannung) wurden mit der Steuerungssoftware aufgenommen. In der Konsolidierungsphase wurde alle 3 Sekunden ein Messwert aufgenommen. Bei der zyklischen Belastung wurden 50 Messpunkte pro Zyklus aufgezeichnet.

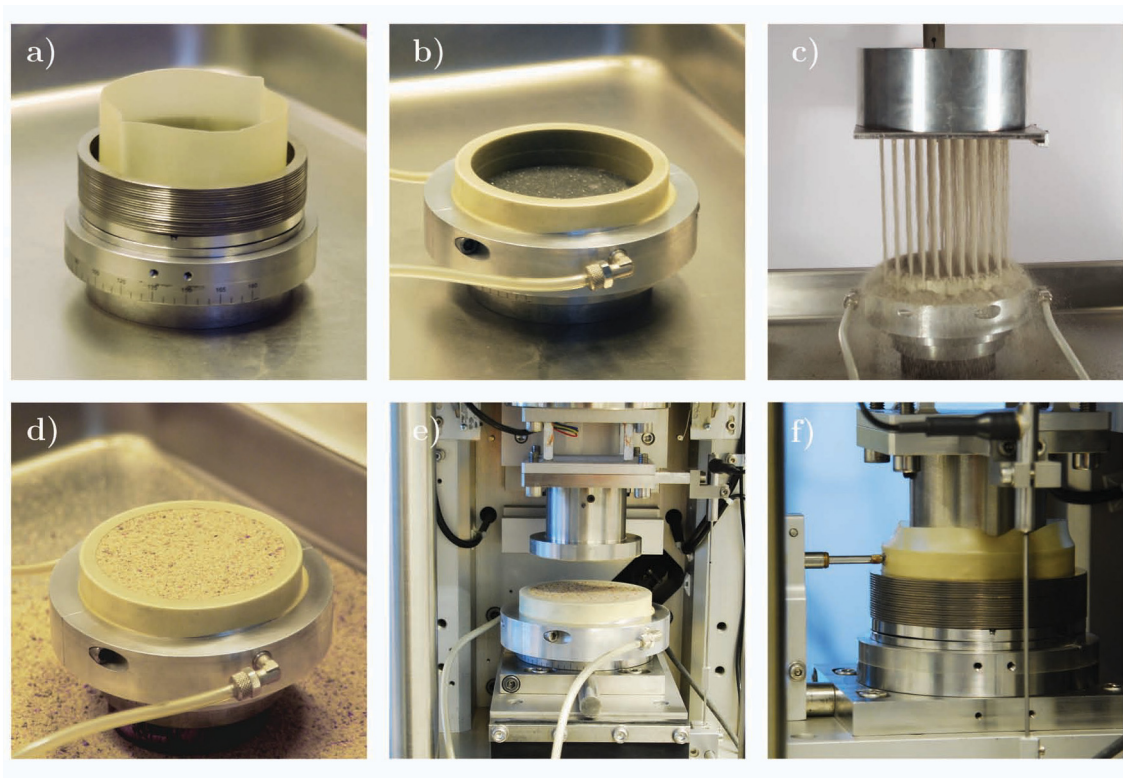
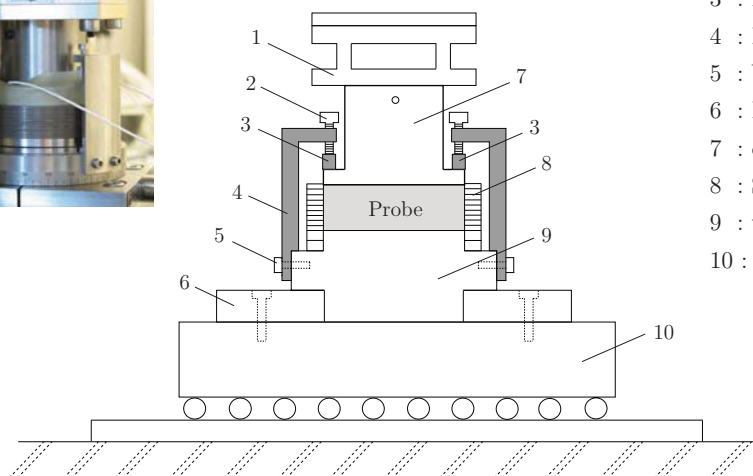


Abbildung 4.4: Probenpräparation im Einfeldschergerät: a) unterer Laststempel mit geklemmter Membran und Stützringen, b) Ansaugen der Membran an den Ringen und Halbschalen mit Vakuum, c) Sandeinrieseln, d) Glätten der Probenoberfläche, e) Anbringen der Probe am Gerät, f) fertig eingebaute Probe



- 1 : Scherkraftmessdose
- 2 : Stellschrauben
- 3 : Minikraftmessdose
- 4 : Klemmvorrichtung
- 5 : Verschraubung
- 6 : Klemmplatte
- 7 : oberer Laststempel
- 8 : Stützringe
- 9 : unterer Laststempel
- 10 : horizontaler Rollwagen auf Kugellager

Abbildung 4.5: Haltevorrichtung für das Drehen der Probenzelle



Durch die Modifikation an der Probenzelle ist es möglich, sie während des Versuchs zu drehen. Damit kann die Richtung der Scherbelastung entsprechend verändert werden. Während beim unidirektionalen Versuch die Richtung der Belastung im ganzen Versuchsverlauf gleich blieb, wurde bei der multidirektionalen Belastung die Scherrichtung nach einer bestimmten Anzahl von Zyklen  $N_P$  gewechselt. Dabei wurde der Versuch gestoppt und an der Probenzelle zusätzlich eine Haltevorrichtung eingebaut (Abbildung 4.5). Diese Vorrichtung bestand aus drei Klemmen, die gleichmäßig um die Probe montiert wurden. Die Klemmen hatten die Funktion, die Vertikalspannung auf der Probe während des Drehvorgangs konstant zu halten. Die Klemmkraft konnte über drei Spindeln manuell auf dem Laststempel eingestellt werden. Durch die in den Klemmen installierten Miniatur-Kraftmessdosen wurden die Klemmkräfte kontrolliert. Während die Kraft auf den Laststempel reduziert wurde, wurde die Kraft mittels Klemmvorrichtung sukzessive gesteigert, so dass die vertikale Kraft in der Summe jederzeit konstant blieb. Nach der vollständigen Umlagerung der vertikalen Kraft konnte der obere Laststempel von der Scherkraftmessdose getrennt werden. Die Probenzelle wurde von der unteren Klemmplatte gelöst und frei um die eigene Achse um den gewünschten Winkel  $\alpha_P$  gedreht. Nach der Drehung und Fixierung der Probenzelle mit der unteren Klemmplatte wurde die vertikale Kraft wieder sukzessive von der Haltevorrichtung auf den Laststempel übertragen. Nach dem Ausbau der Klemmen und Anbringen der Wegaufnehmer konnte der Versuch mit der weiteren zyklischen Belastung fortfahren.

Der Einfluss des Drehvorgangs auf die Probe wurde anhand von Testversuchen im Vorfeld untersucht. Bei diesen Testversuchen wurde die zyklische Belastung nach 1.000 Zyklen gestoppt und die zuvor beschriebene Prozedur für den Drehvorgang durchgeführt. Dabei wurde die Probenzelle jedoch nicht gedreht ( $\alpha_P = 0^\circ$ ), d.h. die Probe wurde nach 1.000 Zyklen mit der gleichen Bedingung wie vorher weiter getestet. Im idealen Fall würden die Ergebnisse dieses Versuchs einen ähnlich „glatten“ Verlauf wie die vom unidirektionalen Versuch zeigen. Anhand der Ergebnisse ist festzustellen, dass der Drehvorgang einen nur vernachlässigbar kleinen Einfluss auf das Verhalten der Probe hat. Die Volumendehnung zeigt nach der Drehung einen leichten Anstieg der Rate, die nach einigen Zyklen wieder schnell abgeklungen ist. Die Schubverzerrungskurve zeigt auch nur eine minimale Änderung nach 1.000 Zyklen. Die Amplitude bleibt dabei aber unverändert. Mit steigender Amplitude fällt die Störung geringer aus und ist zu vernachlässigen.

Die Reproduzierbarkeit der Einfachscherversuche mit der Änderung der Scherbelastungsrichtung wurde auch mit den Vorversuchen geprüft. In der Abbildung 4.6 wurde anhand der drei Versuche mit gleichen Randbedingungen eine gute Wiederholbarkeit demonstriert. Die Volumenänderung (Abbildung 4.6, links) zeigt eine relative gute Übereinstimmung zwischen den Versuchen. Die Versuche wurden mit gleicher Lagerungsdichte eingebaut. Trotz den Bemühungen bei der Probenpräparation führten minimale Abweichungen dazu, dass nach 1.000 Zyklen kleine Unterschiede bei der Volumenänderung auftraten. Um einen Vergleich der Änderung nach der Drehung zwischen den Versuchen zu ermöglichen, werden die Volumendehnungen mit dem jeweiligen Betrag nach 1.000 Zyklen normiert. Die volumetrischen Änderungen nach der Drehung stimmen sehr gut überein (Abbildung 4.6, rechts).

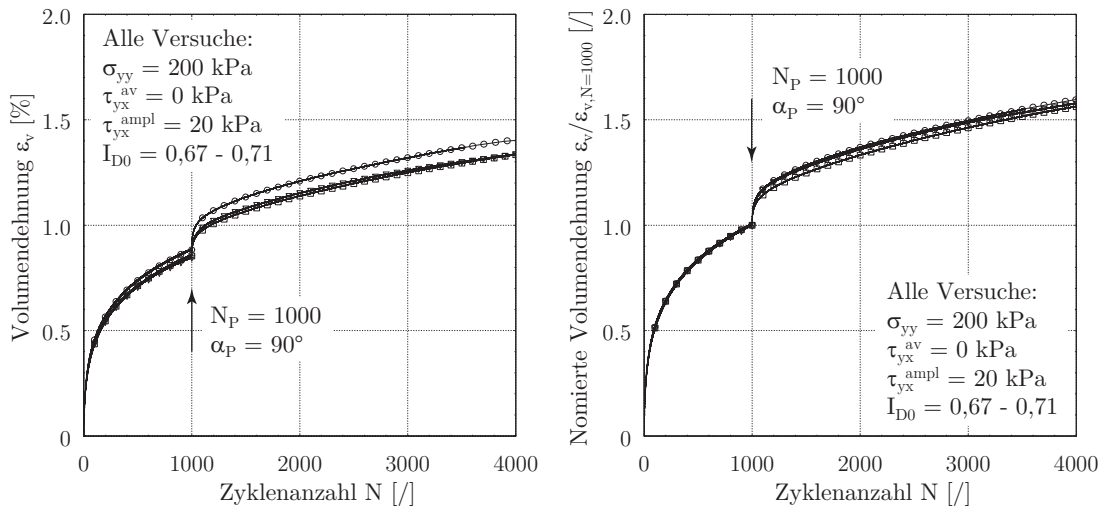


Abbildung 4.6: Reproduzierbarkeit der multidirektionalen Einfeldscherversuche: Versuch mit zwei Wiederholungen. Verlauf der Volumendehnungen  $\varepsilon_v$  (links) und Verlauf der normierten Volumendehnungen  $\varepsilon_v / \varepsilon_{v,N=1000}$  (rechts)

#### 4.2.4 Spannungs- und Verformungsverteilung im Einfeldscherversuch

Das Prinzip der einfachen Scherung („*Simple Shear*“) in einem Bodenelement soll in dem Einfeldschergerät durch das Einprägen eines ebenen Verformungszustands erreicht werden. Die Verformung der Probe kann direkt mit der Schubverzerrung  $\gamma_{yx} = \Delta x / h_0$  und der axialen Dehnung  $\varepsilon_{yy} = \Delta h / h_0$  (Abbildung 2.6) dargestellt werden. Aus der Bedingung, dass keine horizontalen Dehnungen auftreten, folgt, dass die axialen Dehnungen  $\varepsilon_{yy}$  betragsmäßig identisch mit den volumetrischen Dehnungen  $\varepsilon_v$  sind. Für einen Elementversuch sollen die Dehnungs- sowie Spannungszustände überall in der Probe identisch sein (homogene Dehnungs- und Spannungsverteilung in der Probe). Diese Voraussetzung kann unter Laborbedingungen nur teilweise umgesetzt werden.

Ein fundamentales Problem bei der labortechnischen Umsetzung der idealen Einfeldscherdeformation (Abbildung 4.7a) ist die ungleichförmige Verteilung der Normal- und Schubspannungen infolge der fehlenden Schubspannung an den Seitenflächen (in der Abbildung 4.7b). Die Verteilung der Spannung wurde anhand der Ergebnisse von analytischen und numerischen Berechnungen sowie von Laborversuchen untersucht (z. B. nach Roscoe [88], Luck et al. [63] oder Prevost & Høeg [82]). Aufgrund der freien vertikalen Verformung am Rand der Probe sind die Seitenflächen in den Laborgeräten glatt oder mit einer Gummimembran bedeckt, dadurch kann die Schubspannung kaum aufgebaut werden. Allerdings werden bei der Abscherung am oberen und unteren Rand der Probe Schubspannungen  $\tau_{yx} \neq 0$  mobilisiert. Aufgrund der fehlenden Schubspannungen an den seitlichen Rändern (Abbildung 4.7b) verursachen diese Schubspannungen an der Probenoberfläche ein Moment in der Probe. Für die Herstellung des statischen Gleichgewichts ergibt sich eine un-

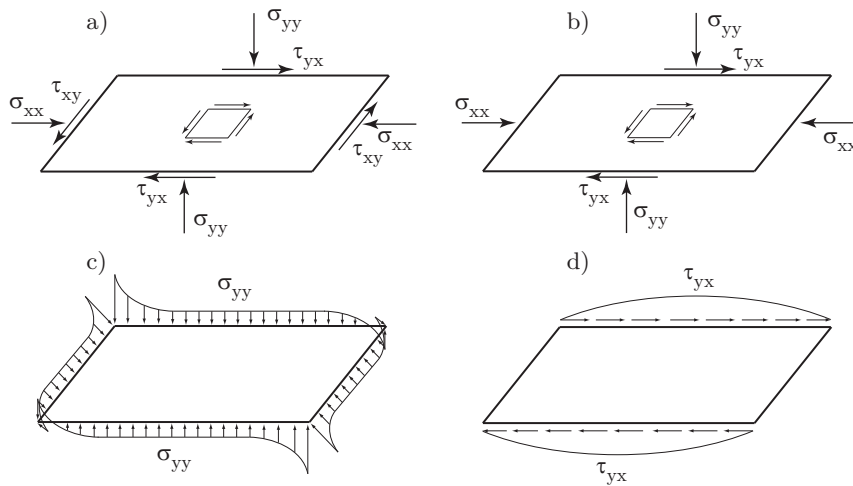


Abbildung 4.7: a) Ideale einfache Scherung („Pure Shear“), b) Einzugscherversuch im Labor, c) qualitative Darstellung der Normalspannungsverteilung, d) qualitative Darstellung der Schubspannungsverteilung. Nach: Airey et al. [3], Vucetic & Lacasse [107], DeGroot et al. [23]

gleichmäßige Normalspannungsverteilung an den Rändern, woraus eine exzentrische Lasteinleitung resultiert (Abbildung 4.7c). Die Schubspannungen am oberen und unteren Rand zeigen wie erwähnt auch keine gleichmäßige Verteilung (Abbildung 4.7d).

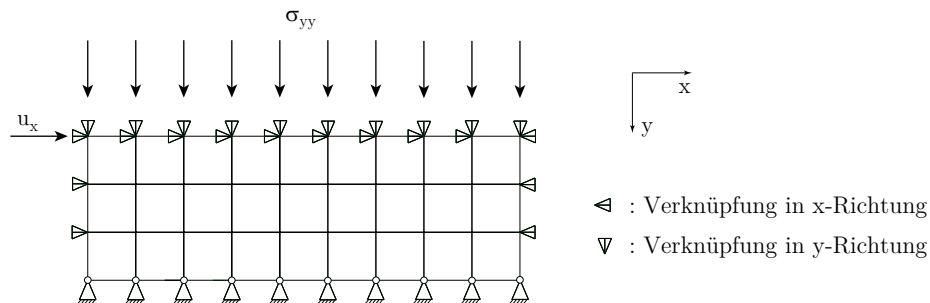


Abbildung 4.8: Schematische Darstellung der Randbedingungen des Einzugscherversuchs in der FE-Berechnung

Für die Untersuchung der Spannungsverteilung der Proben mit unterschiedlichen Abmessungen wurde in der vorliegenden Arbeit die Verformung der Probenzelle mit dem hypoplastischen Stoffgesetz modelliert. Die Berechnung wurde mit dem Programm ANSYS<sup>®</sup> 14.0 durchgeführt. In der Abbildung 4.8 sind schematisch die modellierten Randbedingungen des sogenannten „Einzugscherversuchs“ in einem ebenen Dehnungszustand dargestellt. Die unteren Randknoten wurden in beiden Richtungen festgehalten. Die Stützung der Probe durch die Metallringe wurde mit der Kopplung der Randknoten modelliert. Dabei wurde die horizontale Verschiebung der Randknoten an der linken Seite mit der der gegenüber liegenden Knoten an der rechten Seite verknüpft, damit der Abstand der Knoten während der Sche-



rung konstant bleibt. Die Verschiebungen aller oberen Randknoten wurden in beiden Richtungen in gleicher Weise gekoppelt. Die Parallelführung des oberen und unteren Druckstempels wurde dadurch abgebildet. Die Reibung zwischen der Probe und dem seitlichen Zellenrand wurde nicht berücksichtigt. Nach Wichtmann [108] kann diese Reibung zu einer Vergleichmäßigung der Dehnungs- und Spannungsverteilung führen.

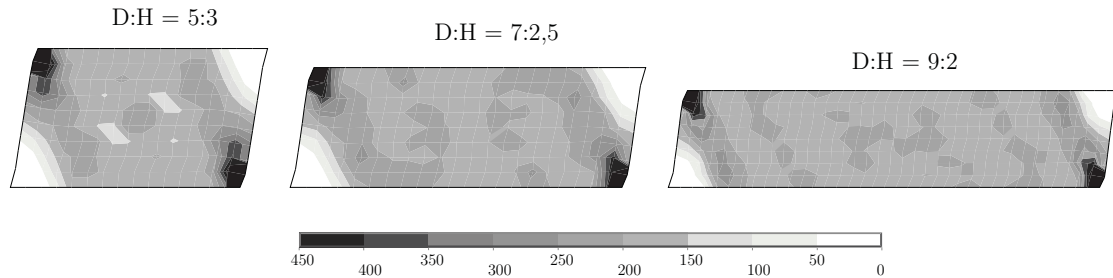


Abbildung 4.9: Normalspannung im Einfachscher Versuch mit verschiedenen Probenabmessungen, FE-Berechnung (2D) mit hypoplastischem Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung

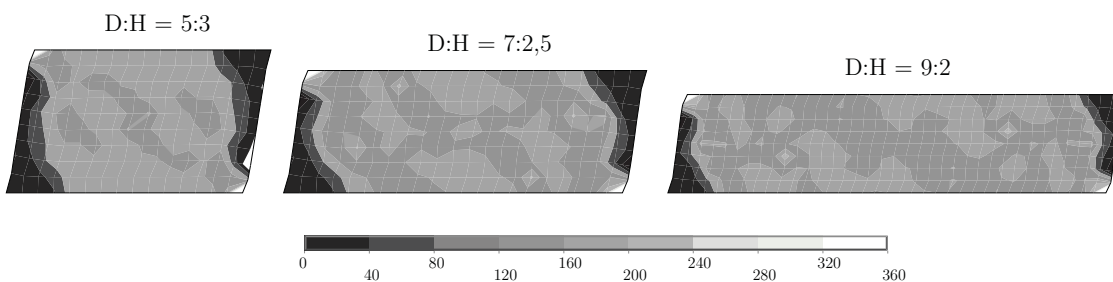


Abbildung 4.10: Schubspannung im Einfachscher Versuch mit verschiedenen Probenabmessungen, FE-Berechnung (2D) mit hypoplastischem Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung

Die Abbildung 4.9 stellt den Spannungszustand in verschiedenen Probenabmessungen (Durchmesser und Höhe:  $D \times H = 5 \text{ cm} \times 3 \text{ cm}$ ;  $7 \text{ cm} \times 2,5 \text{ cm}$  und  $9 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$ ) dar. Bei der Berechnung wurden auch die Normal- und Schubspannungen an den Rändern der Probe ermittelt. Es stellte sich heraus, dass bei allen Versuchen die Spannungen am Rand der Probe ungleichmäßig sind. Wie auch bei DeGroot et al. [23], Vucetic und Lacasse [107] Airey et al. [3] festgestellt wurde, bauen sich an den Ecken der Probe Spannungsspitzen auf. Abhängig vom Abmessungsverhältnis  $D:H$  weist die Probe unterschiedliche Verteilungen innerhalb der Probe auf. Je flacher die Probe ist (größeres Verhältnis  $D:H$ ), desto gleichmäßiger ist die Spannungsverteilung. Die Schubspannungen zeigen eine ähnliche Verteilung wie die der Normalspannungen (Abbildung 4.10).

In einigen Geräten (z. B. Typ Cambridge von Roscoe [88], Cole [22] oder Typ NGI in der Untersuchung von Budhu [18] bzw. Typ NGI von Stroud [100]) können die Spannungen an Teilflächen der Probe durch kleine Kraftmessdosen, die an den Rändern

installiert sind, aufgezeichnet werden. Aus den gemessenen Normal- und Schubspannungen dieser Teilflächen kann der Spannungszustand vom mittleren Drittel der Probe berechnet werden, wo eine annähernd homogene Spannungsverteilung angenommen wird. Der Geräteaufbau, die Datenerfassung und die Auswertung der Versuche mit mehreren Kraftmessdosen sind allerdings sehr kompliziert (siehe auch Cole [22]), daher sind die meisten Geräte (wie auch das in der vorliegenden Arbeit verfügbare Testgerät) nur mit einem Kraftaufnehmer für die Messung der mittleren Spannung auf der gesamten Probenoberfläche ausgerüstet. Die Ergebnisse der FE-Berechnung zeigen, dass die mittleren Normalspannungen des gesamten Querschnitts stets größer sind als die Spannungen im Mittelteil. Mit der steigenden Schubverzerrung vergrößert sich diese Abweichung und beträgt bei einer Schubverzerrung von  $\gamma_{yx} = 20\%$  ca. 5%. Die mittleren Schubspannungen und die aus dem Mittelteil sind dagegen relativ ähnlich. Aus den Ergebnissen der Berechnung mit Variationen von D:H ist festzustellen, dass sich die Abweichung der Spannungen mit dem zunehmenden Abmessungsverhältnis D:H verringert.

Aufgrund dieser Erkenntnisse wurden für die Versuche im Abschnitt 5 die Probenzelle mit der Abmessung  $D \times H = 9 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$  gewählt.

Das Ebenbleiben der Verformungsfigur beim Abscheren wurde bereits durch Youd [121] an einem Gerät vom Typ NGI und von Evgin & Oumarou [30] untersucht. Youd [121] hat dabei nur eine vernachlässigbar kleine Ungleichmäßigkeit der Verformungen festgestellt. In der vorliegenden Arbeit wurde die Problemstellung mit Hilfe der PIV-Methode umfassend untersucht. Die PIV-Methode (Adrian [2]) wurde ursprünglich in der Strömungsmechanik entwickelt und dient dort der Bestimmung von Geschwindigkeitsfeldern strömender Fluide aus Digitalfotos der entsprechenden Vorgänge. Dafür werden einzelne Partikel oder Muster von Partikeln in der Strömung identifiziert und meist durch eine Reihe von Bildern verfolgt. Vorteil dieser Methode ist die Möglichkeit der berührungslosen Messung, um mögliche Verformungen und Verschiebungen relativ genau zu erfassen. Für die Untersuchung wurde die Probenzelle vor einem weißen Hintergrund während des Versuchs mehrmals fotografiert. Die Fotos dienen der Analyse der Verformung am Rand der Zelle.

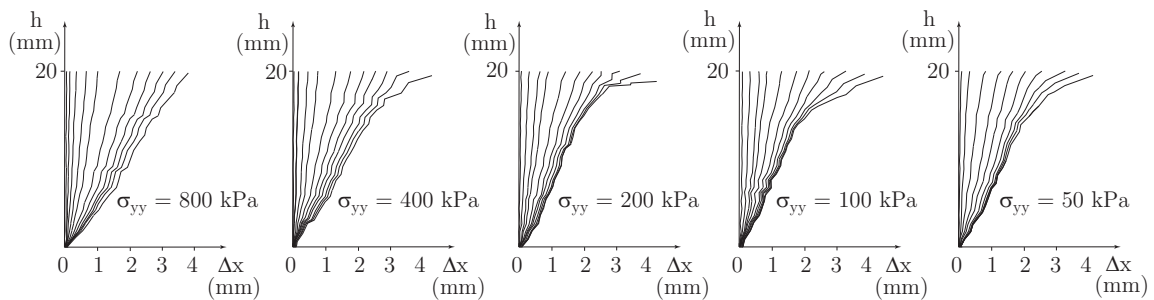


Abbildung 4.11: Verformung des Probenrands bei dichter Lagerung, Messung mit der PIV Methode

Die Verformungen bei den Versuchen mit unterschiedlichen Normalspannungen und unterschiedlichen Lagerungsdichten wurden untersucht. In der Abbildung 4.11 wurde die Analyse an Versuchen mit sehr dichten Proben und unterschiedlichen Normal-

spannungen gezeigt. Die Verformung der Probe entspricht qualitativ den Ergebnissen von Youd [121] und den oben beschriebenen FE-Berechnungen. Die Analyse der Bilder hat gezeigt, dass nur bei kleiner Schubverzerrung sowie im Versuch mit großer Normalspannung ( $\sigma_{yy} = 800 \text{ kPa}$ ) eine annähernd lineare Verformung erreicht wurde. In diesen Versuchen ist zu beobachten, dass der Druckstempel insbesondere bei kleineren Konsolidierungsspannungen an der Probenoberfläche gleitet. Das führt zu einer verfälschten Messung des Scherwegs und damit der gesamten Versuchsergebnisse. Dieses Phänomen tritt nur ab einer bestimmten Schubverformung auf, deren Betrag von der Konsolidierungsspannung und der Lagerungsdichte abhängig ist. Bei Versuchen mit geringer Normalspannung  $\sigma_{yy} = 50 \text{ kPa}$  fängt der Stempel bei einer Schubverzerrung von ca. 5% (Scherweg  $\Delta x = 1 \text{ mm}$ ) an zu gleiten, während im Versuch mit  $\sigma_{yy} = 800 \text{ kPa}$  der Stempel erst bei ca. 20% (Scherweg  $\Delta x = 4 \text{ mm}$ ) leicht abrutscht (Abbildung 4.11). Der Effekt verringert sich mit der Lagerungsdichte. Beim Versuch mit lockerer Probe und  $\sigma_{yy} = 50 \text{ kPa}$  rutscht der Stempel nur leicht bei sehr großer Verformung ab. Um diesen Effekt zu reduzieren, wurden neben dem Druckstempel mit geklebten Sandpapier auch andere Varianten untersucht. Zunächst wurde der Stempel mit einer stark profilierten Metallplatte versehen. Da der Effekt damit nicht reduziert werden konnte, wurde die obere Sandschicht nach dem Vorschlag von Stroud [100] mit Araldit, einem Epoxidharz, verklebt. Auch hier konnte keine wesentliche Verbesserung festgestellt werden. Zudem ist diese Vorgehensweise sehr aufwendig, da die Aushärtezeit des Klebers beachtet werden muss und die Entfernung des Klebers vom Stempel nach jedem Versuch arbeitsintensiv ist.

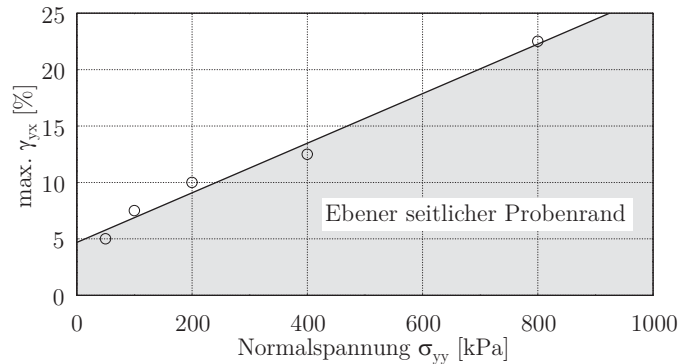


Abbildung 4.12: Grenze bei der ebenen Probenverformung

Die Abbildung 4.12 stellt die Ergebnisse der Verformungsuntersuchung zum Ebenbleiben des seitlichen Probenrandes dar. Aus den Bildanalysen wurden hierzu die Grenzzustände des Abrutschens annähernd ermittelt und aufgetragen. Damit kennzeichnet der Bereich unterhalb der Kurve eine ebene Verformungsfigur. Diese Grenze ist abhängig von der Rauigkeit des oberen und unteren Randes und gilt hier für das eingesetzte Sandpapier (Körnung 80).

## 4.3 Resonant Column Versuch

### 4.3.1 Testgerät

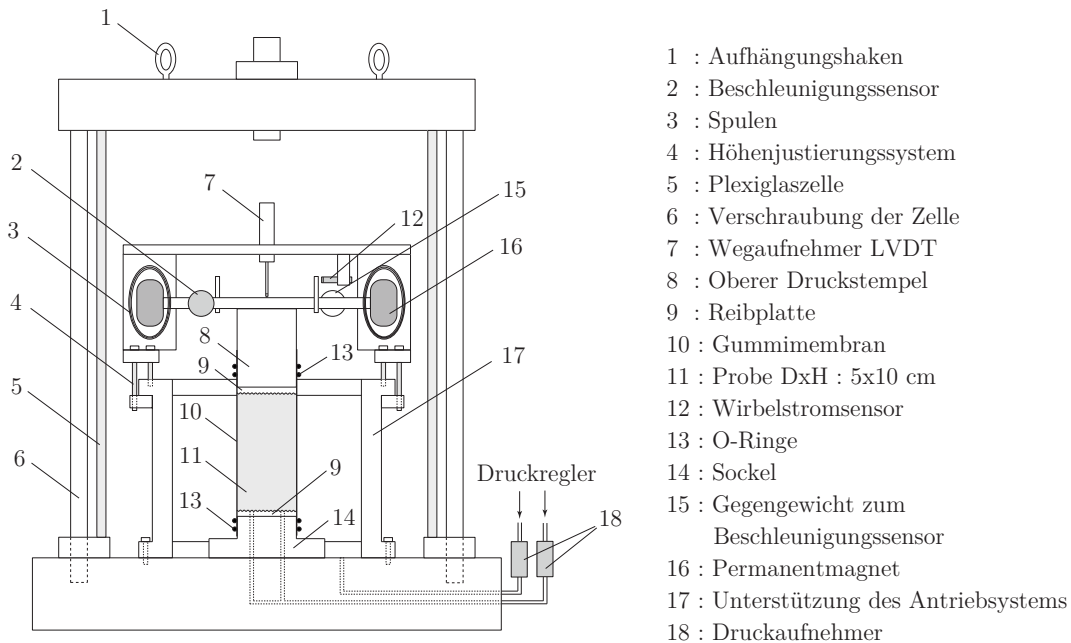


Abbildung 4.13: Schematische Darstellung des Resonant Column Geräts

In der Abbildung 4.13 wird die Druckzelle und die Belastungseinheit des Resonant Column Geräts (RC-Gerät) an der Technischen Universität Berlin dargestellt (Rackwitz [85], Bai [12], Savidis [90]). Es handelt sich hier um ein Gerät des Typs „Fixed-Free“ (festes Fußauflager mit Erregung am freien Probenkopf). Die zylindrische Probe ist von einer Gummimembran luftdicht umschlossen und wird am unteren Ende als eingespannt betrachtet. Der fest mit dem massiven Versuchstisch montierte Sockel und der obere Druckstempel sind für eine Probe mit den Abmessungen  $D \times H = 5 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$  ausgelegt (Abbildung 4.13: 14 und 8). Der obere Druckstempel wird nach dem Probeneinbau fest mit dem Antriebssystem verschraubt. Um eine schlupffreie Übertragung des Torsionsmoments auf die Probe zu ermöglichen, werden auf dem Sockel und dem oberen Druckstempel Reibplatten angebracht (Abbildung 4.13: 9). Das Antriebssystem besteht aus vier Permanentmagneten, die in vier Spulen frei beweglich sind (Abbildung 4.13). Durch die Anregung der vier Spulen mit einem elektronischen Signal wird die Probe in eine Torsionsschwingung versetzt. Eine Biegebeanspruchung der Probe ist durch Parallelschaltung der Spulen möglich. Die axiale Dehnung wird durch einen hochpräzisen induktiven Wegaufnehmer LVDT (Abbildung 4.13: 7) am Kopf der Probe gemessen. Für die Messung der Probenkopfverdrehung wird ein Beschleunigungssensor („Accelerometer“) eingesetzt. Neben der harmonischen Torsionsanregung bei hohen Frequenzen im RC-Versuch kann eine zyklische Torsionsbelastung bei geringer Frequenz  $f < 5 \text{ Hz}$  erfolgen (Torsional-Shear

Test). Hier wird die Probenverdrehung mit einem berührungslos arbeitenden Wirbelstromsensor erfasst (Abbildung 4.13: 2) (Rackwitz & Savidis [86]). Die Probe und das ganze Antriebssystem befindet sich in einer Triaxialzelle. Die mit Glasfaser verstärkte Plexiglaszelle ist für einen Druck bis zu 17 bar ausgelegt. Es ist möglich, den Zelldruck und Porendruck separat durch zwei Druckregler zu steuern.

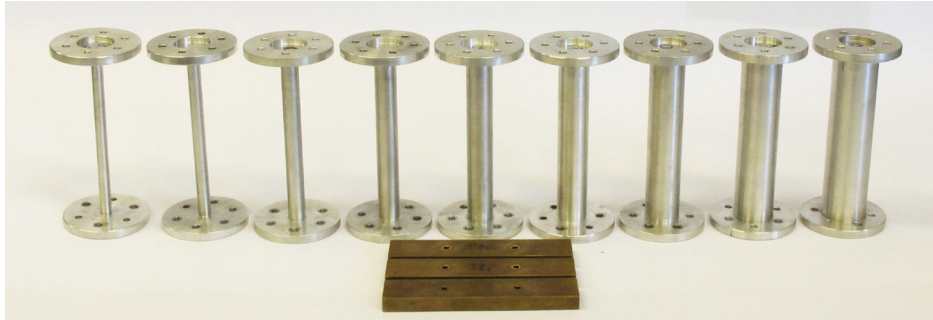


Abbildung 4.14: Verwendete Kalibrierbalken und Kalibriergewichte

Der Einfluss des Antriebssystems wird vor dem Versuchsbeginn durch Kalibrierung mit Aluminiumproben und Kalibriergewichten untersucht. Dabei wird das polare Trägheitsmoment des Systems ermittelt und für die Versuchsauswertung verwendet. Die Kalibrierung soll in verschiedenen Frequenzbereichen durchgeführt werden. Dafür stehen Kalibrierbalken mit unterschiedlichen Abmessungen zur Verfügung (Abbildung 4.14).

#### 4.3.2 Probenpräparation

Die beim RC-Versuch verwendete Einbaumethode ist ähnlich wie die beim Triaxialversuch. Zuerst wird die Gummimembran über den Sockel gestülpt und mit zwei O-Ringen fixiert. Um die Membran wurden die Halbschalen montiert. Mit einem Vakuum von  $-0,3$  bar wurde die Membran an die Halbschale angesaugt. Anschließend wurde der trockene Sand durch einen Trichter in die Halbschale eingerieselt. Die verschiedenen Lagerungsdichten wurden durch Variation des Durchmessers der Trichteröffnung und Fallhöhe des Sandes erreicht. Nach dem Glätten der Probenoberfläche wird unter besonderer Sorgfalt der Druckstempel auf dem Kopf der Probe platziert. Die Gummimembran wird danach hochgezogen und mit O-Ringen befestigt. Um die Probe zu stabilisieren wird ein Vakuum von ca. 25 kPa in die Probe eingeleitet. Danach können die Halbschalen entfernt werden. Nach der Ermittlung der Probenabmessung (Probendurchmesser und Probenhöhe) wird die Unterstützung des Antriebssystems eingebaut und das Antriebssystem schließlich aufgesetzt. Nach der Fixierung des Antriebssystems mit dem oberen Druckstempel wird die Position der Spulen horizontal und vertikal justiert, so dass sich die Permanentmagneten jeweils möglichst mittig innerhalb der Spulen befinden. Danach werden die elektrischen Anschlüsse hergestellt und die Kontakte kontrolliert. Nach dem Aufsetzen der Druckzelle wird das Vakuum in der Probe durch einen Stützdruck von 25 kPa ersetzt.

Die Resonant Column Versuche werden überwiegend an vollzylindrischen Proben, seltener an Hohlzylinder, getestet. Der Nachteil der Vollzylinder besteht darin, dass die Schubverzerrung entlang des Probenradius ungleichmäßig verteilt ist (Abbildung 2.8). Hier ist die Schubverzerrung am Probenrand am größten und in der Probenachse null. Dieser Mangel tritt beim Versuch an einem dünnwandigen Hohlzylinder nicht auf, allerdings ist hier die Probenpräparation sehr aufwendig. Aktuelle Studien haben gezeigt, dass die Ergebnisse aus dem Versuch mit Vollzylinderproben sich nicht von denen aus Hohlzylinderproben unterscheiden (Wichtmann & Triantafyllidis [115]).

### 4.3.3 Versuchsdurchführung

Nach dem Probeneinbau wird die Probe unter einem isotropen Spannungszustand konsolidiert ( $\sigma_1 = \sigma_2 = \sigma_3$ ). Dieser Spannungszustand wird von einem allseitigen Zelldruck erreicht. Infolge Eigengewicht aus Antriebskopf (777 g) und oberen Druckstempel (376 g) entsteht eine unvermeidbare, gerätebedingte Anisotropie des Spannungszustands, die bei einem Probendurchmesser von 5 cm eine vertikale Zusatzspannung von ca. 5,9 kPa ergibt. Diese zusätzliche Last ist im Vergleich zu dem Zelldruck oft klein und kann vernachlässigt werden.

Nach der Konsolidierung wird die Resonanzfrequenz ermittelt. Diese erfolgt zu Beginn jeder Konsolidierungsstufe mit der kleinstmöglichen Anregungsamplitude, die durch eine elektrische Spannung vorgegeben wird. Durch Variation der Erregerfrequenz wird die Eigenfrequenz des Systems ermittelt. Dabei wird zunächst ein weites Frequenzband mit einem relativ großen Inkrement (ca. 5 – 10 Hz) durchlaufen. Falls kein Resonanzpeak erkennbar ist, wird stufenweise mit kleinen Inkrementen die Anregungsamplitude vergrößert, bis der Resonanzzustand messbar ist. Danach wird das Frequenzband und das getestete Inkrement verkleinert. Die Anregungsamplitude wird danach erhöht und die Resonanzfrequenz wird erneut ermittelt. Während der niedrigen Konsolidierungsstufen wird die Probe nur mit kleiner Anregung ( $\gamma^{\text{ampl}} < 10^{-5}$ ) angeregt. Bei höchster Laststufe wird die Probe bis in den plastischen Bereich getestet.

Die Ermittlung des Schubmoduls erfolgt aus der ermittelten Resonanzfrequenz  $f_R$ , der Abmessung und dem Gewicht der Probe sowie dem polaren Trägheitsmoment des Antriebssystems (Abschnitt 2.4).



# 5 Experimentelle Untersuchungen mit Berliner Sand

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der eigenen Laborversuche präsentiert. Zuerst wird das monotone Verhalten des Berliner Sandes untersucht. Die Ergebnisse werden für die Bestimmung der Parameter des hypoplastischen Stoffgesetzes verwendet. Danach wird das zyklische Bodenverhalten im Resonant Column-, Triaxial- und Einfachscherversuch umfassend untersucht. Weiterhin wird der Einfluss der Polarisationsänderung (Änderung der Lastrichtung) anhand der Ergebnisse von multidirektionalen Einfachscherversuchen behandelt.

## 5.1 Versuchsmaterial

Alle Laborversuche in der vorliegenden Arbeit wurden mit Berliner Sand durchgeführt. Es handelt sich dabei um einen eng gestuften Mittel- bis Grobsand mit einem Ungleichförmigkeitsgrad  $U = 3,3$  und einem mittleren Korndurchmesser  $d_{50} = 0,55 \text{ mm}$  (Abbildung 5.1). Die Ermittlung der minimalen und maximalen Lagerungsdichte wurde nach DIN 18126 durchgeführt. Dabei wurde eine maximale Dichte von  $\rho_{d,\max} = 1,906 \text{ g/cm}^3$ ,  $e_{\min} = 0,391$  und eine minimale Dichte von  $\rho_{d,\min} = 1,570 \text{ g/cm}^3$ ,  $e_{\max} = 0,688$  ermittelt. Die Korndichte beträgt  $\rho_s = 2,61 \text{ g/cm}^3$ .

Der gleiche Sand wurde auch bei den großmaßstäblichen Modellversuchen an horizontal belasteten Pfählen von Tasan [102] verwendet. Nach mehrmaliger Beflutung und Entwässerung der Versuchsgrube sowie Einspülung des Materials beim Einbau wurde ein erhöhter Kalkgehalt im Sand festgestellt. Eine Untersuchung zum Einfluss des Kalkgehaltes auf das zyklische Verhalten des Sandes wurde an dieser Stelle nicht weiter durchgeführt.

## 5.2 Materialverhalten unter monotoner Belastung

Die Untersuchung des Bodenverhaltens unter monotoner Belastung ist auf der einen Seite für die Bestimmung der Parameter für das Stoffmodell notwendig, auf der anderen Seite ist sie für das Verständnis des zyklischen Verhaltens von großer Bedeutung. Daher werden im folgenden die Ergebnisse der monotonen Versuche an Berliner Sand vorgestellt und das monotone Verhalten erläutert.

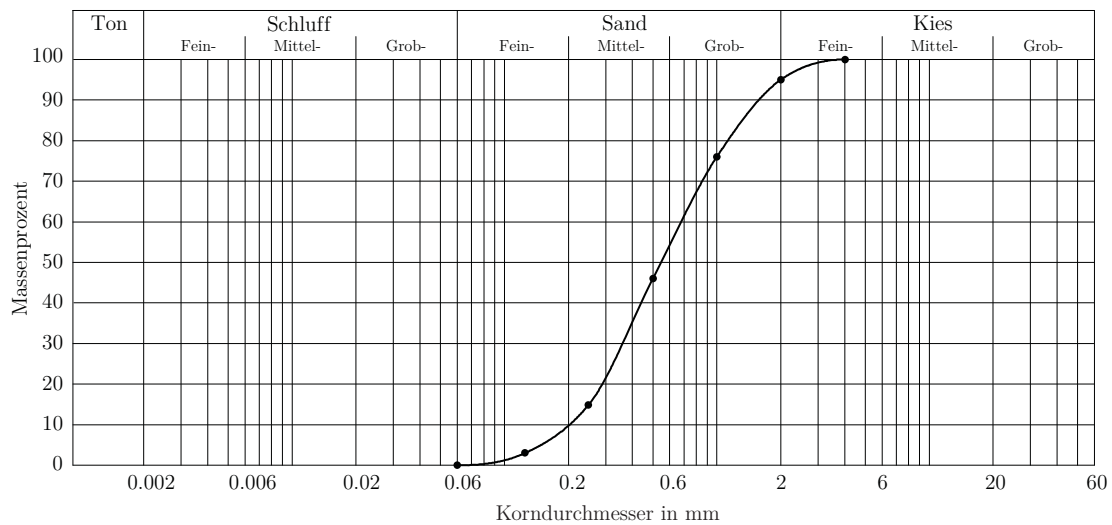


Abbildung 5.1: Kornverteilungskurve Berliner Sand

### 5.2.1 Dränierte Triaxialversuche

Für die Bestimmung des Peak-Reibungswinkels  $\varphi_P$  bei der dichten Lagerung und des Parameters  $\alpha$  des hypoplastischen Stoffgesetzes (Abschnitt 6.5.2) wurden drei dränierte monotone Triaxialversuche mit hohen Anfangslagerungsdichten  $I_{D0}$  und verschiedenen effektiven Seitendrücken  $\sigma_3$  durchgeführt. Außerdem wurden drei Proben mit unterschiedlichen Lagerungsdichten für die Untersuchung des Peak-Reibungswinkels in Abhängigkeit von den Anfangslagerungsdichten getestet. Die Sandproben wurden mit einer konstanten Geschwindigkeit von 0,1 mm/min abgescher. Dabei wurde die Volumenänderung über das ein- und ausströmende Porenwasser der gesättigten Probe gemessen.

Die Abbildung 5.2 stellt die Ergebnisse der monotonen Triaxialversuche bei sehr dichter Lagerung ( $I_{D0} = 0,85 - 0,89$ ) unter den Konsolidierungsspannungen  $\sigma_3 = 100, 200$  und  $300$  kPa dar. Die Entwicklung der Deviatorspannung  $q$  zeigt bei allen drei Versuchen nach ca. 2,5 bis 3,5% axialer Dehnung einen Peak. Danach nehmen die Deviatorspannungen deutlich ab und kommen nach 20% axialer Dehnungen tendenziell zu einem kritischen Zustand (keine Änderung der Spannungen und Volumen bei weiterer Abscherung). Die Volumenänderung zeigt ein ausgeprägtes Dilatanzverhalten nach der anfänglichen Kontraktanz. Die Auflockerung setzt beim Versuch mit kleiner Konsolidierungsspannung früher ein als bei den größeren Drücken.

In der Abbildung 5.3 wurden die Ergebnisse der Versuche mit drei unterschiedlichen Anfangslagerungsdichten  $I_{D0} = 0,89, 0,68$  und  $0,36$  verglichen. Erwartungsgemäß steigt die Deviatorspannung mit zunehmender Lagerungsdichte. Der Versuch mit  $I_{D0} = 0,89$  wurde aus technischen Gründen bei 13% und die anderen nach 20% axialer Dehnung abgebrochen. Der Verlauf der Deviatorspannungen nähern sich nach 20% axialer Dehnung tendenziell einem gemeinsamen Wert (kritischer Zustand). Das Dilatanzverhalten nimmt mit steigender Lagerungsdichte zu.



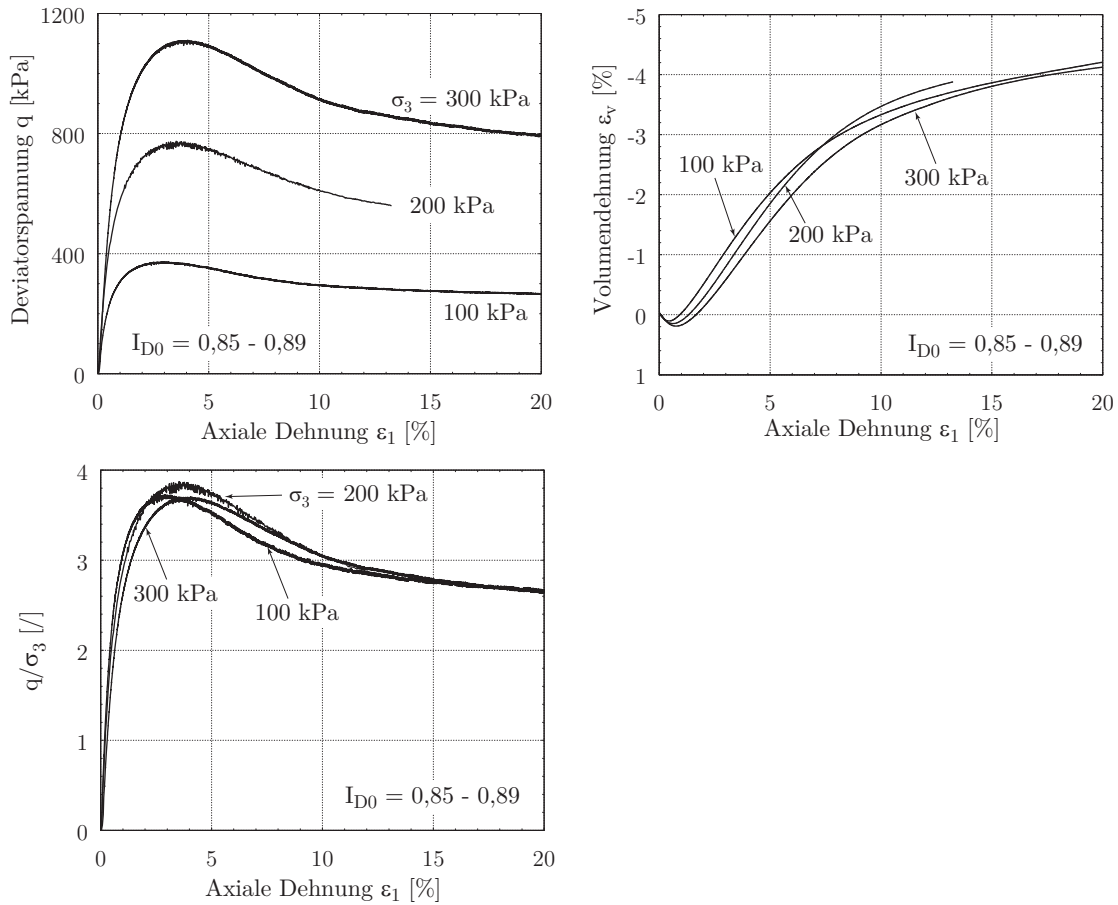


Abbildung 5.2: Monotone Triaxialversuche mit dichter Lagerung und unterschiedlicher Konsolidierungsspannung  $\sigma_3$

Aus diesen Versuchen wurde ein Peak-Reibungswinkel  $\varphi_P = 40,5^\circ$  für sehr dichten Sand,  $\varphi_P = 35,7^\circ$  für dichten Sand und  $\varphi_P = 33^\circ$  für lockeren Sand ermittelt. Die Peak-Reibungswinkel in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte sind in der Abbildung 5.4 dargestellt.  $\varphi_P$  kann anhand einer exponentiellen Funktion über die Lagerungsdichte  $I_{D,P}$

$$\varphi_P(I_{D,P}) = 31,5^\circ \exp(0,42 \cdot I_{D,P}^{2,90}) \quad (5.1)$$

beschrieben werden. Für die lockerste Lagerung ( $I_D = 0$ ) gilt  $\varphi_P = \varphi_c = 31,5^\circ$ .

### 5.2.2 Ödometerversuche

Zur Bestimmung der Parameter  $n$  und  $h_s$  des hypoplastischen Stoffgesetzes (Abschnitt 6.5.2) wurden Ödometerversuche durchgeführt. Aufgrund der besseren Reproduzierbarkeit sowie der genaueren Messung und Steuerung wurden Proben mit der Abmessung  $D \times H = 9 \text{ cm} \times 2 \text{ cm}$  mit der Zelle des Einfeldscherversuchs getestet. Die Proben wurden durch Einrieseln eingebaut und mit einer maximalen Auflast von bis zu 5 kN belastet. Es wurden drei Proben mit dichter Lagerung ( $I_{D0} = 0,94 - 0,96$ )

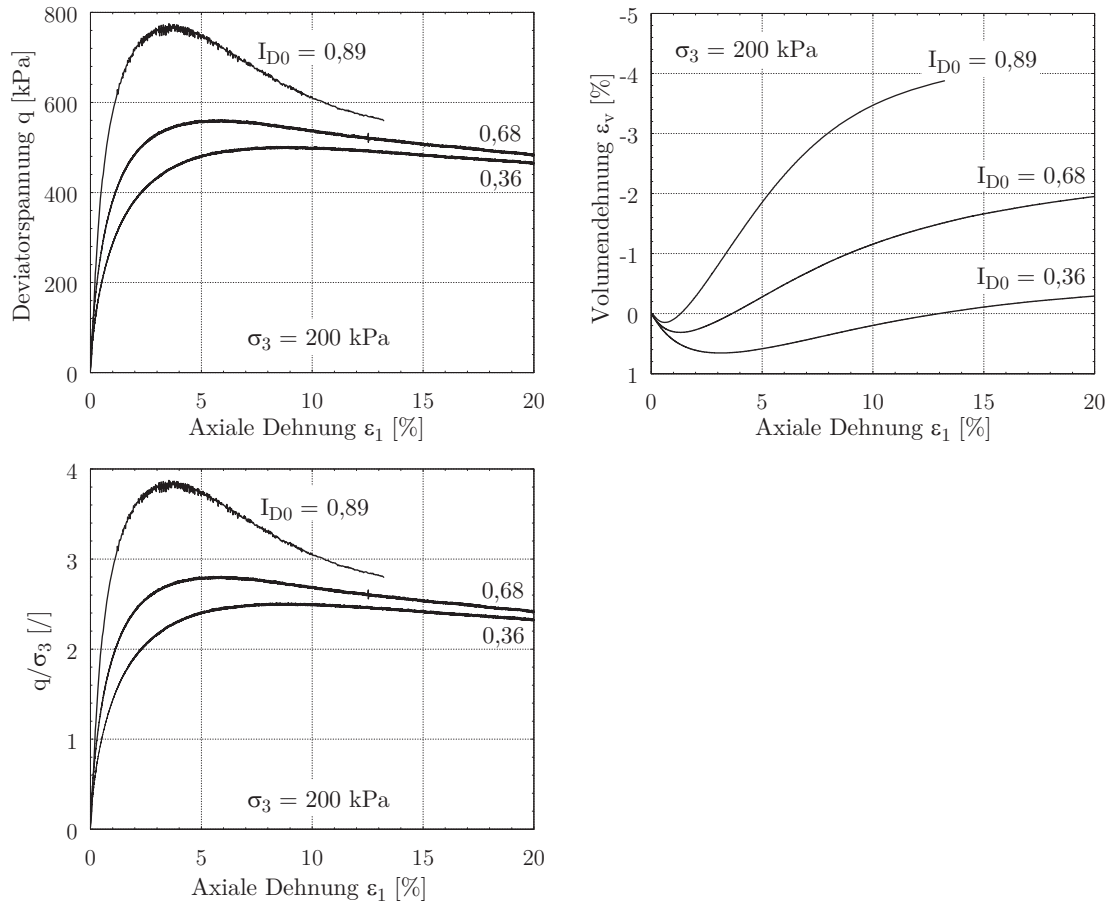


Abbildung 5.3: Monotone Triaxialversuche mit unterschiedlicher Lagerungsdichte bei einer Seitenspannung  $\sigma_3 = 200 \text{ kPa}$

und drei Proben mit lockerer Lagerung ( $I_{D0} = 0,09 - 0,12$ ) getestet. In der Abbildung 5.5 wird die Änderung der Porenzahl  $e$  in Abhängigkeit des mittleren Drucks  $p$  gezeigt. Der mittlere Druck  $p = (\sigma_1 + 2\sigma_3)/3$  wurde mit dem Erdruhedruckbeiwert  $K_0 = 1 - \sin(\varphi_P)$  berechnet. Dabei wurde der Peak-Reibungswinkel  $\varphi_P = 40,5^\circ$  für sehr dichtem Sand und  $\varphi_P = 31,5^\circ$  für lockeren Sand aus dem Abschnitt 5.2.1 angesetzt. Die Kompressionskurve kann mit der Gleichung

$$e = e_0 \cdot \exp \left( - \left( \frac{3p}{h_s} \right)^n \right) \quad (5.2)$$

beschrieben werden (nach Bauer [15] und Herle [38]). Anhand der Versuchsergebnisse (Abbildung 5.5) wurden die Parameter  $h_s = 2300 \text{ MPa}$  und  $n = 0,30$  für die Hypoplastizität ermittelt. Für die lockere Probe gilt  $e_0 = 0,661$  und für die dichte Probe  $e_0 = 0,41$ .

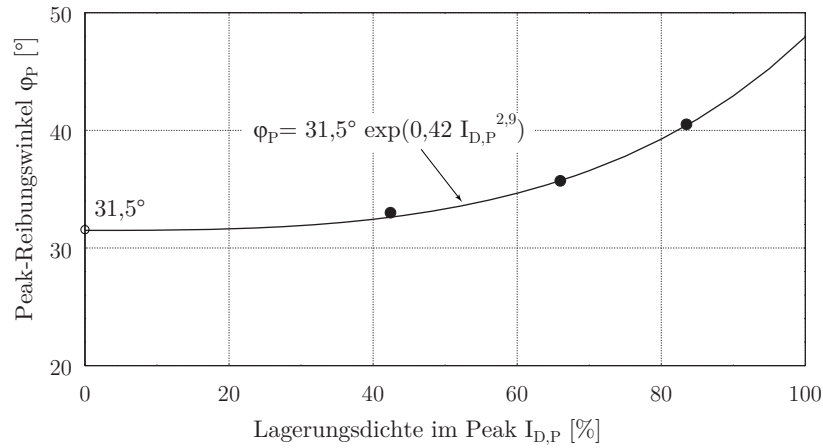


Abbildung 5.4: Peak-Reibungswinkel in Abhängigkeit von der Lagerungsdichte

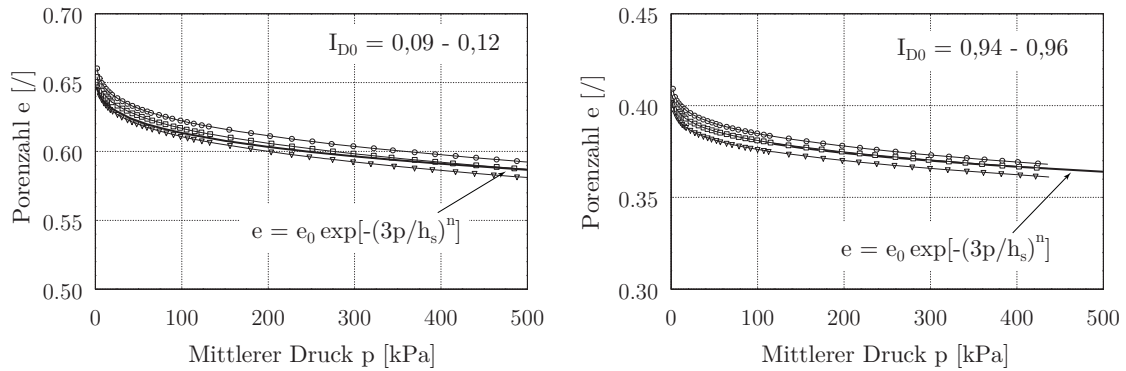


Abbildung 5.5: Ödometerversuche mit locker gelagerter Probe (links) und dichter Probe (rechts)

### 5.2.3 Einfachscherversuche unter konstanter Vertikalspannung

Für die Untersuchung des monotonen Verhaltens und die Bestimmung der maximal aufnehmbaren Schubspannungen wurden monotone Versuche unter konstanter Vertikalspannung (nicht volumenkonstante Versuche) durchgeführt. Es wurde zwei Versuchsreihen getestet. Bei einer wurde die Normalspannung  $\sigma_{yy}$  variiert, bei der anderen wurde die Anfangslagerungsdichte verändert. Die Abbildung 5.6 zeigt die Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlichen Normalspannungen. Es ist festzustellen, dass die Scherfestigkeit mit zunehmender Normalspannung  $\sigma_{yy}$  steigt. Die Schubspannung in allen Versuchen zeigt keinen eindeutigen Peak und erreicht nach ca. 10 bis 15% Schubverzerrung ihren maximalen Wert. Die normierten Schubspannungskurven  $\tau_{yx}/\sigma_{yy}$  sind bei unterschiedlichen Normalspannungen identisch (Abbildung 5.6 unten). Bei allen Versuchen kann eine Schubspannung bis zu 53% der Normalspannung aufgenommen werden. Die Proben verdichten sich am Anfang des Versuchs und lockern nach 4 bis 6% der Schubverzerrung wieder auf. Das Dilatanzverhalten fällt bei der Probe mit kleinerer Normalspannung deutlicher aus.

In der Abbildung 5.7 wurden die Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlichen

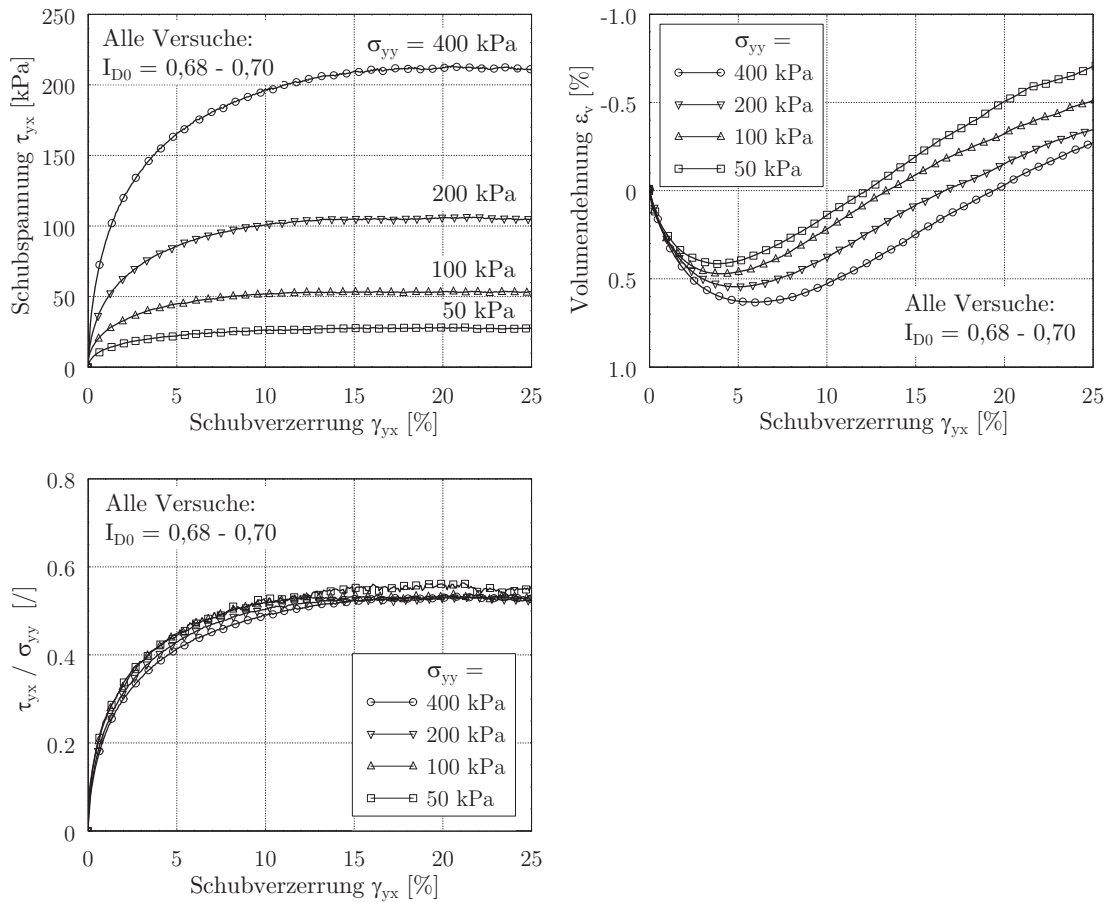


Abbildung 5.6: Nicht volumenkonstante, monotone Einfeldversuche mit unterschiedlichen Normalspannungen  $\sigma_{yy}$

Lagerungsdichten verglichen. Die Schubspannung der dichten Probe ( $I_{D0} = 0,93$ ) erreicht einen Peak bei  $\gamma_{yx} = 8\%$  und fällt danach leicht ab. Bei der locker gelagerten Probe ( $I_{D0} = 0,26$ ) nimmt die Schubspannung kontinuierlich zu und nähert sich dem Wert der anderen Versuche. Die normierten Schubspannungskurven zeigen ebenfalls einen ähnlichen Verlauf. Bei großer Schubverzerrung  $\gamma_{yx} > 25\%$  erreichen alle Versuche tendenziell einen gemeinsamen Wert. Das Dilatanzverhalten nimmt mit steigender Lagerungsdichte zu.

Im Vergleich zu den monotonen Einfeldversuchen nimmt die Scherfestigkeit bei den Triaxialversuchen nach dem Peak offensichtlicher ab, der Peak fällt hier eindeutiger aus. Im Triaxialversuch ist die Auflockerungsphase auch deutlicher ausgeprägt.

## 5.2.4 Spannungszustand im monotonen Einfeldversuch

In den meisten Fällen können die Spannungszustände im Einfeldversuch wegen der fehlenden Kenntnis über die horizontale Spannung nicht direkt ermittelt werden. Nur im Gerät Typ Cambridge (Cole [22], Bassett [14]), Typ NGI (Stroud [100]) oder

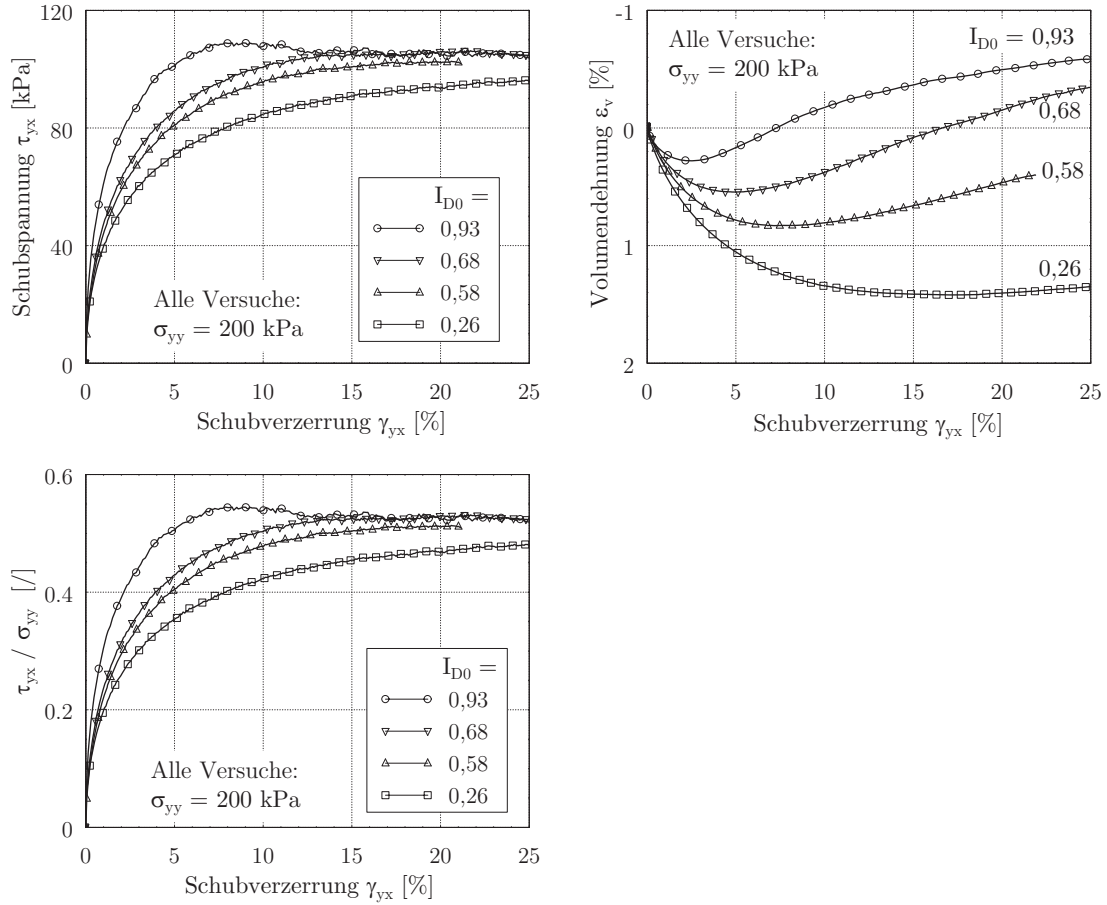


Abbildung 5.7: Nicht volumenkonstanter, monotoner Einfeldscherversuch mit unterschiedlichen Lagerungsdichten  $I_{D0}$

DSC (Arthur [7]) bzw. BAW (Franke [31]) kann der Spannungszustand mit Hilfe der in den Seitenflächen integrierten Kraftaufnehmer bzw. der aufgetragenen Spannung direkt dargestellt werden. In den verbreiteten Gerätemodellen, in denen nur die mittleren Spannungen an der Probenoberfläche ( $\sigma_{yy}$  und  $\tau_{yx}$ ) gemessen werden, kann der Spannungszustand nur mit einigen Annahmen beschrieben werden. Ausgehend von den Spannungen  $\sigma_{yy}$  und  $\tau_{yx}$ , die an jedem Gerät gemessen werden können, werden nachfolgend mögliche Darstellungen des Spannungszustands im Einfeldscherversuch vorgeschlagen:

- Methode 1 (Abbildung 5.8a): Die Probenoberfläche wird als Fläche mit der maximalen Schubspannung angenommen (Airey et al. [3] und Cole [22]). Damit ist die Spannung  $\sigma_{yy}$  während des Versuchs identisch mit  $\sigma_{xx}$  und  $K = K_0 = 1$ . Der mobilisierte Reibungswinkel  $\varphi_m$  lässt sich wie folgt berechnen:

$$\sin \varphi_m = \frac{\tau_{yx}}{\sigma_{yy}} \quad (5.3)$$

- Methode 2 (Abbildung 5.8b): Die Probenoberfläche wird als die Fläche mit dem maximal mobilisierten Reibungswinkel angenommen (im Bruchzustand

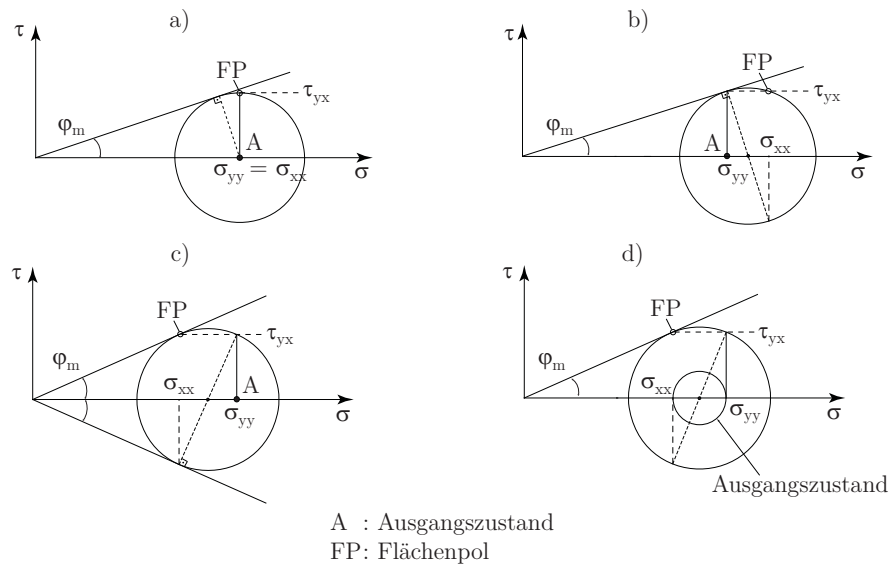


Abbildung 5.8: Mögliche Spannungszustände im Einfeldscherversuch

= Bruchfläche) (nach Airey et al. [3], Cole [22], Atkinson et al. [10], Randolph & Wroth [87]). Dabei ist der Seitendruckbeiwert bei der Konsolidierung  $K_0 = 1$  und während des Versuchs  $K > 1$ . Der mobilisierte Reibungswinkel  $\varphi_m$  berechnet sich aus:

$$\tan \varphi_{\text{m}} = \frac{\tau_{\text{yx}}}{\sigma_{\text{yy}}} \quad (5.4)$$

- Methode 3 (Abbildung 5.8c): Die vertikale Fläche wird als Fläche mit dem maximal mobilisierten Reibungswinkel angenommen (de Jong [48], Airey et al. [3], Randolph & Wroth [87]). Dabei ist der Seitendruckbeiwert bei der Konsolidierung  $K_0 = 1$  und während des Versuchs  $K < 1$ . Im Gegensatz zu den anderen Methoden wird hier der mobilisierte Reibungswinkel  $\varphi_m$  iterativ abhängig vom Spannungsverhältnis  $\tau_{vy}/\sigma_{vy}$  wie folgt ermittelt:

$$\frac{\tau_{yx}}{\sigma_{vv}} = \frac{\sin \varphi_m \cdot \cos \varphi_m}{1 + \sin^2 \varphi_m} \quad (5.5)$$

- Methode 4 (Abbildung 5.8d): Der Spannungszustand kann mit der Annahme, dass die Probe eine ideale einfache Scherung erfährt, dargestellt werden (Duncan & Dunlop [29], Seed & Peacock [94]). Die Spannungen  $\sigma_{yy}$  und  $\sigma_{xx}$  bleiben dabei während des Versuchs konstant ( $K = K_0 = \text{konstant}$ ). Der mobilisierte Reibungswinkel  $\varphi_m$  kann nach folgender Gleichung berechnet werden:

$$\sin \varphi_{\text{m}} = \frac{1}{1 + K_0} \sqrt{(1 - K_0)^2 + 4 \left( \frac{\tau_{\text{yx}}}{\sigma_{\text{vy}}} \right)^2} \quad (5.6)$$

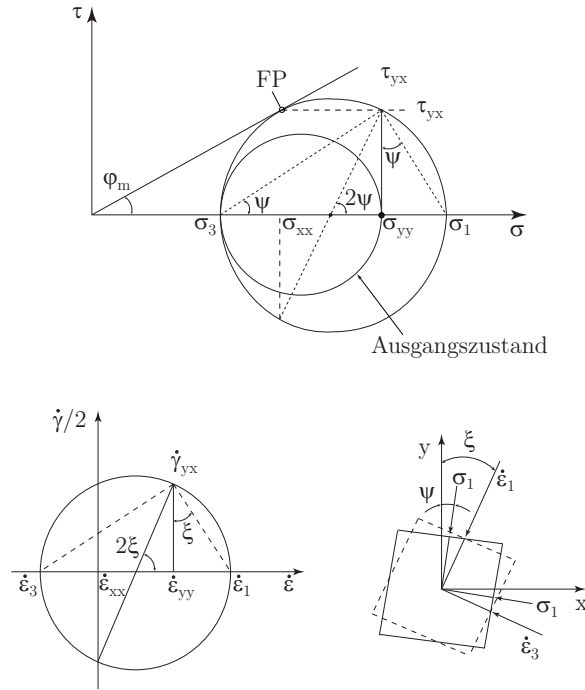


Abbildung 5.9: Mohr'sche Spannungskreis (oben) und Mohr'sche Dehnungsincrementkreis (unten) nach Cole [22] und Oda [77]

- Methode 5: Aus vielen Versuchen mit 14/25 Leighton Buzzard Sand im Gerätetyp Cambridge haben Cole [22], Stroud [100] und Oda [77] einen Zusammenhang zwischen dem Verhältnis der mobilisierten Schub- und Normalspannung auf der horizontalen Fläche und der Rotation der Hauptspannungen festgestellt und schlagen folgende Formel vor:

$$R = \kappa \cdot \tan \psi \quad (5.7)$$

wobei  $R$  das Verhältnis zwischen Schubspannung und Normalspannung ist ( $R = \tau_{yx}/\sigma_{yy}$ ).  $\kappa$  ist eine Materialkonstante und  $\psi$  ist der Winkel zwischen der Richtung der Hauptspannung und der Vertikalen. Das Spannungsverhältnis nach der Konsolidierung beträgt  $K_0 = \sigma_{xx}/\sigma_{yy}$  und ist im Versuch  $K \geq K_0$ . Der Mohr'sche Dehnungsincrementkreis ist mit den gemessenen Größen (der vertikalen Verformung  $\epsilon_{yy}$  und der Schubverzerrung  $\gamma_{yx}$ ) und der Bedingung  $\epsilon_{xx} = \epsilon_{zz} = 0$  (dehnstarre Probenzelle) darstellbar (Abbildung 5.9 unten). Für die Ermittlung von  $\kappa$  wird wie für ein elastisch isotropes Material angenommen, dass bei großen Verformungen (ca.  $\gamma_{yx} = 10\%$ ) die Richtungen der Hauptachsen der Spannungen und der Dehnungsincremente coaxial sind ( $\xi = \psi$ ). Dies wurde von Cole [22] durch umfangreiche Versuchsserien nachgewiesen, womit folgende Beziehung geschrieben werden kann:

$$\tan 2\psi = \tan 2\xi = \frac{\dot{\gamma}_{yx}}{\dot{\epsilon}_{yy}} \quad (5.8)$$

Die Dehnungsincremente  $\dot{\epsilon}_{yy}$  und  $\dot{\gamma}_{yx}$  und die Spannungsverhältnisse  $R$  erhält

man bei verschiedenen Scherwegen eines Versuchs. Daraus lässt sich die Materialkonstante  $\kappa$  ermitteln. Hiermit wiederum können die Hauptspannungen anhand des Mohr'schen Spannungskreises (Abbildung 5.9) wie folgt berechnet werden:

$$\sigma_1 = \sigma_{yy} \cdot \left(1 + \frac{R^2}{\kappa}\right) \quad (5.9)$$

$$\sigma_3 = \sigma_{yy} \cdot (1 - \kappa) \quad (5.10)$$

$$\sin \varphi_m = \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{\sigma_1 + \sigma_3} \quad (5.11)$$

Die oben beschriebenen Methoden zur Darstellung des Spannungszustands führen zu unterschiedlichen Ergebnissen. Beim Vergleich der ersten beiden Ansätze wird bereits aus den Mohr'schen Spannungskreisen deutlich, dass sich bei Anwendung der 1. Methode immer der größere Reibungswinkel bei gleichem Spannungsverhältnis  $\tau_{yx}/\sigma_{yy}$  einstellt. Der Ansatz der vertikalen Bruchflächen (Methode 3) ist im Gegensatz zur Annahme der horizontalen Bruchflächen für normalkonsolidierte Böden wahrscheinlicher, da hier  $\sigma_{xx} < \sigma_{yy}$  und  $K_0 < 1$ . Allerdings muss bei Annahme vertikaler Gleitflächen, wo sich die Bodenelemente vertikal gegeneinander verschieben, auch eine Rotation der ganzen Probe einhergehen, da sonst die aufgezwungene Parallelverformung des Einfeldscherversuchs nicht verträglich ist (de Josselin de Jong [25]). Generell sollten alle drei Methoden nur für größere Verformungen angewendet werden, da von einer isotropen Konsolidierung der Probe ausgegangen wird, was in den meisten Geräten nicht realisiert werden kann.

Methode 4 setzt eine ideale einfache Scherung voraus, was mit den meisten Versuchsgescherten nicht umgesetzt werden kann. Außerdem wird angenommen, dass Vertikal- und Horizontalspannungen ( $\sigma_{yy}$  und  $\sigma_{xx}$ ) und somit auch  $K_0$  während des Abscherens konstant bleiben, was bereits in einigen Versuchsreihen mit detaillierter Messinstrumentation widerlegt wurde.

In einem Bereich von  $0,4 < \kappa < 0,8$  liefert die Methode 5 laut den Versuchsergebnissen von Cole [22] die beste Möglichkeit für die Darstellung des Spannungszustands im Einfeldscherversuch. Im Folgenden wird daher diese Methode für die Auswertung der eigenen Versuchsreihen verwendet.

### 5.2.5 Ermittlung des Reibungswinkels im monotonen Einfeldscherversuch

Für die Ermittlung des Reibungswinkel  $\varphi_m$  ist es notwendig, die Materialkonstante  $\kappa$  zu bestimmen. Dazu wurde der Drehwinkel der Hauptachsen des Dehnungsincrements  $\xi$  anhand der Zuwächse  $\dot{\gamma}_{yx}$  und  $\dot{\epsilon}_{yy}$  berechnet (Gleichung 5.8). Die Abbildung



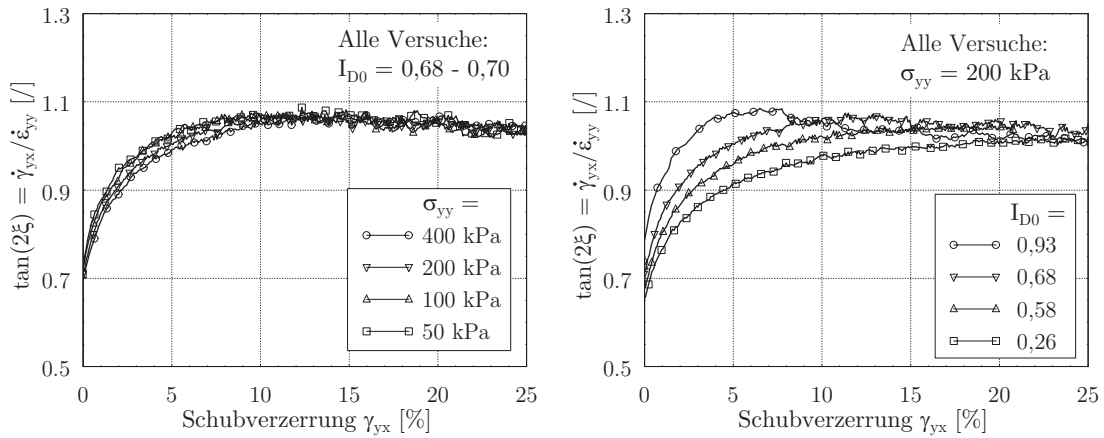


Abbildung 5.10: Verhältnis der Dehnungsinkremente  $\dot{\gamma}_{yx}/\dot{\epsilon}_{yy}$  im Einfeldscherversuch mit unterschiedlicher Normalspannung (links) und unterschiedlicher Lagerungsdichte (rechts)

5.10 stellt das Verhältnis  $\dot{\gamma}_{yx}/\dot{\epsilon}_{yy}$  in Abhängigkeit der Schubverzerrung  $\gamma_{yx}$  für die Versuche im Abschnitt 5.2.3 dar. Die dargestellten Inkremente  $\dot{\gamma}_{yx}$  und  $\dot{\epsilon}_{yy}$  wurden mit einer Rate von  $\Delta\gamma_{yx} = 0,3 - 0,4\%$  berechnet.

In der Abbildung 5.10 ist zu beobachten, dass das Verhältnis  $\dot{\gamma}_{yx}/\dot{\epsilon}_{yy}$  nur von der Lagerungsdichte und nicht von der Normalspannung abhängig ist. Während die Kurve der Versuche mit unterschiedlichen Normalspannungen fast einen ähnlichen Verlauf haben, unterscheiden sich die Kurven bei den Versuchen mit Variation der Lagerungsdichte am Anfang deutlich und streben bei großer Verformung einen gemeinsamen Wert an.

Für die Ermittlung des Parameters  $\kappa$  wurde zuerst der Winkel  $\xi$  ermittelt (Abbildung 5.10). Mit der Annahme, dass die Hauptachsen der Spannungen und der Dehnungsinkremente bei großer Verformung coaxial sind, wurde  $\psi = \xi$  angesetzt. Dabei wurden bei jedem Versuch nur die Messwerte ab einer Schubverzerrung von  $\gamma_{yx} = 10\%$  genommen. Anhand des Spannungsverhältnisses  $R = \tau_{yx}/\sigma_{yy}$  und des Winkels  $\psi$  konnte  $\kappa$  nach der Gleichung 5.7 berechnet werden. Der Mittelwert von  $\kappa$  wurden aus den Ergebnissen aller Versuche gebildet und für die Berechnung des Reibungswinkels verwendet. Für Berliner Sand wurde ein Parameter  $\kappa = 0,529$  ermittelt. Die Abbildung 5.11 stellt die berechneten Reibungswinkel in Abhängigkeit der Schubverzerrung dar. Es wurde für den getesteten Sand ein Reibungswinkel im kritischen Zustand  $\varphi_c = 30,5^\circ - 32^\circ$  festgestellt. Der Reibungswinkel  $\varphi_c$ , der hier aus dem Einfeldscherversuch ermittelt wurde, passt relativ gut zu dem aus den Triaxialversuchen (Abschnitt 5.2.1).

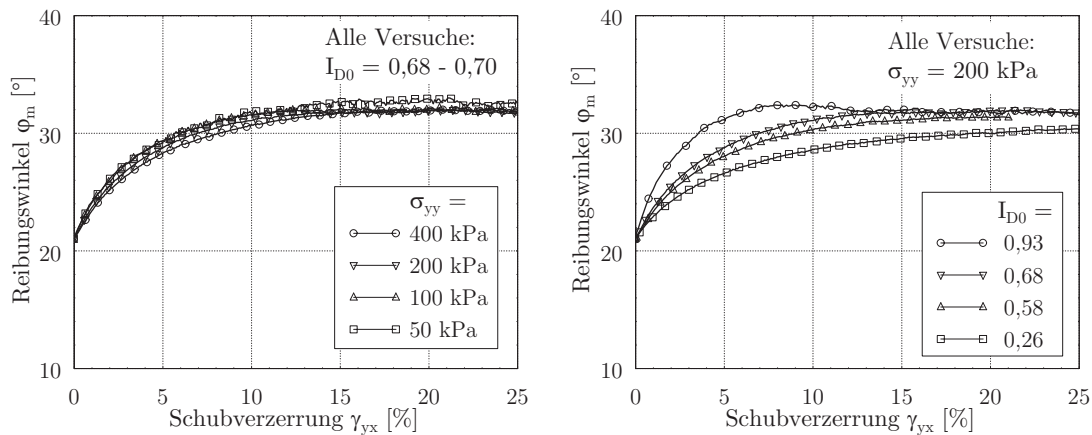


Abbildung 5.11: Ermittelter Reibungswinkel aus Einzelscherversuch mit unterschiedlicher Normalspannung (links) und unterschiedlicher Lagerungsdichte (rechts)

### 5.3 Zyklisches Bodenverhalten im Triaxialversuch

Zyklische Triaxialversuche wurden für die Untersuchung des Bodenverhaltens und für die Bestimmung der Parameter für das explizite Akkumulationsmodell nach Niemunis et al. [76], Wichtmann [108] eingesetzt. Aus den zahlreichen in der Literatur vorhandenen Untersuchungen ist das typische Bodenverhalten im zyklischen Triaxialversuch bekannt (Abschnitt 3.2). Daher wurden in der vorliegenden Arbeit nur Versuche durchgeführt, die für die Ermittlung des Parametersatzes benötigt waren (Abschnitt 6.5.1). Die Versuchsserie bestand aus 10 zyklischen dränierten Versuchen mit jeweils  $10^5$  Zyklen. Die Versuche wurden in vier Reihen aufgeteilt, in denen jeweils der Einfluss eines Parameters untersucht wurde. Dabei wurde die Spannungsamplitude  $q^{\text{ampl}}$ , das Spannungsverhältnis  $\eta^{\text{av}}$ , die Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$  und die mittlere Spannung  $p^{\text{av}}$  innerhalb einer Reihe variiert, während die anderen Parameter konstant gehalten wurden. Alle Versuche waren Schwelllastversuche und wurden im Kompressionsbereich durchgeführt.

#### 5.3.1 Verdichtungsverhalten von Berliner Sand

Das Verdichtungsverhalten ist eine der wichtigsten Eigenschaften von Böden. Die meisten bodenmechanischen Vorgänge sind vom Porenanteil (oder der Lagerungsdichte) abhängig. Die Änderung des Porenvolumens unter Gründungen kann zu Schäden durch ungewollte Setzungen führen. Bei undränierten Bedingungen bewirkt die Tendenz der Porenraumänderung einen Auf- bzw. Abbau des Porenwasserdrucks und kann die Standsicherheit beeinflussen. Daher wird hier die volumetrische Änderung der Probe separat betrachtet.

In der Abbildung 5.12 wurde die Volumenänderung über die Zyklenanzahl aller durchgeführten Versuche aufgetragen. Der Einfluss der zyklischen Lastamplitude

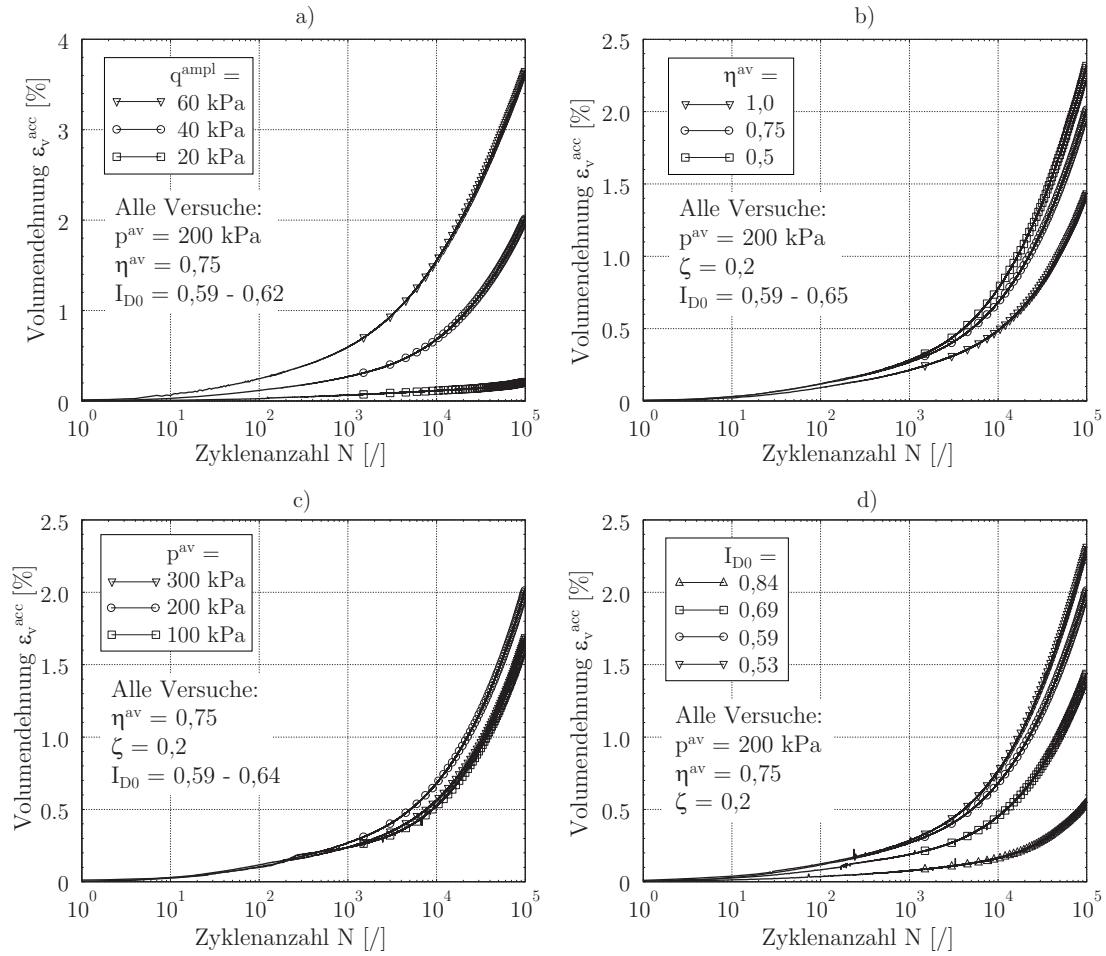


Abbildung 5.12: Volumetrische Änderung im zyklischen Triaxialversuch mit Variation von: a) Amplitude  $q^{\text{ampl}}$ , b) Spannungsverhältnis  $\eta^{\text{av}}$ , c) mittlerer Spannung  $p^{\text{av}}$  und d) Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$

wurde anhand von drei Versuchen mit  $q^{\text{ampl}} = 20, 40$  und  $60$  kPa bei konstanter Mittelspannung  $p^{\text{av}} = 200$  kPa und  $\eta^{\text{av}} = 0,75$  untersucht. Diese Versuche zeigen erwartungsgemäß einen Anstieg der bleibenden Volumendehnung bei zunehmender Lastamplitude (Abbildung 5.12a). Der Einfluss der Anfangslagerungsdichte wurde anhand der vier Versuche mit  $I_{D0} = 0,53; 0,59; 0,69$  und  $0,84$  unter gleicher Belastung und Randbedingungen (gleiche  $p^{\text{av}}, q^{\text{av}}$  und  $q^{\text{ampl}}$ ) untersucht. Es ist zu beobachten, dass sich eine lockere Probe infolge einer zyklischen Belastung stärker verformt als eine dichte Probe (Abbildung 5.12c). Das Spannungsverhältnis  $\eta^{\text{av}}$  spielt auch bei dem Verdichtungsverhalten von Sand eine wichtige Rolle. Die Versuche mit unterschiedlichem Spannungsverhältnis  $\eta^{\text{av}} = q^{\text{av}}/p^{\text{av}}$  zeigen, dass ein größeres Verhältnis  $\eta^{\text{av}}$  eine kleinere Verdichtung mit sich bringt (Abbildung 5.12b). Die mittlere Spannung hat dagegen keinen Einfluss auf die Volumenänderung der Probe. Die Versuche mit der Mittelspannung  $p^{\text{av}} = 100, 200$  und  $300$  kPa weisen fast die gleiche Verdichtung bei gleichem Spannungsverhältnis  $\eta^{\text{av}}$  und Amplitudenverhältnis  $\zeta$  auf (Abbildung 5.12c). Es ist hierbei zu beobachten, dass die volumetrische Dehnung der Probe mit  $p^{\text{av}} = 100$  und  $300$  kPa identisch ist. Bei dem Versuch mit  $p^{\text{av}} = 200$  kPa

ist die Volumendehnung im Vergleich zu den der beiden anderen Versuche ein wenig erhöht. Das kann auf die etwas geringere Anfangslagerung dieser Probe ( $I_{D0} = 0,59$  im Vergleich zu 0,63 und 0,64) zurückzuführen sein.

Das hier vorgestellte Verhalten vom Berliner Sand stimmt mit den Ergebnissen aus einigen Untersuchungen in der Literatur (Abschnitt 3.2) überein. Während die Lastamplitude, die Lagerungsdichte und das Spannungsverhältnis großen Einfluss auf die Volumendehnung eines Bodens haben, spielt die Mittelspannung bei dem Verdichtungsverhalten keine Rolle.

### 5.3.2 Akkumulation der totalen Dehnung $\varepsilon^{\text{acc}}$

In dem Akkumulationsmodell wird neben den Dehnungsinvarianten  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  und  $\varepsilon_q^{\text{acc}}$  auch die totale Dehnungsinvariante  $\varepsilon^{\text{acc}}$  verwendet:

$$\varepsilon^{\text{acc}} = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \varepsilon_2^2 + \varepsilon_3^2} = \sqrt{\varepsilon_1^2 + \frac{(\varepsilon_v - \varepsilon_1)^2}{2}} \quad (5.12)$$

Die totale Dehnung berücksichtigt gleichzeitig die Volumenänderung und die axiale Dehnung. Die volumetrische Änderung im getesteten Bereich (Schwelllastversuche) spielt jedoch bei der totalen Dehnung nur eine untergeordnete Rolle. Der Betrag der totalen Dehnung hängt hauptsächlich von der axialen Dehnung  $\varepsilon_1$  ab. In den nachfolgenden Abschnitten wird die totale Dehnung mit  $\varepsilon^{\text{acc}}$  bezeichnet.

Die Abbildung 5.13 stellt die totale Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$  in Abhängigkeit der Zyklenanzahl  $N$  für die durchgeführten Triaxialversuche dar. Bis auf die Versuchsreihe mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen zeigen die Kurven der totalen Dehnung einen ähnlichen Trend wie die Kurven der volumetrischen Dehnung. Die Akkumulation der totalen Dehnung steigt mit zunehmender Lastamplitude und mit abnehmender Anfangslagerungsdichte. Die mittlere Spannung beeinflusst die totale Dehnung dagegen nicht. Die Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlichem Spannungsverhältnis zeigen, dass die totale Dehnung und die Volumendehnung einen umgekehrten Trend haben (Abbildung 5.12b und 5.13b). Während die Akkumulation der totalen Dehnung mit steigendem Spannungsverhältnis zunimmt, verringert sich die volumetrische Dehnung.

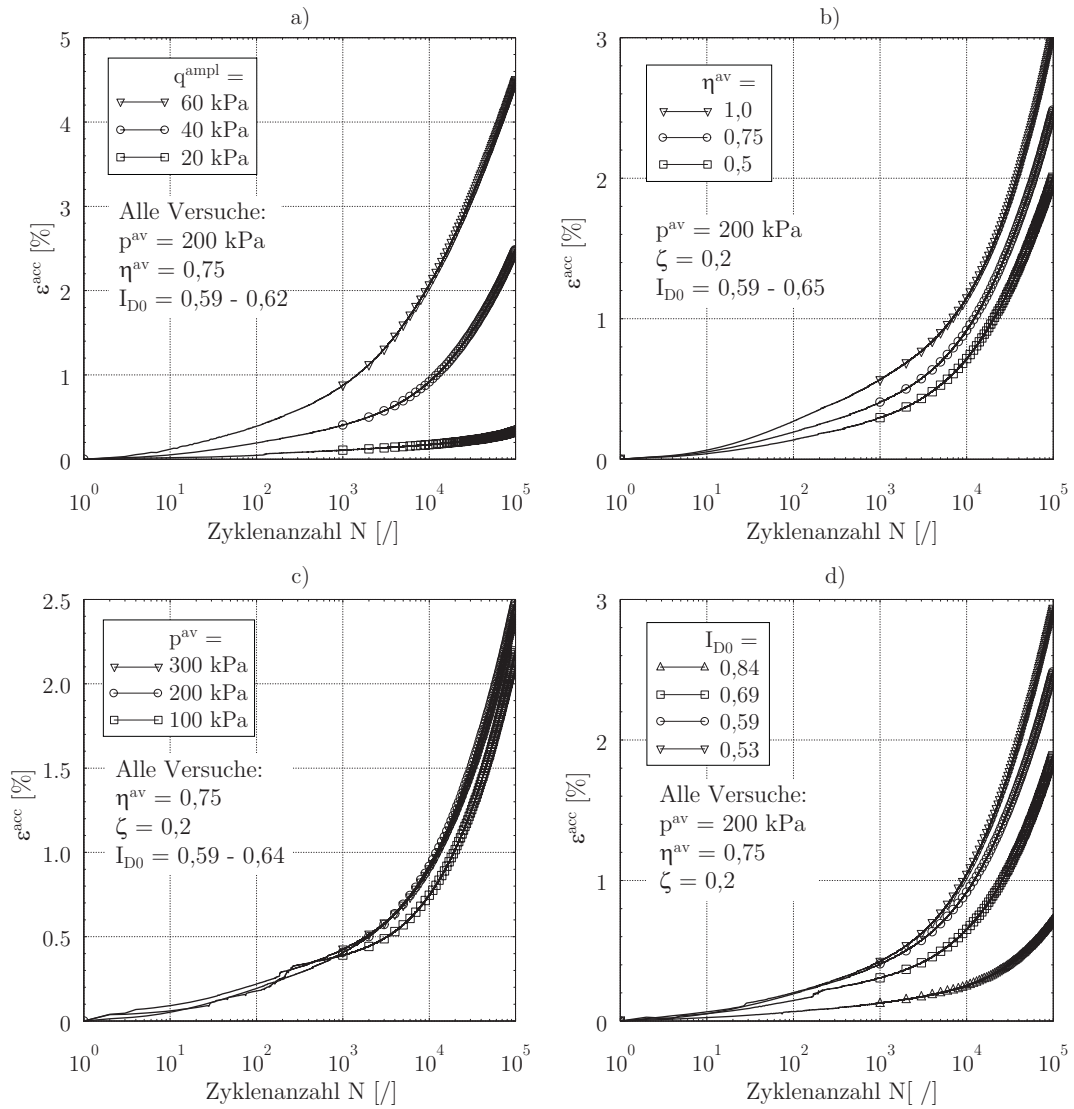


Abbildung 5.13: Totale Dehnung im zyklischen Triaxialversuch mit Variation von: a) Amplitude  $q^{ampl}$ , b) Spannungsverhältnis  $\eta^{av}$ , c) mittlerer Spannung  $p^{av}$  und d) Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$

### 5.3.3 Akkumulationsrichtung $\omega$

Das Verformungsverhalten unter zyklischer Beanspruchung kann durch die Akkumulationsintensität  $\epsilon^{acc}$  und die Akkumulationsrichtung  $\omega = \epsilon_v^{acc} / \epsilon_q^{acc}$  oder  $\Omega = \dot{\epsilon}_v^{acc} / \dot{\epsilon}_q^{acc}$  (das Verhältnis der volumetrischen und deviatorischen Dehnung) beschrieben werden. In der Abbildung 5.14 wurde die Akkumulationsrichtung für die durchgeführten Versuche dargestellt. Es ist offensichtlich, dass die Akkumulationsrichtung signifikant vom Spannungsverhältnis  $\eta^{av}$  abhängt. Mit der Zunahme von  $\eta^{av}$  nimmt die deviatorische Komponente der Akkumulationsrichtung  $\epsilon_q^{acc}$  zu und die volumetrische Dehnung  $\epsilon_v^{acc}$  ab (Abbildung 5.14b). Ein Einfluss der Belastungsamplitude

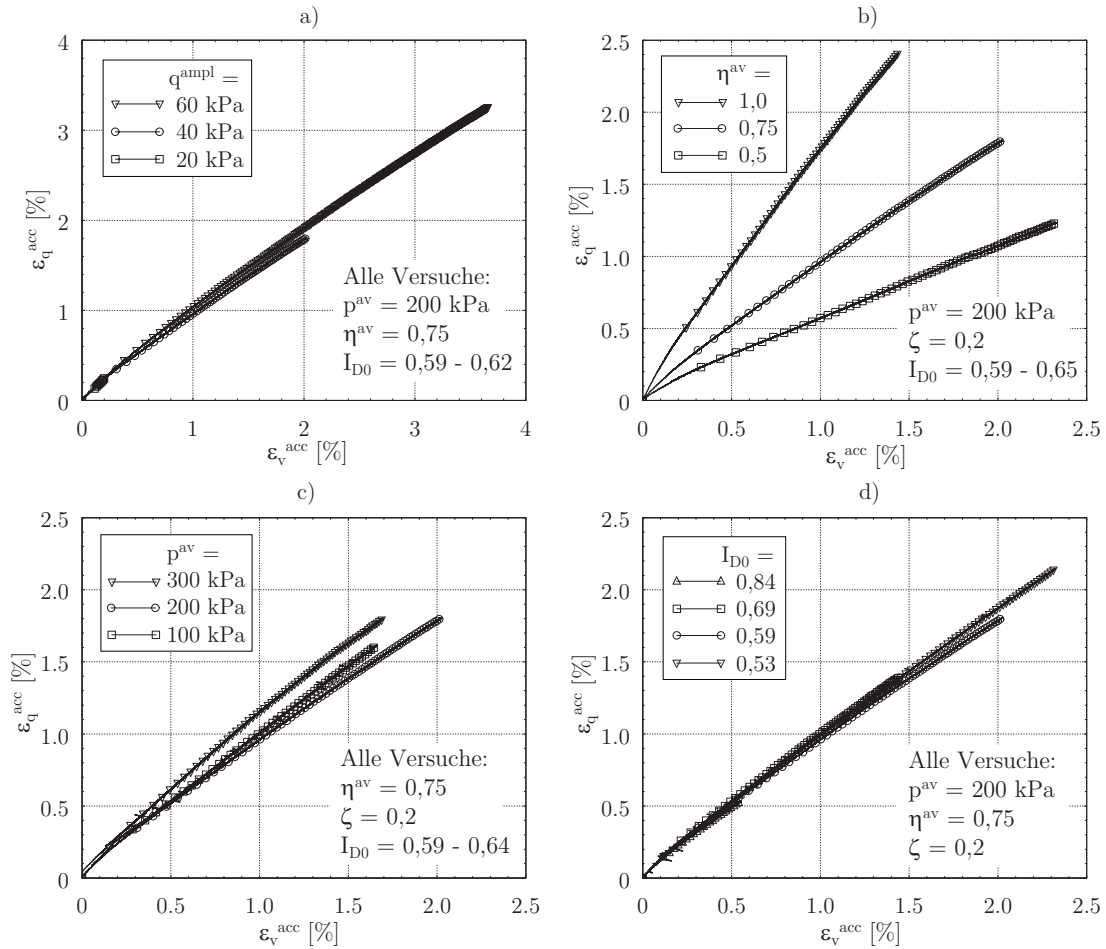


Abbildung 5.14: Deviatorische Dehnung  $\varepsilon_q^{\text{acc}}$  in Abhängigkeit von volumetrischer Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  in zyklischen Triaxialversuchen mit Variation von: a) Amplitude  $q^{\text{ampl}}$ , b) Spannungsverhältnis  $\eta^{\text{av}}$ , c) mittlerer Spannung  $p^{\text{av}}$  und d) Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$

sowie der Anfangslagerungsdichte und der mittleren Spannung wurde nicht festgestellt. Das hier beobachtete Verhalten der Akkumulationsrichtung stimmt gut mit den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen von Chang & Withman [21] sowie von Wichtmann [108] überein.

Bei den Ergebnissen in der Abbildung 5.14 ist zu beobachten, dass die  $\varepsilon_q^{\text{acc}}-\varepsilon_v^{\text{acc}}$ -Dehnungspfade nicht auf einer Linie liegen. Die Akkumulationsrichtung  $\omega = \varepsilon_v^{\text{acc}}/\varepsilon_q^{\text{acc}}$  ändert sich mit der Zyklanzahl  $N$ . Die Abbildung 5.15 stellt den Kehrwert der Akkumulationsrichtung  $1/\omega$  gegen die Zyklanzahl  $N$  für Versuche mit unterschiedlichen Spannungsverhältnissen dar. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich das Verhältnis  $\varepsilon_q^{\text{acc}}/\varepsilon_v^{\text{acc}}$  mit der Zyklanzahl verkleinert. Diese Verkleinerung ist beim Versuch mit größerem Spannungsverhältnis höher und verlangsamt sich mit der Zyklanzahl. Über die Veränderung der Akkumulationsrichtung in den zyklischen Triaxialversuchen mit zunehmender Zyklanzahl  $N$  wurde auch von Wichtmann [108] berichtet. Im Akkumulationsmodell wurde die Veränderung der Akkumulationsrichtung jedoch nicht berücksichtigt. Die Fließrichtung wird hier entsprechend

dem modifizierten Cam-Clay-Modell angenommen (konstanter Wert über alle Zyklen).

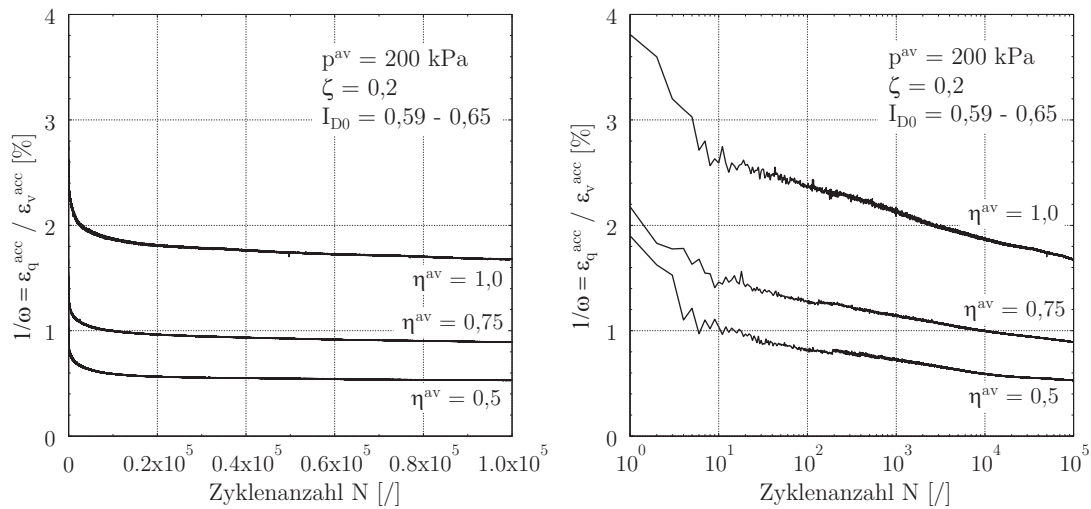


Abbildung 5.15: Triaxialversuche, Akkumulationsrichtung in Abhängigkeit der Zyklenanzahl  $N$  im normalgeteilten Koordinatensystem (links) und im einfach-logarithmisch geteilten Koordinatensystem (rechts)

## 5.4 Einfluss der mittleren Spannung auf die Steifigkeit

### 5.4.1 Schubmodul und Grenzscherdehnungsamplituden im RC-Versuch

Die Bodenparameter dynamischer Schubmodul  $G_{\max}$  und Materialdämpfung  $D$  lassen sich im Resonant Column Versuch (RC-Versuch) zuverlässig ermitteln. In der vorliegenden Arbeit wird der RC-Versuch für die Untersuchung der Druckabhängigkeit der Bodensteifigkeit eingesetzt. Dabei wurden „*multi stage*“-Versuche mit jeweils 9 Laststufen durchgeführt (Versuche zur Ermittlung des maximalen Schubmoduls  $G_{\max}$  unter verschiedenen Konsolidierungsspannungen). In jeder Konsolidierungsstufe wurde die Probe zuerst im Bereich des zu erwartenden elastischen Materialverhaltens (kleine Anregung) getestet. Nach der Ermittlung von  $G_{\max}$  wurde die Zellenspannung  $\sigma_3$  auf die nächste Stufe erhöht. Nach der Konsolidierung wurde der maximale Schubmodul  $G_{\max}$  erneut ermittelt. Bei der letzten Stufe mit  $\sigma_3 = 400$  kPa wurden die Proben bis in den plastischen Bereich angeregt. Es wurden dabei drei Proben mit unterschiedlicher Lagerungsdichte getestet.

Die Verläufe des Schubmoduls  $G$  mit zunehmender Schubdehnungsamplitude wurden in der Abbildung 5.16 dargestellt. Die Abbildung 5.16 links präsentiert exemplarisch die Ergebnisse eines „*multi stage*“-Versuchs. Bei der Ermittlung des maximalen Schubmoduls  $G_{\max}$  am Anfang jeder Laststufe wurden Schubdehnungsamplituden



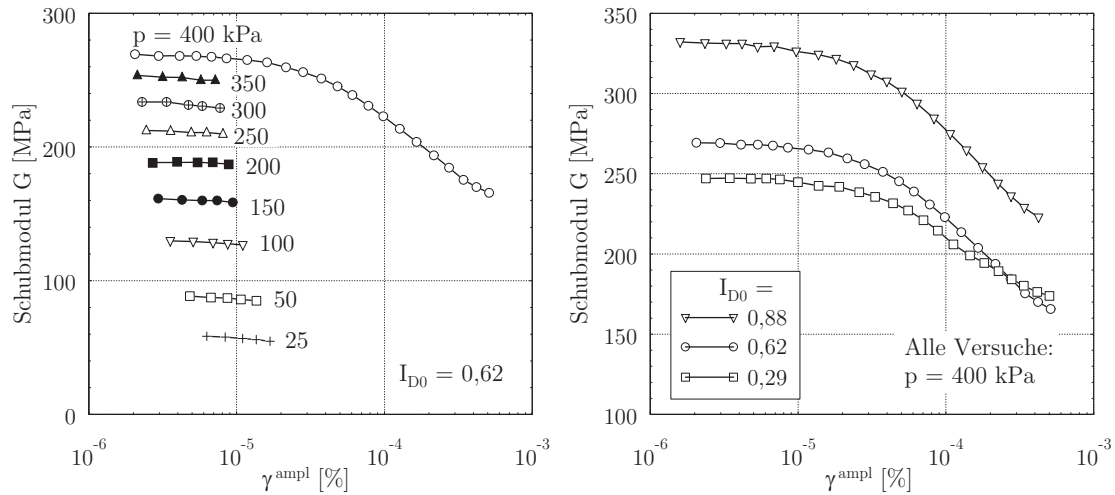


Abbildung 5.16: Schubmodul  $G$  im RC-Versuch bei unterschiedlichen Drücken  $p$  (links) und unterschiedlicher Lagerungsdichte  $I_{D0}$  (rechts)

im Bereich  $2 \cdot 10^{-6} < \gamma^{\text{ampl}} < 10^{-5}$  erreicht. Die Beobachtung der axialen Dehnung gibt Auskunft über das elastische bzw. plastische Verhalten der Probe. Am Anfang des Versuchs wurde unter kleiner Amplitude keine Änderung in der axialen Richtung gemessen.

In der Abbildung 5.16 rechts sind die Schubmodule der maximalen Spannungstufe  $p = 400$  kPa mit unterschiedlicher Lagerungsdichte verglichen. Es ist zu beobachten, dass der Schubmodul von der Lagerungsdichte abhängig ist. Erwartungsgemäß verhält sich die dichte Probe steifer als die lockere Probe. Der Verlauf des Schubmoduls der lockeren Probe bei großem Dehnungsbereich ( $\gamma^{\text{ampl}} > 10^{-4}$ ) weicht von dem der anderen Versuche leicht ab. Es ist vermutlich auf die Imperfektion bei dem Einbau der lockeren Probe zurückzuführen.

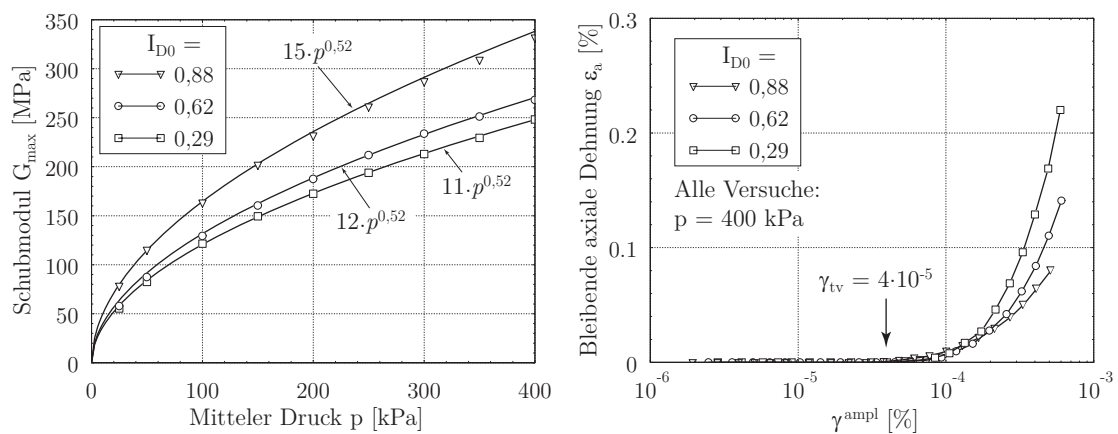


Abbildung 5.17: RC-Versuche: Druckabhängigkeit des Schubmoduls  $G$  für unterschiedliche Lagerungsdichten  $I_{D0}$  (links), Ermittlung der volumetrischen Grenzscherdehnungsamplitude (rechts)

Die Abhängigkeit des Schubmoduls  $G_{\text{max}}$  auf die mittlere Spannung  $p$  kann mit der



exponentiellen Beziehung

$$G \sim p^n \quad (5.13)$$

beschrieben werden (Hardin & Black [35], Silver & Seed [98]). Nach den Empfehlungen des Arbeitskreises 1.4 „Baugrunddynamik“ der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) [24] kann für Sand  $n = 0,5$  angenommen werden. Wichtmann & Triantafyllidis [115] haben anhand der Versuchsergebnisse für einen Mittel- bis Grobsand  $n = 0,42$  ermittelt. Der Exponent  $n$  ist von der Dehnungsamplitude abhängig und wird von der Lagerungsdichte nicht beeinflusst.

Der Einfluss der mittleren Spannung auf die Steifigkeit wurde anhand der beschriebenen RC-Versuche an Berliner Sand untersucht. In der Abbildung 5.17 wurden Ergebnisse dieser Versuche zusammengestellt. Die Anpassung von  $G_{\max} \sim p^n$  an die Versuchsdaten im Bereich  $25 < p < 400$  kPa ergibt eine Konstante  $n = 0,52$  (Abbildung 5.17 links). Der Schubmodul  $G_{\max}$  wurde hier mit der Scherdehnungsamplitude im Bereich zwischen  $10^{-6} < \gamma^{\text{ampl}} < 10^{-5}$  ermittelt. Der Exponent  $n$  stimmt relativ gut mit der Empfehlung des Arbeitskreises 1.4 „Baugrunddynamik“ [24] und von Wichtmann [108] überein.

Die volumetrische Grenzscherdehnungsamplitude kann anhand der axialen Dehnung der Probe bestimmt werden. Die irreversible vertikale Dehnung markiert den Übergang von elastischem zu inelastischem Verhalten der Probe. Ermittelt wurde die Scherdehnungsamplitude, bei der eine messbar bleibende Dehnung der Probe festgestellt wurde. Aus den durchgeführten Versuchen wurde eine Grenzscherdehnungsamplitude  $\gamma_{\text{tv}} = 4 \cdot 10^{-5}$  für dichten Sand ( $I_{\text{D}0} = 0,62$ ) ermittelt. In der Abbildung 5.17 rechts ist die axiale Dehnung über die Scherdehnungsamplitude aufgetragen. Es ist offensichtlich, dass bei einer Scheramplitude  $\gamma^{\text{ampl}} < \gamma_{\text{tv}}$  keine Änderung der Probenhöhe gemessen wurde. Im Bereich  $\gamma^{\text{ampl}} > \gamma_{\text{tv}}$  steigt die axiale Dehnung stetig mit der zunehmenden Amplitude an. Die volumetrische Grenzscherdehnungsamplitude  $\gamma_{\text{tv}}$  ist von der Lagerungsdichte abhängig und für Sand steigt  $\gamma_{\text{tv}}$  mit zunehmender Lagerungsdichte an (Bai [12]).

### 5.4.2 Schubmodul und volumetrische Grenzscherdehnungsamplitude im Einfachscherversuch

Im Einfachscherversuch wird der Sekantenschubmodul  $G$  aus der Schubspannungsamplitude  $\tau_{\text{yx}}^{\text{ampl}}$  und der dazugehörigen Schubverzerrung  $\gamma_{\text{yx}}^{\text{ampl}}$  nach folgender Funktion berechnet:

$$G = \frac{\tau_{\text{yx}}^{\text{ampl}}}{\gamma_{\text{yx}}^{\text{ampl}}} \quad (5.14)$$

Der Sekantenschubmodul kann für eine bestimmte Schubverzerrungsamplitude  $\gamma_{\text{yx}}^{\text{ampl}}$  in dem weggesteuerten Versuch ermittelt werden. Die mittlere Spannung  $p$  im Einfachscherversuch kann aufgrund der unbekannten horizontalen Spannung nicht

direkt berechnet werden. Sie kann jedoch anhand des Erdruhedruckbeiwertes  $K_0 = 1 - \sin(\varphi_P)$  nach der Gleichung

$$p = \frac{\sigma_1 + \sigma_2 + \sigma_3}{3} = \sigma_{yy} \frac{1 + 2K_0}{3} \quad (5.15)$$

angenommen werden (nach Silver & Seed [97]), wobei  $\sin(\varphi_P)$  der Peak-Reibungswinkel ist. Für den getesteten Berliner Sand wurde  $\varphi_P = 35,7^\circ$  für dichten Sand aus den Ergebnissen der monotonen Triaxialversuche (Abschnitt 5.2.1) eingesetzt. In der vorliegenden Arbeit wurde die Druckabhängigkeit vom Schubmodul mittels einer Versuchsreihe mit der gleichen Schubverzerrungsamplitude untersucht. Es wurden Versuche mit unterschiedlichen Normalspannungen von  $\sigma_{yy} = 25$  bis 300 kPa und einer konstanten Schubverzerrungsamplitude  $\gamma_{yx}^{\text{ampl}} = 0,03\%$  durchgeführt. Die getesteten Normalspannungen entsprachen mittleren Drücken im Bereich  $14 < p < 170$  kPa. In der Abbildung 5.18 wurden die bei dem Zyklus  $N = 10^4$  gemessenen Schubmodule über die Mittelspannung  $p$  aufgetragen. Die Ergebnisse zeigen, dass die Schubmodule unterproportional mit der Mittelspannung ansteigen. Die Druckabhängigkeit von  $G$  kann auch hier mit der exponentiellen Beziehung  $G \sim p^n$  beschrieben werden. Die Anpassung an die Versuchsdaten ergibt einen Exponent  $n = 0,60$ . Der Exponent  $n$  ist von der Scherdehnungsamplitude abhängig.

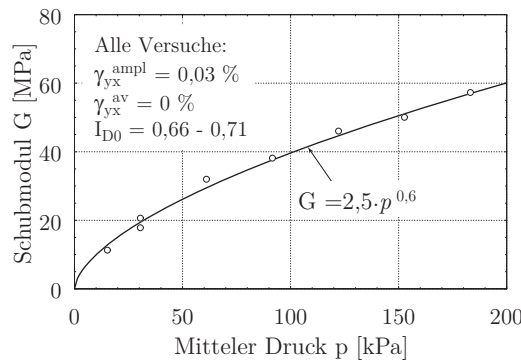


Abbildung 5.18: Weggesteuerte Einzelscherversuche: Schubmodul  $G$  in Abhängigkeit des mittleren Drucks  $p$

Die Grenzscherdehnungsamplitude kann anhand der Ergebnisse von weggesteuerten Einzelscherversuchen bestimmt werden. Dazu wird die Volumendehnung der Versuche mit unterschiedlichen Scherdehnungsamplituden herangezogen. Für die Ermittlung von  $\gamma_{tv}$  wurde die volumetrische Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  bei unterschiedlicher Zyklenanzahl  $N$  über die Schubverzerrungsamplitude aufgetragen (Abbildung 5.19). Es ist offensichtlich, dass die Volumenänderung der Probe nach einer bestimmten Anzahl von Lastzyklen proportional zur Dehnungsamplitude der aufgetragenen zyklischen Belastung ist. In dem normal geteilten Koordinatensystem (Abbildung 5.19, links) wurden die Volumendehnungen mit einer Linie angepasst. Diese Anpassungslinien für verschiedene Zyklenzahlen treffen sich an einem gemeinsamen Punkt auf der horizontalen Achse. Dieser Schnittpunkt auf der  $x$ -Achse markiert die Grenzscherdehnung  $\gamma_{tv}$ . Es wurde dabei eine Dehnungsgrenze  $\gamma_{tv} = 2,5 \cdot 10^{-5}$  ermittelt. Abbildung 5.19 rechts zeigt die Versuchsergebnisse und ihre Anpassungslinie nochmal in

## 5.5 Zyklisches Bodenverhalten im unidirektionalen Einfachscherversuch

der halblogarithmischen Darstellung. Bei der Bestimmung von  $\gamma_{tv}$  ist festzustellen, dass der ermittelte Wert von  $\gamma_{tv}$  relativ sensibel von der Änderung der „*flachen*“ Anpassungslinie abhängt (Anpassungslinie der Werte bei  $N = 10$ , nach Silver & Seed [98]). Es ist daher zu empfehlen, die Werte der Versuche mit einer höheren Zyklenanzahl ( $N > 10^3$ ) für die Ermittlung von  $\gamma_{tv}$  zu verwenden.

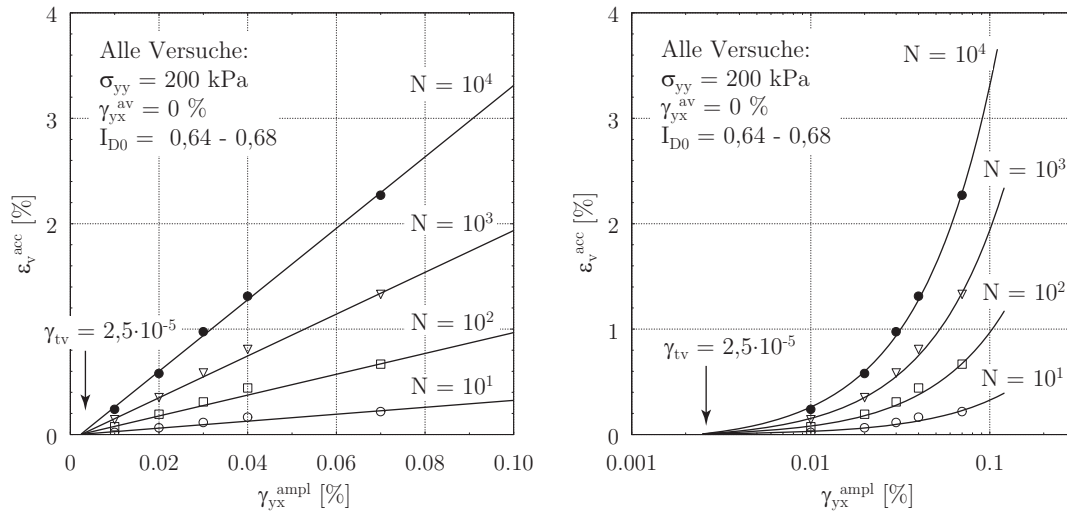


Abbildung 5.19: Einfachscherversuch: Entwicklung der Volumendehnung mit der Scherdehnungsamplitude für unterschiedliche Zyklenanzahlen  $N$  im normalgeteilten Koordinatensystem (links) und im einfach-logarithmisch geteilten Koordinatensystem (rechts)

Die Grenzscherdehnungsamplitude aus dem Einfachscherversuch  $\gamma_{tv} = 2,5 \cdot 10^{-5}$  ist kleiner im Vergleich zu dem Wert aus dem RC-Versuch  $\gamma_{tv} = 4 \cdot 10^{-5}$ . Es liegt vermutlich daran, dass die gemessene Axialdehnung noch von der Zeitdauer der Messung bei der jeweiligen Amplitude und der Resonanzfrequenz abhängt. Die Ermittlung von  $\gamma_{tv}$  beim RC-Versuch im Bereich sehr kleiner Verformungen ist wegen der Auflösung vom axialen Dehnungssensor (0,001 mm) ungenau. Die Probenverformung unterhalb dieser Auflösung konnte nicht erfasst werden. Außerdem wird im RC-Versuch nicht die Volumendehnung, sondern die axiale Dehnung gemessen. Die Probe könnte sich plastisch verformen, ohne ihre Höhe zu verändern. Daher wurde die Aussagekraft und die Zuverlässigkeit der Messung von  $\gamma_{tv}$  mittels Einfachscherversuch höher eingeschätzt.

## 5.5 Zyklisches Bodenverhalten im unidirektionalen Einfachscherversuch

Zyklische Einfachscherversuche werden überwiegend für die Untersuchung des Verflüssigungsverhaltens eingesetzt. Besonders bei der Forschung in den von Erdbeben gefährdeten Regionen werden Einfachscherversuche sehr häufig angewendet. In diesem Gebiet ist eine umfangreiche Literatur zu undrained oder volumenkonstan-

ten Einfachscherversuchen vorhanden. Dagegen wurde das Verdichtungsverhalten eines Bodens unter der zyklischen Einfachscherbelastung nur selten untersucht. Es sind nur wenige Ergebnisse zum Verformungsverhalten im Einfachscherversuch unter weggesteuerter Scherung vorhanden (z. B.: Youd [121] oder Silver & Seed [98], siehe Abschnitt 3.2). In der vorliegenden Arbeit wurden zum Verständnis des zyklischen Bodenverhaltens zahlreiche unidirektionale Einfachscherversuche (Versuche ohne Änderung der Scherrichtung) durchgeführt. Die unidirektionalen Versuche werden auch als Referenzversuche für die multidirektionale Untersuchung verwendet. In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der unidirektionalen Einfachscherversuche vorgestellt und hinsichtlich der Verdichtung, der Akkumulation von totaler Dehnung und der Akkumulationsrichtung diskutiert.

Die Versuche wurden in vier Versuchsreihen aufgeteilt, in denen jeweils ein Parameter variiert wurde. Es wurde der Einfluss von der Lastamplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$ , der mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$ , der Normalspannung  $\sigma_{yy}$  sowie der Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$  untersucht. Die Versuche wurden bis mindestens  $10^4$  Zyklen gefahren. Für die Untersuchung des Einflusses von der Zyklenanzahl wurden einige Proben bis  $10^5$  Zyklen getestet.

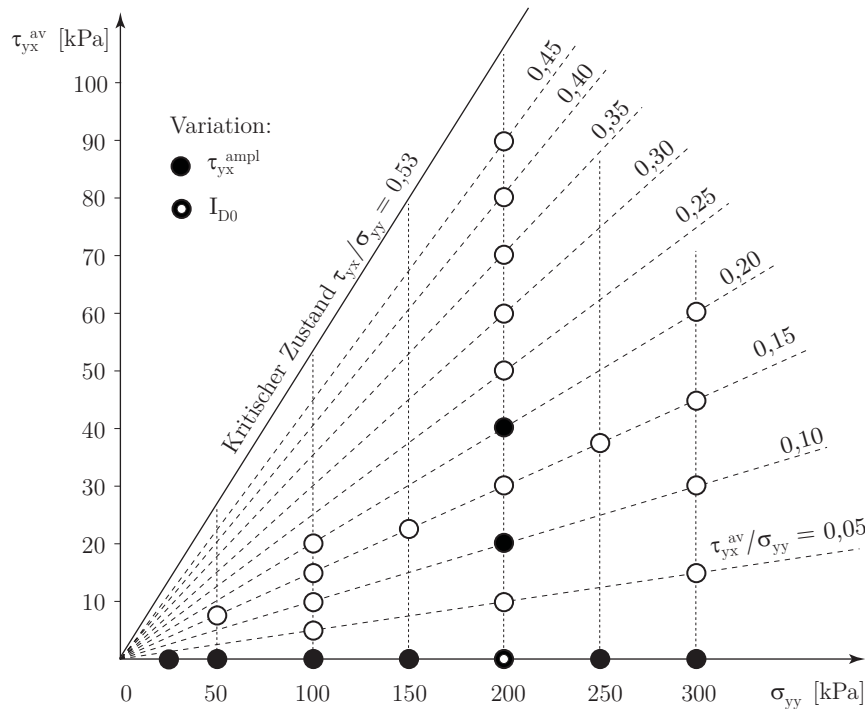


Abbildung 5.20: Konsolidierungsspannungen der unidirektionalen Einfachscherversuche

Zur Veranschaulichung werden die Konsolidierungsspannungen (mittlere Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  und Normalspannung  $\sigma_{yy}$ ) aller durchgeführten Versuche in der Abbildung 5.20 zusammengestellt. Die  $\tau_{yx}^{\text{av}}$ - $\sigma_{yy}$ -Ebene stellt die Spannungszustände auf der Probenoberfläche nach der Konsolidierung dar. Sie beinhaltet aber keine Information über den Spannungszustand innerhalb der Probe. Aus den monotonen Versuchen

## 5.5 Zyklisches Bodenverhalten im unidirektionalen Einfeldversuch

wurde eine Linie für den kritischen Zustand mit  $\tau_{yx}^{av}/\sigma_{yy} = 0,53$  ermittelt. Alle Versuche in der vorliegenden Arbeit wurden unterhalb dieser Linie durchgeführt.

Für die Untersuchung der Lastamplitude wurden Wechsellastversuche ( $\tau_{yx}^{av} = 0$  kPa) mit unterschiedlichen Amplituden  $\tau_{yx}^{ampl}$  durchgeführt (schwarz markierte Punkte, Abbildung 5.20). Außerdem wurden unter  $\sigma_{yy} = 200$  kPa Schwellbeanspruchungen bei  $\tau_{yx}^{av} = 20, 40$  kPa mit verschiedenen Belastungsamplituden  $\tau_{yx}^{ampl}$  getestet. Die Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$  wurde bei  $\sigma_{yy} = 200$  kPa und  $\tau_{yx}^{av} = 0$  kPa variiert. Der Einfluss der mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{av}$  wurde bei  $\sigma_{yy} = 100, 200$  und  $300$  kPa untersucht. In den nachfolgenden Abschnitten werden die Versuchsergebnisse vorgestellt.

### 5.5.1 Verdichtungsverhalten von Berliner Sand

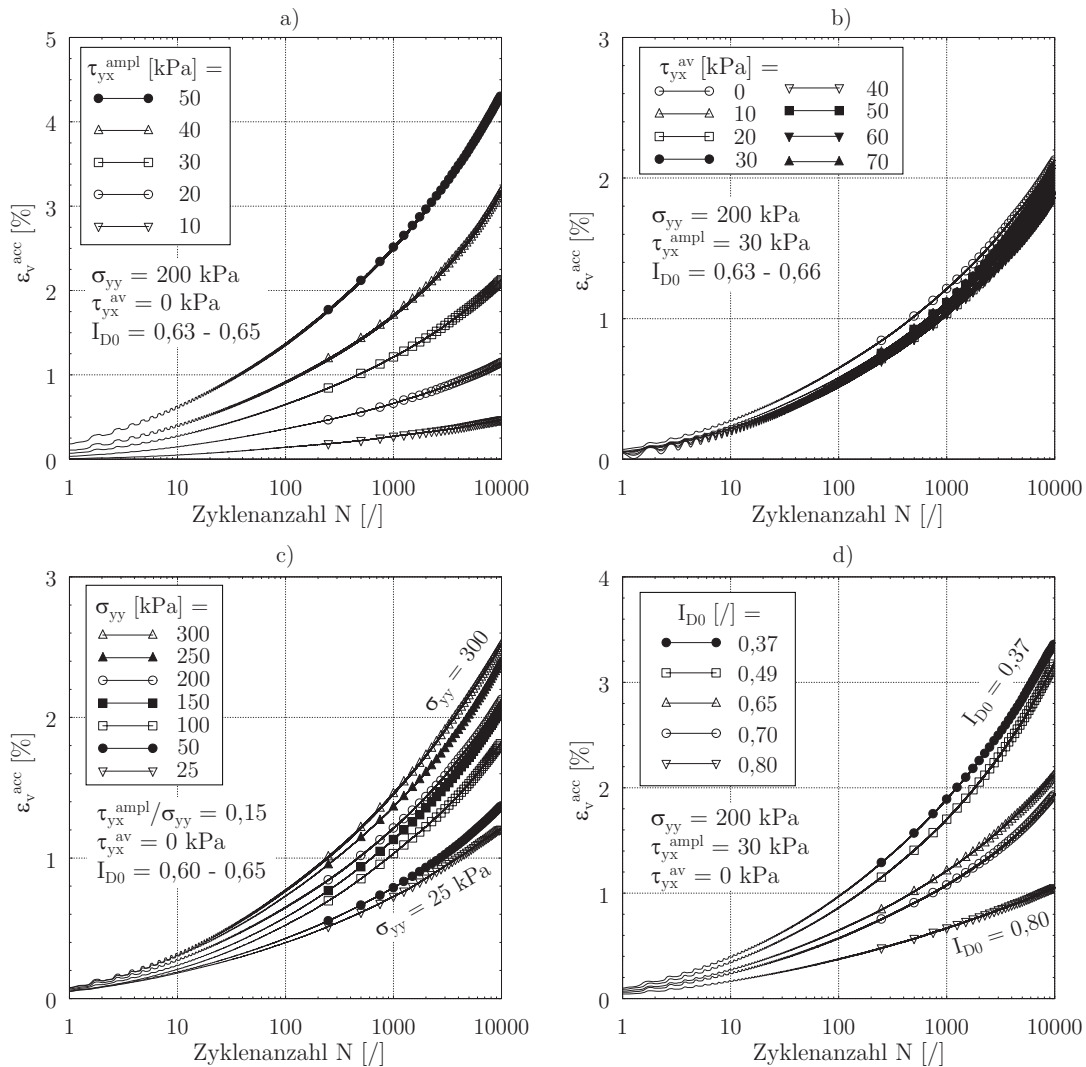


Abbildung 5.21: Volumenänderung im Einfeldversuch mit unterschiedlicher: a) Schubspannungsamplitude  $\tau_{yx}^{ampl}$ , b) Mittelschubspannung  $\tau_{yx}^{av}$ , c) Normalspannung  $\sigma_{yy}$  und d) Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$

Um den Einfluss der Lastamplitude auf die Verdichtung von nichtbindigen Böden zu untersuchen, wurden die Versuche bei konstanter Normalspannung  $\sigma_{yy}$  und mittlerer Schubspannung  $\tau_{yx}^{av} = 0$  kPa mit gleicher Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$  betrachtet (Abbildung 5.20: schwarz markierter Punkt). Die Ergebnisse der Versuche bei  $\sigma_{yy} = 200$  kPa sind in der Abbildung 5.21a exemplarisch dargestellt. Dabei wurde die Probe unter einer zyklischen Belastung von  $\tau_{yx}^{ampl} = 10, 20, 30, 40$  und  $50$  kPa getestet. Es ist offensichtlich, dass die volumetrische Dehnung infolge der zyklischen Belastung von der Lastamplitude abhängig ist. Die Volumendehnung  $\varepsilon_v^{acc}$  ist hier überproportional zu der Schubspannungsamplitude  $\tau_{yx}^{ampl}$ .

Der Einfluss der mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{av}$  wurde in drei Reihen bei gleicher Normalspannung  $\sigma_{yy} = 100, 200$  und  $300$  kPa untersucht. Die Ergebnisse der Versuche mit  $\sigma_{yy} = 200$  kPa sind in der Abbildung 5.21b dargestellt. Dabei wurden die dichten Proben mit einer gleichen Lastamplitude von  $\tau_{yx}^{ampl} = 30$  kPa bei unterschiedlicher Mittelschubspannung von  $\tau_{yx}^{av} = 0$  bis  $70$  kPa getestet. Es stellte sich heraus, dass die Mittelschubspannung keinen Einfluss auf die volumetrische Dehnung der Probe hat. Die Volumendehnungskurven aller Versuche liegen eng zusammen auf einem schmalen Band. Aus der Anordnung der Kurven lässt sich kein eindeutiger Trend erkennen. Wegen des engen Abstands zu der kritischen Linie konnte keine höhere Mittelschubspannung  $\tau_{yx}^{av}$  bei der Amplitude  $\tau_{yx}^{ampl} = 30$  kPa getestet werden. Die Versuchsreihen mit Normalspannungen von  $\sigma_{yy} = 100$  und  $300$  kPa lieferten ähnliche Ergebnisse.

Die Anfangslagerungsdichte spielt erwartungsgemäß eine wichtige Rolle bei dem Verdichtungsverhalten der Probe. In einer Versuchsserie wurden fünf Proben mit unterschiedlicher Dichte getestet (Abbildung 5.21d). Bei identischer zyklischer Belastung verdichtet sich die lockerere Probe stärker. Unter einer Belastung von  $\tau_{yx}^{ampl} = 30$  kPa bei  $\sigma_{yy} = 200$  kPa verformt sich die lockerste Probe ( $I_{D0} = 0,37$ ) fast dreimal mehr als die dichteste Probe mit  $I_{D0} = 0,80$ .

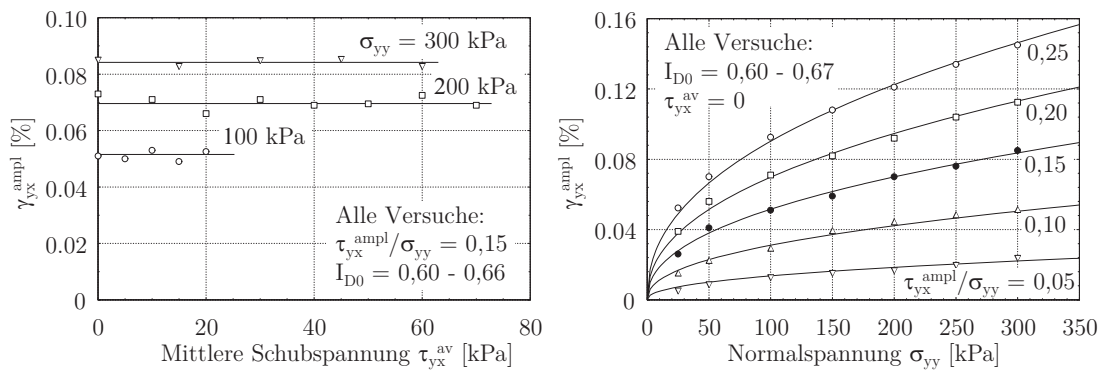


Abbildung 5.22: Schubverzerrungsamplitude (bei  $N = 10^4$ ) in Einzelscherverversuchen mit unterschiedlichen mittleren Schubspannungen  $\tau_{yx}^{av}$  (links) und unterschiedlichen Normalspannungen  $\sigma_{yy}$  (rechts)

Der Einfluss der Normalspannung auf die volumetrische Dehnung wurde in Versuchen mit gleichem Belastungsniveau  $\tau_{yx}^{ampl}/\sigma_{yy} = 0,15 = \text{konstant}$  bei Normalspannungen von  $\sigma_{yy} = 25$  bis  $300$  kPa betrachtet. Die Amplitude  $\tau_{yx}^{ampl}$  ist mit einem



## 5.5 Zyklisches Bodenverhalten im unidirektionalen Einfeldversuch

Verhältnis  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}/\sigma_{yy} = 0,15$  von der Normalspannung abhängig. Die Ergebnisse der Versuchsserie wurde in der Abbildung 5.21c zusammengestellt. Die Verläufe der volumetrischen Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  über die Zyklenanzahl  $N$  zeigen, dass sich die Probe unter größerem Druck schneller verdichtet. Bei gleichem zyklischen Spannungsverhältnis ist die Volumendehnung bei einer Normalspannung von  $\sigma_{yy} = 300 \text{ kPa}$  ca. doppelt so groß wie bei  $\sigma_{yy} = 25 \text{ kPa}$ . Diese Beobachtung steht jedoch im Widerspruch zu den Ergebnissen der weggesteuerten Einfeldversuche (Silver & Seed [98], Youd [121]), wo kein Einfluss der Normalspannung auf die Volumendehnung festgestellt werden konnte. Es ist zu beachten, dass die Versuche bei Silver & Seed [98] und bei Youd [121] weggesteuert und in dieser Studie kraftgesteuert durchgeführt wurden. Die Belastungen bei den kraftgesteuerten und weggesteuerten Versuchen werden anders definiert. Zwischen den weggesteuerten Versuchen wird eine vergleichbare Belastung durch die gleiche Schubverzerrungsamplitude  $\gamma_{yx}^{\text{ampl}}$  erbracht. Stattdessen wird in kraftgesteuerten Versuchen das gleiche Belastungsniveau  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}/\sigma_{yy}$  aufgebracht. Aus diesem Grund ist es erforderlich, die Schubverzerrungsamplitude  $\gamma_{yx}^{\text{ampl}}$  der durchgeführten kraftgesteuerten Versuche zu betrachten.

Die in der Abbildung 5.22 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Schubverzerrungsamplitude  $\gamma_{yx}^{\text{ampl}}$  mit zunehmender Normalspannung  $\sigma_{yy}$  ansteigt (Abbildung 5.22 rechts). Diese Unterschiede der Dehnungsamplituden sind auf die Druckabhängigkeit der Steifigkeit (Abschnitt 5.4) zurückzuführen. Die Steifigkeit der Probe ist unterproportional zu der mittleren Spannung (Die Steifigkeit steigt langsamer als der mittlere Druck). Das führt dazu, dass bei gleichem Belastungsniveau die resultierende Dehnung unter höherem Druck größer ist. Demzufolge verursacht die gleiche Belastung ( $\tau_{yx}^{\text{ampl}}/\sigma_{yy} = \text{konstant}$ ) bei höherem Druck eine größere volumetrische Dehnung. Die Abhängigkeit der Volumendehnung von der resultierenden Schubverzerrungsamplitude wurde anhand der Beobachtung in Versuchen mit unterschiedlichen mittleren Schubspannungen  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  nochmals bestätigt. Diese Versuche haben fast die gleiche Schubverzerrungsamplitude (Abbildung 5.22 links) und weisen dabei ähnliche Volumendehnungen auf (Abbildung 5.21b).

Die Untersuchung von Glasenapp [32] kam ebenfalls zum Schluss, dass die Volumenänderung infolge einer zyklischen Belastung im Einfeldversuch maßgeblich von der resultierenden Schubverzerrungsamplitude  $\gamma_{yx}^{\text{ampl}}$  abhängig ist. Daher wurde  $\gamma_{yx}^{\text{ampl}}$  in der Betrachtung der Ergebnisse von kraftgesteuerten Versuchen einbezogen. In Abbildung 5.23 ist die Volumendehnung in Abhängigkeit von  $\gamma_{yx}^{\text{ampl}}$  für Versuche mit unterschiedlichen Normalspannungen  $\sigma_{yy}$  und verschiedenen Belastungsniveaus  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}/\sigma_{yy}$  dargestellt. Dabei wurde die volumetrische Dehnung nach  $N = 10^3$  und  $10^4$  Zyklen gegen die jeweilige mittlere Schubverzerrungsamplitude  $\bar{\gamma}_{yx}^{\text{ampl}} = 1/N \sum_1^N \gamma_{yx}^{\text{ampl}}(N)$  aufgetragen. Es ist zu beobachten, dass die Ergebnisse aller Versuche, abgesehen von kleinen Abweichungen, auf einer Kurve liegen. Die Volumendehnungen in weggesteuerten Versuchen (Abbildung 5.19) stimmen auch mit den Ergebnissen der kraftgesteuerten Versuche hier überein (durchgezogene Kurven, Abbildung 5.23). Es stellte sich heraus, dass unabhängig von der Normalspannung die Volumendehnung proportional zu der Schubverzerrungsamplitude ist.

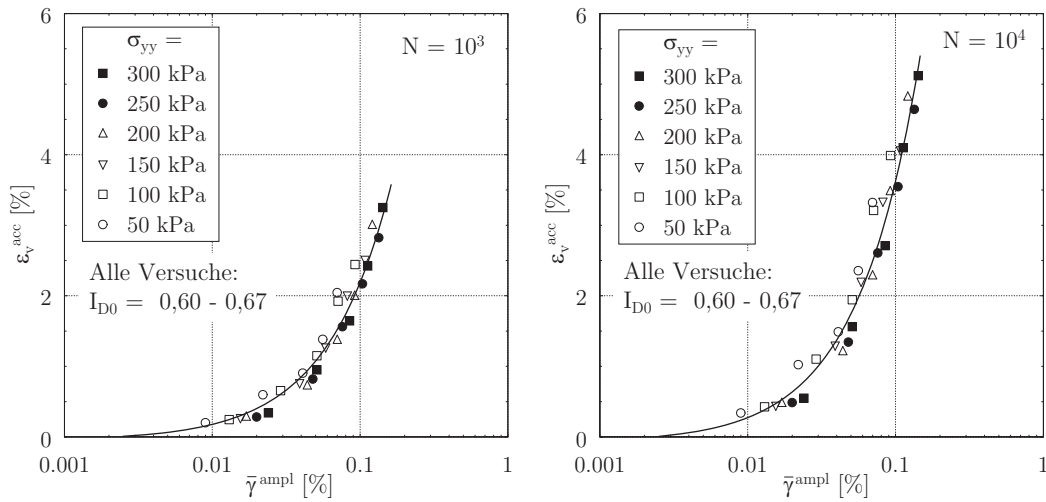


Abbildung 5.23: Einzelscherversuche: volumetrische Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  bei  $10^3$  Zyklen (links) und bei  $10^4$  Zyklen (rechts) in Abhängigkeit der Schubverzerrungsamplitude  $\bar{\gamma}_{yx}^{\text{ampl}}$  für unterschiedliche Normalspannungen  $\sigma_{yy}$

### 5.5.2 Akkumulation der totalen Dehnung $\varepsilon^{\text{acc}}$

Um das Verformungsverhalten der Probe im Einzelscherversuch zu beschreiben, ist es notwendig die Volumendehnung  $\varepsilon_v$  und die Schubverzerrung  $\gamma_{yx}$  gleichzeitig zu betrachten. Die Akkumulation der totalen Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$  umfasst sowohl die volumetrische Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  als auch die Schubverzerrung  $\gamma_{yx}^{\text{acc}}$  (Definition nach Gleichung 2.24). Im Folgenden werden die Einflüsse auf die Akkumulation der totalen Dehnung anhand von Versuchsergebnissen diskutiert. Die Versuchsergebnisse werden im Hinblick auf die Formulierung der Teilfunktionen für das hochzyklische Akkumulationsmodell (HCA-Modell) (Abschnitt 6.3) dargestellt.

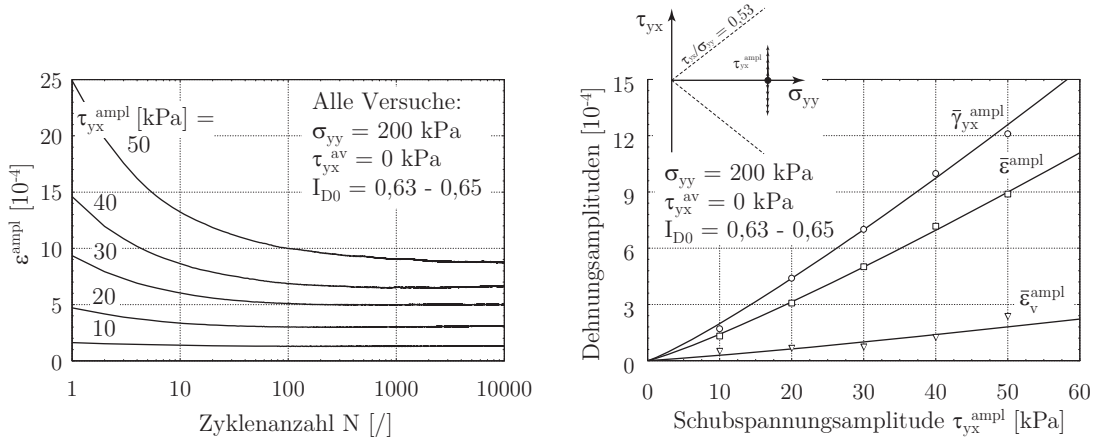
#### 5.5.2.1 Einfluss der Lastamplitude

Der Einfluss der Lastamplitude wurde an Proben unter verschiedenen Normalspannungen untersucht (schwarz markierte Punkte in der Abbildung 5.20). Bei jedem Konsolidierungszustand wurden vier bis fünf unterschiedliche Spannungsamplituden getestet. Repräsentativ werden hier die Ergebnisse der Versuche bei einer Normalspannung von  $\sigma_{yy} = 200$  kPa gezeigt.

Die Amplitude der totalen Dehnung wird für den Fall „einfache Scherung“ nach der Gleichung 2.27 berechnet. Zuerst wird die Dehnungsamplitude in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl betrachtet. Die Abbildung 5.24 links zeigt die Amplitude der totalen Dehnung als Funktion der Zyklenanzahl  $N$ . Es ist zu beobachten, dass die Amplitude in den ersten 200 Zyklen stark abnimmt. Bei der Spannungsamplitude bis  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 40$  kPa bleibt die Amplitude in den weiteren Zyklen konstant, während die Amplitude im Versuch mit  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 50$  kPa sich weiter verkleinert. Die Abnahmerate sinkt hier mit der Zyklenanzahl  $N$ . Nach  $10^4$  Zyklen ist noch kein stabiler Wert von



$\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  zu beobachten.



Abbildungung 5.24: Einfeldversuche: Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl  $N$  (links); mittlere Dehnungsamplituden aus  $10^4$  Zyklen für verschiedene Spannungsamplituden (rechts)

Die starke Abnahme der Dehnungsamplitude mit der Zyklenzahl könnte auf die aufgelockerte Sandschicht an der Probenoberfläche zurückzuführen sein. Die glatte Oberfläche der Probe wurde durch Abziehen des überflüssigen Sands mit Hilfe eines geraden Messers hergestellt. Dadurch lockert sich die obere Sandschicht etwas auf. Die aufgelockerte Zone wird während der ersten Zyklen des Versuchs wieder verdichtet und verursacht vermutlich eine größere Dehnungsamplitude. Das gleiche Verhalten wurde auch im Triaxialversuch festgestellt. Eine andere Variante für die Herstellung der glatten Probenoberfläche wurde auch ausprobiert: Abtragung des Sands durch Absaugen. Diese Methode hat kein zufriedenstellendes Ergebnis geliefert. Außerdem wurde der Feinkornanteil an der Oberfläche abgesaugt, was zur Entmischung des Materials und zur Verfälschung der Versuchsergebnisse führen kann.

Die Abbildung 5.24 rechts stellt die gemittelten Amplituden der Schubverzerrung  $\bar{\gamma}_{yx}^{\text{ampl}}$ , der totalen Dehnung  $\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}}$  und der volumetrischen Dehnung  $\bar{\varepsilon}_v^{\text{ampl}}$  aus  $10^4$  Zyklen in Abhängigkeit der Schubspannungsamplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  dar. Diese drei Dehnungsamplituden sind leicht überproportional zu  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$ , d.h. die Dehnungsamplituden steigen schneller als die Spannungsamplitude. Dabei wurde eine überlineare Beziehung *Dehnungsamplitude*  $\sim (\tau_{yx}^{\text{ampl}})^{1.15}$  für alle drei Kurven festgestellt.

Die Entwicklung der totalen Dehnung im Versuch mit unterschiedlichen Schubspannungsamplituden ist in der Abbildung 5.25 zusammengestellt. Dabei wurden Versuche unter symmetrischer Wechsellast (Abbildung 5.25, links) und im Bereich der Schwelllast (Abbildung 5.25, rechts) durchgeführt. Aufgrund der verschwindend kleinen Akkumulation der Schubverzerrung  $\gamma_{yx}^{\text{acc}} \approx 0$  im Versuch um die Nulllage unterscheidet sich die totale Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$  betragsmäßig kaum von der volumetrischen Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  (Abbildung 5.21a). Hingegen fällt die totale Dehnung der Versuche im Schwelllastbereich größer aus (Abbildung 5.25, rechts). Aufgrund der Akkumulation der Schubverzerrung infolge der statischen Vorscherung mit  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  vergrößert sich die totale Dehnung im Vergleich zum Versuch um die Nulllage. Bei allen Versuchen ist zu

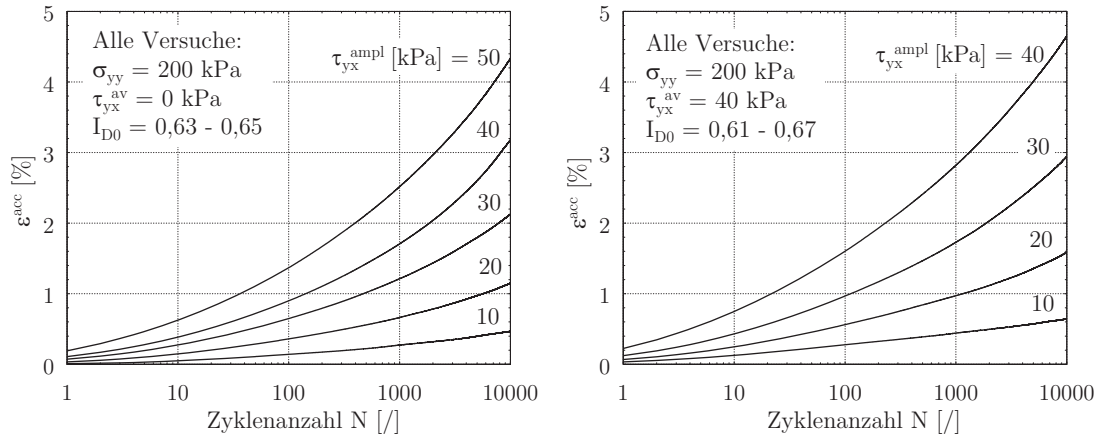


Abbildung 5.25: Akkumulation der totalen Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$  in Abhängigkeit der Zyklenszahl  $N$  für verschiedene Spannungsamplituden  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  um die Nulllage  $\tau_{yx}^{\text{av}} = 0 \text{ kPa}$  (links) und um  $\tau_{yx}^{\text{av}} = 40 \text{ kPa}$  (rechts)

beobachten, dass die bleibende totale Dehnung mit steigender Spannungsamplitude zunimmt.

Die Akkumulation der totalen Dehnung wird in dem HCA-Modell mit der Gleichung

$$\varepsilon^{\text{acc}} \sim (\varepsilon^{\text{ampl}})^{C_{\text{ampl}}} \quad (5.16)$$

approximiert (Abschnitt 6.3). Darin ist  $C_{\text{ampl}}$  eine Materialkonstante. Anhand der zyklischen Triaxialversuche wurde für Berliner Sand  $C_{\text{ampl}} = 2,05$  ermittelt (Abschnitt 6.5.1). Für die Überprüfung der Approximation mit dem HCA-Modell an zyklischen Einfachscherversuchen wurden deren Ergebnisse mit dem Ansatz in Gleichung 5.16 betrachtet. Dabei wurde die akkumulierte Dehnung nach den Zyklen  $N = 10, 50, 100, 500, 1.000, 5.000$  und  $10.000$  über die Dehnungsamplitude  $\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}}$  aufgetragen (Abbildung 5.26). Aufgrund der Variation der Dehnungsamplitude über die Zyklenszahl  $N$  wurde die Dehnungsamplitude bis zum betrachteten Zyklus gemittelt. Der Mittelwert der Dehnungsamplitude  $\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}}$  wurde für die jeweilige Zyklenszahl  $N$  nach folgender Funktion

$$\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \varepsilon^{\text{ampl}}(N) \quad (5.17)$$

berechnet. Die Versuche sollen mit gleicher Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$  eingebaut werden. Dabei ist jedoch eine kleine Abweichung von  $I_{D0}$  zwischen den Versuchen unvermeidbar. Um die leicht unterschiedliche Anfangslagerungsdichte zu berücksichtigen, werden die akkumulierten Dehnungen mit der Teilfunktion  $\bar{f}_e$  normiert. Die Teilfunktion  $\bar{f}_e$  beschreibt den Einfluss der Porenzahl  $e$  auf die Akkumulationsdehnung und wird entsprechend Abschnitt 6.3 durch die hyperbolische Funktion

$$\bar{f}_e = \frac{(C_e - \bar{e})^2}{(C_e - e_{\text{ref}})^2} \frac{1 + e_{\text{ref}}}{1 + \bar{e}} \quad (5.18)$$

## 5.5 Zyklisches Bodenverhalten im unidirektionalen Einfeldscherversuch

erfasst. Darin ist  $C_e$  eine Materialkonstante und  $e_{\text{ref}}$  die Bezugsporenzahl. Für Berliner Sand wurde  $C_e = 0,325$  und  $e_{\text{ref}} = e_{\text{max}} = 0,688$  ermittelt. Die Funktion  $\bar{f}_e$  wurde mit dem Mittelwert der Porenzahl bis zu der betrachteten Zyklenanzahl  $N$  mit  $\bar{e} = 1/N \sum_1^N e(N)$  errechnet.

Die Abbildung 5.26 stellt die Ergebnisse der oben gezeichneten Versuche (Abbildung 5.25) dar. Die Anpassung an die Versuchsdaten mit der Beziehung  $\varepsilon^{\text{acc}} \sim (\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}})^{2,05}$  (durchgezogene Kurve) liefert ein zufriedenstellendes Ergebnis. Der Einfluss der Lastamplitude im Einfeldscherversuch kann gut mit dem Ansatz vom HCA-Modell reproduziert werden.

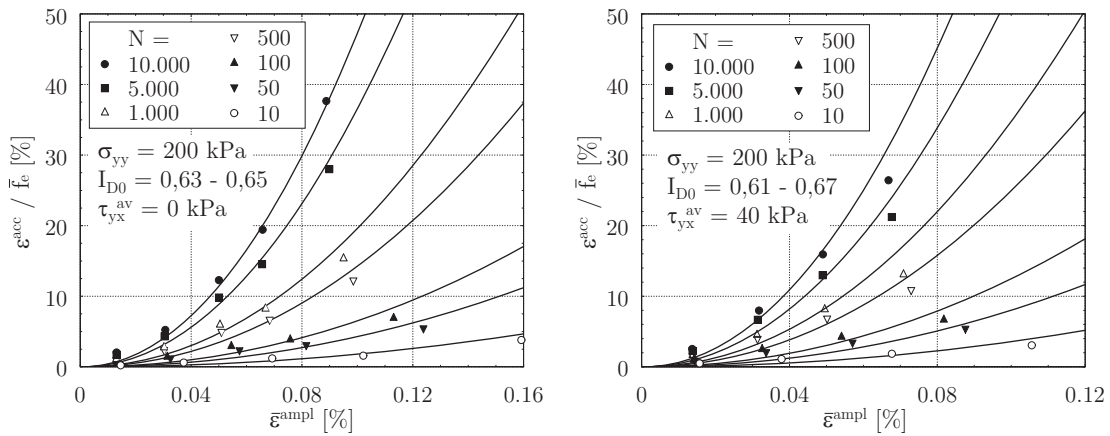


Abbildung 5.26: Abhängigkeit der normierten Akkumulationsdehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}/\bar{f}_e$  auf die gemittelte Dehnungsamplitude  $\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}}$  in Versuche um die Nulllage  $\tau_{yx}^{\text{av}} = 0$  kPa (links) und um  $\tau_{yx}^{\text{av}} = 40$  kPa (rechts)

### 5.5.2.2 Einfluss der Lagerungsdichte

Der Einfluss der Porenzahl wurde anhand von Versuchen mit unterschiedlicher Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$  unter identischem Konsolidierungszustand  $\sigma_{yy} = 200$  kPa und gleicher Belastung  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 30$  kPa,  $\tau_{yx}^{\text{av}} = 0$  kPa untersucht. Die Abhängigkeit der Dehnungsamplituden auf die Lagerungsdichte  $I_{D0}$  ist in der Abbildung 5.27 dargestellt. Es ist zu beobachten, dass die gemittelten Schubverzerrungs- und totalen Dehnungsamplituden ( $\bar{\gamma}_{yx}^{\text{ampl}}$  und  $\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}}$ ) proportional zu  $I_{D0}$  abnehmen. Die Volumendehnungsamplitude  $\bar{\varepsilon}_v^{\text{ampl}}$  bleibt annähernd konstant und ist im Vergleich zu den anderen Amplituden viel kleiner (Abbildung 5.27).

Die Entwicklung der Akkumulation der totalen Dehnung mit der Zyklenanzahl  $N$  ist in der Abbildung 5.28 links gezeigt. Die akkumulierte Dehnung nimmt erwartungsgemäß mit der steigenden Anfangslagerungsdichte ab. Die Entwicklungen der totalen Dehnung ähneln denen der volumetrischen Dehnung (Abbildung 5.21d).

Die Abhängigkeit der akkumulierten Dehnung von der Porenzahl wurde im HCA-Modell mit der Gleichung 5.18 beschrieben. Um den Ansatz von  $f_e$  zu überprüfen, wurde der Ansatz von  $f_e$  (Gleichung 5.18) an die Versuchsergebnisse angepasst.

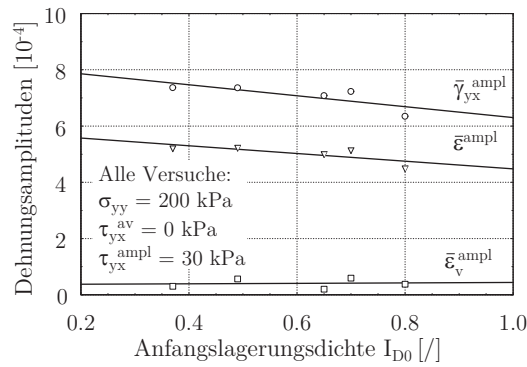


Abbildung 5.27: Dehnungsamplitude als Mittelwert aus  $10^4$  Zyklen gegen die Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$

Dabei wurde die akkumulierte Dehnung mit der Teilfunktion  $\bar{f}_{ampl}$  normiert, um den Einfluss der unterschiedlichen Dehnungsamplituden zu bereinigen. Die Teilfunktion  $\bar{f}_{ampl}$  wurde gemäß Abschnitt 6.3 mit der Gleichung

$$\bar{f}_{ampl} = \left( \frac{\bar{\epsilon}^{ampl}}{10^{-4}} \right)^{C_{ampl}} \quad (5.19)$$

berechnet. Für Berliner Sand ist  $C_{ampl} = 2,05$ . Die für  $N$  Zyklen gemittelte Funktion  $\bar{f}_{ampl}$  wurde mit dem Mittelwert der Dehnungsamplitude  $\bar{\epsilon}$  nach der Gleichung 5.17 berechnet. Die Abbildung 5.28 rechts stellt die normierte Dehnung  $\epsilon^{acc}/\bar{f}_{ampl}$  gegen die gemittelte Porenzahl  $\bar{e} = 1/N \sum_1^N e(N)$  dar. Die Versuchsdaten wurden mit der Beziehung  $\epsilon^{acc} \sim \bar{f}_e$  angepasst ( $\bar{f}_e$  wurde mit  $\bar{e}$  und nach der Gleichung 5.18 berechnet). Die Anpassungskurve (durchgezogene Kurve) zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen der dichten Proben. Bei locker gelagerten Proben werden die Messwerte überschätzt.

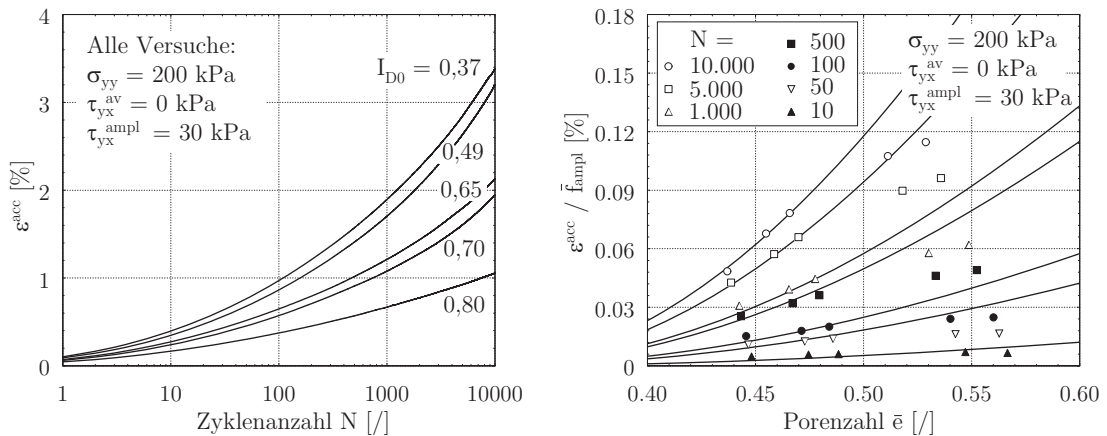


Abbildung 5.28: Akkumulierte Dehnung  $\epsilon^{acc}$  in Abhängigkeit von der Zyklenanzahl  $N$  (links) und normierte Akkumulationsdehnung  $\epsilon^{acc}/\bar{f}_{ampl}$  gegenüber Porenzahl  $\bar{e}$  (rechts)

## 5.5.2.3 Einfluss der Normalspannung

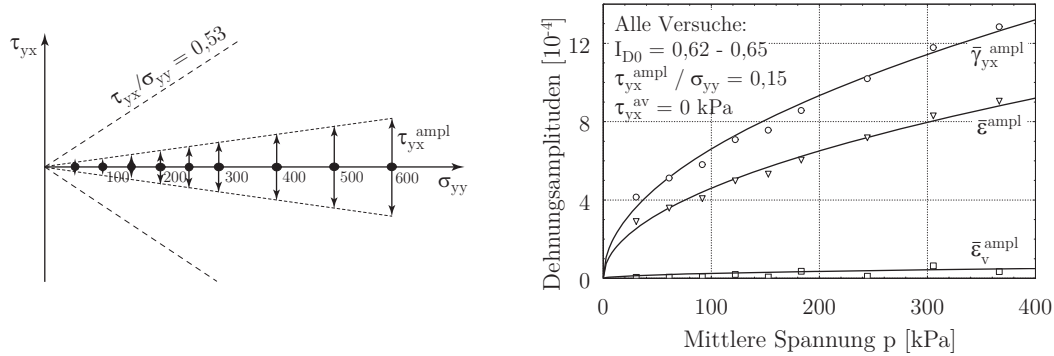


Abbildung 5.29: Schematische Darstellung der getesteten Spannungszustände (links), Mittelwerte der Dehnungsamplituden aus  $10^4$  Zyklen für verschiedenen mittleren Druck  $p$  (rechts)

Der mittlere Druck  $p$  im Einfeldversuch ist von der Normalspannung  $\sigma_{yy}$  abhängig und wird für den Konsolidierungszustand nach der Gleichung 5.15 berechnet. Mit der Variation der Normalspannung  $\sigma_{yy}$  wurden verschiedene mittlere Drücke  $p$  untersucht. In der Abbildung 5.29 wurden die Dehnungsamplituden  $\bar{\gamma}_{yx}^{ampl}$ ,  $\bar{\epsilon}^{ampl}$  und  $\bar{\epsilon}_v^{ampl}$  als Mittelwert aus  $10^4$  Zyklen über den mittleren Druck aufgetragen. Die Amplitude der volumetrischen Dehnung  $\bar{\epsilon}_v^{ampl}$  ist im Vergleich zu  $\bar{\gamma}_{yx}^{ampl}$  und  $\bar{\epsilon}^{ampl}$  vernachlässigbar klein. Die Abhängigkeit der Dehnungsamplitude vom mittleren Druck ( $\bar{\gamma}_{yx}^{ampl}(p)$ ,  $\bar{\epsilon}^{ampl}(p)$  und  $\bar{\epsilon}_v^{ampl}(p)$ ) kann mit der Beziehung *Dehnungsamplitude*  $\sim p^{0,5}$  approximiert werden. Der Exponent  $n = 0,5$  passt mit dem Exponenten der Druckabhängigkeit des Schubmoduls (Abschnitt 5.4.1) gut zusammen.

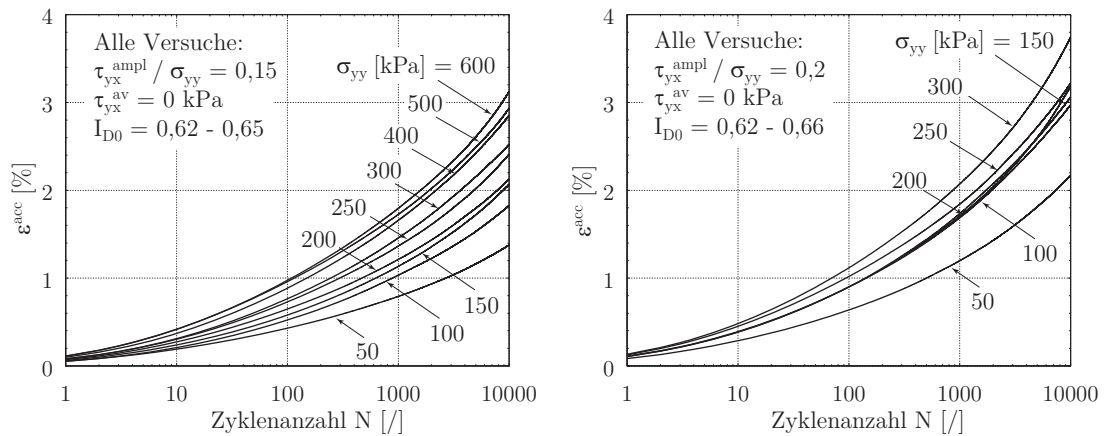


Abbildung 5.30: Akkumulierte Dehnung  $\epsilon^{acc}$  in Abhängigkeit der Zyklenanzahl  $N$  für unterschiedliche Normalspannungen unter der Belastung  $\tau_{yx}^{ampl}/\sigma_{yy} = 0,15$  (links) und  $\tau_{yx}^{ampl}/\sigma_{yy} = 0,2$  (rechts)

Die Entwicklung der akkumulierten totalen Dehnung  $\epsilon^{acc}$  über die Zyklenanzahl  $N$  für Versuche bei unterschiedlicher Normalspannung  $\sigma_{yy}$  mit identischem Lastniveau

$\tau_{yx}^{\text{ampl}}/\sigma_{yy}$  ist in der Abbildung 5.30 zusammengefasst. Es ist deutlich zu erkennen, dass  $\varepsilon^{\text{acc}}$  von der Normalspannung abhängig ist. Je größer die Normalspannung bei gleichem Belastungsniveau ist, desto höher ist die bleibende Verformung. Der von der Versuchsreihe abweichende Trend der Ergebnisse von Versuchen mit  $\sigma_{yy} = 100$  und 150 kPa (Abbildung 5.30 rechts) ist auf die leicht unterschiedlichen Anfangslagerungsdichten  $I_{D0}$  zurückzuführen.

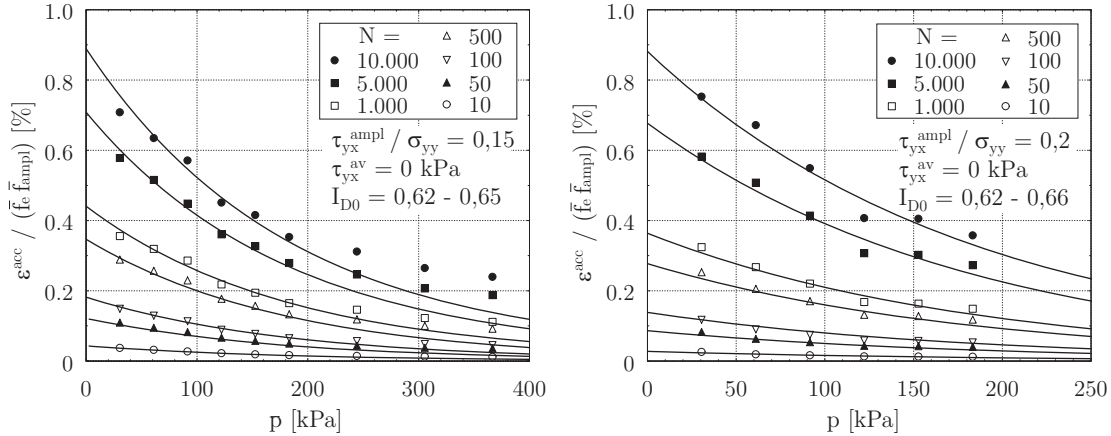


Abbildung 5.31: Normierte akkumulierte Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}/\bar{f}_e\bar{f}_{\text{ampl}}$  in Abhängigkeit vom mittleren Druck  $p$

In der Abbildung 5.31 sind die mit  $\bar{f}_e$  und  $\bar{f}_{\text{ampl}}$  normierten akkumulierten Dehnungen  $\varepsilon^{\text{acc}}$  für unterschiedliche Zyklenanzahlen  $N$  über den mittleren Druck  $p$  aufgetragen. Die normierte Dehnung nimmt mit steigender mittlerer Spannung  $p$  ab. In dem HCA-Modell wird der Einfluss der mittleren Spannung  $p$  mit der potenziellen Beziehung

$$\varepsilon^{\text{acc}} \sim f_p = \exp\left(-C_p \left(\frac{p}{100} - 1\right)\right) \quad (5.20)$$

beschrieben. Für Berliner Sand wurde eine Konstante  $C_p = 0,55$  ermittelt. Die Approximation der Gleichung 5.20 an die Versuchsdaten (Abbildung 5.31: durchgezogene Linie) zeigt eine gute Übereinstimmung im Bereich  $p < 200$  kPa (Abbildung 5.31 links). Für  $p > 200$  kPa wurde die Akkumulation stets unterschätzt.

#### 5.5.2.4 Einfluss der mittleren Schubspannung

Um den Einfluss der mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  auf das zyklische Verhalten zu untersuchen, wurden drei Versuchsreihen mit unterschiedlicher  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  bei  $\sigma_{yy} = 100, 200$  und 300 kPa durchgeführt (Abbildung 5.32 links). Zunächst wird der Einfluss der mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  auf die Dehnungsamplituden betrachtet. Die Abbildung 5.32 stellt die aus  $10^4$  Zyklen gemittelte Amplitude der Schubverzerrung  $\bar{\gamma}_{yx}^{\text{ampl}}$ , der volumetrischen Dehnung  $\bar{\varepsilon}_v^{\text{ampl}}$  und der totalen Dehnung  $\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}}$  gegen die mittlere Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  dar. Es ist zu erkennen, dass die Dehnungsamplituden nicht von der mittleren Schubspannung abhängig sind. Alle drei Dehnungsamplituden bleiben bei unterschiedlichen Schubspannungen  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  annähernd konstant.



## 5.5 Zyklisches Bodenverhalten im unidirektionalen Einfachscherversuch

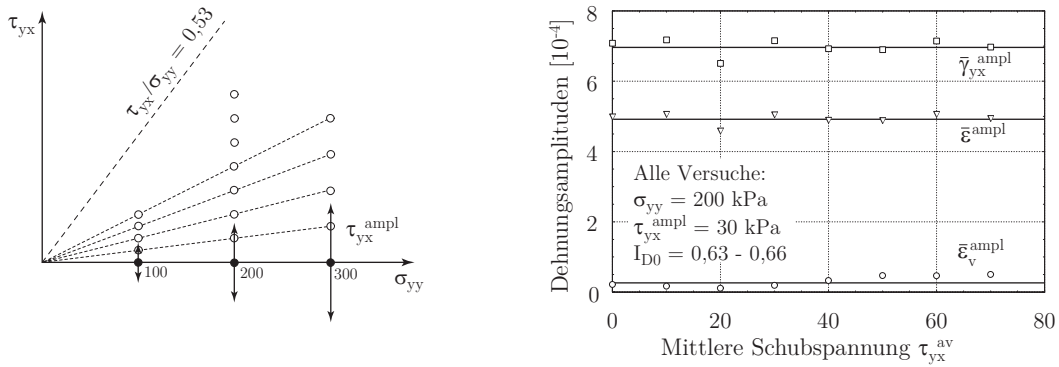


Abbildung 5.32: Schematische Darstellung der getesteten Spannungszustände (links), Dehnungsamplituden  $\bar{\gamma}_{yx}^{ampl}$ ,  $\bar{\epsilon}_v^{ampl}$  und  $\bar{\epsilon}_v^{ampl}$  für verschiedene mittlere Schubspannungen  $\tau_{yx}^{av}$  (rechts)

In Abbildung 5.33 wurde die akkumulierte Dehnung  $\epsilon^{acc}$  über die Zyklenanzahl  $N$  für unterschiedliche mittlere Schubspannungen aufgetragen. Es ist bei allen drei Versuchsreihen zu sehen, dass in den Wechsellastversuchen (Versuche mit  $\tau_{yx}^{av} < \tau_{yx}^{ampl}$ ) die Mittelschubspannung  $\tau_{yx}^{av}$  bei der akkumulierten Dehnung  $\epsilon^{acc}$  nur eine untergeordnete Rolle spielt. Abgesehen von kleinen Abweichungen im Bereich der Reproduzierbarkeit des Versuchs fällt die Dehnung bei unterschiedlichen Schubspannungen  $\tau_{yx}^{av}$  gleich aus. Beim Verlassen des Wechsellastbereichs ( $\tau_{yx}^{av} > \tau_{yx}^{ampl}$ ) steigt die akkumulierte Dehnung  $\epsilon^{acc}$  mit zunehmender Mittelspannung  $\tau_{yx}^{av}$  an.

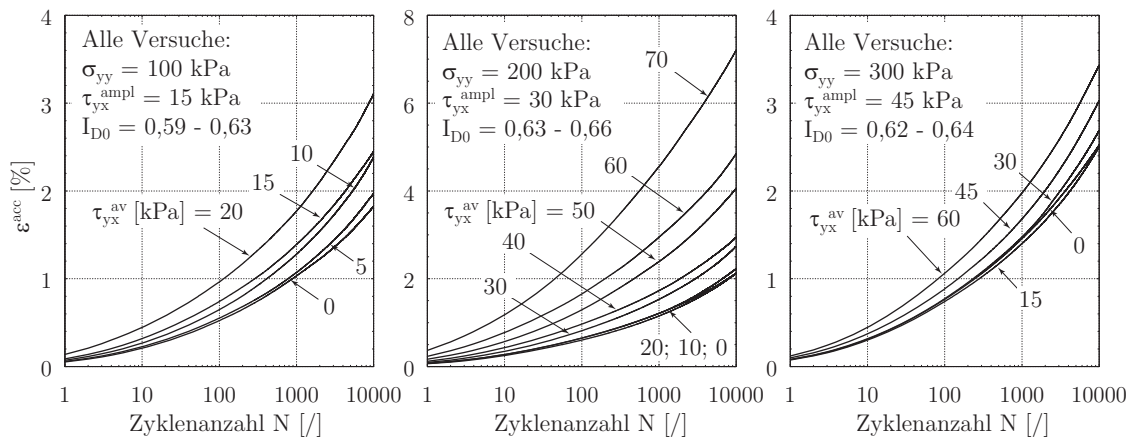


Abbildung 5.33: Akkumulierte Dehnung  $\epsilon^{acc}$  in Abhängigkeit der mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{av}$  bei Normalspannung  $\sigma_{yy} = 100$  kPa (links), 200 kPa (Mitte) und 300 kPa (rechts)

Im Abschnitt 5.2.4 wurde bereits gezeigt, dass die Darstellung der Spannungszustände im Einfachscherversuch während einer monotonen Belastung nicht trivial ist. Aufgrund der fehlenden Kenntnisse über die horizontale Spannung  $\sigma_{xx}$  ist die Darstellung des Spannungszustandes nur mit Hilfe einiger Annahmen möglich. Die im Abschnitt 5.2.4 vorgestellten Darstellungsmethoden sind nicht zufriedenstellend. Die ersten drei Ansätze gehen von einem isotropen Spannungszustand aus.

Damit kann der Konsolidierungszustand (anisotrope Spannungszustand) eines Einfachscherversuchs nicht richtig dargestellt werden. Diese Ansätze sollten nur für größere Verformungen angewendet werden. Die Methode 4 ist labortechnisch nicht realisierbar. Mit der letzten Methode können nur die Komponenten  $\sigma_1$  und  $\sigma_3$  der Hauptspannungen berechnet werden. Die Komponente  $\sigma_2$  ist weiterhin unbekannt. Die Untersuchung von Stroud [100] stellt fest, dass die Mittelhauptspannung  $\sigma_2$  („*intermediate principal stress*“) im Einfachscherversuch von der Invariante  $s = (\sigma_1 + \sigma_2)/2$  und der Schubverzerrung  $\gamma_{yx}$  abhängig ist. Stroud schlug einen Mittelwert von  $\sigma_2 = 0,74 \cdot s$  für Leighton Buzzard Sand vor. Diese Vorgehensweise liefert besonders im kleinen Verformungsbereich mit  $\gamma_{yx} < 3\%$ , in dem sich die meisten Versuche dieser Studie befinden, unzuverlässige Ergebnisse. Aus diesem Grund wurde auf eine quantitative Auswertung der Spannungszustände in Versuchen mit statischer Vorscherung ( $\tau_{yx}^{av} \neq 0$ ) verzichtet. Hier wird nur qualitativ der Einfluss von  $\tau_{yx}^{av}$  auf das Verformungsverhalten diskutiert.

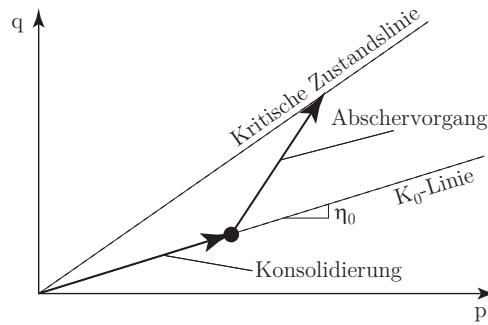


Abbildung 5.34: Schematische Darstellung der Spannungspfade im monotonen Einfachscherversuch

Um die Änderung des Spannungszustands im Spannungsraum vom Einfachscherversuch qualitativ zu verstehen, werden die Spannungspfade in der  $p$ - $q$ -Ebene betrachtet (Abbildung 5.34). Der mittlere Druck  $p$  kann für den Konsolidierungszustand im Einfachscherversuch nach der Gleichung 5.15 berechnet werden. Während des Konsolidierungsvorgangs herrscht in der Probe die  $K_0$ -Bedingung. Die Spannungspfade wandern entlang der  $K_0$ -Linie. Die Neigung der  $K_0$ -Linie zu der  $p$ -Achse  $\eta_0$  berechnet sich aus:

$$\eta_0 = \frac{q}{p} = \frac{3(1 - K_0)}{1 + 2K_0} \quad (5.21)$$

Die Erddruckbeiwert  $K_0$  wird nach der Jaky-Formel  $K_0 = 1 - \sin(\varphi_P)$  mit dem Peak-Reibungswinkel  $\varphi_P$  abgeschätzt. Nach der Konsolidierung wird die Probe abgeschert, der Spannungspfad verlässt die  $K_0$ -Linie und nähert sich der kritischen Zustandslinie an. Nach Budhu [17] steigen die Spannungspfade in der  $p$ - $q$ -Ebene mit einem flacheren Winkel als beim Triaxialversuch. Es wurde festgestellt, dass die dichte Probe beim Einfachscherversuch eine annähernd gleiche Deviatorspannung wie beim Triaxialversuch erreicht. Allgemein kann folgende Feststellung für den Einfachscherversuch getroffen werden:



## 5.5 Zyklisches Bodenverhalten im unidirektionalen Einfeldversuch

- Mit zunehmender Schubspannung steigt das Spannungsverhältnis von  $\eta_{\min} = \eta_0$  bei  $\tau = 0$  bis  $\eta_{\max} = M_c$  (Neigung der kritischen Zustandslinie) bei  $\tau = \tau_{\max}$  an.
- Der mittlere Druck  $p$  erhöht sich mit steigender Schubspannung  $\tau$ .

Durch Variation der mittleren Schubspannungen  $\tau_{yx}^{av}$  kann die Probe im zyklischen Einfeldversuch unter unterschiedlichen Spannungsverhältnissen  $\eta$  getestet werden. Die Ergebnisse in der Abbildung 5.33 deuten darauf hin, dass die akkumulierte Dehnung  $\varepsilon^{acc}$  mit zunehmender mittlerer Schubspannung  $\tau_{yx}^{av}$  und damit mit zunehmendem Spannungsverhältnis  $\eta$  ansteigt. Das stimmt mit den Ergebnissen der Triaxialversuche überein (Abschnitt 5.3.2). Allerdings ist für die Einfeldversuche anzumerken, dass der mittlere Druck (durch die Zunahme von  $p$  mit  $\tau_{yx}^{av}$ ) die Ergebnisse beeinflusst. Da nicht genau bekannt ist, wie sich der mittlere Druck  $p$  mit  $\tau_{yx}^{av}$  während eines Versuchs ändert, wird auf eine quantitative Auswertung verzichtet.

### 5.5.2.5 Einfluss der Zyklenanzahl

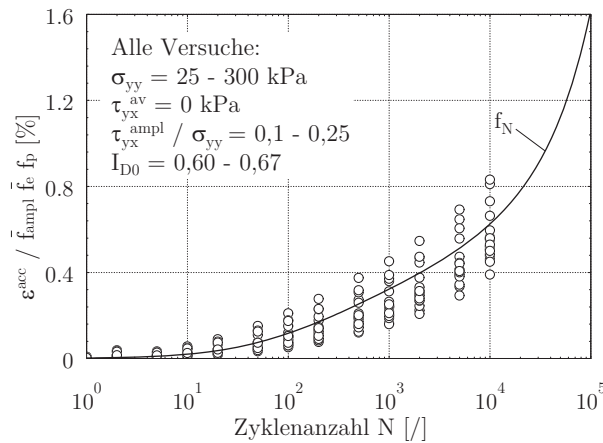


Abbildung 5.35: Normierte Akkumulationsdehnung  $\varepsilon^{acc} / \bar{f}_{ampl} \bar{f}_e \bar{f}_p$  und Nachrechnung mit der Funktion in Gleichung 5.22

Für die Untersuchung des Verlaufs der akkumulierten Dehnung  $\varepsilon^{acc}$  über die Zyklenanzahl  $N$  wurden die totalen Dehnungen  $\varepsilon^{acc}$  mit den Teilfunktionen  $\bar{f}_{ampl}$ ,  $\bar{f}_e$ ,  $\bar{f}_p$ ,  $f_Y$  normiert. Dadurch wurde der Einfluss von unterschiedlichen Amplituden  $\varepsilon^{acc}$ , Lagerungsdichten  $I_{D0}$ , mittleren Drücken  $p$  und Spannungsverhältnissen  $\eta$  eliminiert. Aufgrund der unklaren Spannungsverhältnisse im Einfeldversuch wurden die Ergebnisse hier nicht mit der Funktion  $f_Y$  normiert. Um jedoch den Einfluss des Spannungsverhältnisses zu berücksichtigen, wurden Versuche mit identischen  $\eta$  betrachtet. Hierfür wurden nur Versuche mit Wechsellast um die Nulllage herangezogen (Versuche mit gleichem  $\eta_0$ , siehe Abschnitt 5.5.2.4).

Die Abbildung 5.35 stellt die Ergebnisse der Wechsellastversuche ( $\tau_{yx}^{av} = 0$ ) dar. Die Versuche mit dem Amplitudenverhältnis  $\tau_{yx}^{ampl} / \sigma_{yy} = 0,05$  wurden aufgrund der

signifikanten Abweichung im Vergleich zu den anderen Versuchen außer Acht gelassen. Durch sehr kleine Beträge der Funktion  $\bar{f}_{\text{ampl}}$  wurde die normierte Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}/\bar{f}_{\text{ampl}}\bar{f}_e\bar{f}_p$  hier überschätzt. Die akkumulierte Dehnungskurve aller Versuche fallen in einem Band zusammen (Abbildung 5.35).

Die Abhängigkeit der Bodenverformung von der Zyklusanzahl  $N$  kann mit unterschiedlichen Ansätzen beschrieben werden (Abschnitt 3.4). Im HCA-Modell wird die Verformung anhand einer logarithmischen Funktion mit einem linearen Anteil approximiert:

$$f_N = C_{N1} [\ln(1 + C_{N2}N) + C_{N3}N] \quad (5.22)$$

Darin sind  $C_{N1}$ ,  $C_{N2}$ ,  $C_{N3}$  drei Materialkonstanten. Aus der Kalibrierung anhand der Ergebnisse der Triaxialversuche (Abschnitt 6.5.1) wurden  $C_{N1} = 2 \cdot 10^{-3}$ ,  $C_{N2} = 0,022$  und  $C_{N3} = 8,5 \cdot 10^{-5}$  für Berliner Sand ermittelt. Die Funktion in Gleichung 5.22 wurde mit  $C_{N2} = 0,022$  und  $C_{N3} = 8,5 \cdot 10^{-5}$  an die Versuchsdaten der Einfachscherversuche angepasst. Dabei wurde eine Konstante  $C_{N1} = 1 \cdot 10^{-3}$  ermittelt. Die Konstante  $C_{N1}$  unterscheidet sich hier von der aus dem Abschnitt 6.5.1. Das liegt daran, dass die Ergebnisse der Einfachscherversuche nicht mit der Funktion  $f_Y$  normiert wurden. Der unbekannte Betrag von  $f_Y$  fließt in  $C_{N1}$  ein. Die Anpassungskurve (durchgezogene Kurve Abbildung 5.35) zeigt eine gute Übereinstimmung zwischen dem Ansatz in Gleichung 5.22 und den Messdaten.

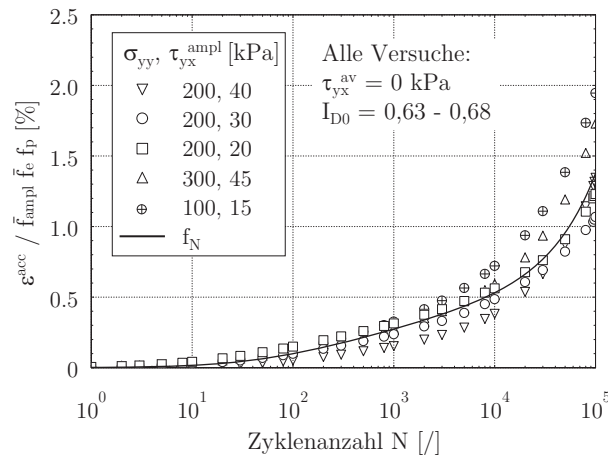


Abbildung 5.36: Akkumulationsdehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}/\bar{f}_{\text{ampl}}\bar{f}_e\bar{f}_p$  in Einfachscherversuche bis  $10^5$  Zyklen

Nach der Gleichung 5.22 ist  $f_N$  im kleinen Zyklusbereich hauptsächlich vom logarithmischen Anteil  $\ln(1 + C_{N2}N)$  abhängig. Die Steigung von  $\ln(1 + C_{N2}N)$  klingt mit zunehmender Zyklusanzahl  $N$  ab. Für große  $N$  wird die Funktion  $f_N$  nur vom linearen Anteil  $C_{N3}N$  beeinflusst. Um den Einfluss von  $N$  im Bereich  $N > 10^4$  zu untersuchen, wurden einige Versuche mit  $N = 10^5$  durchgeführt. In Abbildung 5.36 ist die normierte akkumulierte Dehnung von Wechsellastversuchen um die Nulllage bei  $\sigma_{yy} = 100, 200$  und  $300$  kPa dargestellt. Der Verlauf der Dehnungen kann gut anhand der Funktion  $f_N$  mit  $C_{N2} = 0,022$  und  $C_{N3} = 8,5 \cdot 10^{-5}$  approximiert werden. Im Bereich von  $N > 10^4$  bis  $10^5$  liefert  $f_N$  auch gute Ergebnisse.

## 5.5 Zyklisches Bodenverhalten im unidirektionalen Einfeldversuch

In der Abbildung 5.37 ist die akkumulierte Dehnung der durchgeführten Versuche mit  $N = 10^5$  dargestellt. Es ist zu erkennen, dass das in den oberen Abschnitten beobachtete Verhalten für  $N > 10^4$  sich fortsetzt.

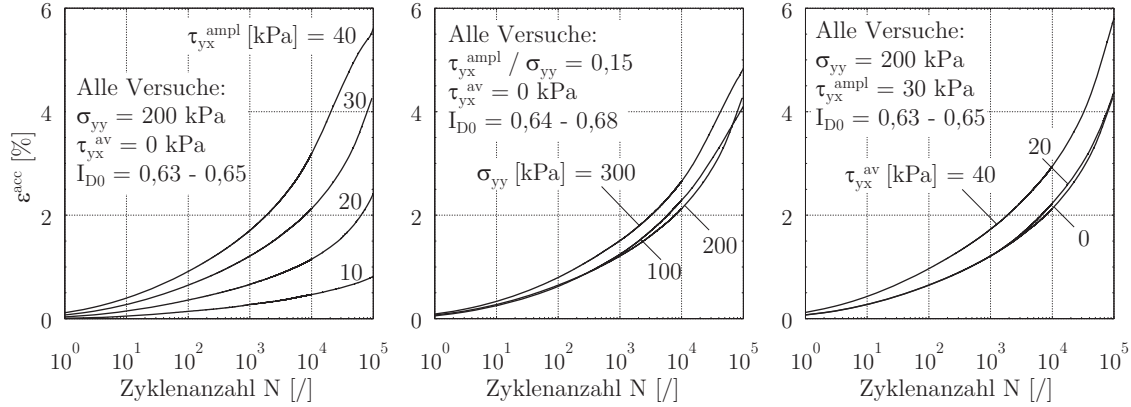


Abbildung 5.37: Akkumulierte Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$  in Einfeldversuchen bis  $10^5$  Zyklen mit Variation von  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  (links) und Variation von  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  (Mitte und rechts)

### 5.5.3 Akkumulationsrichtung $\omega$

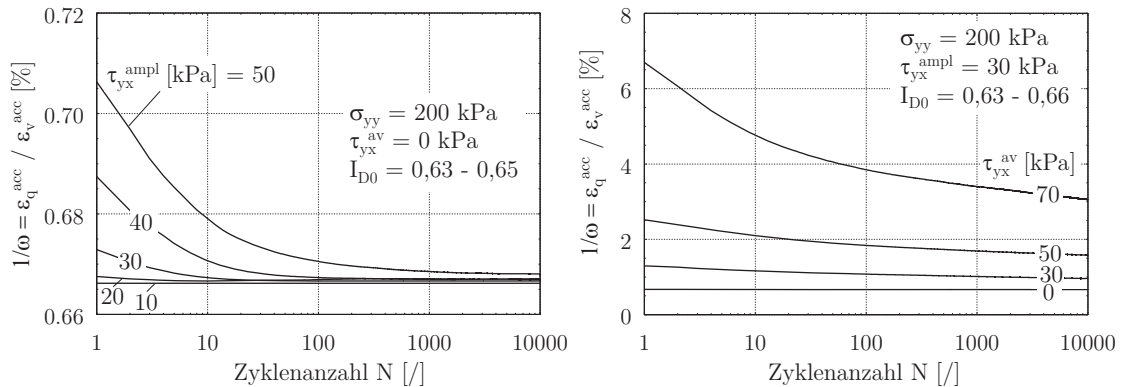


Abbildung 5.38: Akkumulationsrichtung als Funktion der Zyklenzahl  $N$  im Einfeldversuch mit Wechsellast um die Nulllage (links) und mit unterschiedlicher mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  (rechts)

Die Akkumulationsrichtung  $\omega = \varepsilon_v^{\text{acc}} / \varepsilon_q^{\text{acc}}$  wurde für Einfeldversuche mit  $\varepsilon_q^{\text{acc}}$  aus der Gleichung 2.23 berechnet. Zunächst wird die Abhängigkeit der Akkumulationsrichtung von der Zyklenzahl  $N$  betrachtet. In der Abbildung 5.38 ist der Kehrwert der Akkumulationsrichtung  $1/\omega$  als Funktion der Zyklenzahl  $N$  aufgetragen. Bei allen Versuchen nimmt  $1/\omega$  mit  $N$  ab (außer in den Versuchen mit Amplituden  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 10$  kPa und  $\tau_{yx}^{\text{av}} = 0$  kPa). Je größer die Lastamplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  und die mittlere Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  ist, desto größer ist der Betrag von  $1/\omega$  am Anfang des Versuchs. Es ist zu erkennen, dass die Abnahme von  $1/\omega$  in den Versuchen mit  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} < 50$  kPa (Abbildung 5.38 links) nach ca. 30 bis 100 Zyklen abklingt,

die Akkumulationsrichtungen bleiben danach nahezu konstant. Die Abnahme von  $1/\omega$  bei den Versuchen mit unterschiedlichen mittleren Schubspannungen (rechts) ist verhältnismäßig viel größer als die in den Wechsellastversuchen. Die Änderung der Akkumulationsrichtung setzt sich hier noch nach  $10^5$  Zyklen fort.

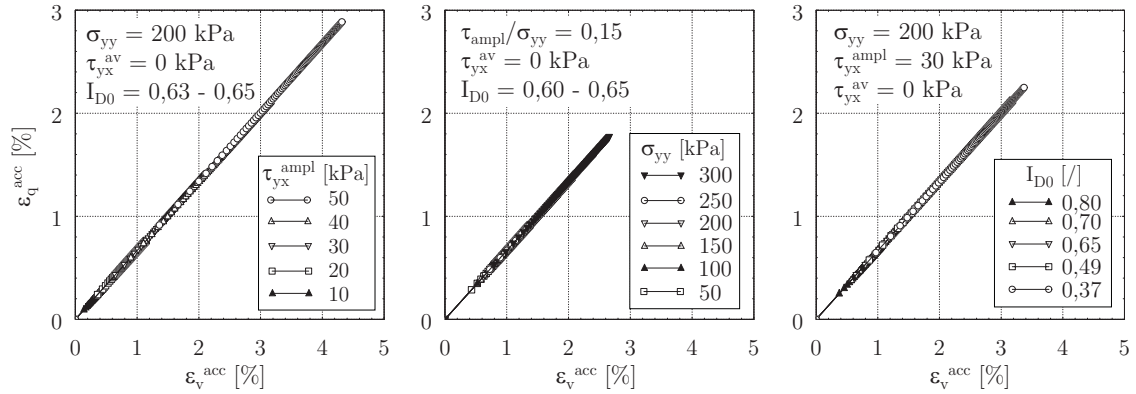


Abbildung 5.39: Deviatordehnung  $\varepsilon_q^{\text{acc}}$  in Abhängigkeit der volumetrischen Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  in Wechsellastversuchen mit Variation von: Amplitude (links), Normalspannung (Mitte) und Lagerungsdichte (rechts)

Es ist aus den Ergebnissen der zyklischen Triaxialversuche bekannt, dass die Akkumulationsrichtung  $\omega = \varepsilon_q^{\text{acc}}/\varepsilon_v^{\text{acc}}$  nur vom Spannungsverhältnis  $\eta = q/p$  beeinflusst wird. Die Lastamplitude, der mittlere Druck und die Lagerungsdichte spielen bei der Akkumulationsrichtung nur eine untergeordnete Rolle. Dies wurde auch in den Einfachscherversuchen beobachtet. Die Ergebnisse der Versuche mit Wechsellast um die Nulllage ( $\tau_{yx}^{\text{av}} = 0$  kPa, Abbildung 5.39) zeigen, dass die Amplitude, die Normalspannung und die Lagerungsdichte keinen Einfluss auf die Neigung  $\varepsilon_q^{\text{acc}}/\varepsilon_v^{\text{acc}}$  haben. Alle  $\varepsilon_q^{\text{acc}}-\varepsilon_v^{\text{acc}}$ -Dehnungspfade liegen auf einer Gerade.

In einer anderen Versuchsreihe wurde die Akkumulationsrichtung im Schwelllastbereich untersucht. Dabei wurden die Proben unter gleichem Spannungsverhältnis  $\tau_{yx}^{\text{av}}/\sigma_{yy}$  getestet. In dieser Versuchsreihe wurde auch kein Einfluss von der Amplitude und der Normalspannung sowie der Lagerungsdichte festgestellt (Abbildung 5.40). Die  $\varepsilon_q^{\text{acc}}-\varepsilon_v^{\text{acc}}$ -Dehnungspfade weichen nur leicht voneinander ab. Die Abweichungen können jedoch vernachlässigt werden.

Der Einfluss des Spannungsverhältnisses  $\eta = q/p$  wurde in einer Versuchsreihe bei einer Normalspannung von  $\sigma_{yy} = 200$  kPa untersucht. Dabei wurden Proben mit gleichen Lagerungsdichten und Spannungsamplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 30$  kPa unter unterschiedlicher mittlerer Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  getestet. Bei den Versuchen mit  $\tau_{yx}^{\text{av}} = 80$  und  $90$  kPa wurde die Lastamplitude aufgrund des kleinen Abstands zu der kritischen Zustandslinie auf  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 20$  und  $10$  kPa reduziert (Abbildung 5.20). Es ist offensichtlich, dass mit steigender  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  und demzufolge ebenfalls mit steigendem Spannungsverhältnis  $\eta = q/p$  (siehe Abschnitt 5.5.2.4) die Neigung vom  $\varepsilon_q^{\text{acc}}-\varepsilon_v^{\text{acc}}$ -Dehnungspfad zunimmt (Abbildung 5.41). In dem Versuch mit  $\tau_{yx}^{\text{av}} = 90$  kPa lockert die Probe zunächst in den ersten wenigen Zyklen auf (dilatantes Verhalten:  $\varepsilon_v^{\text{acc}} < 0$ ) und verdichtet sich danach wieder im Laufe des Versuchs. Der mittlere Spannungs-

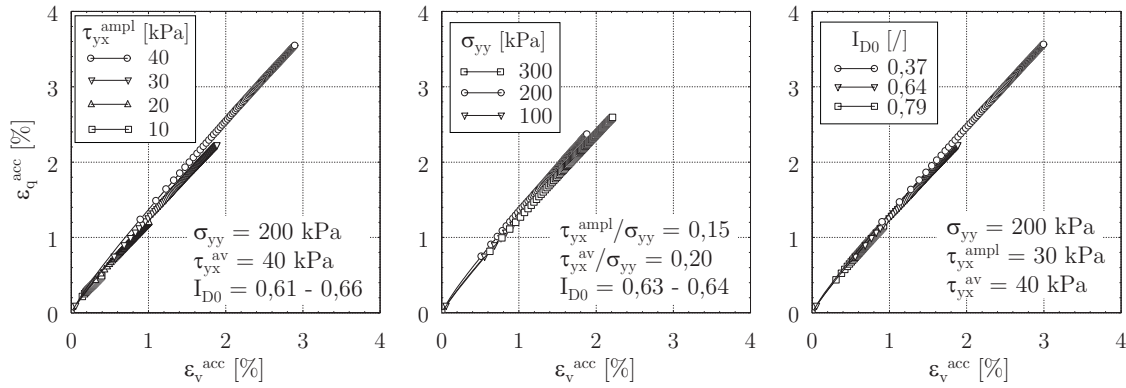


Abbildung 5.40: Deviatordehnung  $\varepsilon_q^{\text{acc}}$  in Abhängigkeit der volumetrischen Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  in Schwellastversuchen ( $\tau_{yx}^{\text{av}} = 40 \text{ kPa}$ ) mit Variation von: Amplitude (links), Normalspannung (Mitte) und Lagerungsdichte (rechts)

zustand hier entspricht dem Zustand oberhalb der CT-Linie (nach Chang & Withmann [21] und Glasenapp [32], siehe Abschnitt 3.2.2). In Abbildung 5.38 wurde bereits festgestellt, dass sich die Akkumulationsrichtung im Versuch mit  $\tau_{yx}^{\text{av}} > 0$  mit der Zyklenanzahl  $N$  ständig verändert. Das wurde schließlich wieder in den gekrümmten Dehnungspfaden in der  $\varepsilon_q^{\text{acc}}-\varepsilon_v^{\text{acc}}$ -Ebene beobachtet (Abbildung 5.41). Die Krümmungen der  $\varepsilon_q^{\text{acc}}-\varepsilon_v^{\text{acc}}$ -Dehnungspfade nehmen mit der mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  zu.

## 5.6 Zyklisches Verhalten im multidirektionalen Einfeldscherversuch

In diesem Abschnitt wird der Einfluss der Änderung der Belastungsrichtung (Polarisationswechsel) auf das zyklische Bodenverhalten im Einfeldscherversuch untersucht. Neben dem allgemeinen zyklischen Verformungsverhalten wird die Intensität und die Änderung der Dehnungsrate nach dem Polarisationswechsel unter dem Einfluss der Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$ , der Lastamplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$ , der Normalspannung  $\sigma_{yy}$ , des Drehwinkels  $\alpha_P$  und des Zeitpunkts der Drehung  $N_P$  hinsichtlich der Formulierung der Teilfunktion  $f_\pi$  des HCA-Modells (Abschnitt 6.3) behandelt.

Die zyklische Belastung auf die Probe im multidirektionalen Versuch wurde paketweise aufgebracht (Abbildung 5.42). In jedem Paket wurde die Amplitude, die mittlere Schubspannung und die Belastungsrichtung konstant gehalten. Nach jedem Paket mit einer bestimmten Zyklenanzahl  $N_P$  wurde die Probe um einen Winkel  $\alpha_P$  gedreht. Die Belastung durch das weitere Paket erfolgte in der neuen Richtung mit identischer Amplitude wie das vorherige Paket ( $\tau_{yx,(1.\text{Paket})}^{\text{ampl}} = \tau_{yx,(2.\text{Paket})}^{\text{ampl}}$ ). Ähnlich wie in den Triaxialversuchen und unidirektionalen Einfeldscherversuchen wurde der erste Zyklus (irregulärer Zyklus) bei der Auswertung der zyklischen Verformung nicht berücksichtigt. Es ist zu beobachten, dass sich der erste Zyklus nach dem Wechsel der Polarisation auch signifikant von den nachfolgenden Zyklen unterschei-

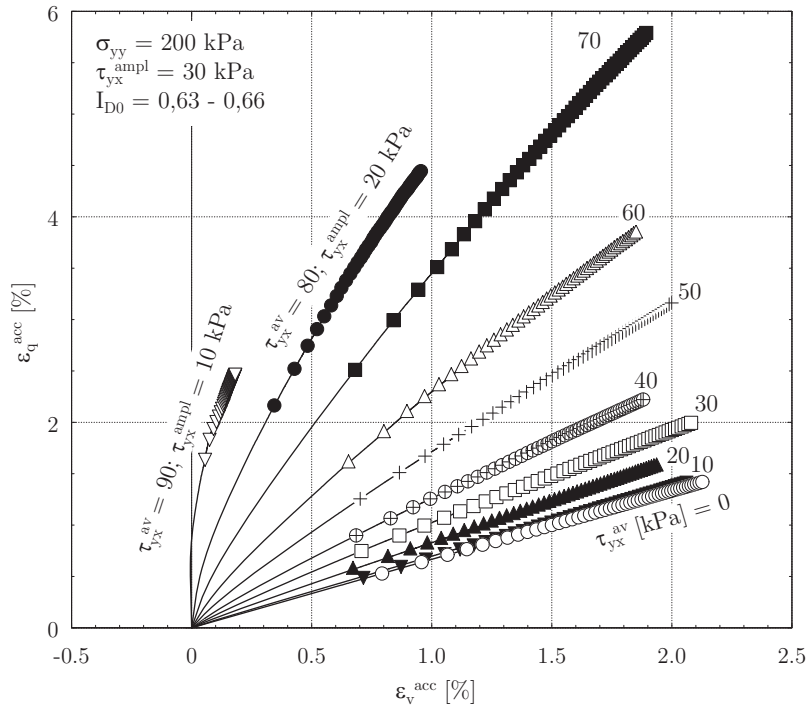


Abbildung 5.41: Einachsversuch:  $\varepsilon_q^{\text{acc}}$ - $\varepsilon_v^{\text{acc}}$ -Dehnungspfade für  $\sigma_{yy} = 200 \text{ kPa}$  und unterschiedliche mittlere Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$

det. Aus diesem Grund wurde in der nachfolgenden Auswertung die Verformung des ersten Zyklus von der akkumulierten Dehnung nach der Polarisationsänderung abgezogen.

### 5.6.1 Akkumulation der Volumendehnung

Am Anfang eines Versuchs wird angenommen, dass die Probe sich in einem Zustand befindet, in dem die Sandkörner vollkommen chaotisch in der horizontalen Ebene angeordnet sind (nach der Probenpräparation). Nach dem Aufbringen des ersten Zyklenpakets mit mehreren Hundert Zyklen, richten sich die Körner in eine Richtung aus, die sich nach der Belastungsrichtung aus diesem Lastpaket orientiert (Polarisation der Belastungszyklen nach Niemunis et al. [76], Wichtmann [108]). Bei der Drehung der Probe um einen Winkel  $\alpha_P$  nach  $N_P$  Zyklen entsteht eine plötzliche Änderung der Polarisation. Die Sandkörner müssen sich jetzt erneut anordnen, um sich an die aktuelle Orientierung des Lastpakets anzupassen. Demzufolge steigt die volumetrische Dehnung direkt nach der Änderung der Scherrichtung sprunghaft an. Der temporäre Anstieg der Dehnungsrate nimmt im Laufe des Versuchs wieder ab und strebt den ursprünglichen Wert an. Dieses Verhalten wurde bei allen Versuchen mit plötzlich wechselnder Polarisation beobachtet.

Zunächst wird die volumetrische Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  der Probe im Versuch mit wechselnder Polarisation betrachtet. Der Einfluss der Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$  auf das Verdichtungsverhalten beim Polarisationswechsel wurde in einer Versuchsreihe mit



## 5.6 Zyklisches Verhalten im multidirektionalen Einfachscher Versuch

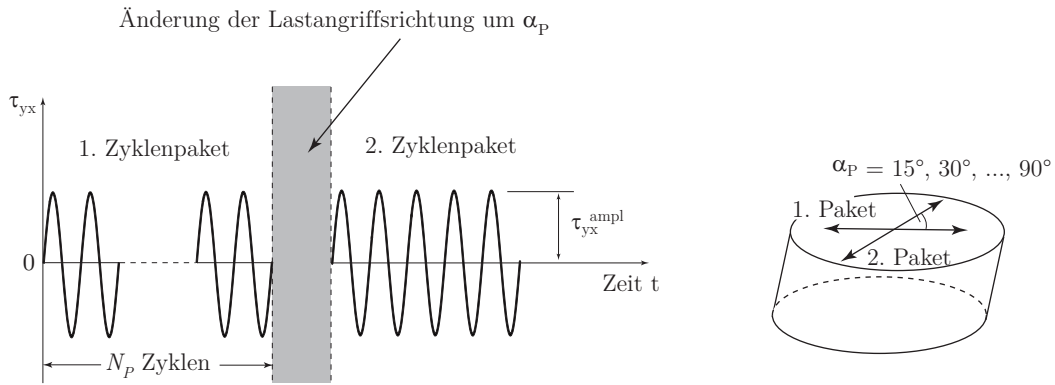


Abbildung 5.42: Schematische Darstellung des Versuchsablaufs bei multidirektionalen Einfachscher Versuchen

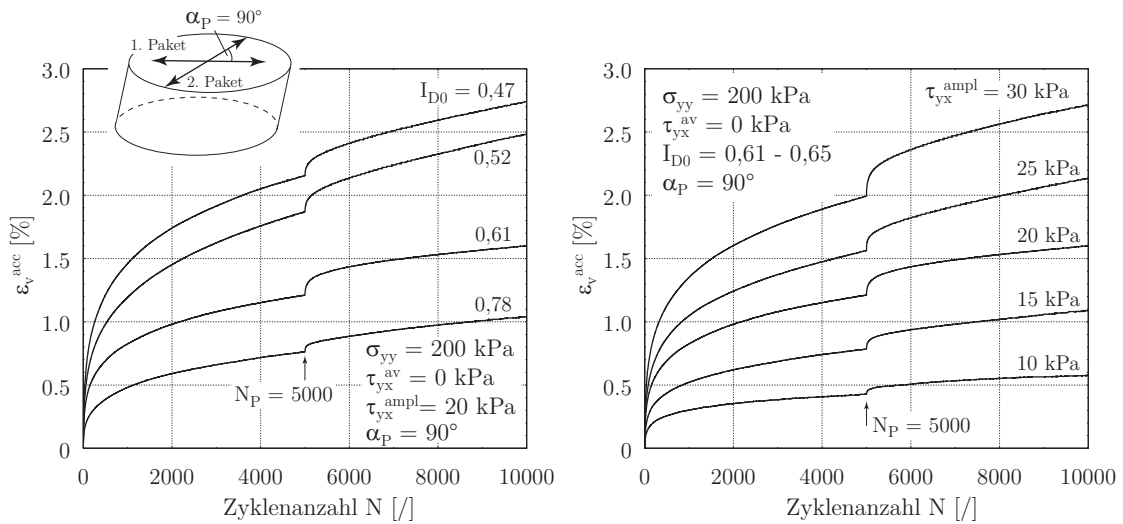


Abbildung 5.43: Multidirektionale Einfachscher Versuche: Volumetrische Dehnung bei Polarisationswechseln nach 5.000 Zyklen mit Variation der Lagerungsdichte  $I_{D0}$  (links) und der Schubspannungsamplitude  $\tau_{yx}^{ampl}$  (rechts)

gleicher Normalspannung  $\sigma_{yy} = 200 \text{ kPa}$  und gleicher Amplitude  $\tau_{yx}^{ampl} = 20 \text{ kPa}$  um die Nulllage untersucht. Dabei wurde in allen Versuchen die Belastungsrichtung nach 5.000 Zyklen um  $\alpha_P = 90^\circ$  verändert. In der Abbildung 5.43 links sind die Ergebnisse dieser Versuchsreihe gezeigt. Es ist offensichtlich, dass unabhängig von der Lagerungsdichte die Volumendehnung direkt nach der Änderung der Lastrichtung sprunghaft ansteigt. Die durch den Polarisationswechsel resultierende Dehnung steigt mit abnehmender Lagerungsdichte an. Diese Feststellung stimmt mit den Ergebnissen aus multidimensionalen Einfachscher Versuchen im CMDSS-Gerät nach Niemunis et al. [76] und Wichtmann [108] überein.

Auf ähnliche Weise wurde auch der Einfluss der Schubspannungsamplitude  $\tau_{yx}^{ampl}$  auf das Verformungsverhalten beim Polarisationswechsel untersucht. Dabei wurden dichte Proben unter der Normalspannung  $\sigma_{yy} = 200 \text{ kPa}$  und unterschiedlicher Amplitude  $\tau_{yx}^{ampl}$  getestet. Abbildung 5.43 rechts stellt die Volumenänderung  $\epsilon_v^{acc}$  bei

Änderung der Belastungsrichtung um  $90^\circ$  nach  $N_P = 5.000$  Zyklen dar. Mit zunehmender Amplitude  $\tau_{yx}^{ampl}$  steigt die aus der Polarisationsänderung resultierende Volumenänderung an.

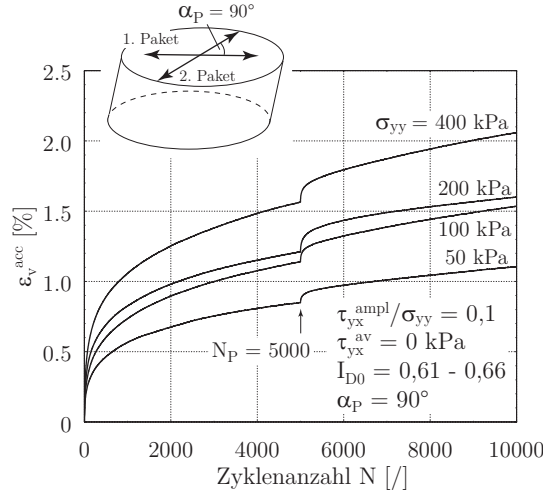


Abbildung 5.44: Multidirektionale Einfachscherversuche: Volumetrische Dehnung bei Polarisationswechseln unter unterschiedlicher Normalspannung  $\sigma_{yy}$

Die Entwicklung der Akkumulation der Volumendehnung  $\varepsilon_v^{acc}$  mit der Zyklenanzahl  $N$  in Versuchen mit unterschiedlicher Normalspannung  $\sigma_{yy}$  wird in der Abbildung 5.44 gezeigt. Unabhängig von  $\sigma_{yy}$  entsteht erwartungsgemäß nach dem Polarisationswechsel ein temporärer Anstieg der Dehnungsrate. Die Dehnungsrate nimmt mit der Zyklenanzahl  $N$  nach der Drehung wieder ab und die Kurve nähert sich dem vorherigen Verlauf an. Die durch die Änderung der Scherrichtung resultierende Dehnung steigt tendenziell mit zunehmender Normalspannung  $\sigma_{yy}$ .

Die Diagramme in der Abbildung 5.45 stellen die Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlicher Drehung der Belastungsrichtung nach  $N_P = 5.000$  Zyklen dar. Die Versuche wurden gezielt mit gleicher Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$  eingebaut. Trotz der Bemühung bei der Probenpräparation führten die minimalen Abweichungen dazu, dass nach 5.000 Zyklen kleine Unterschiede bei der Volumendehnung auftraten. Um einen besseren Vergleich zwischen den Versuchen zu ermöglichen, wurden die volumetrischen Dehnungen mit dem jeweiligen Betrag bei 5.000 Zyklen normiert. Nach 5.000 Zyklen haben damit alle Versuche die gleiche Dehnung  $\varepsilon_v^{acc} / \varepsilon_{v,N=5000}^{acc} = 1$ . Es ist aus den Diagrammen deutlich zu erkennen, dass der Winkel des Polarisationswechsels  $\alpha_P$  einen wesentlichen Einfluss auf die Volumendehnung hat. Der temporäre Anstieg der volumetrischen Dehnung nimmt mit dem Drehwinkel im Bereich  $\alpha_P < 90^\circ$  zu und erreicht seinen maximalen Wert bei  $\alpha_P = 90^\circ$ . Weitere Versuche haben gezeigt, dass bei  $180^\circ > \alpha_P > 90^\circ$  die Zunahme der volumetrischen Dehnung mit  $\alpha_P$  wieder abnimmt. Bei der Drehung mit  $\alpha_P = 0^\circ$  und  $180^\circ$  hat die Änderung keinen Einfluss auf die Volumendehnung.

Die Abbildung 5.46 stellt die Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlichen Zeitpunkten der Polarisationsänderung zusammen. Dabei wurde die Probe in den jeweiligen Versuchen nach  $N_P = 1.000, 2.500, 5.000$  und  $7.500$  Zyklen um  $90^\circ$  gedreht.



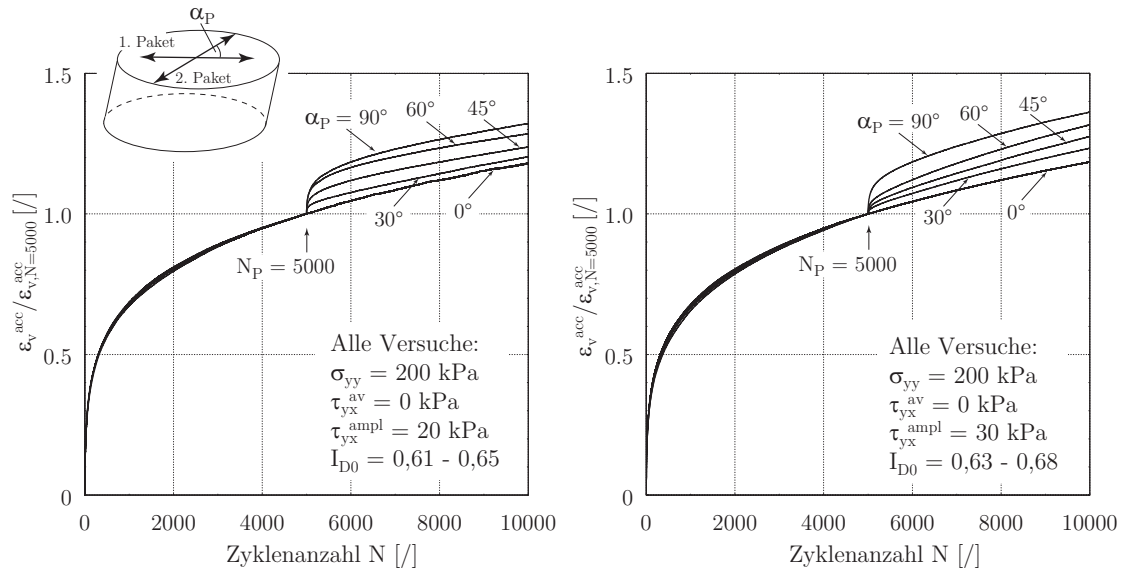


Abbildung 5.45: Normierte Volumendehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}} / \varepsilon_{v,N=5000}^{\text{acc}}$  bei unterschiedlichen Polarisationswechsel  $\alpha_P$  mit einer Schubspannungsamplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 20 \text{ kPa}$  (links) und  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 30 \text{ kPa}$  (rechts)

Es wurde insgesamt drei Versuchsreihen mit unterschiedlichen Amplituden durchgeführt. In den Versuchen mit gleicher Schubspannungsamplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  ist zu beobachten, dass  $N_P$  keine Wirkung auf die resultierende Dehnung hat. Nach 10.000 Zyklen weisen die Versuche fast die gleiche Dehnung auf.

### 5.6.2 Akkumulation der totalen Dehnung unter Polarisationsänderung

Für die Formulierung der Funktion  $f_\pi$  des HCA-Modells wird die Akkumulation der totalen Dehnung betrachtet. Die im Abschnitt 5.6.1 vorgestellten multidirektionalen Versuche wurden mit symmetrischer Wechsellast beansprucht. Aufgrund der symmetrischen Belastung um die Nulllage findet nur eine minimale Akkumulation der Schubverzerrung  $\gamma_{yx}^{\text{acc}} \approx 0$  statt. Diese kleine Schubverzerrung spielt bei der totalen Dehnung nur eine untergeordnete Rolle. Demzufolge ist die totale Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$  fast identisch mit der volumetrischen Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$ , die beide ein ähnliches Verhalten zeigen. An dieser Stelle wird das Verhalten der totalen Dehnung nicht weiter behandelt und auf den Abschnitt 5.6.1 verwiesen.

Der Verlauf der akkumulierten Dehnung mit der Zyklenzahl  $\varepsilon^{\text{acc}}(N)$  vor der Änderung der Lastangriffsrichtung entspricht dem der unidirektionalen Versuche. Dieser wurde bereits im Abschnitt 5.5 ausführlich untersucht und beschrieben. In den folgenden Abschnitten wird daher nur auf die Änderung der Akkumulationsrate durch den Polarisationswechsel eingegangen. Die Rate der akkumulierten Dehnung

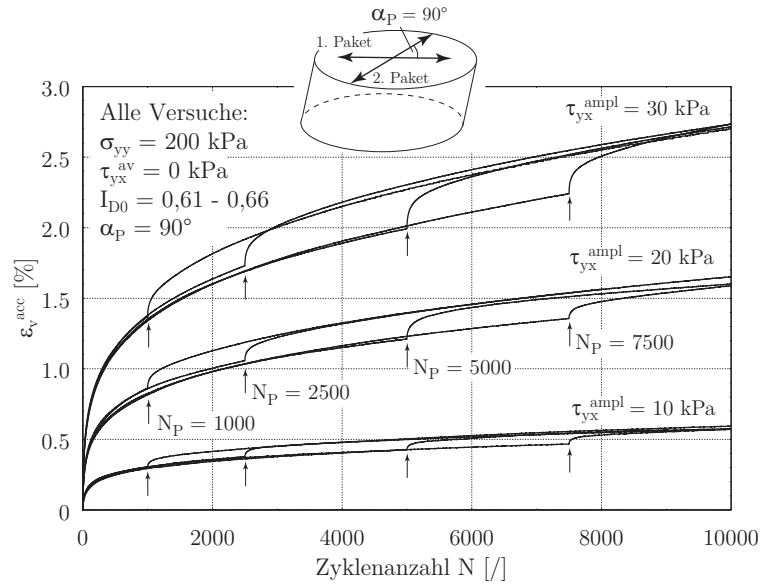


Abbildung 5.46: Multidirektionale Einfeldscherversuche: Volumetrische Dehnung bei Polarisationswechseln nach unterschiedlicher Zyklenanzahl  $N_P$

wird mit der Formel

$$\dot{\epsilon}^{\text{acc}} = \frac{\Delta \epsilon^{\text{acc}}}{\Delta N} \quad (5.23)$$

berechnet. Am Anfang des Versuchs oder direkt nach der Drehung wird  $\dot{\epsilon}^{\text{acc}}$  mit einem kleinen Inkrement  $\Delta N$  berechnet (z. B.:  $\Delta N = 1, 2, \dots$ ). Die Rate sinkt mit der zyklischen Belastung ab, das Inkrement  $\Delta N$  kann damit im Laufe des Versuchs größer gewählt werden (z. B.:  $\Delta N = 20 - 40$ ).

### 5.6.2.1 Einfluss des Drehwinkels $\alpha_P$

Der Einfluss der Änderungswinkel  $\alpha_P$  auf die Akkumulation wurde in zwei Versuchsreihen untersucht. Dabei wurden die Proben mit einer Normalspannung von  $\sigma_{yy} = 200 \text{ kPa}$  konsolidiert und danach mit einer Amplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 20$  oder  $30 \text{ kPa}$  getestet. Nach 5.000 Zyklen wurde die Probe um einen Winkel  $\alpha_P$  mit  $0^\circ \leq \alpha_P \leq 180^\circ$  gedreht. In der Abbildung 5.47 links sind die Ergebnisse der Versuche mit  $\alpha_P$  von  $0^\circ$  bis  $90^\circ$  gezeigt. Um die kleine Abweichung von  $\epsilon^{\text{acc}}$  nach 5.000 Zyklen aufgrund der leicht unterschiedlichen Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$  zu eliminieren, werden die Ergebnisse mit der jeweiligen Dehnung nach 5.000 Zyklen  $\epsilon_{N=5000}^{\text{acc}}$  normiert. Ähnlich wie bei der volumetrischen Dehnung ist direkt nach der Polarisationsänderung ein sprunghafter Anstieg der totalen Dehnung zu erwarten. Es ist zu erkennen, dass die Erhöhung der Dehnungsakkumulation nach der Umstellung der Belastungsrichtung mit zunehmendem Drehwinkel  $\alpha_P$  ansteigt. Die Erhöhung der Dehnung erreicht mit  $\alpha_P = 90^\circ$  den maximalen Wert und nimmt nach weiterer Zunahme ab. Die Ergebnisse mit  $\alpha_P > 90^\circ$  wurden aufgrund der Übersichtlichkeit

in der Abbildung 5.47 nicht dargestellt. Die Abnahme der akkumulierten Dehnung bei  $\alpha_P > 90^\circ$  kann in der Abbildung 5.48 links beobachtet werden.

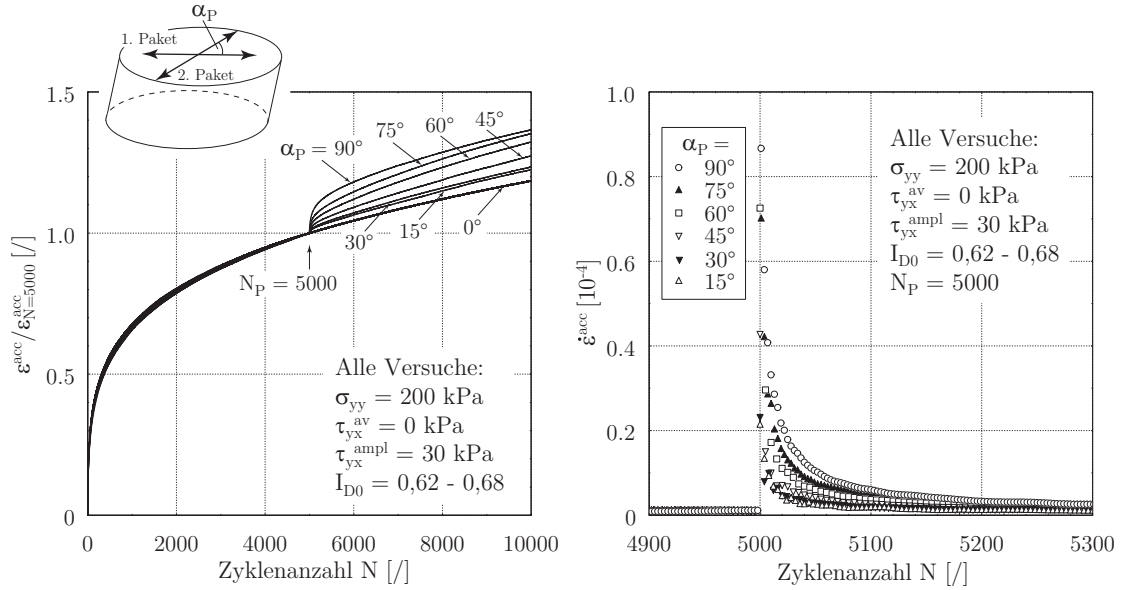


Abbildung 5.47: Verlauf der normierten Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}} / \varepsilon_{N=5000}^{\text{acc}}$  (links) und der Akkumulationsrate  $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}$  (rechts) über die Zyklenszahl  $N$  in multidirektionalen Einachserscherversuchen mit Variation des Drehwinkels  $\alpha_P$

Der Wechselvorgang der Polarisierung wird durch den maximalen Wert der Akkumulationsrate direkt nach der Drehung und ihrer Abnahme im Laufe der folgenden zyklischen Belastung beschrieben. Die Entwicklung der Dehnungsrate  $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}$  mit der Zyklenszahl  $N$  nach den Polarisationswechseln ist in der Abbildung 5.47 rechts dargestellt. Die Diagramme zeigen einen plötzlichen Anstieg der Rate bei der Drehung bei  $N_P = 5.000$  Zyklen, davor bleibt die Rate nahe zu konstant. Die Akkumulationsrate sinkt nach der Drehung mit der Zyklenszahl  $N$  wieder ab. Die Größe des Winkels  $\alpha_P$  hat einen erheblichen Einfluss auf die Änderung der Rate. Je größer der Winkel  $\alpha_P$  ist, desto höher ist die Rate nach der Änderung. Die Rate klingt schneller bei Versuchen mit kleinerem Drehwinkel  $\alpha_P$  ab.

In dem HCA-Modell (Abschnitt 6.3) wird die Änderung der Polarisierung anhand der Teilfunktion  $f_\pi$  simuliert.  $f_\pi$  stellt den Vergrößerungsfaktor der Dehnungsrate bei einem Polarisationswechsel dar. Bei den Laborversuchen wird  $f_\pi$  als das Verhältnis der Dehnungsraten von einem Versuch mit und einem Versuch ohne Änderung der Belastungsrichtung definiert. Dabei wird der Einfluss der leicht unterschiedlichen Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$  durch die Normierung der Dehnungsrate  $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}$  mit der Teilfunktion  $f_e$  (Gleichung 5.18) beseitigt. Für die Berechnung von  $f_e$  wurde die aktuelle Porenzahl  $e$  verwendet. Der Einfluss der leichten Variation der Dehnungsamplitude aufgrund der unterschiedlichen Porenzahl  $e$  wurde auch auf ähnliche Weise mit der Funktion  $f_{\text{ampl}}$  aus der Dehnungsrate eliminiert. Die Normierung mit der Funktion  $f_{\text{ampl}} = (\varepsilon^{\text{ampl}} / 10^{-4})^{2,05}$  wurde mit der aktuellen Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  (nicht mit der gemittelten Amplitude  $\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}}$ ) berechnet. Aus einem multidirektionalen Versuch und einem unidirektionalen Referenzversuch (ohne Polarisationsänderung)

kann die Funktion  $f_\pi$  nach der Gleichung

$$f_\pi = \frac{(\dot{\epsilon}^{\text{acc}} / (f_{\text{ampl}} f_e))_{\alpha_P \neq 0}}{(\dot{\epsilon}^{\text{acc}} / (f_{\text{ampl}} f_e))_{\alpha_P = 0}} \quad (5.24)$$

bestimmt werden. Vor einer Änderung der Scherrichtung hat  $f_\pi$  einen Wert von  $f_\pi = 1$ , unmittelbar danach beträgt  $f_\pi = f_\pi(\alpha_P)$  (mit  $\alpha_P$ : Winkel der Scherrichtsungsänderung).

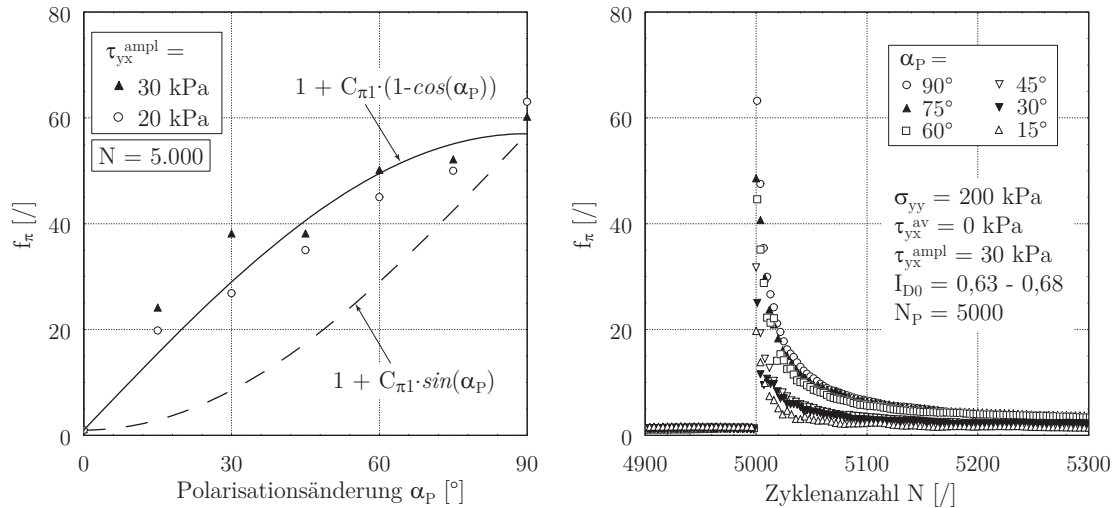


Abbildung 5.48:  $f_\pi$  direkt nach einem Polarisationswechsel bei (links) und Verlauf von  $f_\pi$  mit Zyklenzahl  $N$  (rechtes) in Versuchen mit unterschiedlichen Drehwinkel  $\alpha_P$

Die Beträge der Funktion  $f_\pi(\alpha_P)$  direkt nach einem  $90^\circ$ -Wechsel bei  $N_P = 5.000$  Zyklen sind gegen den Drehwinkel  $\alpha_P$  in der Abbildung 5.48 links aufgetragen. Dabei ist zu erkennen, dass  $f_\pi(\alpha_P)$  den maximalen Wert bei  $\alpha_P = 90^\circ$  erreicht. Eine Drehung mit  $\alpha_P = 0^\circ$  und  $180^\circ$  beeinflusst das Dehnungsverhalten dagegen nicht ( $f_\pi(\alpha_P) = 1$ ). Die Abhängigkeit von  $f_\pi(\alpha_P)$  auf den Drehwinkel  $\alpha_P$  kann mit der Funktion

$$f_\pi = 1 + C_{\pi 1} \cdot \sin(\alpha) \quad (5.25)$$

erfasst werden. Darin ist  $C_{\pi 1}$  eine Materialkonstante. Für Berliner Sand wurde eine Konstante  $C_{\pi 1} = 56$  ermittelt (Abschnitt 6.5.1).

Die Approximation von  $f_\pi(\alpha_P)$  mit der Gleichung 5.25 ergibt ein relativ gutes Ergebnis (durchgezogene Kurve, Abbildung 5.48, links). Die Abbildung 5.48 rechts zeigt den Verlauf von  $f_\pi$  mit der Zyklenzahl  $N$  für die Versuche mit  $\alpha_P$  von  $15^\circ$  bis  $90^\circ$ . Erwartungsgemäß nehmen die Werte von  $f_\pi$  im Versuch mit kleinerem  $\alpha_P$  schneller ab.

In der Abbildung 5.49 sind ausgewählte Funktionen  $f_\pi$  in Abhängigkeit der Zyklenzahl nach dem Polarisationswechsel  $\Delta N_P$  dargestellt. Die Diagramme lassen

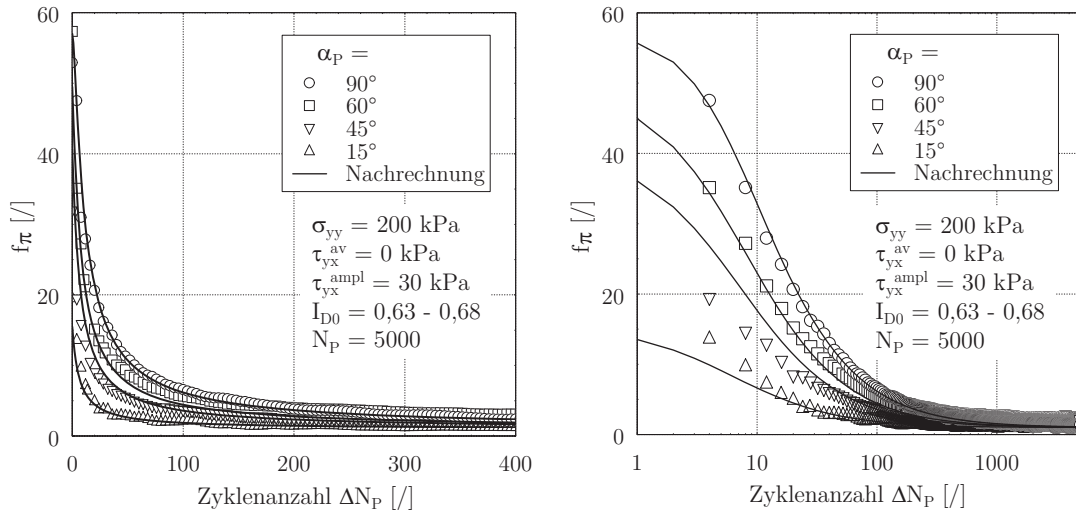


Abbildung 5.49: Abnahme von  $f_\pi$  für verschiedene Drehwinkel  $\alpha_P$  in Abhängigkeit der Zyklenszahl nach der Polarisationsänderung  $\Delta N_P$  im normalgeteilten Koordinatensystem (links) und im einfach-logarithmisch geteilten Koordinatensystem (rechts)

erkennen, dass die Akkumulationsraten am Anfang sehr schnell abklingen und erst nach mehreren Tausend Zyklen den vorherigen Wert erreichen.

In dem HCA-Modell wird  $f_\pi$  mit dem Ansatz nach der Gleichung 5.25 approximiert. Der Wert von  $f_\pi$  ist von dem Drehwinkel  $\alpha$  abhängig, der von der aktuellen Polarisation (Polarisation des aktuellen Zyklenpakets) und der der zurückliegenden Zyklen („back polarization“) eingeschlossen wird. Die Funktion  $f_\pi$  (und damit die Dehnungsrate  $\dot{\epsilon}^{\text{acc}}$ ) klingt mit der Zyklenszahl  $\Delta N_P$  ab. Dieser Vorgang wird mit der Evolutionsgleichung vom Drehwinkel  $\alpha$  erfasst. Anhand der Versuchsergebnisse kann die Änderung des Winkels  $\alpha$  mit der Gleichung

$$\dot{\alpha} = -\frac{\alpha}{C_{\pi 2} \cdot N_P + \Delta N_P} \quad (5.26)$$

beschrieben werden. Darin ist  $C_{\pi 2}$  eine Materialkonstante,  $\Delta N_P$  ist die Zyklenszahl ab dem Polarisationswechsel ( $\Delta N_P = N - N_P$ ). Für Berliner Sand wurde ein  $C_{\pi 2} = 1,25 \cdot 10^{-3}$  ermittelt (Abschnitt 6.5.1). Diese Funktion beschreibt die Näherung der „back polarization“ an die aktuelle Polarisation (Abschnitt 6.3.4).

Die Beschreibung von  $f_\pi$  durch die Gleichungen 5.25 und 5.26 mit Konstante  $C_{\pi 1} = 56$  und  $C_{\pi 2} = 1,25 \cdot 10^{-3}$  für Berliner Sand zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen der Laborversuche (durchgezogene Kurve, Abbildung 5.49).

### 5.6.2.2 Einfluss des Zeitpunkts der Polarisationsänderung $N_P$

In den hier beschriebenen Versuchen ist bereits zu beobachten, dass nach einer Polarisationsänderung mehrere Zyklen benötigt werden, um die Orientierung der

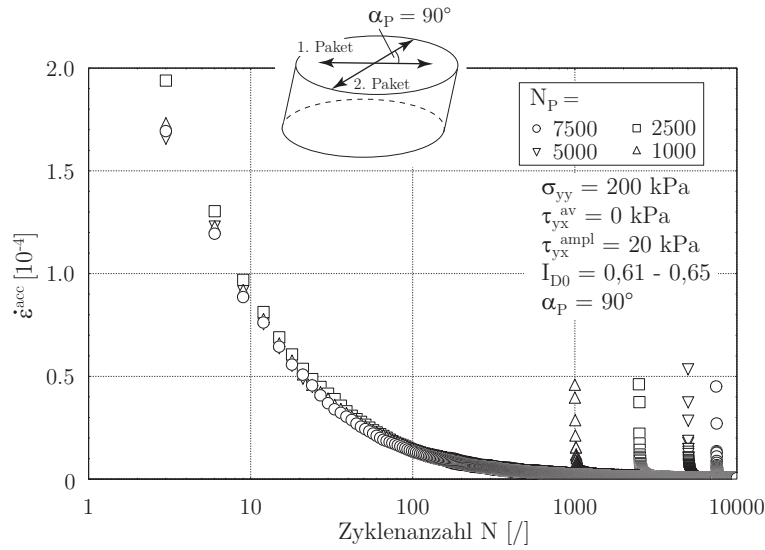


Abbildung 5.50: Akkumulationsrate  $\dot{\epsilon}^{acc}$  als Funktion der Zyklenzahl  $N$  in Versuche mit  $90^\circ$ -Polarisationsänderung bei verschiedener  $N_P$

Sandkörner der aktuellen Polarisation anzupassen. Ausgehend von einer völlig chaotischen Anordnung der Sandkörner nach der Probenpräparation müssen sich diese am Anfang eines Versuchs auf die aktuelle Belastungsrichtung einstellen. Ob bis zum Zeitpunkt des Polarisationswechsels die Adaption der Anfangspolarisation an die aktuelle Polarisation abgeschlossen ist, ist nicht bekannt. In diesem Abschnitt wird die Abhängigkeit der Anzahl der zurückliegenden Zyklen bis zum Zeitpunkt des Polarisationswechsels  $N_P$  untersucht.

In drei Versuchsreihen wurde die Lastangriffsrichtung nach einem unterschiedlich langem 1. Paket mit gleicher Amplitude um  $90^\circ$  gedreht. In der Abbildung 5.50 wurden die Ergebnisse der Versuchsreihe mit  $\tau_{yx}^{ampl} = 20 \text{ kPa}$  präsentiert. Dabei wurden bei vier Proben jeweils nach  $N_P = 1.000, 2.500, 5.000$  und  $7.500$  Zyklen die Polarisation um  $\alpha_P = 90^\circ$  geändert. Die Entwicklung der Akkumulationsrate  $\dot{\epsilon}^{acc}$  über die Zyklenzahl  $N$  zeigt, dass die Messwerte in den ersten 1.000 Zyklen aller vier Versuche zusammenfallen. Das deutet auf eine gute Reproduzierbarkeit des Einfachscherversuchs hin. Unabhängig von der Zyklenzahl  $N_P$  steigt die Akkumulationsrate  $\dot{\epsilon}^{acc}$  direkt nach einem  $90^\circ$ -Polarisationswechsel auf einen ungefähr gleichen Wert an. Die Raten  $\dot{\epsilon}^{acc}$  sinken danach wieder auf das vorherige Niveau ab.

Die Abbildung 5.51 präsentiert die Ergebnisse der drei Versuchsreihen mit  $\tau_{yx}^{ampl} = 10, 20$  und  $30 \text{ kPa}$ . Dabei wurde die Funktion für die Polarisationsänderung  $f_\pi$  des jeweiligen Versuchs im Bereich 100 Zyklen vor und bis zu 1.000 Zyklen nach den Polarisationswechseln dargestellt. Der Abbildung 5.51 ist zu entnehmen, dass der maximale Wert von  $f_\pi$  nach einer Polarisationsänderung tendenziell mit zunehmender Zyklenzahl  $N_P$  ansteigt. Dies ist deutlich bei den Versuchen mit der Amplitude von  $\tau_{yx}^{ampl} = 30 \text{ kPa}$  zu beobachten. Es stellt sich heraus, dass die Ermittlung von  $f_\pi$  unmittelbar nach dem Polarisationswechsel aufgrund der schnell abfallenden Werte der Akkumulationsrate  $\dot{\epsilon}^{acc}$  nur mit großer Streuung möglich ist.

## 5.6 Zyklisches Verhalten im multidirektionalen Einfeldversuch

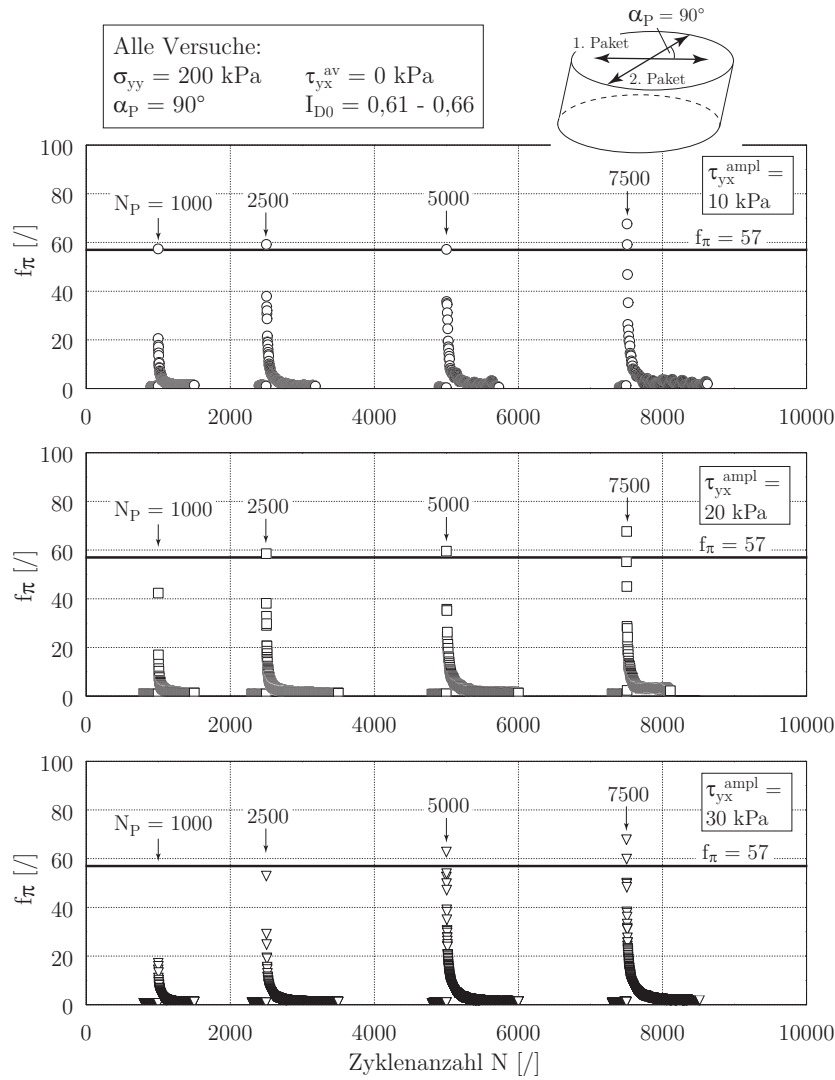


Abbildung 5.51:  $f_\pi$  bei Variation des Zeitpunkts der Polarisationsänderung  $N_P$  im multidirektionalen Einfeldversuch mit  $\tau_{yx}^{ampl} = 10 \text{ kPa}$  (oben),  $\tau_{yx}^{ampl} = 20 \text{ kPa}$  (mittel) und  $\tau_{yx}^{ampl} = 30 \text{ kPa}$  (unten)

Für die Beschreibung der Funktion  $f_\pi$  im HCA-Modell (Gleichung 5.25) wurde von einem konstanten Wert für  $f_\pi$ -max für unterschiedliche Zyklanzahlen  $N_P$  ausgegangen. Es wurde ein Wert  $f_\pi$ -max = 57 (entspricht  $C_{\pi 1} = 56$ ) für Berliner Sand angenommen. Dieser Wert ist unabhängig von der Lastamplitude  $\tau_{yx}^{ampl}$  und der Zyklanzahl  $N_P$ . In der Abbildung 5.51 ist zu erkennen, dass diese Annahme die meisten Versuchsergebnisse relativ gut wiedergibt.

Weiterhin wird der Einfluss der Zyklanzahl nach der Polarisationsänderung  $\Delta N_P$  auf die Abnahme von  $f_\pi$  untersucht. In der Abbildung 5.52 ist das Abklingen der Funktion  $f_\pi$  mit der Zyklanzahl  $\Delta N_P$  dargestellt. Es ist offensichtlich, dass der Zeitpunkt der Polarisationsänderung  $N_P$  einen großen Einfluss auf die Abnahme der Akkumulationsrate nach dem Wechsel hat. Die Abbildung 5.52 zeigt ein deutlich schnelleres Absinken von  $f_\pi$  in den Versuchen mit früherer Änderung der Polarisation



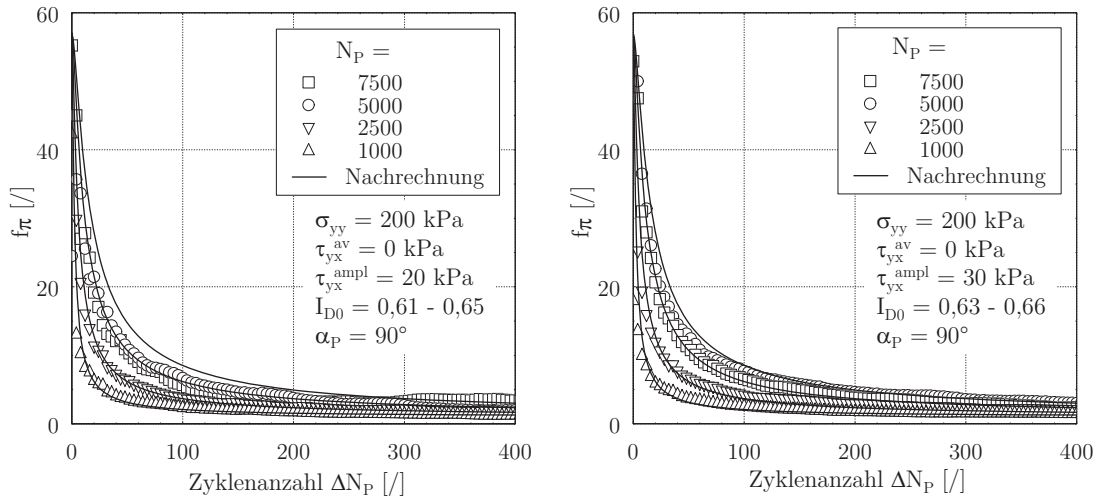


Abbildung 5.52: Abhängigkeit der Funktion  $f_\pi$  von der Zyklanzahl nach dem Polarisationswechsel  $\Delta N_P$  bei unterschiedlichen Zeitpunkten für die Drehung  $N_P$  in Versuchen mit  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 20 \text{ kPa}$  (links) und  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 30 \text{ kPa}$  (rechts)

(kleinere  $N_P$ ). Das liegt vermutlich daran, dass ausgehend von dem chaotischen Zustand nach der Präparation die Probe im Versuch mit einem längeren 1. Paket mehr von der Lastrichtung dieses Pakets geprägt wurde. Demzufolge benötigen die Sandkörner dieser Probe in dem nachfolgenden Paket mehr Zyklen, um sich in die neue Richtung umzuorientieren.

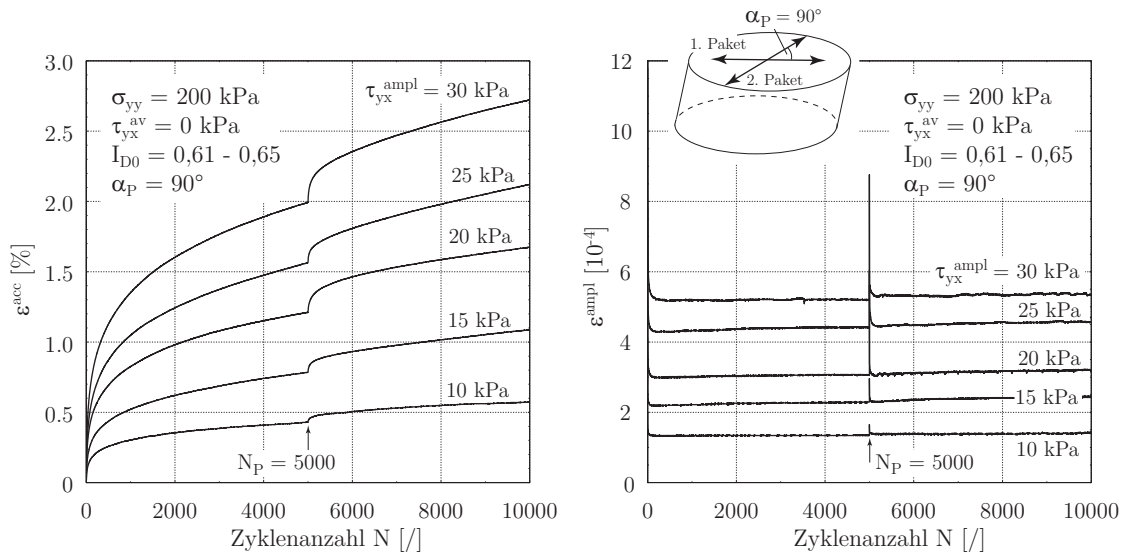


Abbildung 5.53: Akkumulation der totalen Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$  (links) und Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  (rechts) bei unterschiedlichen Amplituden  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  im Versuch mit  $90^\circ$ -Polarisationswechsel

In dem HCA-Modell kann der Verlauf von  $f_\pi$  mit der Zyklanzahl anhand der Gleichungen 5.25 und 5.26 berechnet werden. Die Abhängigkeit der  $f_\pi$  von  $N_P$  wird in der



Evolutionsgleichung (Gleichung 5.26) von  $\alpha$  berücksichtigt. Die Nachrechnung von  $f_\pi$  für Berliner Sand zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen (durchgezogene Kurve, Abbildung 5.52).

### 5.6.2.3 Einfluss der Lastamplitude

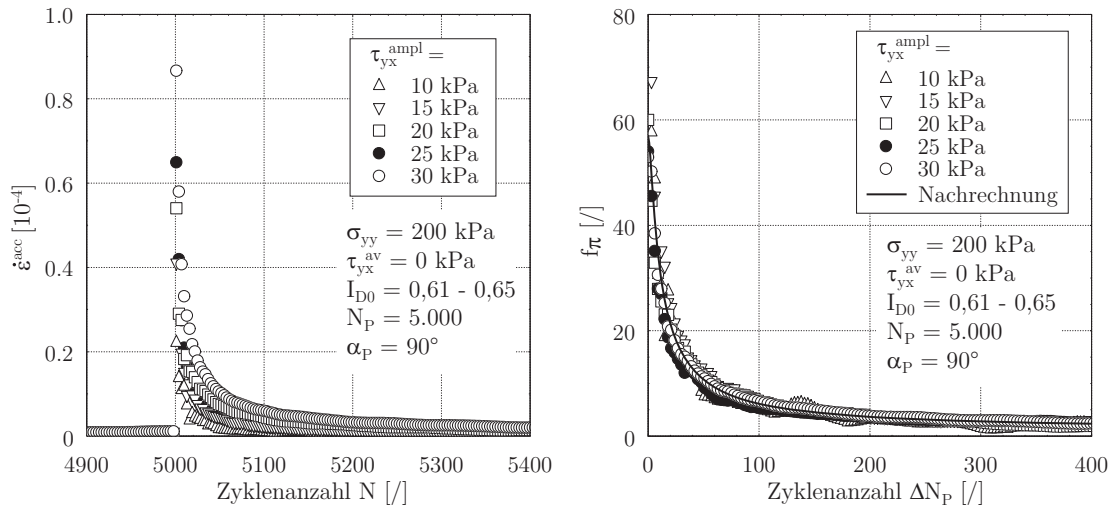


Abbildung 5.54: Akkumulationsrate  $\dot{\epsilon}^{acc}$  als Funktion der Zyklanzahl  $N$  für unterschiedliche Amplituden  $\tau_{yx}^{ampl}$  (links) und  $f_\pi$  in Abhängigkeit der Zyklanzahl nach dem Polarisationswechsel  $\Delta N_P$  (rechts)

Die Abhängigkeit der Akkumulationsrate von der Amplitude  $\epsilon^{ampl}$  wurde in Versuchen mit unterschiedlichen Schubspannungsamplituden  $10 \leq \tau_{yx}^{ampl} \leq 30$  kPa getestet. In der Abbildung 5.53 ist die totale Dehnung  $\epsilon^{acc}$  und die Dehnungsamplitude  $\epsilon^{ampl}$  in Abhängigkeit der Zyklanzahl  $N$  dargestellt. Erwartungsgemäß zeigt die Akkumulation von  $\epsilon^{acc}$  ein ähnliches Verhalten wie die volumetrische Dehnung  $\epsilon_v^{acc}$  (Abschnitt 5.6.1). Die Dehnungsamplitude  $\epsilon^{ampl}$  weist einen sprunghaften Anstieg beim Polarisationswechsel auf. Dieser temporäre Zuwachs nimmt danach wieder schnell ab. Der Anstieg der Amplitude fällt bei dem Versuch mit größerer Lastamplitude höher aus. Der Betrag von  $\epsilon^{ampl}$  nach der Richtungsänderung ist ungefähr gleich groß wie die Amplitude davor.

In der Abbildung 5.54 links sind die Akkumulationsraten  $\dot{\epsilon}^{acc}$  der Versuche mit unterschiedlicher  $\tau_{yx}^{ampl}$  in Abhängigkeit der Zyklanzahl  $N$  dargestellt. Je größer die Lastamplitude  $\tau_{yx}^{ampl}$  ist, desto höher ist die Zunahme der Rate  $\dot{\epsilon}^{acc}$  beim Polarisationswechsel. Die Funktion  $f_\pi$  für Versuche mit verschiedenen Amplituden  $\tau_{yx}^{ampl}$  ist in der Abbildung 5.54 rechts zusammengestellt. Es ist festzustellen, dass unabhängig von der Amplitude die  $f_\pi(\Delta N_P)$ -Kurven zusammenfallen. Die Nachrechnung mit den Gleichungen 5.25 und 5.26 vom HCA-Modell mit den Konstanten  $C_{\pi 1} = 56$  und  $C_{\pi 2} = 1,25 \cdot 10^{-3}$  für Berliner Sand, zeigt eine sehr gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen (durchgezogene Kurve).

### 5.6.2.4 Druckabhängigkeit

Der Einfluss des mittleren Drucks wurde in den Versuchen mit unterschiedlicher Normalspannung  $\sigma_{yy}$  untersucht. Dabei wurden Proben unter Normalspannung von  $\sigma_{yy} = 50, 100, 200$  und  $400$  kPa getestet. In der Abbildung 5.55 ist die Akkumulationsrate und die Funktion  $f_\pi$  dieser Versuchsreihe dargestellt. Die Normalspannung zeigt einen leichten Einfluss auf die Akkumulationsrate  $\dot{\epsilon}^{\text{acc}}$ . Die Rate steigt tendenziell mit zunehmender Normalspannung  $\sigma_{yy}$ . Dagegen spielt die Normalspannung bei der Entwicklung von  $f_\pi$  keine Rolle (Abbildung 5.56 rechts). Die Approximation mit der Funktion aus dem HCA-Modell passt sehr gut zu den Messwerten (durchgezogene kurve, Abbildung 5.55 rechts).

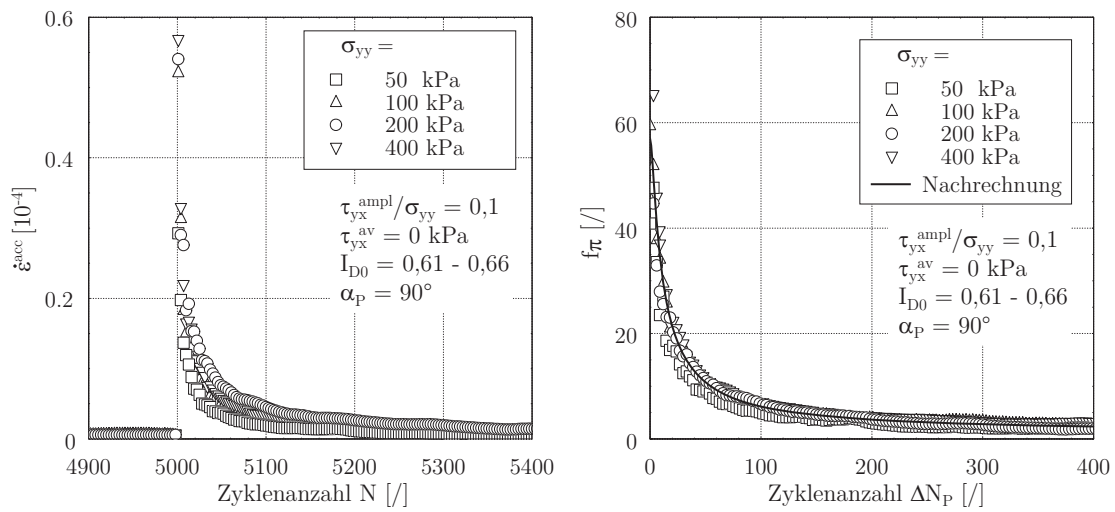


Abbildung 5.55: Akkumulationsrate  $\dot{\epsilon}^{\text{acc}}$  als Funktion der Zyklanzahl  $N$  für unterschiedliche Normalspannungen  $\sigma_{yy}$  (links) und Funktion  $f_\pi$  in Abhängigkeit der Zyklanzahl nach dem Polarisationswechsel  $\Delta N_P$  (rechts)

### 5.6.2.5 Einfluss der Anfangslagerungsdichte $I_{D0}$

Zur Untersuchung des Einflusses der Lagerungsdichte  $I_{D0}$  auf das zyklische Verhalten bei der Polarisationsänderung wurden vier Versuche bei unterschiedlicher Anfangslagerungsdichte durchgeführt. Das Verdichtungsverhalten dieser vier Proben wurde bereits im Abschnitt 5.6.1 präsentiert. Abbildung 5.56 stellt die Änderungen der Akkumulationsrate und der Funktion  $f_\pi$  mit der Zyklanzahl  $N$  und  $N_P$  dar. Dabei ist zu beobachten, dass die Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$  keinen Einfluss auf die Akkumulationsrate  $\dot{\epsilon}^{\text{acc}}$  und die Funktion  $f_\pi$  hat. Es ist in der Versuchsreihe keine eindeutige Tendenz zu erkennen. Die Nachrechnung mit der Gleichungen 5.25 und 5.26 ergibt ein zufriedenstellendes Ergebnis (durchgezogene Kurve, Abbildung 5.56, rechts).

## 5.6 Zyklisches Verhalten im multidirektionalen Einfeldversuch

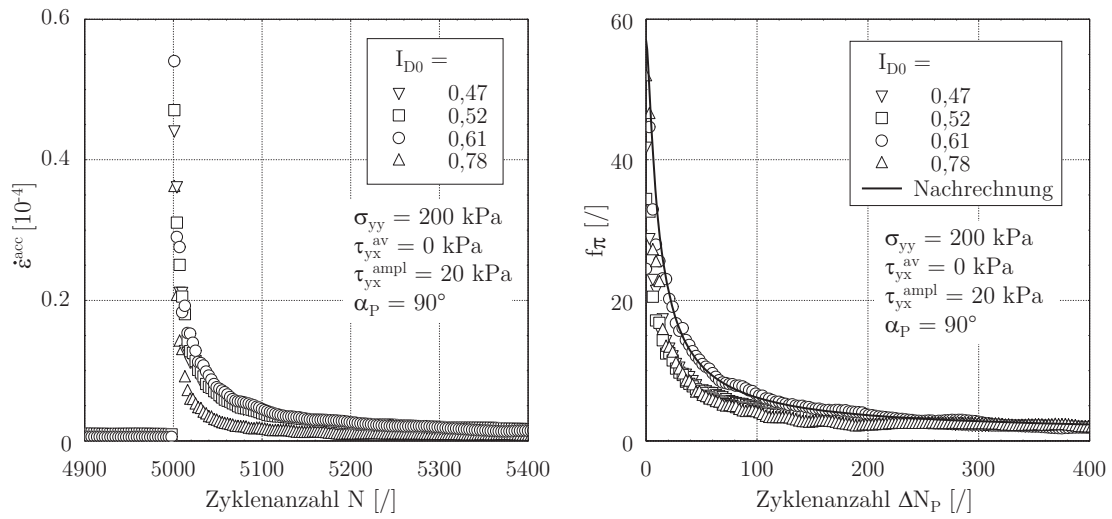


Abbildung 5.56: Akkumulationsrate  $\dot{\varepsilon}^{acc}$  als Funktion der Zyklusanzahl  $N$  für unterschiedliche Lagerungsdichte  $I_{D0}$  (links) und  $f_\pi$  in Abhängigkeit der Zyklusanzahl nach dem Polarisationswechsel  $\Delta N_P$  (rechts)



## 6 Stoffmodelle

Für die FE-Berechnung von Randwertproblemen unter wiederholter Belastung mit mehreren Zyklen (hochzyklische Belastung) ist das explizite Akkumulationsmodell (HCA-Modell) sehr gut geeignet. Die „implizite“ Berechnung mit dem konventionellen Stoffgesetz ist aufgrund des Rechenaufwands und des aufsummierten Fehlers der Integrationsalgorithmen nur für einige Zyklen zuverlässig ( $N < 50$ ). In diesem Abschnitt wird das HCA-Modell und seine Modifikation sowie das für die implizite Berechnung verwendete hypoplastische Stoffgesetz vorgestellt. Weiterhin wird die Ermittlung der Parameter für die Stoffmodelle geklärt und die Validierung der Stoffmodelle anhand der Laborversuche gezeigt.

### 6.1 Basis des expliziten Akkumulationsmodells für Sand unter zyklischer Beanspruchung

Der Ausgangspunkt für das in der vorliegenden Arbeit verwendete Akkumulationsmodell ist die Konzeption der expliziten Formulierung der Verformung von Boden unter zyklischer Belastung nach Sawicki & Swidzinski [93]. Das Modell von Sawicki & Swidzinski basiert auf der Verdichtungskurve von Einfeldversuchen. Die akkumulierte Dehnung wird anhand der Funktion

$$\Phi = C_1 \ln(1 + C_2 z) \quad (6.1)$$

explizit berechnet. Darin ist  $\Phi = \Delta n/n_0$  die Verdichtung,  $n$  ist der Porenanteil. Die Variable  $z$  hängt von der Amplitude  $\gamma^{\text{ampl}}$  und der Zyklenanzahl  $N$  mit der Beziehung  $z = 1/4(\gamma^{\text{ampl}})^2 N$  ab. Ausgehend von der Basis des Akkumulationsmodells von Sawicki & Swidzinski [93] wurde seit Ende der 90er Jahre an der Ruhr Universität Bochum das explizite Akkumulationsmodell (HCA-Modell) entwickelt. Niemunis [72] erweiterte das Modell von Sawicki & Swidzinski um die hypoplastische Fließrichtung und stellte die Notwendigkeit der weiteren Entwicklung dieses Modells dar. In einer späteren Studie (Niemunis [73]) beschrieb er die akkumulierte Dehnung mit der Funktion:

$$f_N = C_{N1}[\ln(1 + C_{N2}N) + C_{N3}N] \quad (6.2)$$

Außerdem wurden die Teilfunktionen  $f_{\text{ampl}}$ ,  $f_e$ ,  $f_p$ ,  $f_Y$  und  $f_\pi$  für die Berücksichtigung der Einflüsse der Dehnungsamplitude, der Porenzahl, des mittleren Drucks, des Spannungsverhältnisses und der Polarisationsänderung (Abschnitt 6.3.1) formuliert. Dabei wurde die Fließregel des modifizierten Cam-Clay-Modells für

die Berechnung der deviatorischen Dehnung vorgeschlagen. In der Veröffentlichung von Niemunis et al. [75] wurde der Ansatz der Teilfunktion  $f_e$  für die Porenzahl nochmals verbessert und die Variable  $g^A$  für die Historiotropie eingeführt. Mit  $g^A$  wird der Einfluss der Zyklenpakete mit unterschiedlicher Amplitude in Betracht gezogen. In der gleichen Studie wurde weiterhin die erste FE-Berechnung mit dem HCA-Modell durchgeführt.

Anhand der zahlreichen Laborversuche von Wichtmann [108] wurde die Akkumulation von Sand unter zyklischer Belastung experimentell umfangreich untersucht. Die Laborergebnisse von dieser Studie bestätigten die Ansätze von Niemunis in den Teilfunktionen  $f_{\text{ampl}}$ ,  $f_N$ ,  $f_e$ ,  $f_p$ ,  $f_Y$  und  $f_\pi$  (Niemunis et al. [75]). Das HCA-Modell wurde anschließend an zyklischen Triaxialversuchen validiert. Nach einer weiteren Untersuchung wurde zusätzlich eine Materialkonstante  $C_{\text{ampl}}$  für die Dehnungsamplitude eingeführt (Wichtmann et al. [113]). Die Änderung des Kompressionsmoduls  $K$  und die Einwirkung von der Querdehnzahl  $\nu$  wurde auch untersucht (Wichtmann et al. [116]).

Die aktuellsten Ansätze für  $f_{\text{ampl}}$ ,  $f_N$ ,  $f_e$ ,  $f_p$  und  $f_Y$  des HCA-Modells sind in dem Abschnitt 6.3.1 zusammengestellt.

## 6.2 Testberechnungen mit dem ursprünglichen HCA-Modell

Die Fähigkeit des HCA-Modells wurde bereits in vielen Studien anhand der FE-Berechnungen demonstriert. In den meistens Berechnungen wurde der Einfluss der Änderung der Belastungsrichtung unberücksichtigt. Die Teilfunktion  $f_\pi$  für die Polarisationsänderung wurde mit  $f_\pi = 1$  angesetzt. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wurde das HCA-Modell auch ohne Einsatz von  $f_\pi$  an zyklischen Triaxial- und Einfachscherversuchen erfolgreich validiert. Die Ergebnisse der Nachrechnungen sind im Abschnitt 7.3.1 präsentiert.

Das Konzept für die Darstellung des Bodenverhaltens bei einem Polarisationswechsel (Abschnitt 6.3.4) wurde bereits von Niemunis [73] erstellt. Es ist bis jetzt jedoch keine Beispielberechnung mit diesem Ansatz bekannt. Zur Bewertung des ursprünglichen HCA-Modells (nach Niemunis et al. [76]) mit der Beschreibung der Polarisationsänderung wurden multidirektionale Einfachscherversuche mit einer plötzlichen Änderung der Scherbelastungsrichtung nachgerechnet. Die Berechnung wurde mit dem FEM-Programm ANSYS<sup>®</sup> durchgeführt. Die Randbedingungen der Berechnung werden im Abschnitt 7.3.2.1 beschrieben. Folgende Parameter für das HCA-Modell wurden verwendet:

Die Materialkonstanten  $C_{\pi 1} = 56$  und  $C_{\pi 2} = 5 \cdot 10^5$  in der Tabelle 6.1 wurden anhand der Ergebnisse der multidirektionalen Einfachscherversuche mit dem ursprünglichen Ansatz kalibriert (Nach Wichtmann [108]). Dabei wurden die Versuche mit unterschiedlicher Anfangslagerungsdichte (Abschnitt 5.6.2) herangezogen. Die Prozedur für die Bestimmung dieser beiden Parameter wurde von Wichtmann [108] detailliert

| $C_{\text{ampl}}$ | $C_{N1}$          | $C_{N2}$ | $C_{N3}$            | $C_p$ | $C_Y$ | $C_e$ | $C_{\pi 1}$ | $C_{\pi 2}$    |
|-------------------|-------------------|----------|---------------------|-------|-------|-------|-------------|----------------|
| 2,05              | $2 \cdot 10^{-3}$ | 0,022    | $8,5 \cdot 10^{-5}$ | 0,55  | 1,96  | 0,325 | 56          | $5 \cdot 10^5$ |

Tabelle 6.1: Materialkonstanten für das ursprüngliche HCA-Modell für Berliner Sand

beschrieben. Für die Voruntersuchung wurden zwei Versuchsreihen mit Variation der Amplituden und der Zeitpunkte der Richtungsänderung nachgerechnet.

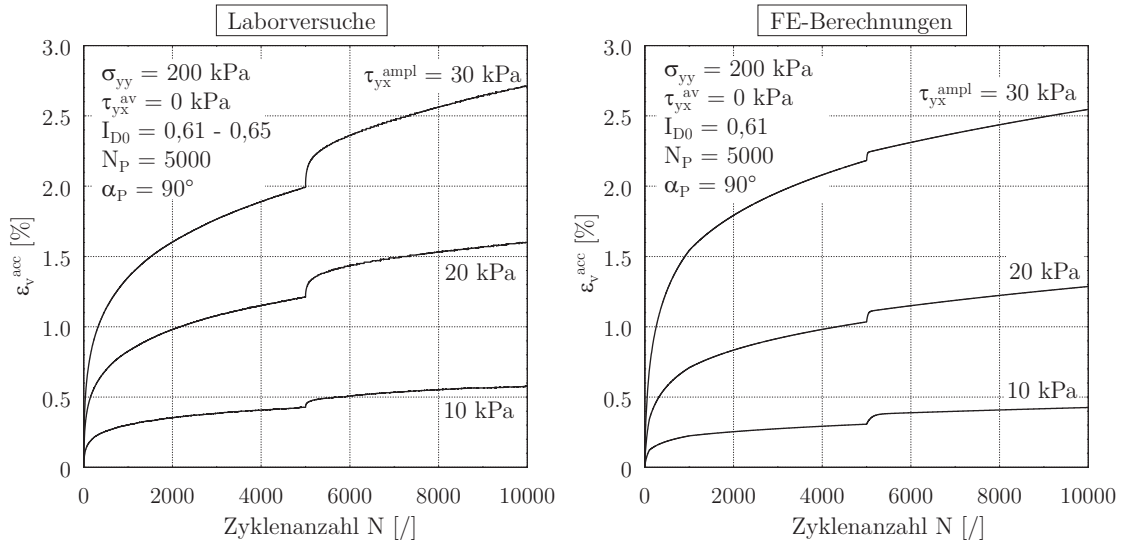


Abbildung 6.1: Akkumulierte Dehnung bei einer 90°-Wechsel in den Laborversuchen (links) und in den Nachrechnungen mit dem ursprünglichen HCA-Modell (rechts), Parameter gemäß Tabelle 6.1 und 6.4

Die Verformung der Probe in der Nachrechnung mit dem ursprünglichen HCA-Modell zeigt ansatzweise ein ähnliches Verhalten wie in den Laborversuchen (Abbildungen 6.1 und 6.2). Die Drehung der Polarisationsrichtung verursacht eine zusätzliche Dehnung der Probe. Bei allen Versuchen ist zu erkennen, dass nach dem Wechsel die Dehnung sprunghaft ansteigt. Die Dehnungsrate nimmt danach mit weiterer zyklischer Belastung schnell wieder ab.

Die Beschreibung der Bodenverformung bei einem Polarisationswechsel nach der Methode von Niemunis (Niemunis et al. [76]) wurde durch die Testberechnungen demonstriert. Die Ergebnisse zeigen jedoch einige Grenzen dieses Ansatzes von Niemunis auf. In den Nachrechnungen mit unterschiedlichen Amplituden nimmt der Sprung in der Dehnungskurve infolge einer Umstellung der Scherrichtung mit steigender Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  ab (Abbildung 6.1 rechts). Dagegen nimmt in den Laborversuchen dieser Änderung in der Dehnung mit steigender Amplitude an Intensität zu (Abbildung 6.1 links). Während die Nachrechnung die Verformung der Probe bei einer Spannungsamplitude von  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 10 \text{ kPa}$  relativ gut abgebildet, kann die Verformung bei  $\tau_{yx}^{\text{ampl}} = 30 \text{ kPa}$  nicht genau prognostiziert werden. Obwohl

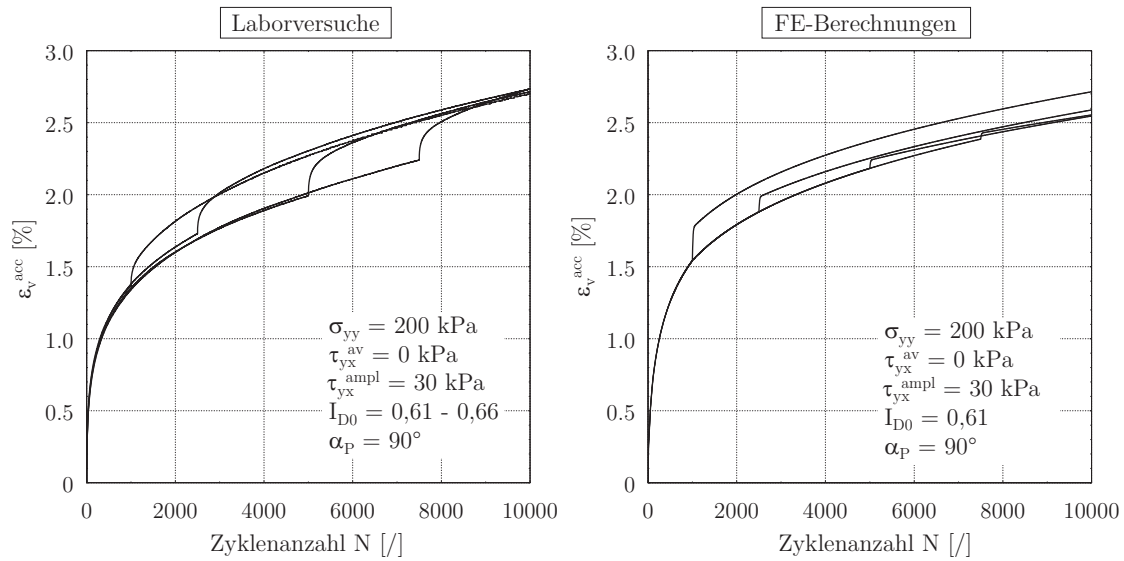


Abbildung 6.2: Akkumulierte Dehnung bei einer 90°-Wechsel in den Laborversuchen (links) und in den Nachrechnungen mit dem ursprünglichen HCA-Modell (rechts), Parameter gemäß Tabelle 6.1 und 6.4

die Dehnungsrate (Steigung der Dehnungskurve) direkt nach der Änderung relativ gut abgeschätzt wird, nimmt diese Steigung sehr schnell wieder ab. Daher fällt der resultierende Dehnungszuwachs im Vergleich zu dem Laborergebnis kleiner aus. In den Versuchen mit unterschiedlichen Zeitpunkten für die Drehung sind auch Abweichungen festzustellen. Besonders die Dehnungszuwächse am Ende des Versuchs wurden nicht zutreffend prognostiziert. Die resultierenden Dehnungen nach einer Polarisationsänderung in Laborversuchen sind unabhängig von dem Zeitpunkt der Richtungsänderung  $N_P$ . Dagegen wird der Dehnungszuwachs mit steigender Zyklanzahl  $N_P$  abnehmend prognostiziert.

Die Testberechnungen haben gezeigt, dass das Verhalten von Sand bei einem Polarisationswechsel durch  $f_\pi$  prinzipiell beschrieben werden kann. Die Ergebnisse der FE-Berechnung mit der ursprünglichen Formel sind nicht zufriedenstellend. Für eine bessere Prognose ist es notwendig, der Ansatz von  $f_\pi$  zu modifizieren.

## 6.3 Das HCA-Modell und die Modifikation des Ansatzes für die Polarisationsänderung

### 6.3.1 Allgemeine Formulierung

Das explizite Akkumulationsmodell (HCA-Modell nach Niemunis et al. [76], Wichtmann et al. [112]) beschreibt die Spannungsänderung des rolligen Bodens infolge einer wiederkehrenden Belastung. Die allgemeine Spannungs- Dehnungsbeziehung



kann mit einer tensoriellen Gleichung dargestellt werden:

$$\mathring{\mathbf{T}} = \mathbb{E} : (\mathbf{D} - \mathbf{D}^{\text{acc}} - \mathbf{D}^{\text{pl}}) \quad (6.3)$$

Darin ist  $\mathring{\mathbf{T}}$  die Jaumann'sche Spannungsrate,  $\mathbb{E}$  die von dem Spannungsniveau abhängige elastische Steifigkeit (Abschnitt 6.3.7),  $\mathbf{D}$  die Dehnungsrate,  $\mathbf{D}^{\text{acc}}$  die Akkumulationsdehnungsrate und  $\mathbf{D}^{\text{pl}}$  die Rate der plastischen Dehnung (Abschnitt 6.3.8).

Die Akkumulationsdehnungsrate  $\mathbf{D}^{\text{acc}}$  wird nach Niemunis et al. [76] als Produkt von den Teilfunktionen  $f$  und der Akkumulationsrichtung  $\mathbf{m}$  berechnet:

$$\begin{aligned} \mathbf{D}^{\text{acc}} = D^{\text{acc}} \mathbf{m} &= f_{\text{ampl}} \dot{f}_N f_e f_p f_Y f_\pi \mathbf{m} \\ &= (f_{\text{ampl}} \dot{f}_N^A + f_{\text{ampl}} \dot{f}_N^B) f_e f_p f_Y f_\pi \mathbf{m} \end{aligned} \quad (6.4)$$

Die Intensität der Akkumulationsrate  $D^{\text{acc}}$  wird aus sieben Funktionen zusammengesetzt, deren Einwirkungen auf das Verformungsverhalten anhand der experimentellen Untersuchung von Wichtmann [108] umfassend studiert wurden. Durch diese Funktionen werden folgende Einflüsse berücksichtigt:

- $f_{\text{ampl}}$  : Dehungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$
- $\dot{f}_N^A$  : Zyklische Belastungsgeschichte
- $\dot{f}_N^B$  : Grundrate der Akkumulation, unabhängig von  $N$
- $f_e$  : Porenzahl
- $f_p$  : Mittlere Spannung  $p^{\text{av}}$
- $f_Y$  : Spannungsverhältnis  $\eta^{\text{av}}$
- $f_\pi$  : Polarisationsänderung

Die Teilfunktionen und ihre Konstanten werden in der Tabelle 6.2 zusammengefasst.

### 6.3.2 Teilfunktionen $f_{\text{ampl}}$ , $f_e$ , $f_p$ , $f_Y$ und $f_N$

In dem Multiplikator  $f_{\text{ampl}}$  wird der Einfluss der zyklischen Belastung in Form einer Dehungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  berücksichtigt. Durch  $f_{\text{ampl}}$  ist die Akkumulationsrate  $D^{\text{acc}}$  proportional zu der Dehungsamplitude mit einem Potenzsatz  $C_{\text{ampl}}$ :

$$D^{\text{acc}} \sim (\varepsilon^{\text{ampl}})^{C_{\text{ampl}}} \quad (6.5)$$

$C_{\text{ampl}}$  ist eine Materialkonstante. Nach der Untersuchung von Wichtmann [108] wurde eine quadratische Beziehung vorgeschlagen ( $C_{\text{ampl}} = 2$ ). Bei den späteren Untersuchungen ergab sich aus den Ergebnissen von mehreren Triaxialversuchen, dass diese Konstante einen Wert im Bereich zwischen 1,3 und 2,5 annimmt (Wichtmann et al. [113]). Diese Beziehung gilt für kleine Dehungsamplituden  $\varepsilon^{\text{ampl}} \leq 10^{-3}$ . Für  $\varepsilon^{\text{ampl}} > 10^{-3}$  ist die Akkumulationsrate von der Amplitude unabhängig und wird mit  $\varepsilon^{\text{ampl}} = 10^{-3}$  berechnet.

| Teilfunktion                                                                                                                                                                                                                                                          | Materialkonstanten                                                      |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| $f_{\text{ampl}} = \begin{cases} \left( \frac{\varepsilon^{\text{ampl}}}{\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{ampl}}} \right)^{C_{\text{ampl}}} & \text{für } \varepsilon^{\text{ampl}} \leq 10^{-3} \\ 100 & \text{für } \varepsilon^{\text{ampl}} > 10^{-3} \end{cases}$ | $C_{\text{ampl}}$<br>$\varepsilon_{\text{ref}}^{\text{ampl}} = 10^{-4}$ |
| $\dot{f}_{\text{N}}^{\text{A}} = C_{\text{N1}} C_{\text{N2}} \exp \left( -\frac{g^{\text{A}}}{C_{\text{N1}} f_{\text{ampl}}} \right)$ $g^{\text{A}} = \int f_{\text{ampl}} \dot{f}_{\text{N}}^{\text{A}} dN$                                                          | $C_{\text{N1}}, C_{\text{N2}}$                                          |
| $\dot{f}_{\text{N}}^{\text{B}} = C_{\text{N1}} C_{\text{N3}}$                                                                                                                                                                                                         | $C_{\text{N3}}$                                                         |
| $f_{\text{e}} = \frac{(C_{\text{e}} - e)^2}{(C_{\text{e}} - e_{\text{ref}})^2} \frac{1 + e_{\text{ref}}}{1 + e}$                                                                                                                                                      | $C_{\text{e}}$<br>$e_{\text{ref}} = e_{\text{max}}$                     |
| $f_{\text{p}} = \exp \left[ -C_{\text{p}} \left( \frac{p^{\text{av}}}{p_{\text{ref}}} - 1 \right) \right]$                                                                                                                                                            | $C_{\text{p}}$<br>$p_{\text{ref}} = 100 \text{ kPa}$                    |
| $f_{\text{Y}} = \exp (C_{\text{Y}} \bar{Y}^{\text{av}})$                                                                                                                                                                                                              | $C_{\text{Y}}$                                                          |
| $f_{\pi} = 1 + C_{\pi 1} \cdot (1 - \cos(\alpha))$ $\dot{\alpha} = -C_{\pi 2} \cdot \alpha \cdot (\varepsilon^{\text{ampl}})^2$                                                                                                                                       | $C_{\pi 1}, C_{\pi 2}$                                                  |

Tabelle 6.2: Zusammenstellung der Teilfunktionen und der Materialkonstanten des HCA-Modells nach Niemunis et al. [76]

Der Einfluss der Lagerungsdichte wird in der Teilfunktion  $f_e$  mit der Potenzzahl  $e$  durch die hyperbolische Funktion

$$f_e = \frac{(C_e - e)^2}{(C_e - e_{\text{ref}})^2} \frac{1 + e_{\text{ref}}}{1 + e} \quad (6.6)$$

beschrieben. Darin ist  $e_{\text{ref}} = e_{\text{max}}$  eine Referenzporenzahl ( $e_{\text{max}}$  nach DIN 18126).  $C_e$  ist eine Materialkonstante und gleich der Potenzzahl, bei der die Akkumulation verschwindet ( $f_e = 0$ , „asymptotische“ Potenzzahl).

Die Dehnungsakkumulation nimmt exponentiell mit der mittleren Spannung  $p^{\text{av}}$  ab und wird im Akkumulationsmodell mit der Funktion

$$f_p = \exp \left[ -C_p \left( \frac{p^{\text{av}}}{p_{\text{ref}}} - 1 \right) \right] \quad (6.7)$$

berücksichtigt. Dabei ist  $p_{\text{ref}} = p_{\text{atm}} = 100 \text{ kPa}$  ein Referenzdruck und  $C_p$  eine Materialkonstante.

Das Spannungsverhältnis kann durch die Zustandsvariable  $\bar{Y}$  dargestellt werden:

$$\bar{Y} = \frac{Y - Y_i}{Y_c - Y_i} = \frac{Y - 9}{Y_c - 9} \quad , \quad Y = -\frac{I_1 I_2}{I_3} \quad , \quad Y_c = \frac{9 - \sin^2 \varphi_c}{1 - \sin^2 \varphi_c} \quad (6.8)$$

Die Funktion  $Y$  nach Matsuoka und Nakai [67] und das Spannungsverhältnis  $\eta = q/p$  in der  $p$ - $q$ -Ebene lassen sich durch folgende Gleichungen verknüpfen:

$$Y = \frac{27(3 + \eta)}{(3 + 2\eta)(3 - \eta)} \quad , \quad \eta = \frac{3Y - 27}{4Y} \pm \sqrt{\left( \frac{3Y - 27}{4Y} \right)^2 + \frac{9Y - 81}{2Y}} \quad (6.9)$$

In der Gleichung 6.8 sind  $I_i$  die Basis-Invarianten der Spannung  $\boldsymbol{\sigma}$  (siehe Anhang) und  $\varphi_c$  ist der Reibungswinkel im kritischen Zustand. Die Zustandsvariable  $\bar{Y}$  nimmt einen Wert zwischen 0 und 1 an. Bei isotropen Spannungszuständen ( $\eta = 0; Y = 9$ ) ist  $\bar{Y} = 0$  und bei kritischem Spannungsverhältnis ( $\eta = M_c(\varphi_c)$  oder  $\eta = M_e(\varphi_c); Y = Y_c$ ) ist  $\bar{Y} = 1$ . Im Akkumulationsmodell wird der Einfluss des Spannungsverhältnisses durch die Funktion  $f_Y$  mit

$$f_Y = \exp(C_Y \bar{Y}^{\text{av}}) \quad (6.10)$$

erfasst. Dabei ist  $C_Y$  eine Materialkonstante und  $\bar{Y}^{\text{av}}$  ist das mittlere Spannungsverhältnis (nach Gleichung 6.8).

Der Einfluss der Zyklenzahl auf die Akkumulationsrate wird in der Teilfunktion  $f_N$  betrachtet.  $f_N$  stellt eine empirische Approximation der Verläufe der Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}(N)$  anhand der drei Materialkonstanten  $C_{N1}$ ,  $C_{N2}$  und  $C_{N3}$  dar:

$$f_N = C_{N1} [\ln(1 + C_{N2}N) + C_{N3}N] \quad (6.11)$$

Für das Akkumulationsmodell wird  $f_N$  in Ratenform verwendet (Ableitung nach  $N$ ):

$$\dot{f}_N = \underbrace{\frac{C_{N1}C_{N2}}{1 + C_{N2}N}}_{\dot{f}_N^A} + \underbrace{C_{N1}C_{N2}}_{\dot{f}_N^B} \quad (6.12)$$

Die Rate von  $f_N$  wird in der Gleichung 6.12 in zwei Teile getrennt. Eine von  $N$  abhängige Komponente  $\dot{f}_N^A$  und ein von  $N$  unabhängiger Anteil  $\dot{f}_N^B$ .  $\dot{f}_N^A$  klingt mit steigender Zyklenzahl ab und ist primär auf Kornumlagerungen zurückzuführen. Der Anteil  $\dot{f}_N^B$  bleibt konstant und bestimmt die Akkumulationsrate bei höherer Zyklenzahl ( $N > 10^3$ ).  $\dot{f}_N^B$  wird als „Grundgeschwindigkeit der Akkumulation“ und  $\dot{f}_N^A$  als „strukturelle Akkumulationsrate“ bezeichnet.

Für die zyklische Belastungsgeschichte (Historiotropie) ist die Zyklenzahl  $N$  allein keine geeignete Zustandsvariable, da dadurch keine Information über die Intensität der vergangenen zyklischen Belastungen dargestellt werden kann. Um die Akkumulation einer Belastung aus mehreren Zyklenpaketen mit unterschiedlichen Amplituden abbilden zu können, ist es notwendig, den Einfluss der Intensität der vergangenen Belastung zu betrachten. Beispielsweise hat ein Paket mit großen Zyklen und kleinen Amplituden keinen großen Einfluss auf das nachfolgende Paket mit viel größeren Amplituden. Dafür wird die Variable  $g^A$  eingeführt, in der die Zyklenzahl  $N$  in Form von  $\dot{f}_N^A$  und die Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{acc}}$  in Form von  $f_{\text{ampl}}$  berücksichtigt:

$$g^A = \int f_{\text{ampl}} \dot{f}_N^A dN \quad (6.13)$$

Ersetzt man in der Gleichung 6.12 die Zyklenzahl  $N$  durch  $g^A$ , erhält man den Anteil der strukturellen Akkumulationsrate  $\dot{f}_N^A$ :

$$\dot{f}_N^A = C_{N1}C_{N2} \exp\left(-\frac{g^A}{C_{N1}f_{\text{ampl}}}\right) \quad (6.14)$$

### 6.3.3 Modifikation des Ansatzes von $f_\pi$

Mit der Funktion  $f_\pi$  wird die Polarisationsänderung (Änderung der Belastungsrichtung) berücksichtigt. Die Funktion  $f_\pi$  hängt von dem Winkel  $\alpha$  zwischen der aktuellen Polarisation  $\vec{A}_\varepsilon$  und der „back polarization“  $\pi$  ab ( $\pi$ : Polarisation der zurück liegenden Zyklen, Abschnitt 6.3.4). Im Falle eines Polarisationswechsels erhöht  $f_\pi$  die Akkumulationsrate um einen Faktor von  $f_\pi(\alpha)$ . Nach Niemunis et al. [76] wird  $f_\pi$  und  $\alpha$  mit der Beziehung  $f_\pi(\alpha) = 1 + C_{\pi1} \cdot (1 - \cos(\alpha))$  beschrieben. Die Ergebnisse der Laborversuche in der vorliegenden Arbeit (Abbildung 5.48) haben gezeigt, dass sich die Erhöhung der Dehnungsrate mit der Funktion

$$f_\pi(\alpha) = 1 + C_{\pi1} \cdot \sin(\alpha) \quad (6.15)$$

besser approximieren lässt.  $C_{\pi1}$  ist hierbei eine Materialkonstante.

Nach dem Wechsel klingt die Akkumulationsrate mit der Zyklenzahl  $N$  wieder ab und nähert sich dem vorherigen Wert. Eine schematische Darstellung der Verläufe von  $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}$ ,  $\alpha$  und  $f_\pi$  ist der Abbildung 6.3 zu entnehmen. Nach dem Ansatz von Niemunis et al. [76] wird das Abklingen von  $f_\pi$  durch die Abnahme des Winkels  $\alpha$  mit der Evolutionsfunktion  $\dot{\alpha} = -C_{\pi 2} \cdot \alpha (\varepsilon^{\text{ampl}})^2$  beschrieben. Es wurde dabei angenommen, dass die Änderung von  $f_\pi$  von der Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  abhängig ist. Die Ergebnisse der multidirektionalen Einfachscherversuche im Abschnitt 5.6.2 haben bewiesen, dass der Abnahmeprozess von  $f_\pi$  lediglich von der Zyklanzahl bei der Polarisationsänderung  $N_P$  beeinflusst wird. Die Dehnungsamplitude, die Lagerungsdichte, der Drehwinkel sowie der mittlere Druck spielt dabei keine Rolle. Folgende Gleichung wird für die Beschreibung des Abklingens von  $f_\pi$  verwendet:

$$\dot{\alpha} = -\frac{\alpha}{C_{\pi 2} \cdot N_P + \Delta N_P} \quad (6.16)$$

Darin ist  $C_{\pi 2}$  eine weitere Materialkonstante,  $N_P$  ist die Zyklanzahl bei der Polarisationsänderung,  $\Delta N_P$  ist die Zyklanzahl ab der Polarisationsänderung ( $\Delta N_P = N - N_P$ ). Die Wirkungsweise und Zusammensetzung von  $\vec{A}_\varepsilon$ ,  $\boldsymbol{\pi}$  und  $f_\pi$  wird im folgenden Abschnitt detailliert erläutert.

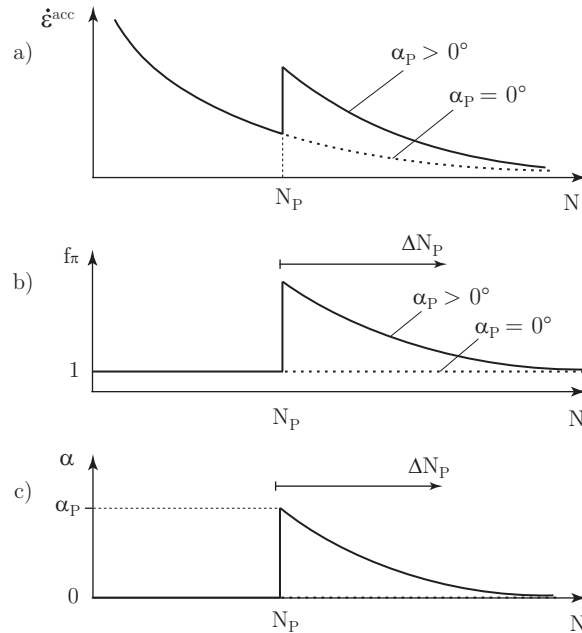


Abbildung 6.3: Schematische Darstellung des Verlaufs der Akkumulationsrate  $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}$  (a), Funktion  $f_\pi$  (b) und Winkel  $\alpha$  (c) bei einer Polarisationsänderung nach  $N_P$  Zyklen

### 6.3.4 Wirkungsweise der „back polarization“ und der Polarisation der aktuellen Zyklen in $f_\pi$

In diesem Abschnitt soll die Wechselwirkung der Polarisierungen der aktuellen Zyklen  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon$  und der zurückliegenden Zyklen  $\pi$  im HCA-Modell bei einer Änderung der Belastungsrichtung erläutert werden. Betrachtet wird ein Versuch mit zwei Lastpaketen mit zwei Dehnungsamplituden  $\mathbb{A}_\varepsilon^1$  und  $\mathbb{A}_\varepsilon^2$ . Die Polarisation  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon$  wird für die Orientierung eines Zyklenpakets definiert und wird mit  $\mathbb{A}_\varepsilon$  nach folgender Definition berechnet:

$$\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon = \frac{\mathbb{A}_\varepsilon}{\|\mathbb{A}_\varepsilon\|} \quad (6.17)$$

Nach der Probenpräparation wird angenommen, dass die Sandkörner in der horizontalen Ebene in einem vollkommen chaotischen Anfangszustand (ohne ausgeprägte Richtung) liegen. Am Anfang des Versuchs wird die Probe im ersten Lastpaket mit  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^1$  belastet. Nach der Aufbringung von ausreichend vielen Zyklen richten sich die Sandkörner in die bevorzugte Richtung des ersten Zyklenpakets  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^1$  aus. Die Kenntnis über die Richtung der zurückliegenden Zyklen wird in der „back polarization“  $\pi$  (Tensor 4. Stufe) gespeichert, eine Art *Historiotropie* der Belastungsrichtung. Für den Anfangswert  $\pi_0$  kann für einen chaotischen Zustand der Sandkörner

$$\pi_0 = \pi^{\text{iso}} = \frac{1}{3}\mathbb{I} \quad (6.18)$$

angesetzt werden (Niemunis et al. [76]). Darin ist  $\mathbb{I}$  der Einheitstensor mit  $I_{ijkl} = \delta_{ik}\delta_{jl}$ . Nach der Untersuchung der vorliegenden Arbeit kann während des ersten Zyklenpakets  $\pi = \vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^1$  eingesetzt werden,  $\pi$  nimmt direkt nach dem ersten Zyklus den Wert von  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^1$  an.

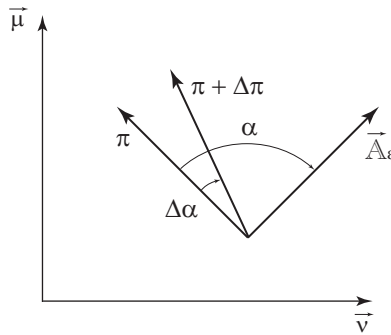


Abbildung 6.4: Adaption der „back polarization“  $\pi$  an die aktuelle Polarisation  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon$ , nach Niemunis et al. [76]

Nach dem Übergang vom ersten zum zweiten Zyklenpaket wechselt die Polarisation von  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^1$  zu der des zweiten Pakets  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2$ . Es gilt zu Beginn des zweiten Lastpakets die

*back polarization*  $\boldsymbol{\pi} = \vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^1$ . Der Winkel  $\alpha$  zwischen der aktuellen Polarisation  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2$  und  $\boldsymbol{\pi}$  kann zu Beginn des zweiten Lastpakets mit

$$\cos(\alpha) = \boldsymbol{\pi} :: \vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2 = \vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^1 :: \vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2 \quad (6.19)$$

berechnet werden. Falls das erste und zweite Zyklenpaket eine identische Belastungsrichtung besitzen ( $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2 = \vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^1$ ), ist  $\cos(\alpha) = 1$  und bei einer  $90^\circ$ -Änderung zwischen den beiden Richtungen ist  $\cos(\alpha) = 0$ .

Die Änderung der Polarisation verursacht einen temporären Anstieg der Akkumulationsrate. Die Rate nimmt danach im Laufe des zweiten Zyklenpakets wieder ab. Während des zweiten Pakets bleibt die Polarisation  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2$  konstant, der Tensor  $\boldsymbol{\pi}$  ändert sich dagegen und nähert sich der aktuellen Polarisation  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2$  asymptotisch an,  $\boldsymbol{\pi} \rightarrow \vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2$ . Die Sandkörner orientieren sich nach dem Polarisationswechsel sukzessiv nach der bevorzugten Richtung des zweiten Zyklenpaket  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2$ .

Das Abklingen der Akkumulationsrate mit der Zyklenanzahl nach dem Polarisationswechsel wird durch die Adaption von  $\boldsymbol{\pi}$  an die aktuelle Polarisation  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2$  beschrieben. Das Produkt  $\boldsymbol{\pi} :: \vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2$  stellt den Grad der Adaption der Kornstruktur an die aktuelle Polarisation dar (mit  $0 \leq \boldsymbol{\pi} :: \vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2 \leq 1$ ; bei  $\boldsymbol{\pi} :: \vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2 = 1$ : vollständige Adaption). Die Entwicklung des Winkels  $\alpha$  kann mit der Funktion

$$\dot{\alpha} = -\frac{\alpha}{C_{\pi 2} \cdot N_P + \Delta N_P} \quad (6.20)$$

approximiert werden. Darin ist  $N_P$  die Zyklenanzahl des ersten Lastpakets,  $\Delta N_P$  die Zyklenanzahl ab der Polarisationsänderung ( $\Delta N_P = N - N_P$ ). Die Näherung der *back polarization*  $\boldsymbol{\pi}$  an die aktuelle Polarisation  $\vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2$  wird in der tensoriellen Darstellung durch einen Rotationsoperator  $\mathcal{R}$  mit

$$\boldsymbol{\pi} + \Delta \boldsymbol{\pi} = \mathcal{R} :: \boldsymbol{\pi} \quad (6.21)$$

umgesetzt (Niemunis et al. [76]). Mit einem Änderungswinkel von  $\Delta \alpha = \dot{\alpha} \Delta N$  berechnet sich der Rotationsoperator  $\mathcal{R}$  aus:

$$\mathcal{R} = (\cos \Delta \alpha - 1)(\vec{\boldsymbol{\mu}} \otimes \vec{\boldsymbol{\mu}} + \vec{\boldsymbol{\nu}} \otimes \vec{\boldsymbol{\nu}}) + \sin \Delta \alpha (\vec{\boldsymbol{\mu}} \otimes \vec{\boldsymbol{\nu}} - \vec{\boldsymbol{\nu}} \otimes \vec{\boldsymbol{\mu}}) + \mathcal{J} \quad (6.22)$$

Darin ist  $\vec{\boldsymbol{\mu}} = \vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2 + \boldsymbol{\pi}$ ,  $\vec{\boldsymbol{\nu}} = \vec{\mathbb{A}}_\varepsilon^2 - \boldsymbol{\pi}$  und  $\mathcal{J}$  ist der Identitätstensor 8. Stufe.

### 6.3.5 Akkumulationsrichtung $\mathbf{m}$

Der normierte Tensor  $\mathbf{m}$  zeigt die Richtung der Akkumulation im Dehnungsraum.  $\mathbf{m}$  ist allein vom Spannungsverhältnis  $\eta = q/p$  abhängig und kann durch die Fließregeln des modifizierten Cam-Clay Modells approximiert werden (Niemunis et al. [76]):

$$\mathbf{m} = \frac{-\frac{1}{3} \left( p - \frac{q^2}{M^2 p} \right) \mathbf{1} + \frac{3}{M^2} \mathbf{T}^*}{\left\| -\frac{1}{3} \left( p - \frac{q^2}{M^2 p} \right) \mathbf{1} + \frac{3}{M^2} \mathbf{T}^* \right\|} \quad (6.23)$$

Die Neigung der Grenzgeraden  $M$  berechnet sich aus dem kritischen Reibungswinkel  $\varphi_c$  mit der Gleichung:

$$M = F \frac{6 \sin \varphi_c}{3 - \sin \varphi_c} \quad (6.24)$$

$$F = \sqrt{\frac{1}{8} \tan^2 \psi + \frac{2 - \tan^2 \psi}{2 + \sqrt{2} \tan \psi \cos(3\theta)}} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \tan \psi \quad (6.25)$$

$$\tan \psi = \sqrt{3} \|\mathbf{T}^*\| \quad (6.26)$$

$$\cos(3\theta) = -\frac{\sqrt{6} \operatorname{tr}(\hat{\mathbf{T}}^* \cdot \hat{\mathbf{T}}^* \cdot \hat{\mathbf{T}}^*)}{(\hat{\mathbf{T}}^* \cdot \hat{\mathbf{T}}^*)^{\frac{3}{2}}} \quad (6.27)$$

### 6.3.6 Definition der Dehnungsamplitude $\mathbb{A}_\varepsilon$

Im allgemeinen Fall wird die Dehnungsamplitude in einem Tensor 4. Stufe  $\mathbb{A}_\varepsilon$  dargestellt. Die tensorielle Darstellung der Dehnungsamplitude ermöglicht, die mehrdimensionale Dehnungsschleifen abzubilden. Für die Ermittlung der Teilfunktion  $f_{\text{ampl}}$  (Tabelle 6.2) wird die Amplitude in skalarer Form  $\varepsilon^{\text{ampl}} = \|\mathbb{A}_\varepsilon\|$  verwendet. In diesem Abschnitt wird der Algorithmus für die Bestimmung des Tensors  $\mathbb{A}_\varepsilon$  erläutert.

Der Ausgang für das Akkumulationsmodell ist eine implizite FE-Berechnung des Belastungszyklus. Aus dieser Berechnung wird die Dehnungsschleife des Zyklus für jeden Integrationspunkt als eine Reihe von Dehnungspunkten ( $\epsilon_i$ ) aufgezeichnet. Zunächst werden die am weitesten von einander entfernten Punkte gesucht (Punkt  $\epsilon_A$  und  $\epsilon_E$ ). Der Abstand der beiden Punkte berechnet sich aus:

$$2R^{(6)} = \|\epsilon_A - \epsilon_E\| \quad (6.28)$$

und die Orientierung:

$$\vec{r}^{(6)} = \frac{\epsilon_A - \epsilon_E}{\|\epsilon_A - \epsilon_E\|} \quad (6.29)$$

Der hochgestellte Index „<sup>(6)</sup>“ steht für die Dimension der Schleife. Der originale Dehnungspfad ( $\epsilon^{(6)}$ ) kann maximal sechs Dimensionen haben. Der normierte Vektor  $\vec{r}^{(6)}$  beschreibt die Richtung der Geraden, auf der die Punkte  $\epsilon_A$  und  $\epsilon_B$  liegen. Im nächsten Schritt werden alle Punkte der Dehnungsschleife auf eine Ebene senkrecht zur Richtung  $\vec{r}^{(6)}$  projiziert. Dabei entsteht eine fünfdimensionale Dehnungsschleife  $\epsilon^{(5)}$ :

$$\epsilon^{(5)} = \epsilon^{(6)} - \vec{r}^{(6)} : \epsilon^{(6)} \otimes \vec{r}^{(6)} \quad (6.30)$$



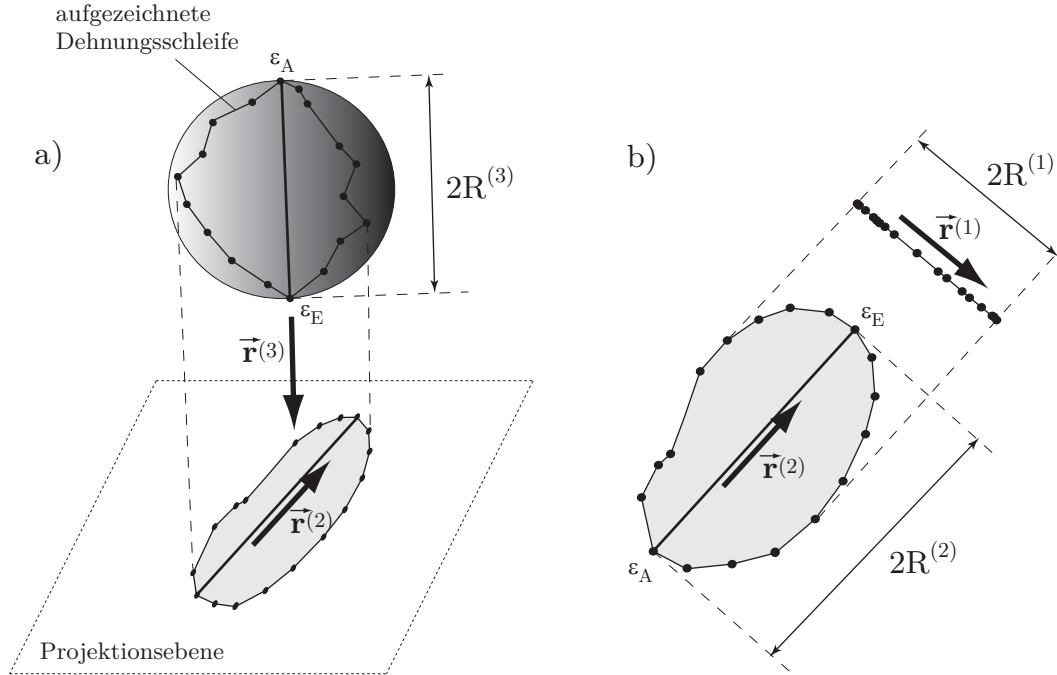


Abbildung 6.5: Projektion der Dehnungsschleife: a) Projektion der 3D-Schleife zu 2D-Schleife ( $\epsilon^{(3)} \rightarrow \epsilon^{(2)}$ ); b) Projektion der 2D-Schleife zu 1D-Schleife ( $\epsilon^{(2)} \rightarrow \epsilon^{(1)}$ ), nach Niemunis et al. [76]

Die Spannweite  $2R^{(5)}$  und die Richtung  $\vec{r}^{(5)}$  der projizierten Schleife werden analog wie bei dem ersten Durchlauf ermittelt. Anschließend wird die Dehnungsschleife  $\epsilon^{(5)}$  in Richtung von  $\vec{r}^{(5)}$  projiziert. Die Prozedur wird solange wiederholt, bis alle Spannweiten  $2R^{(6)} \geq 2R^{(5)} \geq \dots \geq 2R^{(1)}$  und alle Richtungen  $\vec{r}^{(i)}$  festgestellt werden. Die Projektion einer dreidimensionalen zu einer eindimensionalen Dehnungsschleife wird in der Abbildung 6.5 schematisch dargestellt.

Die tensorielle Dehungsamplitude  $\mathbb{A}_\epsilon$  berechnet sich aus den ermittelten halben Spannweiten und den Richtungen zu:

$$\mathbb{A}_\epsilon = \sum_{i=1}^6 R^{(i)} \vec{r}^{(i)} \otimes \vec{r}^{(i)} \quad (6.31)$$

$\mathbb{A}_\epsilon$  ist ein Tensor 4. Stufe mit den Eigenwerten  $R^{(i)}$  und den zugehörigen Eigentensoren  $\vec{r}^{(i)}$ . Die skalare Amplitude  $\epsilon^{\text{ampl}}$  kann aus den Eigenwerten  $R^{(i)}$  berechnet werden:

$$\epsilon^{\text{ampl}} = \|\mathbb{A}_\epsilon\| = \sqrt{(R^{(6)})^2 + (R^{(5)})^2 + \dots + (R^{(1)})^2} \quad (6.32)$$

Für die Effektivität in der numerischen Umsetzung kann die Berechnung abgebrochen werden, wenn die berechnete Spannweite unbedeutend klein ist. In der numerischen Berechnung der vorliegenden Arbeit wurde eine Grenze von 10% der größten Spannweite genommen ( $R^{(i)} \leq 0,1R^{(6)}$ ).

### 6.3.7 Elastische Steifigkeit $\mathbb{E}$

Die Spannungsrate wird aus der Dehnung über die elastische Steifigkeit  $\mathbb{E}$  berechnet (Gleichung 6.3). Die Steifigkeit  $\mathbb{E}$  ist von der Spannung abhängig und kann nach folgender Gleichung

$$\mathbb{E} = \lambda \mathbf{1} \otimes \mathbf{1} + 2\mu \mathbb{I} \quad (6.33)$$

berechnet werden. Darin ist  $I_{ijkl} = 0,5(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk})$  der Identitätstensor,  $\lambda$  und  $\mu$  sind die Lamé-Konstanten.

$$\lambda = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \quad , \quad \mu = G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (6.34)$$

Der Elastizitätsmodul  $E$  bezieht sich auf dem Kompressionsmodul und der Querkontraktionszahl  $\nu$ :

$$E = 3K(1 - 2\nu) \quad (6.35)$$

Aus den Ergebnissen von zahlreichen dränierten und undränierten zyklischen Triaxialversuchen (Wichtmann et al. [116]) wird für die praktische Anwendung der Ansatz von  $\nu = 0,32$  empfohlen. Der von der Spannung abhängige Kompressionsmodul  $K$  kann durch

$$K = A(p_{\text{atm}})^{1-n} p^n \quad (6.36)$$

beschrieben werden. Darin ist  $p_{\text{atm}} = 100 \text{ kPa}$  der Atmosphärendruck,  $A$  und  $n$  sind zwei Konstanten. Nach Wichtmann et al. [112] oder Wichtmann & Triantafyllidis [116] kann für Feinsand  $A = 440$  und  $n = 0,5$  sowie für Mittelsand  $A = 467$  und  $n = 0,46$  angenommen werden.

### 6.3.8 Plastische Dehnungsrate $\mathbf{D}^{\text{pl}}$

In einem homogenen Fall (z. B. Berechnung eines Elementversuchs) ist die Gleichung

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbb{E} : (\mathbf{D} - \mathbf{D}^{\text{acc}}) \quad (6.37)$$

ausreichend. Die Spannungen können hier die Coulomb'sche Pyramide nicht verlassen. In FE-Berechnungen können jedoch Spannungszustände auftreten, die außerhalb der Coulomb'sche Pyramide liegen. Das Stoffmodell muss dabei gewährleisten, dass die Spannungen innerhalb des zulässigen Bereichs bleiben. Das kann durch die Einführung einer plastischen Dehnungsrate  $\mathbf{D}^{\text{pl}}$  in der Gleichung 6.37 erreicht werden. Spannungen, die durch die Berechnung den zulässigen Bereich verlassen, werden zurück auf die Fließfläche projiziert. Dabei wird die assoziierte Fließregel

von Matsuoka & Nakai [67] verwendet. Die elastische Steifigkeit  $\mathbb{E}$  wird durch eine elastoplastische Steifigkeit  $\mathbb{E}^{\text{ep}}$  ersetzt:

$$\mathbb{E}^{\text{ep}} = \mathbb{E} - \frac{\mathbb{E} : \mathbf{m} \otimes \mathbf{m} : \mathbb{E}}{k + \mathbf{m} : \mathbb{E} : \mathbf{m}} \quad (6.38)$$

Darin ist  $\mathbf{m}$  die Fließregel und  $k$  der Verfestigungsmodul. Entsprechend wird die Gleichung 6.3 umgerechnet:

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbb{E} : (\mathbf{D} - \mathbf{D}^{\text{acc}}) - \underbrace{\frac{\mathbb{E} : \mathbf{m} \otimes \mathbf{m} : \mathbb{E}}{k + \mathbf{m} : \mathbb{E} : \mathbf{m}} : (\mathbf{D} - \mathbf{D}^{\text{acc}})}_{\mathbb{E} : \mathbf{D}^{\text{pl}}} \quad (6.39)$$

## 6.4 Konventionelles Stoffgesetz für die implizite Berechnung

Als Eingangsparameter für die explizite Berechnung mit dem HCA-Modell steht die Dehnungsamplitude aus der impliziten Berechnung dar. Eine zuverlässige Verformungsprognose kann nur erreicht werden, wenn die Dehnungsamplitude präzise abgeschätzt wird. Daher ist das konventionelle Stoffgesetz für das HCA-Modell von entscheidender Bedeutung. In diesem Abschnitt wird das hypoplastische Stoffgesetz (Kolymbas [59], Gudehus [34], Bauer [15], von Wolffersdorff [118], Herle [38]) sowie dessen Erweiterung um die intergranulare Dehnung (Niemunis & Herle [74]) vorgestellt.

### 6.4.1 Hypoplastisches Stoffgesetz

In der allgemeinen Form des hypoplastischen Stoffgesetzes erhält man die Spannungsrate  $\dot{\mathbf{T}}$  in der Abhängigkeit von Spannung  $\mathbf{T}$ , Dehnung  $\mathbf{D}$  und die Porenzahl  $e$ :

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{F}(\mathbf{T}, \mathbf{D}, e) = \mathbb{L} : \mathbf{D} + \mathbf{N} \|\mathbf{D}\| \quad (6.40)$$

Darin ist  $\dot{\mathbf{T}}$  die Jaumann'sche Spannungsrate,  $\mathbf{D}$  die Dehnungsrate.  $\mathbb{L}$  und  $\mathbf{N}$  sind der vierstufige lineare und der zweistufige nichtlineare Steifigkeitstensor. Die Steifigkeitstensoren (nach von Wolffersdorff [118]) können mit den folgenden Funktionen beschrieben werden:

$$\mathbb{L} = f_b f_e \frac{1}{\hat{\mathbf{T}} : \hat{\mathbf{T}}} \left( F^2 \mathbb{I} + a^2 \hat{\mathbf{T}} \hat{\mathbf{T}} \right) \quad (6.41)$$

$$\mathbf{N} = f_b f_e f_d \frac{F a}{\hat{\mathbf{T}} : \hat{\mathbf{T}}} \left( \hat{\mathbf{T}} + \hat{\mathbf{T}}^* \right) \quad (6.42)$$

Darin ist  $I_{ijkl} = 0,5(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk})$  der Identitätstensor. Die Parameter  $F$  nach der Gleichung 6.25 und  $a = \sqrt{3}(3 - \sin \varphi_c)/(2\sqrt{2} \sin \varphi_c)$  beschreiben das Bruchkriterium. Die Faktoren  $f_d$ ,  $f_e$  und  $f_b$  berücksichtigen den Einfluss der Spannung und der Lagerungsdichte auf die Steifigkeit:

$$f_d = \left( \frac{e - e_d}{e_c - e_d} \right)^\alpha \quad (6.43)$$

$$f_e = \left( \frac{e_c}{e} \right)^\beta \quad (6.44)$$

$$f_b = \left( \frac{e_{i0}}{e_{c0}} \right)^\beta \frac{h_s}{n} \frac{1 + e_i}{e_i} \left( \frac{3p}{h_s} \right)^{1-n} \left[ 3 + a^2 - a\sqrt{3} \left( \frac{e_{i0} - e_{d0}}{e_{c0} - e_{d0}} \right)^\alpha \right]^{-1} \quad (6.45)$$

Hierbei sind  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $h_s$  und  $n$  Materialkonstanten. Die Parameter  $e_d$ ,  $e_c$  und  $e_i$  sind die Porenzahlen bei dichtester, kritischer und lockerster möglicher Lagerungsdichte. Der tiefgestellte Index „0“ beschreibt den drucklosen Zustand ( $p = 0$ ). Die Porenzahlen hängen von dem Druck nach folgender Gleichung ab:

$$\frac{e_i}{e_{i0}} = \frac{e_c}{e_{c0}} = \frac{e_d}{e_{d0}} = \exp \left[ - \left( \frac{3p}{h_s} \right)^n \right] \quad (6.46)$$

Die Hypoplastizität enthält acht Konstanten: der kritische Reibungswinkel  $\varphi_c$ , die Grenzporenzahlen  $e_{i0}$ ,  $e_{c0}$  und  $e_{d0}$ , die Granulathärte  $h_s$  und die Exponenten  $n$ ,  $\beta$  und  $\alpha$ .

## 6.4.2 Hypoplastisches Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung

Es ist bekannt, dass die Berechnungen der zyklischen Belastungen mit Hypoplastizität nach der Lastumkehr unrealistische Ergebnisse liefern (Niemunis & Herle [74]). Besonders bei kleinen Spannungs- bzw. Dehnungsamplituden verursacht die Richtungsänderung der Spannungsrate eine ungewöhnlich große Dehnung („Ratcheting“). Die berechneten akkumulierten Dehnungen werden wesentlich größer als in der Realität ermittelt.

Um das Problem zu lösen wird in dem hypoplastischen Stoffgesetz eine weitere Zustandsvariable, die sog. intergranulare Dehnung  $\mathbf{h}$  eingeführt (Niemunis & Herle [74]). Die Variable  $\mathbf{h}$  speichert den letzten Teil des zurückliegenden Dehnungspfades ( $\|\mathbf{h}\|_{\max} = R$ ). Der Grad der Mobilisierung der intergranularen Dehnung  $\rho$  ist:

$$\rho = \frac{\|\mathbf{h}\|}{R} \quad (6.47)$$

Die erhöhte Steifigkeit  $\mathbb{M}$  wird mit dem vierstufigen linearen Tensor  $\mathbb{L}$  (Gleichung 6.41) und dem zweistufigen nichtlinearen Tensor  $\mathbf{N}$  (Gleichung 6.42) aus der Beziehung:

$$\mathbb{M} = [\rho^\chi m_T + (1 - \rho^\chi) m_R] \mathbb{L} + \begin{cases} \rho^\chi (1 - m_T) \mathbb{L} : \vec{\mathbf{h}} \vec{\mathbf{h}} + \rho^\chi \mathbf{N} \vec{\mathbf{h}} & \text{für } \vec{\mathbf{h}} : \mathbf{D} > 0 \\ \rho^\chi (m_R - m_T) \mathbb{L} : \vec{\mathbf{h}} \vec{\mathbf{h}} & \text{für } \vec{\mathbf{h}} : \mathbf{D} \leq 0 \end{cases} \quad (6.48)$$

berechnet. Hierbei ist  $\vec{\mathbf{h}} = \mathbf{h}/\|\mathbf{h}\|$  die intergranulare Dehnungsrichtung,  $\chi$ ,  $m_T$  und  $m_R$  drei Materialkonstanten. Die objektive Rate der intergranularen Dehnung  $\dot{\mathbf{h}}$  berechnet sich aus:

$$\dot{\mathbf{h}} = \begin{cases} (\mathbb{I} - \vec{\mathbf{h}}\vec{\mathbf{h}}\rho^{\beta_r}) : \mathbf{D} & \text{für } \vec{\mathbf{h}} : \mathbf{D} > 0 \\ \mathbf{D} & \text{für } \vec{\mathbf{h}} : \mathbf{D} \leq 0 \end{cases} \quad (6.49)$$

Darin ist  $\beta_r$  eine weitere Materialkonstante.

Durch die Erweiterung mit der intergranularen Dehnung enthält das hypoplastische Stoffgesetz zusätzlich fünf weitere Materialkonstanten: die Vergrößerungsfaktoren  $m_R$  und  $m_T$ , die Exponenten  $\beta_r$ ,  $\chi$  und den Radius  $R$ .

## 6.5 Bestimmung der Materialkonstanten

Für die FE-Berechnungen mit dem Akkumulationsmodell werden folgende Parameter benötigt:

- die Materialkonstanten für die Berechnung der Akkumulationsrate  $D^{\text{acc}}$ :  $C_{\text{ampl}}$ ,  $C_e$ ,  $C_p$ ,  $C_Y$ ,  $C_{\pi 1}$ ,  $C_{\pi 2}$ ,  $C_{N1}$ ,  $C_{N2}$  und  $C_{N3}$
- der Kompressionsmodul  $K$  und die Querkontraktionszahl  $\nu$
- der kritische Reibungswinkel  $\varphi_c$  für die Berechnung der Akkumulationsrichtung  $\mathbf{m}$  und die Teilfunktion  $f_Y$
- die Parameter des konventionellen Stoffgesetzes für die impliziten Berechnungen (Hypoplastisches Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung).

### 6.5.1 Parameter für das Akkumulationsmodell

Für die Ermittlung der Parameter  $C_{\text{ampl}}$ ,  $C_e$ ,  $C_p$ ,  $C_Y$ ,  $C_{N1}$ ,  $C_{N2}$  und  $C_{N3}$  werden von Wichtmann et al. [116] drei verschiedene Methoden mit unterschiedlichen Aufwand und Genauigkeiten vorgeschlagen:

1. Abschätzung der Parameter anhand der Korrelationen mit  $d_{50}$ ,  $C_u$ , und  $e_{\min}$ . Die Methode ist nur für sehr grobe Abschätzungen zu empfehlen, da die Kornbeschaffenheit (Kornform, Rauigkeit, Mineralogie) nicht berücksichtigt wird.
2. Die Parameter  $C_{\text{ampl}}$ ,  $C_e$ ,  $C_p$  und  $C_Y$  werden aus der Korrelation mit  $d_{50}$ ,  $C_u$ , und  $e_{\min}$  abgeschätzt. Die Parameter  $C_{N1}$ ,  $C_{N2}$  und  $C_{N3}$  werden aus einem einzigen zyklischen Triaxialversuch ermittelt. Diese Methode wird als Mindeststandard vorgeschlagen.
3. Bestimmung der Parameter aus mindesten elf zyklischen Triaxialversuchen. Davon sind neun dränierte und zwei undräßierte Versuche. Die dränierten Triaxialversuche werden für die Ermittlung von  $C_{\text{ampl}}$ ,  $C_e$ ,  $C_p$ ,  $C_Y$ ,  $C_{N1}$ ,  $C_{N2}$  und  $C_{N3}$  verwendet. Zwei undräßierte Versuche sind für die Bestimmung der

Steifigkeitsparameter nötig. Mit den Laborversuchen werden die Parameter genau kalibriert. Daher wird diese Methode für die Ermittlung der Parameter bei ausführlicher Untersuchung unbedingt empfohlen.

In diesem Abschnitt wird die Parameterbestimmung aus den zyklischen Triaxialversuchen erläutert. Es sind mindestens neun dränierte zyklische Triaxialversuche mit Kraftsteuerung und jeweils  $10^5$  Lastzyklen notwendig. Die Versuche werden in vier Reihen eingeteilt, in denen jeweils ein Parameter variiert wird. Eine schematische Darstellung der Spannungspfade während der zyklischen Belastung wird in der Abbildung 6.6 gezeigt. Dabei wird die Amplitude  $q^{\text{ampl}}$ , die Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$ , das Spannungsverhältnis  $\eta^{\text{av}} = q^{\text{av}}/p^{\text{av}}$  und der mittlere Druck  $p^{\text{av}}$  variiert. Innerhalb einer Versuchsreihe werden die anderen Parameter konstant gehalten.

Zusätzlich wird die Ermittlung der Parameter  $C_{\pi 1}$  und  $C_{\pi 2}$  anhand der Ergebnisse von multidirektionalen Einfachscherversuchen mit einer Änderung der Scherrichtung erklärt.

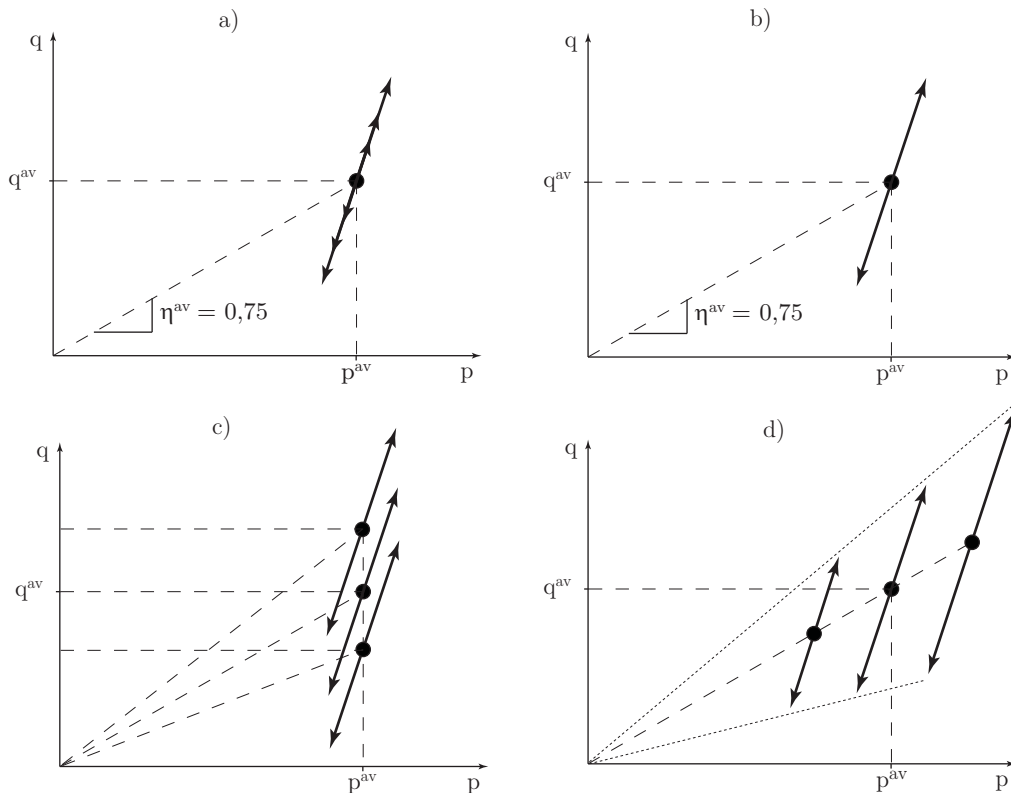


Abbildung 6.6: Schematische Darstellung der Spannungspfade im zyklischen Triaxialversuch. a) Variation der Amplitude, b) Variation der Lagerungsdichte, c) Variation des Spannungsverhältnisses, d) Variation des mittleren Drucks

Im zyklischen Triaxialversuch wird der erste Zyklus (irregulärer Zyklus) aufgrund seiner signifikant großen Verformung nicht im HCA-Modell betrachtet. Dabei wird nur die Akkumulation der regulären Zyklen berücksichtigt. Demzufolge wird für die Bestimmung der Parameter des Akkumulationsmodells nur die Verformung der regulären Zyklen verwendet. Die Dehnung während des ersten Zyklus wird von der

totalen Aukkuulationsdehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$  abgezogen. Der Zyklenzähler  $N$  fängt mit den regulären Zyklen an ( $N = 0$  zu Beginn des zweiten Zyklus).

### 6.5.1.1 Parameter $C_{\text{ampl}}$ und $C_e$

Die beiden Parameter  $C_{\text{ampl}}$  und  $C_e$  werden zuerst ermittelt. Weil für die Berechnung von  $C_{\text{ampl}}$  die Funktion  $f_e$  mit dem Parameter  $C_e$  und für die Bestimmung von  $C_e$  die Funktion  $f_{\text{ampl}}$  mit dem Parameter  $C_{\text{ampl}}$  benötigt wird, muss die Auswertung dieser beiden Parameter iterativ erfolgen. Dafür wird der Parameter  $C_e$  als erste Schätzung mit  $C_e = 0,95 \cdot e_{\text{min}}$  angenommen. Bei der Bestimmung der Parameter  $C_{\text{ampl}}$  werden die zyklischen Triaxialversuche mit unterschiedlichen Amplituden herangezogen. Die bleibende Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$  wird durch die Teilfunktion  $\bar{f}_e$  dividiert, um die Ergebnisse vom Einfluss der unterschiedlichen Anfangslagerungsdichte zu bereinigen. Für die Berechnung von  $\bar{f}_e$  wird der abgeschätzte  $C_e$  und die gemittelte Porenzahl  $\bar{e}$  verwendet:

$$\bar{e} = \frac{1}{N} \int e(N) dN \quad (6.50)$$

Die Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  wird auch über die Anzahl der Zyklen gemittelt, da die Dehnungsamplitude bei Kraftsteuerung sich leicht mit der Zyklenzahl verändern kann.

$$\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}} = \frac{1}{N} \int \varepsilon^{\text{ampl}}(N) dN \quad (6.51)$$

Die normierte Akkumulationsdehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}/\bar{f}_e$  wird für verschiedene Zyklenzahlen gegen die Dehnungsamplitude  $\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}}$  in einem Diagramm aufgetragen (Abbildung 6.7a). Die Daten für eine bestimmte Zyklenzahl  $N$  werden mit der Funktion

$$f = k_N (\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}})^{C_{\text{ampl}}} \quad (6.52)$$

angepasst (durchgezogene Linien, Abbildung 6.7). Dabei ist  $k_N$  eine Anpassungskonstante, die nicht weiter verwendet wird. Der Parameter  $C_{\text{ampl}}$  ergibt sich aus der Funktion, die die Daten am besten wiedergibt.

Für die Bestimmung der Parameter  $C_e$  werden die Ergebnisse der Versuche mit unterschiedlichen Anfangslagerungsdichten verwendet. Die gemittelten Dehnungsamplitude und Porenzahl der Versuche werden nach der Gleichung 6.50 und 6.51 errechnet. Die normierte Akkumulationsdehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}/\bar{f}_{\text{ampl}}$  wird als Funktion der gemittelten Porenzahl  $\bar{e}$  für unterschiedliche Zyklenzahlen aufgetragen (Abbildung 6.7b). Die dargestellten Punkte für eine bestimmte Zyklenzahl werden mit der Funktion

$$f = k_N \frac{(C_e - \bar{e})^2}{1 + \bar{e}} \quad (6.53)$$

angepasst. Der hier gewonnene Parameter  $C_e$  wird für die Berechnung von  $C_{\text{ampl}}$  wieder verwendet. Die Prozedur wird solange wiederholt, bis der Unterschied der Parameter zwischen den Berechnungsschritten unbedeutend klein ist.

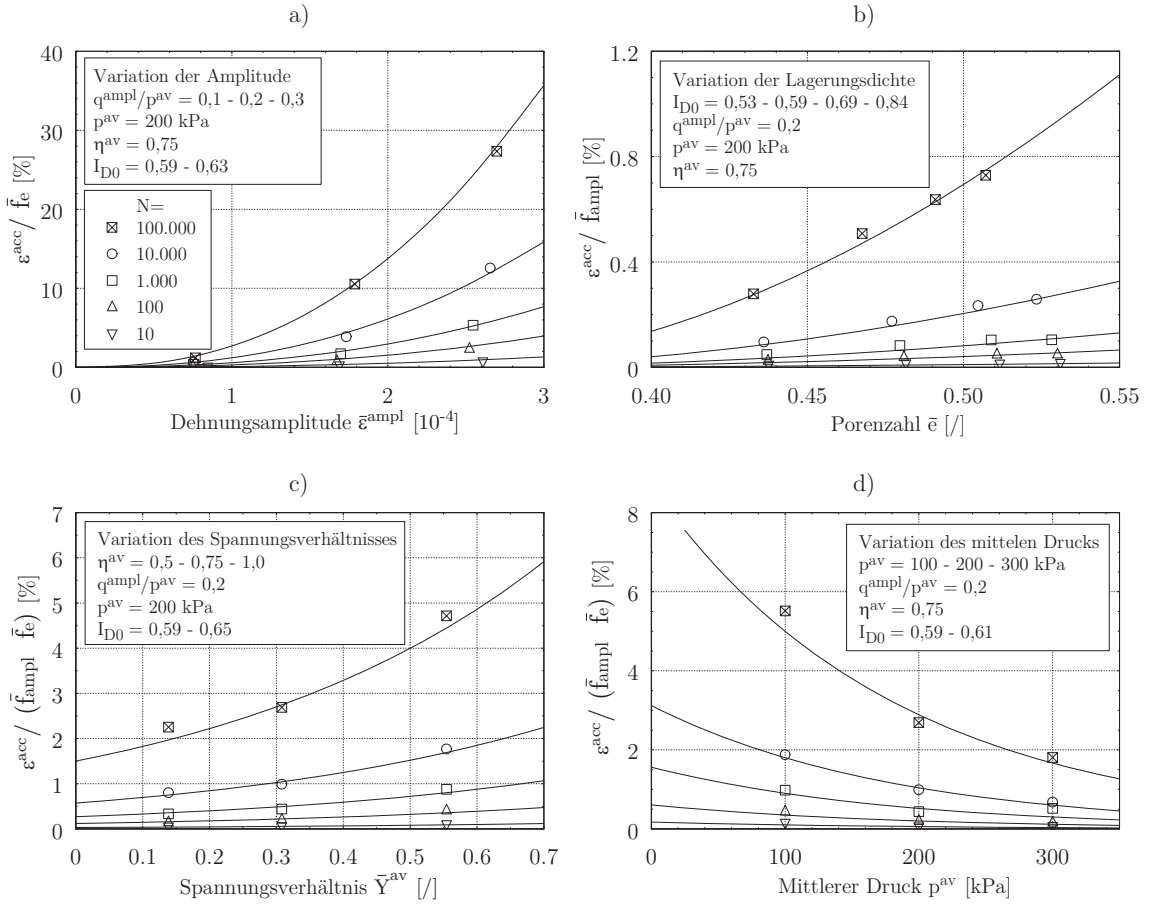


Abbildung 6.7: Ergebnisse der dränierten zyklischen Triaxialversuche mit Berliner Sand, Variation der Amplitude (a), Lagerungsdichte (b), Spannungsverhältnis (c), mittleren Druck (d)

### 6.5.1.2 Parameter $C_Y$

Weiterhin wird der Parameter  $C_Y$  aus den Versuchen mit Variation der Spannungsverhältnisse kalibriert. Dabei werden die Akkumulationsdehnungen  $\varepsilon^{\text{acc}}$  durch die Teilfunktionen  $\bar{f}_{\text{ampl}}$  und  $\bar{f}_e$  dividiert und gegen das Spannungsverhältnis  $\bar{Y}^{\text{av}}$  in einem Diagramm dargestellt (Abbildung 6.7c). Aus der Anpassung der Daten für eine bestimmte Zyklenanzahl mit der Funktion

$$f = k_N \exp(C_Y \bar{Y}^{\text{av}}) \quad (6.54)$$

erhält man den Parameter  $C_Y$ .

### 6.5.1.3 Parameter $C_p$

Der Parameter  $C_p$  wird aus den Versuchen mit unterschiedlichen mittleren Drücken ermittelt. Dabei werden die Spannungsamplituden mit den mittleren Drücken  $p^{\text{av}}$  so variiert, dass das Amplitudenverhältnis  $\zeta = q^{\text{ampl}}/p^{\text{ampl}}$  konstant bleibt. Für die



Ermittlung der Parameter werden die Akkumulationsdehnungen  $\varepsilon^{\text{acc}}$  mit den Funktionen  $\bar{f}_{\text{ampl}}$  und  $\bar{f}_e$  normiert und über den mittleren Druck aufgetragen (Abbildung 6.7d). Die Anpassung der Funktion

$$f = k_N \exp \left[ -C_p \left( \frac{p^{\text{av}}}{100 \text{ kPa}} - 1 \right) \right] \quad (6.55)$$

an die gemessenen Punkte liefert den Parameter  $C_p$ .

#### 6.5.1.4 Parameter $C_{N1}$ , $C_{N2}$ und $C_{N3}$

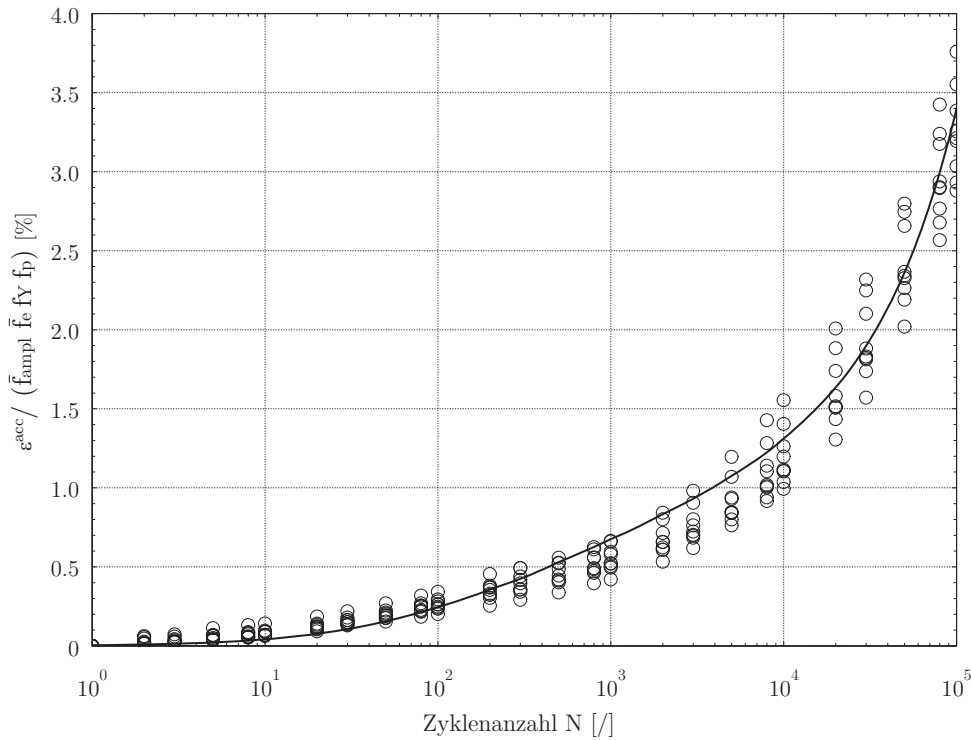


Abbildung 6.8: Ermittlung der Parameter  $C_{N1}$ ,  $C_{N2}$  und  $C_{N3}$  für Berliner Sand mit der Anpassungsfunktion  $f_N$  (Gleichung 6.56, durchgezogene Kurve)

Nach der Bestimmung der Parameter  $C_{\text{ampl}}$ ,  $C_e$ ,  $C_p$  und  $C_Y$  können die Parameter  $C_{N1}$ ,  $C_{N2}$  und  $C_{N3}$  kalibriert werden. Dazu werden alle durchgeführten Versuche herangezogen. Die Akkumulationsdehnungen werden mit den Teilfunktionen  $\bar{f}_{\text{ampl}}$ ,  $\bar{f}_e$ ,  $f_Y$  und  $f_p$  dividiert und über der Zyklenzahl aufgetragen (Abbildung 6.8). Die Parameter  $C_{N1}$ ,  $C_{N2}$  und  $C_{N3}$  ergeben sich aus der Anpassungsfunktion  $f_N$ :

$$f_N = C_{N1} [\ln(1 + C_{N2}N) + C_{N3}N] \quad (6.56)$$

#### 6.5.1.5 Parameter $C_{\pi1}$ und $C_{\pi2}$

Für die Bestimmung von  $C_{\pi1}$  und  $C_{\pi2}$  werden Ergebnisse aus multidirektionalen Einfachscherversuchen herangezogen. Dazu werden mindestens fünf Versuche mit und

drei Versuche ohne Änderung der Polarisierung benötigt. Die Versuche ohne Polarisationswechsel werden als Referenzversuche und für die Ermittlung von  $f_\pi$  verwendet. Alle Proben werden mit gleicher Anfangslagerungsdichte und um die Nulllage getestet. In den multidirektionalen Versuchen wird ein 90°-Polarisationswechsel durchgeführt. Bei den Referenzversuchen wird eine identische Belastung  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  wie in dem dazugehörigen multidirektionalen Versuch aufgebracht.

Für die Ermittlung des Parameters  $C_{\pi 1}$  werden die Ergebnisse von drei Versuchen mit unterschiedlicher Lastamplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  verwendet. In den Versuchen wird nach derselben Anzahl von Zyklen  $N_P$  die Polarisierung geändert. Für die Berechnung von  $f_\pi$  werden die Akkumulationsrate  $\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}$  der Multidirektional- und Referenzversuche mit den Funktionen  $f_e$  und  $f_{\text{ampl}}$  (Tabelle 6.2) normiert, um die leichte Abweichung in den Ergebnissen aufgrund der unterschiedlichen Anfangslagerungsdichte zu bereinigen. Dazu wird die aktuelle Porenzahl  $e$  (Porenzahl bei Zyklen  $N$ ) und die aktuelle Amplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  verwendet (nicht die gemittelten Werte). Die Funktion  $f_\pi$  kann mit der Gleichung:

$$f_\pi = \frac{(\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}/f_e f_{\text{ampl}})_{\alpha \neq 0}}{(\dot{\varepsilon}^{\text{acc}}/f_e f_{\text{ampl}})_{\alpha = 0}} \quad (6.57)$$

berechnet werden.  $C_{\pi 1}$  stellt den Unterschied von  $f_\pi$  direkt vor und nach der Polarisationsänderung dar. In der Abbildung 6.9 wird die Ermittlung von  $C_{\pi 1}$  für Berliner Sand anhand der Ergebnisse von fünf Multidirektionalversuchen gezeigt. Der Wert von  $C_{\pi 1}$  wurde als Mittelwert von fünf Versuchen gerechnet.

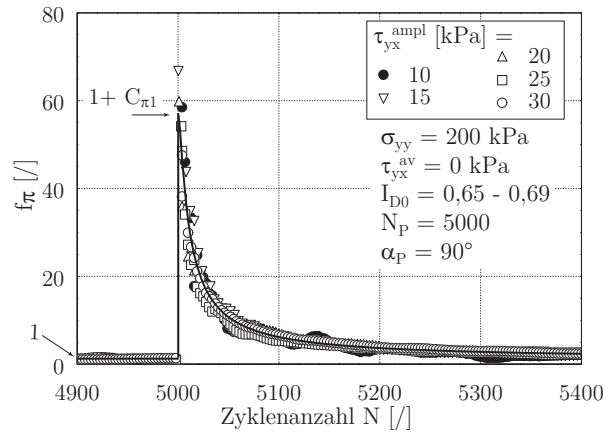


Abbildung 6.9: Ermittlung von  $C_{\pi 1}$  für Berliner Sand

Der Parameter  $C_{\pi 2}$  wird aus den Ergebnissen von Versuchen mit Polarisationswechsel bei unterschiedlicher Zyklenanzahl  $N_P$  bestimmt. Dazu werden mindestens drei Multidirektional- und ein Referenzversuch benötigt. Die Funktion  $f_\pi$  für den jeweiligen Versuch wird nach der Gleichung 6.57 berechnet und gegen die Zyklenanzahl ab den Polarisationswechseln  $\Delta N_P$  aufgetragen. Der Parameter  $C_{\pi 2}$  wird durch die Anpassung der Funktion

$$f_\pi = 1 + C_{\pi 1} \cdot \sin \alpha \quad \text{mit} \quad \alpha = \frac{\pi/2 \cdot C_{\pi 2} \cdot N_P}{\Delta N_P + C_{\pi 2} \cdot N_P} \quad (6.58)$$

an die Versuchsdaten ermittelt. In der Abbildung 6.10 ist die Ermittlung von  $C_{\pi 2}$  für Berliner Sand dargestellt.

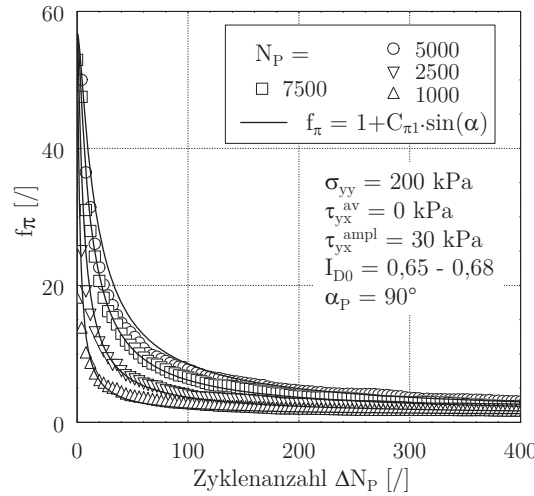


Abbildung 6.10: Ermittlung von  $C_{\pi 2}$  für Berliner Sand

#### 6.5.1.6 Zusammenstellung der HCA-Parameter für Berliner Sand

Die Materialkonstanten für das HCA-Modell in der vorliegenden Arbeit wurden aus den zyklischen Triaxialversuchen mit jeweils  $10^5$  Zyklen ermittelt. Zusätzlich wurden die Parameter  $C_{\pi 1}$  und  $C_{\pi 2}$  anhand der Ergebnisse von Einfachscherversuchen mit Änderung der Lastrichtung bestimmt. Die Ergebnisse der Laborversuche und ihre Nachrechnung werden im Abschnitt 5.3 und 6.5.3 präsentiert. Die Tabelle 6.3 fasst die ermittelten Materialkonstanten zusammen.

| $C_{\text{ampl}}$ | $C_{N1}$          | $C_{N2}$ | $C_{N3}$            | $C_p$ | $C_Y$ | $C_e$ | $C_{\pi 1}$ | $C_{\pi 2}$          |
|-------------------|-------------------|----------|---------------------|-------|-------|-------|-------------|----------------------|
| 2,05              | $2 \cdot 10^{-3}$ | 0,022    | $8,5 \cdot 10^{-5}$ | 0,55  | 1,96  | 0,325 | 56          | $1,25 \cdot 10^{-3}$ |

Tabelle 6.3: Zusammenstellung der Materialkonstanten für Berliner Sand

#### 6.5.1.7 Bestimmung der Steifigkeitsparameter und des Reibungswinkels

Für die Bestimmung der Steifigkeitsparameter werden zwei zyklische undrännierte Triaxialversuche durchgeführt. Die undrännierten Versuche sollen gleiche Versuchsparameter ( $I_{D0}$ ,  $p^{\text{av}}$ ,  $q^{\text{av}}$  und  $q^{\text{ampl}}$ ) wie zwei von den drännierten Versuchen haben. Der Kompressionsmodul wird mit der Gleichung

$$K = \frac{\dot{u}}{\dot{\epsilon}_v^{\text{acc}}} \quad (6.59)$$

berechnet. Darin ist  $\dot{u}$  die Rate der Porenwasserdruckakkumulation aus dem undrännierten Versuch und  $\dot{\epsilon}_v^{\text{acc}}$  die Rate der volumetrischen Dehnungsakkumulation

aus dem dränierten Versuch. Alternativ kann der Kompressionsmodul nach der Gleichung 6.35 (Abschnitt 6.3.7) berechnet werden. Für die praktische Anwendung kann hier die Querkontraktionszahl  $\nu = 0,32$  angenommen werden.

Für die numerische Berechnung in der vorliegenden Arbeit wurde der Kompressionsmodul nach der Gleichung 6.36 mit  $K = A \cdot (p_{atm})^{1-n} p^n$  (nach Wichtmann et al. [112]) abgeschätzt. Für Berliner Sand wurde  $A = 467$  und  $n = 0,46$  angenommen.

Der Reibungswinkel  $\varphi_c$  kann aus einem Schüttkegelversuch (Herle [38]) oder undränierten Triaxialversuchen (DIN 18137-2 [27]) ermittelt werden. Für die Bestimmung von  $\varphi_c$  wird in der vorliegenden Arbeit ein Schüttkegelversuch angewendet.

### 6.5.2 Parameter für das hypoplastische Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung

Für das hypoplastische Stoffgesetz werden acht Materialkonstanten  $\varphi_c$ ,  $h_s$ ,  $n$ ,  $e_{d0}$ ,  $e_{c0}$ ,  $e_{i0}$ ,  $\alpha$  und  $\beta$  benötigt. Die Ermittlung der einzelnen Parameter kann aus den Standardlaborversuchen erfolgen (Herle [38]). In diesem Abschnitt wird die Ermittlung der Materialkonstanten kurz erläutert.

- Wahlweise kann der kritische Reibungswinkel  $\varphi_c$  aus einem Schüttkegelversuch oder aus undränierten Triaxialversuchen (DIN 18137-2 [27]) ermittelt werden. Aus dem Schüttkegelversuch ergibt sich der Reibungswinkel  $\varphi_c$  als Neigung der Kegelflanke. Anstelle des Schüttkegelversuchs können auch rotierende Hohlzylinder für die Bestimmung von  $\varphi_c$  eingesetzt werden (Rackwitz [84]).
- Die Grenzporozitäten  $e_{d0}$ ,  $e_{c0}$  und  $e_{i0}$  beschreiben das Porenvolumen im drucklosen Zustand ( $p = 0$ ). Dieser Zustand ist bei den Laborversuchen jedoch schwierig umzusetzen. Daher kann die Grenzporozität nach der Porozität bei lockerster und dichtester Lagerung (DIN 18126 [26]) abgeschätzt werden (Herle [38]):  $e_{i0} = 1,15 \cdot e_{\max}$ ,  $e_{c0} = e_{\max}$  und  $e_{d0} = e_{\min}$ .
- Für die Bestimmung der Konstante  $\beta$  sind die Ergebnisse von Ödometerversuchen mit Anfangsporozität  $e_{\min}$  und  $e_{\max}$  heranzuziehen. Nach der Parameterstudie von Herle [38] hat die Veränderung von  $\beta$  nur geringen Einfluss auf die Ergebnisse. Daher kann für  $\beta$  ein Wert von 1,0 angesetzt werden.
- Die Granulathärte  $h_s$  und der Exponent  $n$  werden aus dem Ödometerversuch mit lockerster Lagerungsdichte bestimmt. Durch die Anpassung der Kompressionskurve mit der Funktion

$$\frac{e}{e_0} = \exp \left[ - \left( \frac{3p}{h_s} \right)^n \right] \quad (6.60)$$

erhält man die beiden Konstanten.

Alternativ zu dieser Standardmethode wurden auch andere Vorgehensweisen für die Bestimmung von  $h_s$  und  $n$  verwendet (Rackwitz [84]). Dabei wur-

den die Ergebnisse der Ödometerversuche verwendet. Zuerst werden die Versuchsergebnisse in der Form normiert, in der die Setzung und die vertikale Spannung auf deren jeweiligen maximalen Wert bezogen werden. Die Parameter  $\varphi_c$ ,  $e_{d0}$ ,  $e_{c0}$ ,  $e_{i0}$  und  $\beta$  werden wie oben beschrieben ermittelt. Die Granulathärte  $h_s$  kann aus der Ungleichförmigkeit  $U$  und dem mittleren Korndurchmesser  $d_{50}$  abgeschätzt werden (Herle [38]). Anschließend werden die Ödometerversuche mit einer Variation des Parameters  $n$  simuliert, bis eine Übereinstimmung von gerechneten und gemessenen Ergebnissen erreicht ist. Die Bestimmung der Stoffkonstante nach dieser Methode ist relativ aufwendig und nur bedingt zu empfehlen.

- Den Einfluss der Lagerungsdichte auf den Peak-Reibungswinkel  $\varphi_P$  wird über die Konstante  $\alpha$  berücksichtigt. Für die Bestimmung von  $\alpha$  werden dränierte Triaxialversuche mit dichtester Lagerung durchgeführt. Die Konstante  $\alpha$  berechnet sich aus

$$\alpha = \frac{1}{\ln r_e} \ln \left[ 6 \frac{(K_P + 2)^2 + a^2 K_P (K_P - 1 - \tan \nu_P)}{a (5K_P - 2) (K_P + 2) \sqrt{4 + 2(1 + \tan \nu_P)^2}} \right] \quad (6.61)$$

Darin ist  $K_P = \sigma_1/\sigma_3$  das maximalen Spannungsverhältnis.  $r_e = (e - e_d)/(e_c - e_d)$  wird mit den Porenzahlen  $e$ ,  $e_c$ ,  $e_d$  nach der Gleichung 6.46 für den Peak-Zustand berechnet und

$$a = \frac{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi_c)}{2\sqrt{2} \sin \varphi_c} \quad (6.62)$$

$$\tan \nu_P = 2 \frac{(K_P - 4) + A K_P (5K_P - 2)}{(5K_P - 2) (1 + 2A)} - 1 \quad (6.63)$$

$$A = \frac{a^2}{(K_P + 2)^2} \left[ 1 - \frac{K_P (4 - K_P)}{5K_P - 2} \right] \quad (6.64)$$

Die Erweiterung der Hypoplastizität um die intergranulare Dehnung erfordert fünf weitere Stoffkonstanten:  $\beta_r$ ,  $\chi$ ,  $R$ ,  $m_T$  und  $m_R$ . Für die Ermittlung dieser Parameter sind drei statische Triaxialversuche mit veränderten Spannungspfaden durchzuführen (Niemunis [73]). Dabei werden die Spannungspfade in der  $p$ - $q$ -Ebene während des Versuchs um  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  und  $180^\circ$  gegen den aktuellen Verlauf gedreht. Eine schematische Darstellung der Versuche und Vorgehensweise der Parameterbestimmung wurde von Niemunis [73] beschrieben.

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird eine alternative Methode zur Bestimmung der zusätzlichen Stoffkonstanten verwendet. Die Konstanten für die intergranulare Dehnung wurden durch eine Anpassung an die zyklischen Triaxialversuche mit unterschiedlichen Amplituden ermittelt. Dabei wurden die ersten zwei Zyklen eines Versuchs nachgerechnet. Bei der Berechnung wurde  $R = 10^{-4}$ ,  $\chi = 6,0$  und  $\beta_r = 0,2$  gewählt und der Parameter  $m_R$  variiert, bis die gemittelte Dehnungsamplitude  $\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}}$

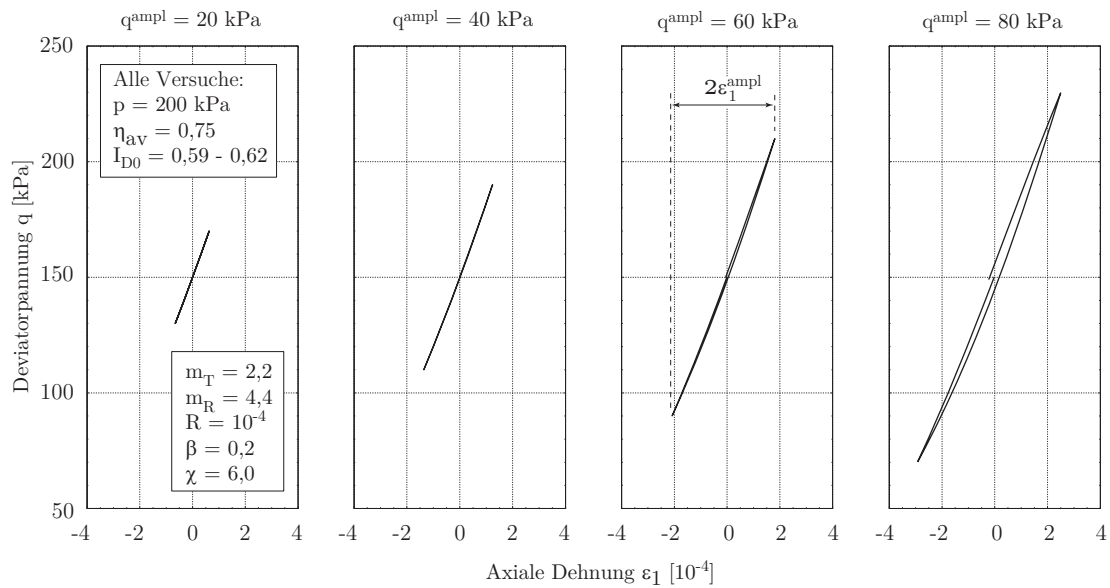


Abbildung 6.11: Zweiter Zyklus der Nachrechnung von Triaxialversuchen, Hypoplastizität mit intergranularer Dehnung, Stoffparameter nach Tabelle 6.4

aus den Laborversuchen reproduzierbar waren ( $\bar{\varepsilon}^{\text{ampl}}$  ist Mittelwert aus  $10^5$  Zyklen). Dabei wurde der Parameter  $m_T = 0,5 m_R$  angesetzt. In der Abbildung 6.11 werden beispielsweise die Spannungs-Dehnungs-Hysteresis aus den Nachrechnungen der zyklischen Triaxialversuche gezeigt. Die Ergebnisse der Nachrechnungen wurden mit denen aus Laborversuchen mit Berliner Sand verglichen und im Abschnitt 6.5.3 gezeigt. Eine ähnliche Kalibrierungsmethode wurde auch bei Wichtmann [108] angewendet.

Anhand der durchgeführten Laborversuche an Berliner Sand wurden nachfolgende Parameter für das hypoplastische Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung ermittelt:

| $\varphi_c [^\circ]$ | $h_s [MPa]$ | $n$  | $e_{d0}$ | $e_{c0}$ | $e_{i0}$ | $\alpha$ | $\beta$ |
|----------------------|-------------|------|----------|----------|----------|----------|---------|
| 31,5                 | 2300        | 0,30 | 0,391    | 0,688    | 0,791    | 0,13     | 1,0     |

| $m_R$ | $m_T$ | $R$       | $\chi$ | $\beta_r$ |
|-------|-------|-----------|--------|-----------|
| 4,4   | 2,2   | $10^{-4}$ | 6,0    | 0,2       |

Tabelle 6.4: Zusammenstellung der Stoffkonstanten der Hypoplastizität mit intergranularen Dehnung für Berliner Sand

### 6.5.3 Überprüfung der Materialkonstanten

Zur Bewertung der Prognose der Stoffmodelle mit dem ermittelten Konstantensatz wurden die Ergebnisse aus den FE-Nachrechnungen mit dem experimentellen Laborversuchen verglichen. Alle FE-Berechnungen wurden mit dem Programm ANSYS® 14.0 durchgeführt. Die Implementierung der Stoffmodelle ist im Abschnitt 7.1.2 angenähert erläutert. Die Nachrechnung der Laborversuche erfolgte mit einem vierknotigen PLANE182-Element. Das PLANE182-Element hat lineare Ansatzfunktionen, volle Integration und wird für 2D-Modellierung angewendet. Die monotonen bzw. zyklischen Triaxialversuche wurden im axialsymmetrischen Zustand simuliert.

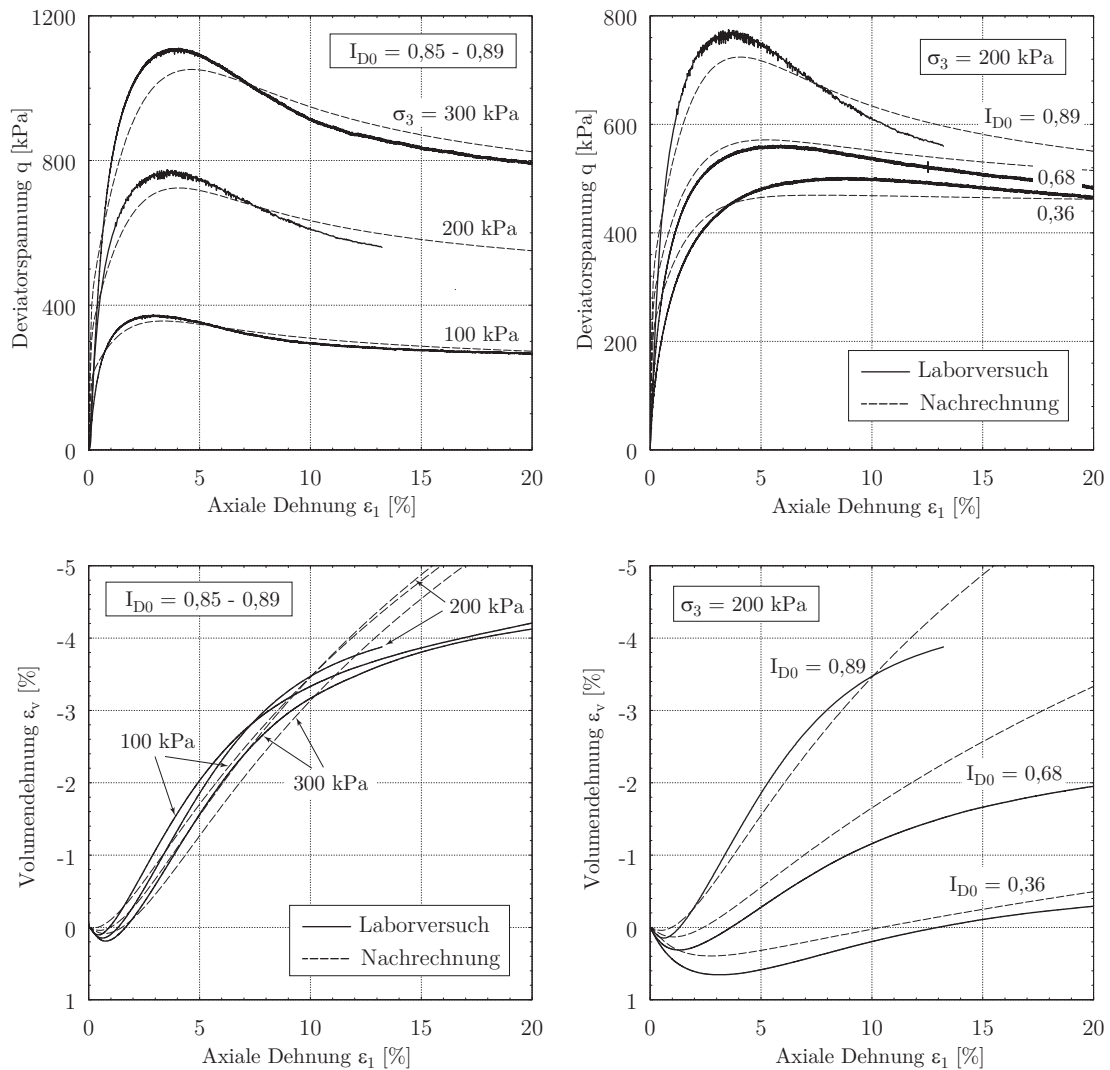


Abbildung 6.12: Nachrechnung drainierter monotoner Triaxialversuche mit dem hypoplastischen Stoffgesetz für Berliner Sand, Parameter entspricht Tabelle 6.4

Zur Überprüfung der Hypoplastizität werden die drainierten monotonen Triaxialversuche nachgerechnet. Die Abbildung 6.12 zeigt die Ergebnisse der FE-Berechnungen gegenüber den Laborversuchen. Die Ergebnisse der Rechnungen stimmen mit denen



aus Laborversuchen nicht exakt überein. Die Abweichungen sind jedoch akzeptabel. Bei den dichten Proben werden die Peak-Spannungen generell unterschätzt und bei mitteldichter Probe leicht überschätzt. Die Abweichungen zwischen prognostizierten und tatsächlichen Spannungen sind unter 5%. Die Volumendehnungen in mittel- und dichten Proben zeigen ab ca. 10% der axialen Dehnung eine zunehmende Abweichung auf. Die Laborversuche zeigen eine Tendenz zum kritischen Zustand (keine Veränderung der Porenvolumen und Spannungen bei weiterer Abscherung), während sich in der Nachrechnung das Dilatanzverhalten nach 10% der axialen Dehnung weiter ausprägt.

Die Genauigkeit des Parametersatzes für die intergranulare Dehnung wird anhand der Nachrechnung der ersten zwei Zyklen der zyklischen Triaxialversuche validiert. Die ersten beiden Zyklen aller Versuche werden mit dem Parametersatz in der Tabelle 6.4 nachgerechnet. In der Abbildung 6.13 wird die errechnete Amplitude des zweiten Zyklus gegen den Mittelwert aus  $10^5$  Zyklen von den Laborversuchen gestellt. Die FE-Berechnungen können die Ergebnisse der Laborversuche relativ gut wiedergeben.

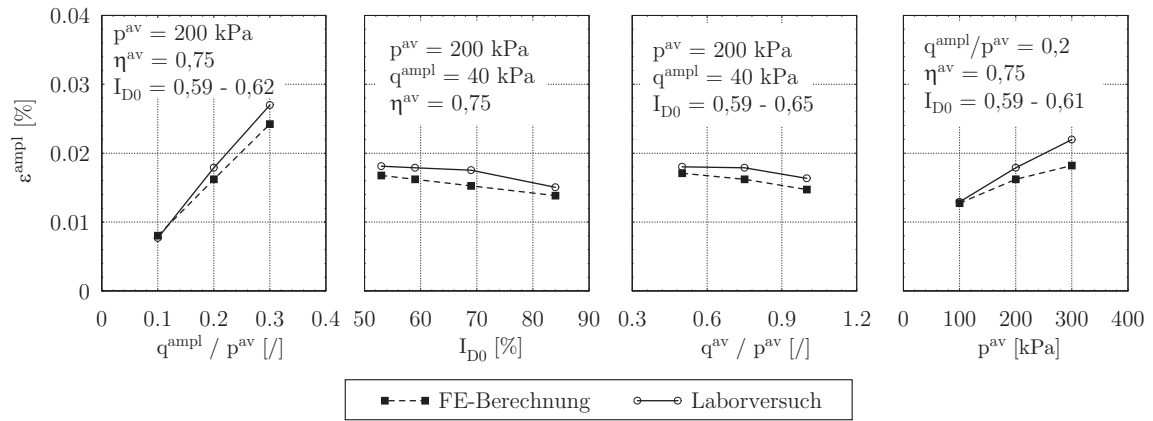


Abbildung 6.13: Amplitude der zyklischen Triaxialversuche aus den FE-Berechnungen (Parameter entspricht Tabelle 6.4) und aus den Laborversuchen (Mittelwert von  $10^5$  Zyklen)

Das Akkumulationsmodell kann mit den Ergebnissen der Handrechnung der zyklischen Triaxialversuche validiert werden. Dabei wurden die Teilfunktionen  $f_{\text{ampl}}$ ,  $f_e$ ,  $f_p$ ,  $f_Y$  (Tabelle 6.2) und  $f_N$  (Gleichung 6.11) mit dem Parametersatz aus der Tabelle 6.3 berechnet. Die Akkumulationsdehnung für die Versuche mit konstanter Spannungsamplitude kann einfach nach folgender Gleichung ermittelt werden:

$$\varepsilon^{\text{acc}}(N) = f_{\text{ampl}} f_e f_p f_Y f_N \quad (6.65)$$

Dabei werden die Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  und die Porenzahl  $e$  mit dem Mittelwert aus den Laborversuchen angenommen und als konstant über den gesamten Versuchsverlauf angesetzt (gestrichelte Kurve in Abbildung 6.14). Mit dem ermittelten Parametersatz in der Tabelle 6.3 stimmen die Ergebnisse der Nachrechnungen mit den aus den Laborversuchen sehr gut überein.



Die Qualität der Prognose von FE-Berechnungen mit dem Akkumulationsmodell in Verbindung mit dem hypoplastischem Stoffgesetz und integranularer Dehnung kann durch eine Nachrechnung der zyklischen Triaxialversuche kontrolliert werden. In der Abbildung 6.14 sind die Ergebnisse der Nachrechnung und der Laborversuche in vier Serien mit Variation jeweils eines Versuchsparameters gezeigt. Die Akkumulationsdehnung der FE-Berechnung stimmt mit den Laborversuchen sehr gut überein.

Es gibt minimale Abweichung zwischen den von Hand gerechneten Ergebnissen und denen der FE-Berechnungen (bis auf dem Versuch mit großer Spannungsamplitude). Die Abweichung wird durch die unterschiedliche Annahme der Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  und der Porenzahl  $e$  verursacht. In der FE-Berechnung wird  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  durch die Prognose der Hypoplastizität angenommen und die Porenzahl im Laufe des Versuchs ständig aktualisiert. Stattdessen werden diese beiden Parameter in der Handrechnung aus dem Laborversuch übernommen und konstant während des Versuchs gehalten.

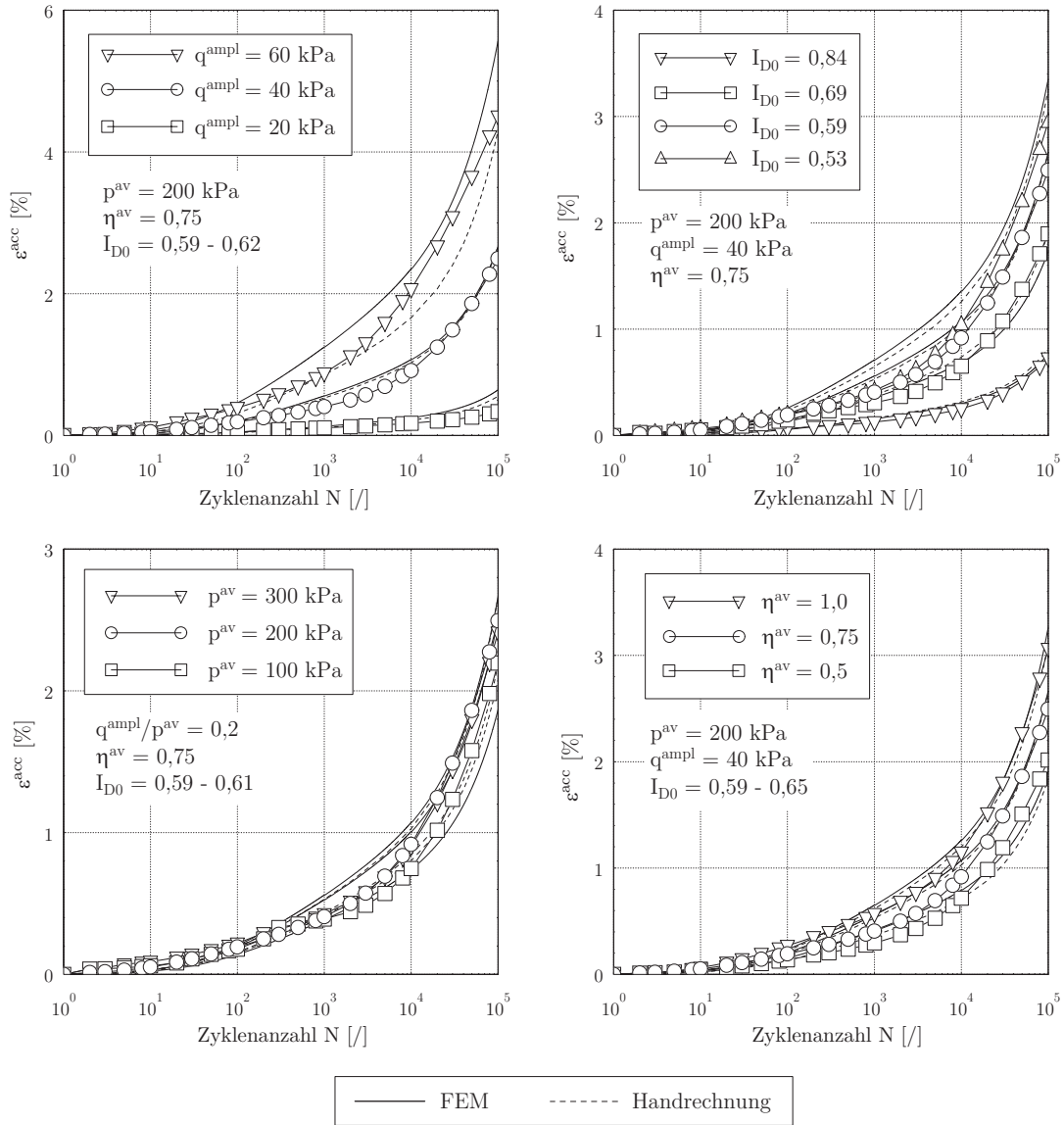


Abbildung 6.14: Nachrechnung der zyklischen Triaxialversuche mit dem Akkumulationsmodell: FE-Berechnung in Kombination mit Hypoplastizität, Parameter nach Tabelle 6.3 und 6.4; Handrechnungen, Parameter nach Tabelle 6.3

# 7 Numerische Untersuchung

## 7.1 Numerische Umsetzung

### 7.1.1 Rechenablauf

Für die FE-Berechnung wird neben dem bereits beschriebenen Hochzyklischen Akkumulationsmodell (HCA-Modell) ein konventionelles Stoffgesetz benötigt, mit dem die monotone Belastung bis zur mittleren Spannung und die ersten zwei Zyklen „explizit“ berechnet werden. Dafür wurde in der vorliegenden Arbeit das hypoplastische Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung (Niemunis & Herle [74]) eingesetzt (Abschnitt 6.4). Im zweiten Zyklus wird der Verlauf der Dehnungspfade in jedem Integrationspunkt in einem Dehnungstensor  $\mathbb{A}_\varepsilon$  aufgezeichnet. Daraus wird anschließend die Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  ermittelt. Der Algorithmus für die Berechnung von  $\mathbb{A}_\varepsilon$  und  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  wurde bereits im Abschnitt 6.3.6 detailliert beschrieben.

Die Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  ist ein wichtiger Eingangsparameter für die weiteren Rechenschritte. Die Berechnung der weiteren Zyklen erfolgt „explizit“ mit dem HCA-Modell. Dabei werden die bleibenden Dehnungen oder die Spannungsänderungen an den Integrationspunkten in Abhängigkeit vom Inkrement  $\Delta N$  der Zyklenanzahl berechnet. Das Inkrement  $\Delta N$  kann am Anfang der Berechnung klein und mit zunehmender Zyklenanzahl größer gewählt werden (z. B. am Anfang  $\Delta N = 1$  und ab  $10^5$  Zyklen  $\Delta N = 1000$ ). Während der expliziten Berechnung wird die Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  als konstant angenommen. Aufgrund der Verdichtung oder Auflockerung des Bodens kann sich  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  jedoch verändern. Die Anpassung der Dehnungsamplitude erfolgt durch die Einschaltung von implizit gerechneten Aktualisierungszyklen zwischen der expliziten Berechnung. Für die FE-Berechnung in dieser Studie werden bei den Zyklen  $N = 5, 10, 100, 1.000$  usw. Aktualisierungszyklen durchgeführt. Der Berechnungsablauf für einen Einfachscherversuch mit dem HCA-Modell wurde exemplarisch in der Abbildung 7.1 dargestellt.

### 7.1.2 Implementierung des HCA-Modells im Programm ANSYS®

Die numerischen Untersuchungen in dieser Studie wurden mit dem FEM-Programm ANSYS® 14.0 durchgeführt. Das Programm ANSYS® bietet eine breite Möglichkeit zur numerischen Simulation im Bereich der Fluidmechanik, Akustik, Thermodynamik, Piezoelektrizität und des Elektromagnetismus. Das FEM-

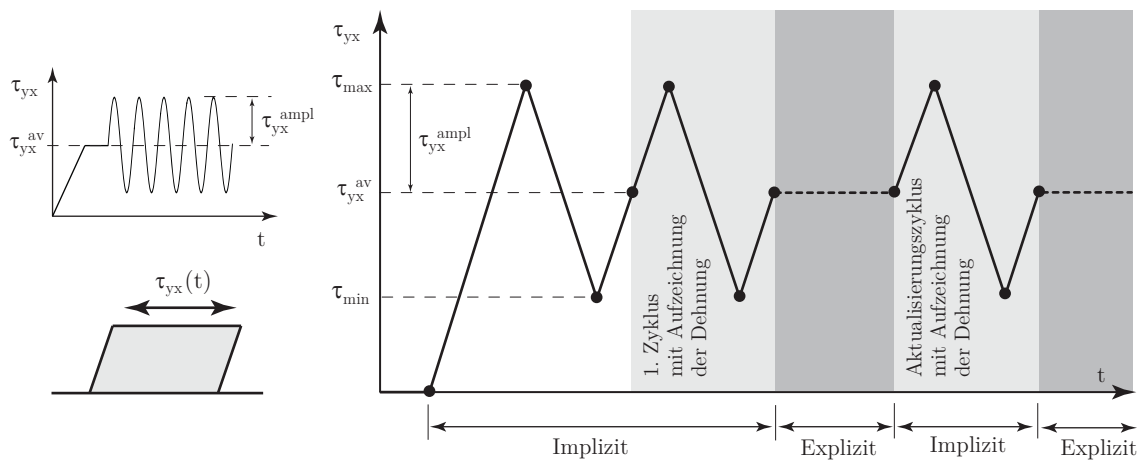


Abbildung 7.1: Schematische Darstellung des Rechenablaufs eines Einzelscherverversuchs mit dem Akkumulationsmodell

Programm ANSYS<sup>®</sup> wird auch sehr häufig für die Lösung von ingenieurtechnischen Problemen im Bereich der Strukturmechanik eingesetzt.

Im Programm ANSYS<sup>®</sup> ist eine Bibliothek mit einer Vielzahl von Elementen und Stoffgesetzen für verschiedene physikalische Problemstellungen vorhanden. Außerdem bietet ANSYS<sup>®</sup> dem Anwender die Möglichkeit, die Elementbibliothek zu erweitern oder weitere zusätzliche Stoffmodelle zu implementieren. Als Schnittstelle stellt das Programm ANSYS<sup>®</sup> eine Reihe von vordefinierten Subroutinen zur Verfügung. Für die Stoffgesetzformulierungen ist die Subroutine *UserMat* vorgesehen.

Die Implementierung des HCA-Modells erfolgt in drei Hauptteilen:

- Subroutine für die implizite Berechnung:  
Bei der Berechnung des Anfangsgleichgewichtes und des ersten Zyklus wird bei dieser Subroutine das hypoplastische Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung aufgerufen. Das hypoplastische Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung wurde von F. Rackwitz, E. Tasan und D. Aubram für das Programm ANSYS<sup>®</sup> implementiert und angewendet (Rackwitz [84], Tasan [102], Aubram [11]).
- Subroutine für die Aufzeichnung der Dehnungspfade:  
In dieser Subroutine wird auch die Subroutine mit der Hypoplastizität aufgerufen. Zusätzlich werden die berechnete Dehnungszustände während der Berechnung nach bestimmten Kriterien (Niemunis et al. [76]) als Zustandvariable für jeden Integrationspunkt gespeichert. Für die vorgesehenen Plätze in ANSYS<sup>®</sup> für die Zustandvariable ist bei eigener Implementierung eine Speicherung der Dehnungspfade mit maximal 133 aufgezeichneten Dehnungspunkten möglich. Diese Subroutine wird für die Berechnung des zweiten Zyklus und der Aktualisierungszyklen verwendet.
- Subroutine für die explizite Berechnung:  
In dieser Subroutine kommt die explizite Berechnung mit den im Abschnitt 6.3

vorgestellten Gleichungen zum Einsatz. Zu Beginn einer expliziten Berechnung wird die Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$  aus den aufgezeichneten Dehnungspunkten ermittelt. Der dazu verwendete Algorithmus (Abschnitt 6.3.6) wurde von Dr. Niemunis vom KIT implementiert und zur Verfügung gestellt.

## 7.2 Verifizierung der Implementierung des HCA-Modells

In diesem Abschnitt wird die Implementierung des HCA-Modells im Programm ANSYS® durch den Vergleich des Ergebnisses einer Beispielberechnung aus der einschlägigen Literatur verifiziert. Als Beispiel wurde die FE-Berechnung eines Zentrifugenmodellversuchs einer Flachgründung unter zyklischer Belastung nach Helm et al. [37] gewählt (Abbildung 7.2). Als Vergleich wurden die Ergebnisse der Nachrechnung desselben Beispiels von Niemunis et al. [76] und Wichtman [108] mit dem FEM-Programm ABAQUS genommen.

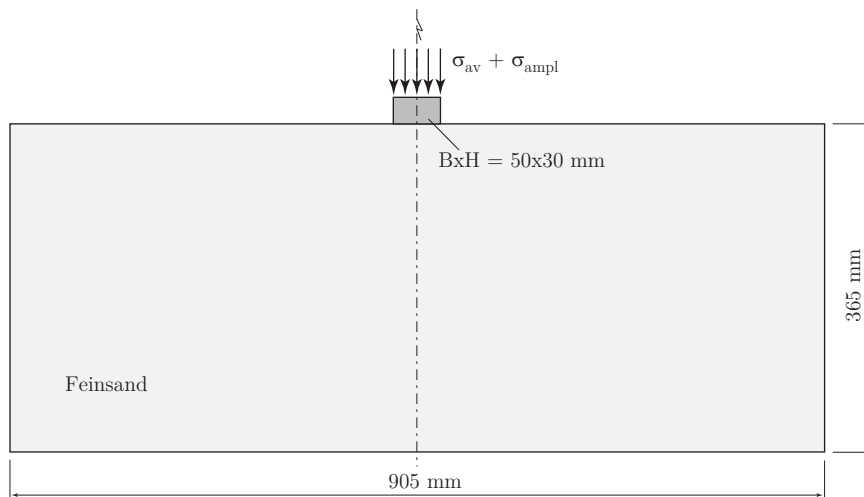


Abbildung 7.2: Abmessungen des Versuchsbehälters des Zentrifugenmodellversuchs mit 20g, nach Helm et al. [37]

### 7.2.1 Materialkonstanten

Der Zentrifugenversuch von Helm et al. [37] wurde mit einem enggestuften Feinsand ( $d_{50} = 0,21 \text{ mm}$ ,  $U = d_{60}/d_{10} = 1,95$  und  $\rho_s = 2,66 \text{ g/cm}^3$ ) durchgeführt. Für die Berechnung in dieser Studie wurde der Parametersatz für die Hypoplastizität aus Wichtmann [108] verwendet. Die Materialkonstanten der intergranularen Dehnung wurden an die Anfangssetzung und die gemessene Setzungsamplitude  $s_{\text{ampl}}$  des Modellversuchs angepasst. Die Materialkonstanten für das hypoplastische Stoffgesetz und für die intergranulare Dehnung sind der Tabelle 7.1 zu entnehmen.

| $\varphi_c [^\circ]$ | $h_s [MPa]$ | $n$  | $e_{d0}$ | $e_{c0}$ | $e_{i0}$ | $\alpha$ | $\beta$ |
|----------------------|-------------|------|----------|----------|----------|----------|---------|
| 32,8                 | 5580        | 0,30 | 0,575    | 0,908    | 1,044    | 0,12     | 1,0     |

| $m_R$ | $m_T$ | $R$       | $\chi$ | $\beta_r$ |
|-------|-------|-----------|--------|-----------|
| 4,8   | 2,4   | $10^{-4}$ | 6,0    | 0,2       |

Tabelle 7.1: Zusammenstellung der Stoffkonstanten der Hypoplastizität mit intergranularen Dehnung für Zentrifugenfeinsand (ZFS)

Die Parameter für das HCA-Modell für den ZFS wurden anhand der zyklischen Triaxialversuche kalibriert (Wichtmann [108]). In der Tabelle 7.2 werden die Materialkonstanten für das HCA-Modell zusammengefasst.

| $C_{\text{ampl}}$ | $C_{N1}$            | $C_{N2}$ | $C_{N3}$            | $C_p$ | $C_Y$ | $C_e$ | $C_{\pi1}$ | $C_{\pi2}$ |
|-------------------|---------------------|----------|---------------------|-------|-------|-------|------------|------------|
| 2,00              | $1,1 \cdot 10^{-3}$ | 0,38     | $5,3 \cdot 10^{-5}$ | 0,43  | 2,0   | 0,51  | 4,0        | 200        |

Tabelle 7.2: Zusammenstellung der Parameter für das HCA-Modell für den ZFS

### 7.2.2 Randbedingungen der FE-Berechnung

Die Simulation des Zentrifugenmodellversuchs erfolgte im Programm ANSYS<sup>®</sup> 14.0 mit vierknotigen PLANE182-Elementen im ebenen Dehnungszustand. Folgende Bedingung wurde bei der Modellierung berücksichtigt:

- Unter Ausnutzung der Symmetrie für die Einsparung der Rechnungskapazität wurde nur die Hälfte des Versuchsbehälters modelliert ( $H \times B = 9,05 \text{ m} \times 7,3 \text{ m}$ ).
- Abmessungen des Fundamentes: Breite  $b = 1,0 \text{ m}$ , Höhe  $h = 0,6 \text{ m}$ , Einbindetiefe  $t = 0 \text{ m}$  (Abbildung 7.2).
- Material des Fundamentes: Aluminium mit E-Modul  $E = 25\,000 \text{ MPa}$ ,  $\nu = 0,3$  und Wichte  $\gamma = 27 \text{ kN/m}^3$ .
- Reibungsbeiwert in der Kontaktzone zwischen Fundament und Boden  $\mu = 0,47$ .
- Die intergranulare Dehnung wurde aufgrund des Einrieselvorgangs am Anfang mit  $h_{11} = R$  und alle anderen Komponenten gleich Null angesetzt.
- Für frisch eingerieselten Sand gilt  $g_0^A = 0$ .
- Anfangslagerungsdichte  $I_{D0} = 0,9$ .
- Erdruhedruckbeiwert  $K_0 = 1 - \sin(\varphi_P) = 0,38$ .

- Mittlere Belastung auf dem Fundament  $\sigma_{av} = 89 \text{ kPa}$ , Spannungsamplitude  $\sigma_{ampl} = 75 \text{ kPa}$ .
- Das Streifenfundament wurde als ebenes Problem („*plane strain*“) modelliert.
- Die Berechnung wurde ohne Aktualisierungszyklen durchgeführt.
- Während der Berechnung mit der expliziten Methode ist die Funktion  $f_\pi = 1,0$  (ohne Änderung der Polarisierung) angesetzt.

Die Diskretisierung durch die vierknotigen Elemente erfolgte mit insgesamt 448 Elementen für den Boden und 56 Elementen für das Fundament (Abbildung 7.3 links). Die Knoten am unteren Rand waren nur in horizontaler Richtung beweglich und die Seitenknoten nur in vertikaler Richtung. Die Last  $\sigma_{av}$  und  $\sigma_{ampl}$  wurde auf den Knoten an der Fundamentoberkante aufgebracht. Die Setzung wurde als Verschiebung der Fundamentunterkante gemessen und enthielt nicht die Setzung infolge des Eigengewichtes.

### 7.2.3 Ergebnisse

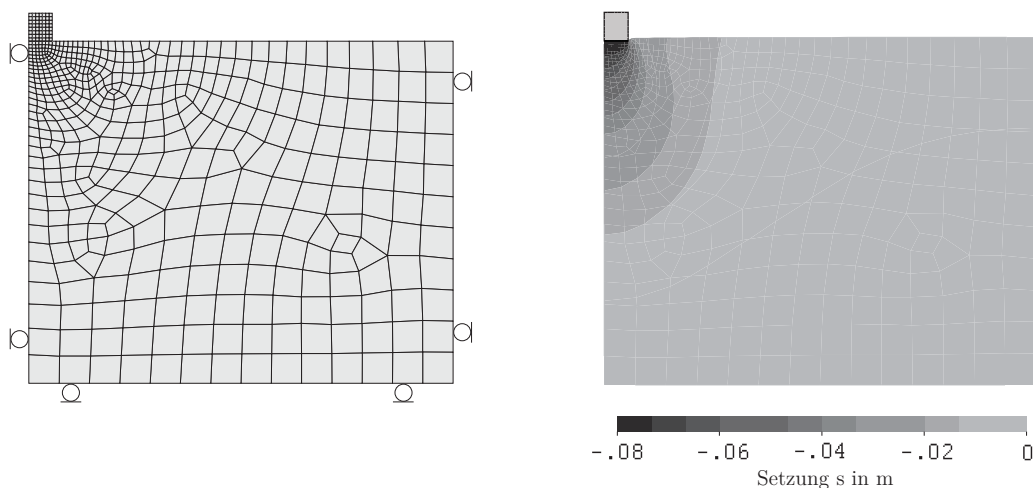


Abbildung 7.3: FE-Diskretisierung mit Randbedingungen (links) und Felder der vertikalen Verschiebung nach  $10^5$  Zyklen in m (rechts)

In der Abbildung 7.3 rechts wurden die Felder der vertikalen Verschiebung nach  $10^5$  Zyklen gezeigt (inklusive der Setzung infolge des Eigengewichtes). Es ist zu erkennen, dass im Gegensatz zum Modellversuch hier keine Aufwölbung des Bodens neben dem Fundament stattgefunden hat.

Der Verlauf der Setzung des Fundamentes  $s$  nach der Zyklen Anzahl  $N$  wird in der Abbildung 7.4 dargestellt, dabei wurde eine Anfangssetzung von  $s_0 = 0,9 \text{ cm}$  aus dem Fundamenteigengewicht abgezogen. Die Diagramme zeigen eine gute Übereinstimmung der FE-Berechnung mit dem Modellversuch. Als Amplitude der Setzung wurde beim Zentrifugenversuch ein Wert von  $s_{ampl} = 0,8 \text{ mm}$  gemessen (Wichtmann [108]). In der FE-Berechnung wurde eine Amplitude von  $s_{ampl} =$

0,82 mm festgestellt und damit ein wenig die gemessene Amplitude überschätzt. Die Setzung des Fundamentes nach dem ersten Zyklus wurde von der impliziten Berechnung mit Hypoplastizität etwas kleiner als die Setzung aus dem Modellversuch prognostiziert ( $s_{N=1} = 2,0$  mm und  $s_{N=1} = 2,4$  mm). Die akkumulierte Setzung der Nachrechnung bleibt relativ nah an der gemessenen Setzung im Verlauf des Versuchs. Nach  $10^5$  Zyklen erreicht die bleibende Setzung aus FE-Berechnung 6,95 cm und ist damit kleiner als die Endsetzung aus dem Modellversuch (7,3 cm). Die Unterschiede zwischen der FE-Berechnung und dem Modellversuch können zum Teil in den schwierigen Bedingungen bei der Durchführung eines Zentrifugenversuchs liegen (Imperfektionen und Erschütterungen während der Versuchsdurchführung).

In der Abbildung 7.4 rechts wurden die Ergebnisse der eigenen FE-Berechnung gegenüber den Nachrechnungen aus der Literatur desselben Randwertproblems gestellt. Die akkumulierte Setzung  $s(N)$  aller Nachrechnungen zeigt einen relativ ähnlichen Verlauf mit der Zyklenanzahl  $N$ . Bei der eigenen Berechnung wurde der Anfangswert  $s_{N=1}$  kleiner als der aus der einschlägigen Literatur abgeschätzt. Diese Diskrepanz liegt vermutlich an den unterschiedlichen Versionen der Hypoplastizität für die implizite Berechnung. Bei der Berechnung von Wichtmann wurde das hypoplastische Stoffgesetz mit erhöhter Schubsteifigkeit verwendet (Wichtmann [108]).

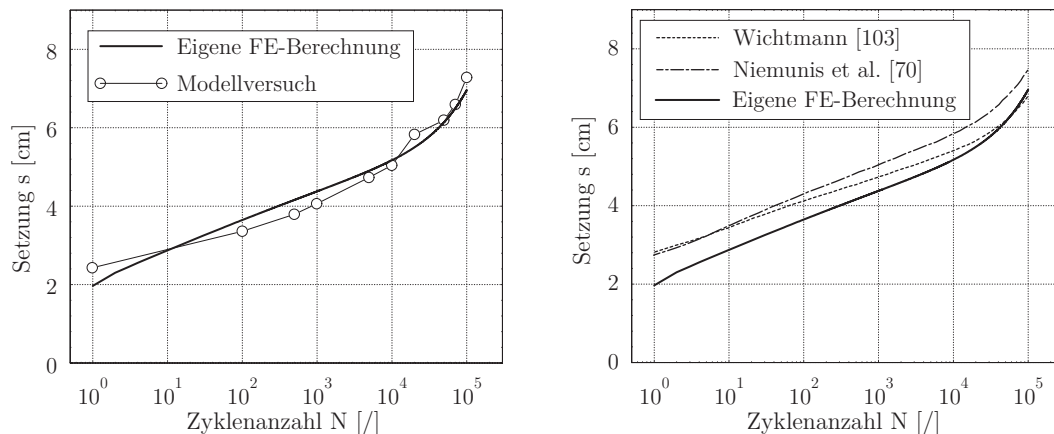


Abbildung 7.4: Akkumulierte Setzung des Fundamentes aus der eigenen FE-Berechnung im Vergleich mit dem Versuchsergebnis nach Helm et al. [37] (links) und mit den Ergebnissen von Wichtmann [108], Niemunis et al. [76]

### 7.3 Validierung des modifizierten HCA-Modells

Das modifizierte HCA-Modell wird für unterschiedliche Randbedingungen validiert. Dabei werden die im Kapitel 5 präsentierten Einfeldversuche nachgerechnet. Im Folgenden werden die Ergebnisse der Nachrechnung sowohl der unidirektionalen Versuche (Versuche ohne Änderung der Belastungsrichtung) als auch der multidirektionalen Versuche (Versuche mit Änderung der Belastungsrichtung) vorgestellt.



### 7.3.1 Versuche ohne Änderung der Belastungsrichtung

#### 7.3.1.1 Materialkonstanten und Randbedingungen

Für die Simulation der unidirektionalen Einzelscherversuche wurde im Programm ANSYS® ein Element PLANE182 eingesetzt. Dabei wurden die Materialkonstanten für das hypoplastische Stoffgesetz nach der Tabelle 6.4 und für das HCA-Modell nach der Tabelle 6.3 verwendet. Die Bestimmung dieser Parameter für Berliner Sand wurde bereits im Abschnitt 6.5 detailliert beschrieben. Folgende Randbedingungen wurde bei der Modellierung berücksichtigt:

- Die Berechnung wurde als ebenes Problem durchgeführt.
- Die unteren Knoten wurden in beiden Richtungen festgehalten.
- Die Verschiebungen der oberen Knoten sind in beide Richtungen identisch.
- Der Anfangswert der intergranularen Dehnung wurde gleich Null angesetzt.
- Für frisch eingerieselten Sand wurde  $g_0^A = 0$  genommen.
- Der Erdruckbeiwert wurde nach der Jaky-Formel mit  $K_0 = 1 - \sin(\alpha_P) = 0,35$  angesetzt.
- Bei den Zyklen 5, 10, 100, 1.000 und 10.000 wurden Aktualisierungszyklen eingeführt.
- Bei der expliziten Berechnung mit dem HCA-Modell wurde am Anfang mit einem Intervall von  $\Delta N = 1$  gerechnet. Ab 1.000 Zyklen wurde  $\Delta N = 10$  und ab 10.000 Zyklen  $\Delta N = 100$  angesetzt.

#### 7.3.1.2 Ergebnisse

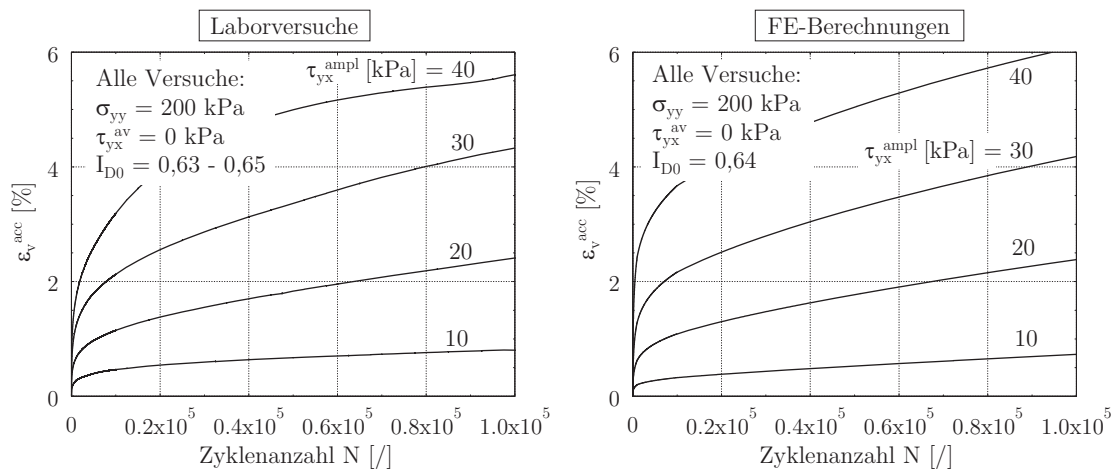


Abbildung 7.5: Volumetrische Dehnung in Abhängigkeit der Lastamplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  in Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)

Der Einfluss der Schubspannungsamplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  auf die volumetrische Dehnung wurde in der Abbildung 7.5 gezeigt. Dabei wurden die Ergebnisse der Laborversuche (links) gegenüber der FE-Berechnung (rechts) zusammengestellt. Es ist zu erkennen, dass die FE-Nachrechnungen mit den Laborversuchen sehr gut übereinstimmen.

In der Abbildung 7.6 wird die akkumulierte Dehnung der Versuche mit unterschiedlicher Lagerungsdichte dargestellt. Bis auf dem Versuch mit  $I_{D0} = 0,37$  passen die prognostizierten Dehnungen und die Messwerte sehr gut zusammen. Die Abweichungen der Volumendehnungen nach  $10^4$  Zyklen betragen hier weniger als 10%. Die Dehnung der locker gelagerte Probe mit  $I_{D0} = 0,37$  wurde überschätzt. Es liegt vermutlich an der verwendete Einbaumethode für die lockere Probe. Hier wurde der Sand durch einen Trichter ohne Fallhöhe in die Mitte der Probenzelle eingerieselt. Wie bei einem Schüttkegelversuch haben die größeren Sandkörner die Tendenz, an den Flanken des Kegels nach außen zu rollen. An den Rändern der Probe befinden sich mehr gröbere Körner. Dadurch entstand eine inhomogene Probe. Es wird daher eine alternative Einbaumethode für die Präparation der lockeren Probe empfohlen. Nach jedem Aktualisierungszyklus wird die Dehnungsamplitude erneuert. Dabei wurde die Amplitude stets nach unten korrigiert. Dies verursacht einen Knick in der Dehnungskurve (Abbildung 7.6 rechts). Der Knick ist auffälliger bei den Versuchen mit kleinerer Anfangslagerungsdichte.

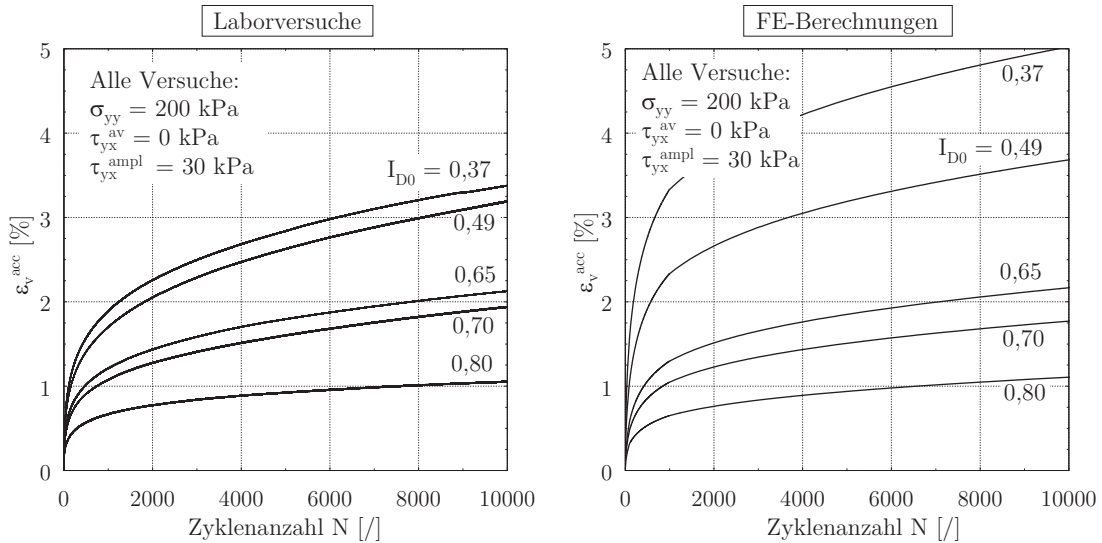


Abbildung 7.6: Volumetrische Dehnung in Abhängigkeit der Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$  in Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)

Die Nachrechnungen der Versuche mit unterschiedlicher Normalspannung  $\sigma_{yy}$  (Abbildung 7.7) zeigen kein zufriedenstellendes Ergebnis. Für Versuche mit  $\sigma_{yy} < 200$  kPa steigt die akkumulierte Dehnung mit zunehmender Normalspannung. Diese entspricht auch der Tendenz der Laborversuche. Für größere Normalspannung  $\sigma_{yy} > 200$  kPa nimmt die Akkumulation im Gegensatz zum Laborversuch wieder ab. Die Intensität der Akkumulation kann mit dem HCA-Modell hier nur teilweise zutreffend prognostiziert werden.

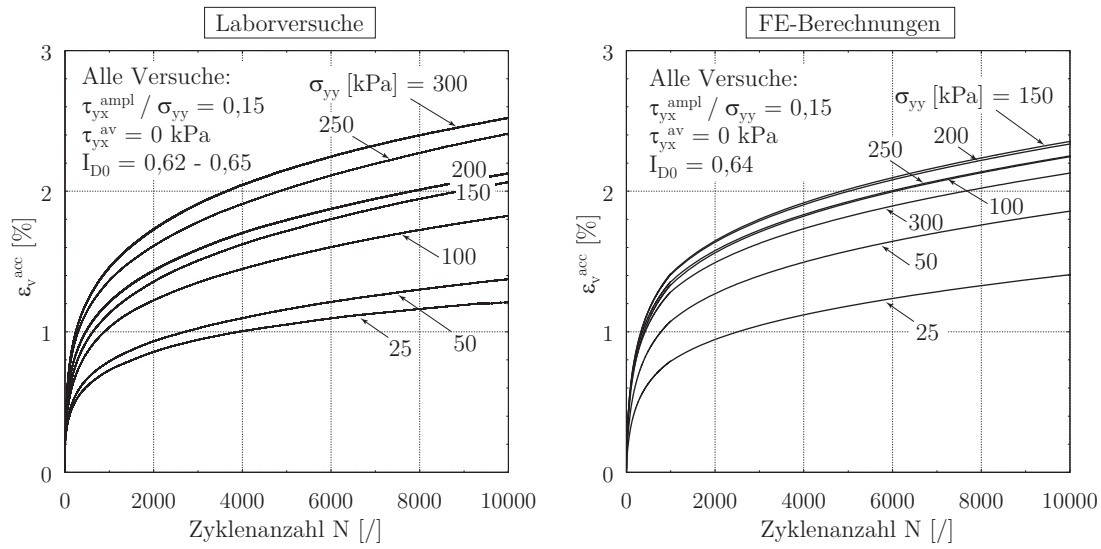


Abbildung 7.7: Volumetrische Dehnung in Abhängigkeit der mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{av}$  in Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)

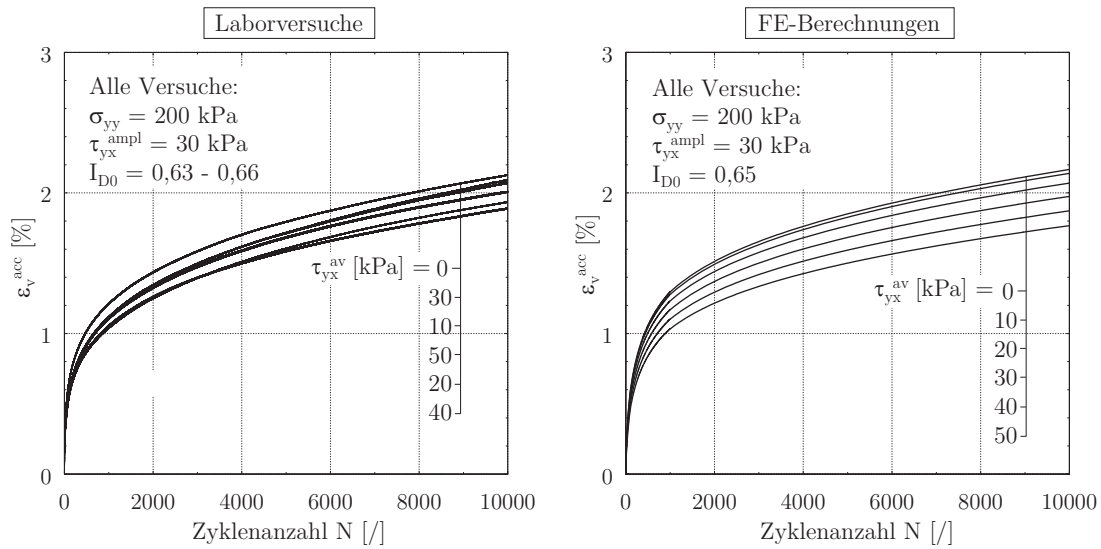


Abbildung 7.8: Totale Dehnung in Abhängigkeit der mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{av}$  in Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)

Die mittlere Schubspannung spielt bei der volumetrischen Dehnung nur eine untergeordnete Rolle. In den Laborversuchen in der Abbildung 7.8 links ist kein eindeutiger Trend zu erkennen. Die kleine Abweichung zwischen den Ergebnissen liegt im Rahmen der Reproduzierbarkeit des Versuchs. In der Abbildung 7.8 ist festzustellen, dass die FE-Berechnungen die Laborversuche sehr gut wiedergeben können. Die Ergebnisse der FE-Berechnung (Abbildung 7.8 rechts) zeigen eine leichte Abhängigkeit der akkumulierten Dehnung  $\varepsilon_v^{acc}$  von der mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{av}$ . Je größer  $\tau_{yx}^{av}$  ist, desto kleiner fällt die Volumendehnung  $\varepsilon_v^{acc}$  aus.

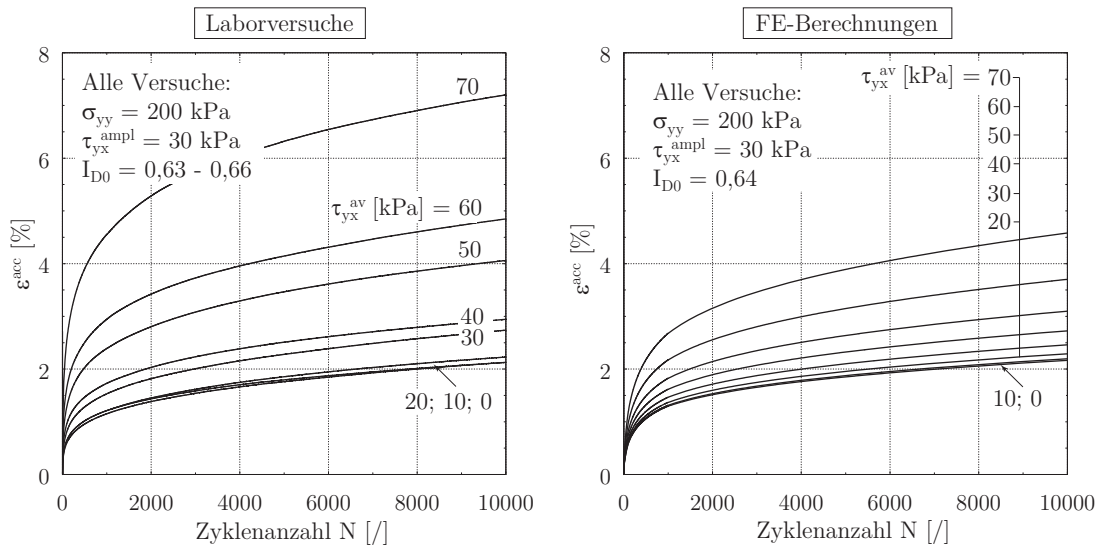


Abbildung 7.9: Volumetrische Dehnung in Abhängigkeit der Normalspannung  $\sigma_{yy}$  in Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)

Wie im Abschnitt 5.6.2 bereit erwähnt, ist die Akkumulation der Schubverzerrung  $\gamma^{\text{acc}}$  bei einem Wechsellastversuch um die Nulllage  $\tau_{yx}^{\text{av}} = 0$  verschwindend klein. Demzufolge ist die volumetrische Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  hier identisch mit der totalen Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$ . Bei den Versuchen mit  $\tau_{yx}^{\text{av}} > 0$  unterscheidet sich dagegen die volumetrische Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  deutlich von der totalen Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$ . Die Abbildung 7.9 stellt die Akkumulation der totalen Dehnung in Abhängigkeit der Zyklenanzahl  $N$  dar. Die Ergebnisse aus den FE-Berechnungen und aus den Laborversuchen zeigen einen gemeinsamen Trend: die totale Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$  steigt mit zunehmender mittlerer Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  an. Während die Dehnungen bei den Versuchen mit  $\tau_{yx}^{\text{av}} \leq 40 \text{ kPa}$  aus den Nachrechnungen und Laborversuchen gut zusammenpassen, weichen die Ergebnisse von  $\tau_{yx}^{\text{av}} > 40 \text{ kPa}$  deutlich voneinander ab. Diese Abweichungen sind auf dem Effekt des Abrutschens des Laststempels auf der Probenoberfläche (Abschnitt 4.2.4) zurückzuführen. Bei großer Schubverzerrung (großer  $\tau_{yx}^{\text{av}}$ ) gleitet der Druckstempel auf der Probenoberfläche und verfälscht die Messergebnisse. Nach der Voruntersuchung sind die Ergebnisse der Laborversuche mit  $\sigma_{yy} = 200 \text{ kPa}$  ab einer Schubverzerrung von  $\gamma_{yx} = 8\%$  nicht mehr zuverlässig (Abbildung 4.12).

## 7.3.2 Versuche mit Änderung der Belastungsrichtung

### 7.3.2.1 Materialkonstanten und Randbedingungen

Für die Berechnung der Einfachscherversuche wurde der Parametersatz für Berliner Sand gemäß Tabelle 6.4 und 6.3 angewendet. Für die Modellierung der multidirektionalen Einfachscherversuche wurde ein achtknotiges Element SOLID185 verwendet. SOLID185 ist ein Element mit einer linearen Ansatzfunktion, voller Integration und kommt bei der 3D-Modellierung der räumlichen Strukturen zum Einsatz. Folgende

Randbedingungen wurden bei der Simulation berücksichtigt:

- Die unteren Knoten wurden in allen Richtungen festgehalten.
- Die Verschiebungen der oberen Knoten sind in allen Richtungen identisch.
- Der Anfangswert der intergranularen Dehnung wurde gleich Null angesetzt.
- Für frisch eingerieselten Sand wurde  $g_0^A = 0$  genommen.
- Der Erdruckbeiwert wurde nach der Jaky-Formel mit  $K_0 = 1 - \sin(\alpha_P) = 0,35$  angesetzt.
- Die Versuche wurden mit maximal  $10^4$  Zyklen gerechnet.
- Bei den Zyklen 5, 10, 100 und 1.000 wurden Aktualisierungszyklen eingeführt.
- Bei der expliziten Berechnung mit dem HCA-Modell wurde mit einem Intervall von  $\Delta N = 1$  gerechnet.

### 7.3.2.2 Ergebnisse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Nachrechnung der Versuche mit Änderung der Polarisierung (nach Abschnitt 5.6) präsentiert. Die Versuche wurden in sechs Reihen mit jeweiliger Variation der Amplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$ , Lagerungsdichte  $I_{D0}$ , Normalspannung  $\sigma_{yy}$ , mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$ , Zyklenanzahl des ersten Lastpakets  $N_P$  und Drehwinkel  $\alpha_P$  aufgeteilt.

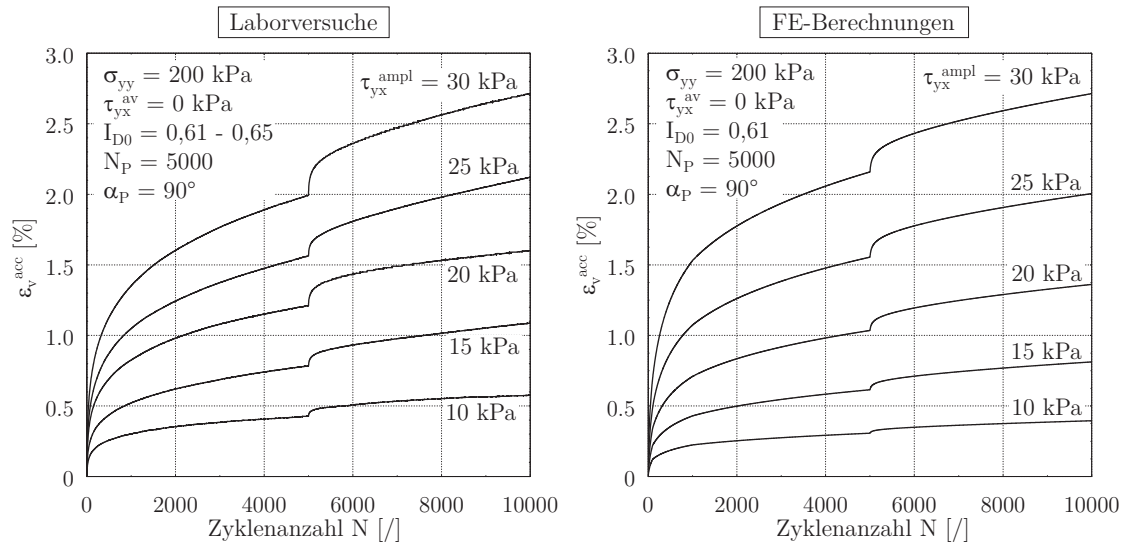


Abbildung 7.10: Volumetrische Dehnung bei einem Polarisationswechsel mit  $\alpha_P = 90^\circ$  für unterschiedliche Lastamplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  aus Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)

Zunächst wird der Einfluss der Amplitude auf die akkumulierte Dehnung betrachtet. In einer Serie wurden die Versuche mit einer  $90^\circ$ -Polarisationsänderung unter

verschiedener Lastamplituden nachgerechnet. Die Ergebnisse der FE-Berechnung (Abbildung 7.10) zeigen eine gute Übereinstimmung mit den Laborversuchen. Die zu erwarteten Einflüsse der Amplitude auf die Entwicklung der volumetrischen Dehnung können durch die FE-Berechnung prinzipiell gut hergestellt werden. Es bestehen kleine Abweichungen zwischen den Labormesswerten und den gerechneten Ergebnissen nach dem ersten Lastpaket. Bei den kleinen Amplituden  $\tau_{yx}^{ampl} < 25$  kPa wurde die volumetrische Dehnung stets geringer abgeschätzt und für  $\tau_{yx}^{ampl} > 25$  kPa wurde  $\varepsilon_v^{acc}$  überschätzt. Die resultierenden Ergebnisse der FE-Berechnungen stimmen mit den Laborversuchen nicht perfekt überein, sind aber für die durchgeführte Prognose akzeptabel. Es wurde eine deutliche Verbesserung gegenüber den Nachrechnungsergebnissen mit dem ursprünglichen Ansatz (Abbildung 6.1) festgestellt. Die Verformung bei großer Amplitude ( $\tau_{yx}^{ampl} = 30$  kPa) wurde wesentlich besser prognostiziert.

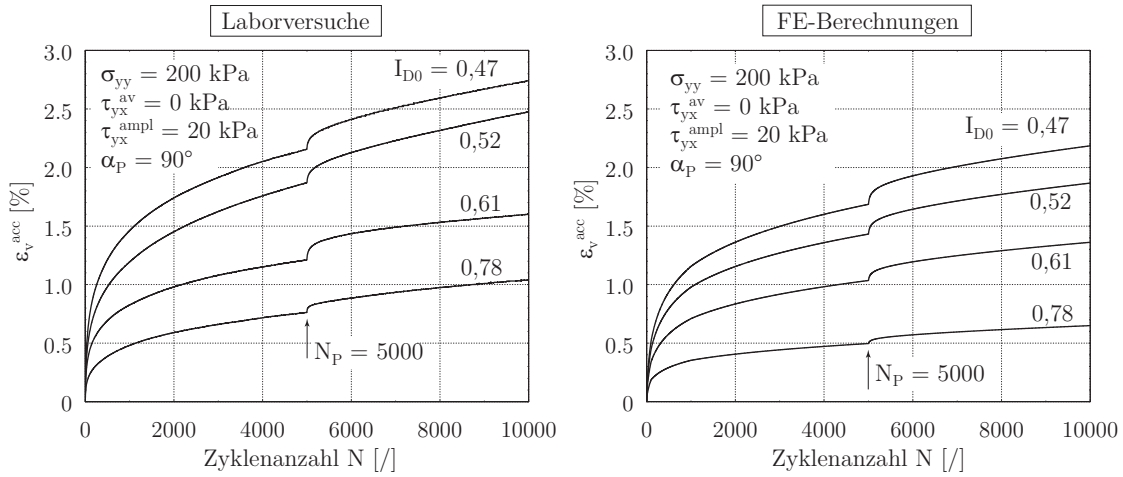


Abbildung 7.11: Volumetrische Dehnung bei einem Polarisationswechsel mit  $\alpha_P = 90^\circ$  für unterschiedliche Lagerungsdichte  $I_{D0}$  aus Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)

In der Abbildung 7.11 sind die Versuche mit unterschiedlicher Lagerungsdichte  $I_{D0}$  präsentiert. Die Dehnungskurve der Nachrechnung stimmt mit der der Laborversuche überein. Im ersten Lastpaket wurde die volumetrischen Dehnungen bei der FE-Berechnung kleiner abgeschätzt. Demzufolge wurden die Endverformungen generell geringer berechnet. Wenn nur die Verformung nach dem Polarisationswechsel betrachtet wird, ist eine relativ gute Übereinstimmung der Ergebnisse festzustellen.

Die Einwirkung des mittleren Drucks auf die Prognose der Einfeldversuche mit dem HCA-Modell wurde bereit im Abschnitt 7.3.1.2 untersucht. Dabei ist eine Diskrepanz zwischen den Nachrechnungen und den Laborversuchen bei  $\sigma_{yy} > 200$  kPa festzustellen. Diese wurde auch in der FE-Berechnung der Versuche mit Polarisationsänderung beobachtet. Die in der Abbildung 7.12 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass für  $\sigma_{yy} < 200$  kPa das HCA-Modell annehmbare Abschätzungen lieferte. Hingegen wurde für  $\sigma_{yy} > 200$  kPa die akkumulierte Dehnung  $\varepsilon_v^{acc}$  viel kleiner prognostiziert. Die Unterschiede zwischen den Nachrechnungen und Laborversuchen können

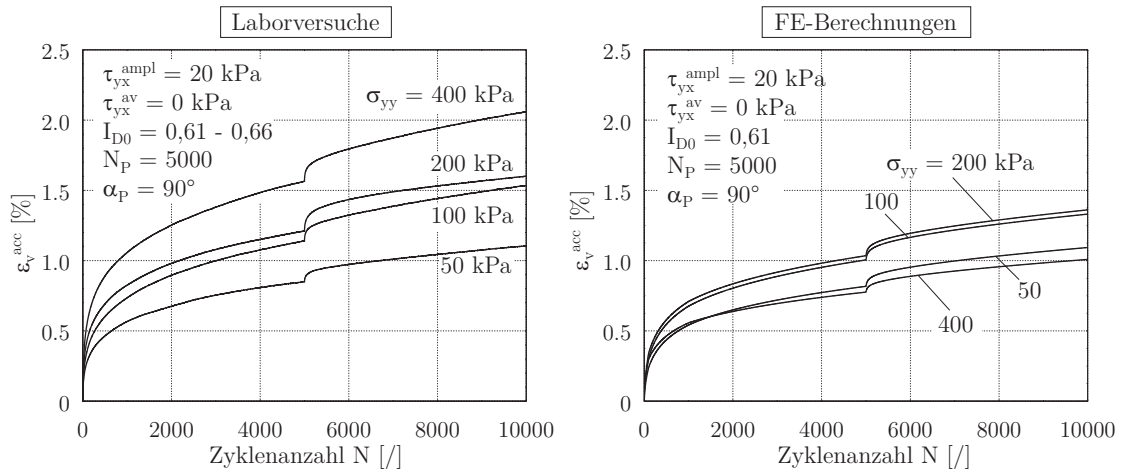


Abbildung 7.12: Volumetrische Dehnung bei einem Polarisationswechsel mit  $\alpha_P = 90^\circ$  für unterschiedliche Normalspannung  $\sigma_{yy}$  aus Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)

zum Teil durch die allgemeinen Nachteile der Einfachscherversuche bedingt sein. Sie können aber auch aus den grundlegenden Unterschieden der zwei verschiedenen Versuchstypen kommen (das HCA-Modell basiert auf den Ergebnissen der Triaxialversuche). Zur Erklärung dieser Frage, worüber in der Literatur bereits widersprüchliche Ergebnisse vorhanden sind (Abschnitt 3.2), sind weitere Studien notwendig.

Der Einfluss des Zeitpunkts der Polarisationsänderung wurde experimentell in einer Versuchsreihe mit unterschiedlich langen ersten Lastpaketen untersucht. Die Ergebnisse der Nachrechnung dieser Versuchsserie sind in der Abbildung 7.13 gegenüber den Laborergebnissen aufgetragen. Es ist festzustellen, dass das Verformungsverhalten der Probe bei einer Polarisationsänderung in den Laborversuchen relativ gut durch die FE-Berechnung reproduziert werden kann. Abgesehen von den Abweichungen nach dem ersten Lastpaket passen die Verformungen infolge des Polarisationswechsels gut zusammen. Die resultierenden Dehnungen wurden nicht von der Zyklanzahl  $N_P$  beeinflusst. Nach 10.000 Zyklen haben die Versuche eine fast identische Volumendehnung.

Die Nachrechnung mit der modifizierten Funktion  $f_\pi$  stellt hier auch eine wesentliche Verbesserung gegenüber dem ursprünglichen Ansatz (Abbildung 6.2) dar. Das Bodenverhalten bei unterschiedlicher  $N_P$  wurde durch das HCA-Modell sehr gut abgebildet.

Der Drehwinkel spielt beim temporären Anstieg der Dehnungsrate eine entscheidende Rolle. Zur Überprüfung des Akkumulationsmodells wurden die Versuche mit unterschiedlichen Drehwinkeln  $\alpha_P$  nachgerechnet. Die in der Abbildung 7.14 dargestellten Ergebnisse zeigen, dass die Volumenzunahme durch die Polarisationsänderung einen maximalen Wert bei  $\alpha_P = 90^\circ$  erreicht. Die Dehnung bei einem Polarisationswechsel mit  $\alpha_P$  ist identisch mit der bei  $180^\circ - \alpha_P$ . Dies entspricht der Formulierung der Teilfunktion  $f_\pi$  mit  $f_\pi \sim \sin(\alpha_P)$  vom HCA-Modell. Die in den Laborversuchen



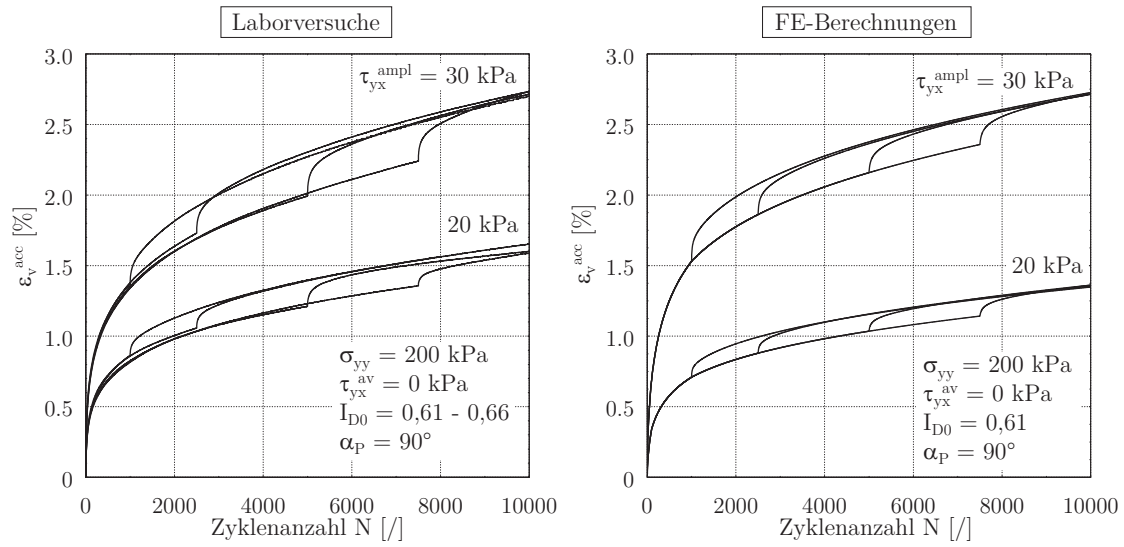


Abbildung 7.13: Volumetrische Dehnung bei einem Polarisationswechsel mit  $\alpha_P = 90^\circ$  bei unterschiedlicher Zyklusanzahl  $N_P$  aus Laborversuchen (links) und FE-Berechnungen (rechts)

festgestellten Eigenschaften (Abschnitt 5.6.2.1) wurden gut in der FE-Berechnung wiedergegeben.

Bei der experimentellen Untersuchung mit Polarisationsänderung wurden aufgrund der Versuchstechnik nur symmetrische Wechsellastversuche getestet (ohne Variation der mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{av}$ ). In diesem Abschnitt wurde der Einfluss von  $\tau_{yx}^{av}$  anhand des HCA-Modells numerisch untersucht. Die Abbildung 7.15 stellt die Ergebnisse der FE-Berechnung mit unterschiedlicher mittlerer Schubspannung  $\tau_{yx}^{av}$  dar. Es ist offensichtlich, dass diese  $\tau_{yx}^{av}$  keinen großen Einfluss auf den Anstieg der Volumendehnung bei einem Polarisationswechsel hat.



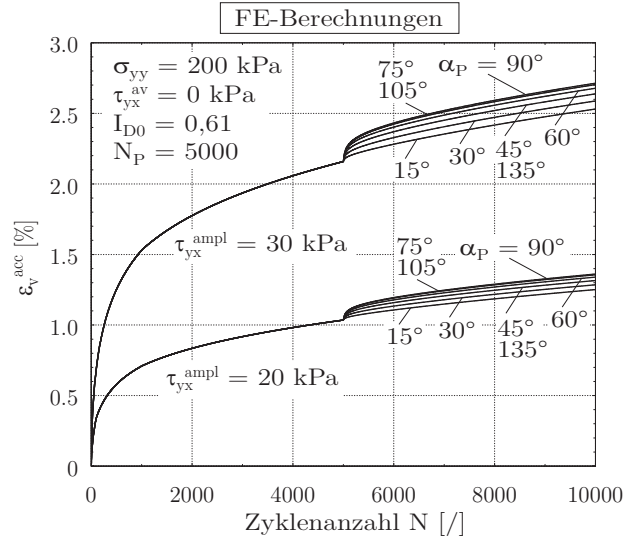


Abbildung 7.14: Volumetrische Dehnung bei unterschiedlicher Polarisationsänderung  $\alpha_P$

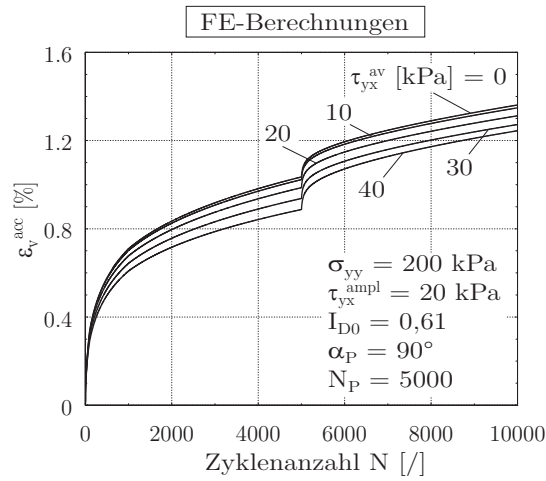


Abbildung 7.15: Volumetrische Dehnung bei unterschiedlicher mittlerer Schubspannungen  $\tau_{yx}^{av}$



# 8 Zusammenfassung und Ausblick

## 8.1 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde das zyklische Verhalten von Sand überwiegend im Einfachscherversuch experimentell und numerisch untersucht. Die Laboruntersuchung dient auf der einen Seite zum Verständnis des Bodenverhaltens unter unidirektionaler und multidirektionaler Belastung. Auf der anderen Seite wurde sie für die Kalibrierung und Validierung der Stoffmodelle bei den numerischen Untersuchungen verwendet.

Am Anfang der experimentellen Untersuchung wurden die Randbedingungen eines Einfachscherversuchs detailliert analysiert. Die Verteilung der Spannung und Verformung bei großer Schubverzerrung im Einfachscherversuch ist bekanntlich inhomogen. Bei kleiner Verformung kann diese Verteilung annähernd als gleichmäßig angenommen werden. Die Schubverzerrung, bei der die Messwerte nicht mehr zuverlässig sind, hängt von der Normalspannung, der Lagerungsdichte und der Abmessung der Probe ( $D:H$ ) ab. Diese Grenzscherverzerrung liegt beispielsweise im Versuch mit dichter Probe unter Normalspannung von 200 kPa bei ca.  $\gamma_{yx} = 8\%$ . Generell ist beim Einfachscherversuch eine Probenabmessung mit  $D : H > 4,0$  zu empfehlen.

Bezüglich der Intensität der akkumulierten Dehnung im Einfachscherversuch wurden nachfolgende Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen gewonnen:

- In einer Versuchsreihe mit gleicher Normalspannung  $\sigma_{yy}$  und mittlerer Schubspannung  $\tau_{yx}^{av}$  steigt die volumetrische Akkumulationsdehnung erwartungsgemäß mit zunehmender Lastamplitude  $\tau_{yx}^{ampl}$ .
- Die Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{ampl}$  nimmt mit der Zyklenanzahl  $N$  in den ersten 100 Zyklen stark ab und bleibt danach annähernd konstant.
- Die Abhängigkeit der akkumulierten Volumendehnung von der Dehnungsamplitude kann gut über die Teilfunktion  $f_{ampl}$  des HCA-Modells mit  $\varepsilon^{acc} \sim (\varepsilon^{ampl})^{C_{ampl}}$  approximiert werden.
- Die Porenanzahl  $e$  (oder Lagerungsdichte  $I_D$ ) hat einen deutlichen Einfluss auf die Dehnungsakkumulation. Je kleiner die Anfangslagerungsdichte  $I_{D0}$  ist, desto größer fällt die Akkumulation der Volumendehnung aus.
- Für mittel dichte bis sehr dichte Proben kann die Beziehung zwischen der Akkumulation der Volumendehnung und der Porenzahl  $e$  gut über die hyperbolische Funktion  $f_e$  des HCA-Modells beschrieben werden. Für lockere Proben wurde die volumetrische Dehnungsakkumulation überschätzt.

- Die Akkumulation der Dehnung nimmt mit steigendem mittleren Druck  $p$  in den kraftgesteuerten Versuchen mit gleichem zyklischen Belastungsniveau  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}/\sigma_{yy} = \text{konstant}$  zu. Im Einfachscherversuch kann der mittlere Druck  $p$  über den Erdruchdruck  $K_0 = 1 + \sin(\alpha_P)$  mit  $p = \sigma_{yy} \cdot (1 + 2K_0)/3$  abgeschätzt werden.
- Der Einfluss des mittleren Druckes kann für den Bereich  $p < 200 \text{ kPa}$  gut mit der Funktion  $f_p = \exp(-C_p(p/100 - 1))$  abgeschätzt werden. Für  $p > 200 \text{ kPa}$  wird die Dehnung durch diese Formel unterschätzt.
- Der Mittelwert der Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  spielt bei der Volumendehnung nur eine untergeordnete Rolle. In den Versuchen mit identischer Amplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$  und Normalspannung  $\sigma_{yy}$  sind die Akkumulationen der volumetrischen Dehnung fast gleich. Die Akkumulation der totalen Dehnung ist dagegen von der mittleren Schubspannung  $\tau_{yx}^{\text{av}}$  abhängig. Die totale Dehnung  $\varepsilon^{\text{acc}}$  steigt mit zunehmender  $\tau_{yx}^{\text{av}}$ .
- Die Dehnungskurve  $\varepsilon^{\text{acc}}(N)$  im Einfachscherversuch kann relativ gut über die Gleichung  $\varepsilon^{\text{acc}}(N) \sim C_{N1}[\ln(1 + C_{N2}N) + C_{N3}N]$  vom HCA-Modell approximiert werden.

Die wesentlichen Erkenntnisse über die akkumulierte Dehnungsrichtung  $\omega = \varepsilon_v^{\text{acc}}/\varepsilon_q^{\text{acc}}$  aus den Ergebnissen der experimentellen Untersuchungen sind:

- Wie in den Triaxialversuchen hängen die Akkumulationsrichtungen in den Einfachscherversuchen fast ausschließlich von dem Spannungsverhältnis  $\eta = q/p$  ab. Im Gegensatz zu den zyklischen Triaxialversuchen bleibt die volumetrische Dehnung  $\varepsilon_v^{\text{acc}}$  mit steigender  $\eta = q/p$  fast konstant und der deviatorische Anteil  $\varepsilon_q^{\text{acc}}$  nimmt zu.
- Die Lagerungsdichte, Amplitude und der mittlere Druck haben keinen Einfluss auf die Akkumulationsrichtung.
- Eine leichte Änderung der Akkumulationsrichtung mit der Zyklenzahl  $N$  wurde festgestellt. Mit steigender Zyklenzahl  $N$  (besonders in den ersten 1.000 Zyklen) nimmt der Kehrwert der Akkumulationsrichtung  $1/\omega = \varepsilon_q^{\text{acc}}/\varepsilon_v^{\text{acc}}$  leicht ab.

Das ursprüngliche Testgerät wurde nur für die Belastung der Probe in einer Richtung konzipiert. Mit der durchgeführten Modifikation der Probenzelle ist es möglich, die Belastungsrichtung in einem Versuch zu verändern. Aus der Untersuchung des Einflusses der Änderung der Lastangriffsrichtung auf die akkumulierte Dehnung wurden nachfolgende wesentliche Erkenntnisse gewonnen:

- Nach jedem Polarisationswechsel steigt die Dehnungsrate sprunghaft an. Dieser temporäre Anstieg ist jedoch nur vorübergehend und klingt bei den weiteren Zyklen wieder ab, d. h. die Dehnungsrate nähert sich dem vorherigen Wert an. Infolge einer zyklischen Belastung wird die Orientierung der Sandkörner durch die Richtung dieser Zyklen ausgeprägt. Bei einer Änderung der Lastrichtung müssen die Sandkörner sich erneut in die Richtung der veränderten

Zyklen orientieren. Dies verursacht einen temporären Anstieg der Dehnungsrate.

- Der Anstieg der Dehnungsrate bei einem Polarisationswechsel ist von dem Drehwinkel  $\alpha_P$  abhängig. Eine Änderung infolge eines Polarisationswechsels mit  $\alpha_P$  ist identisch mit einer Änderung mit  $(180^\circ - \alpha_P)$ . Die Dehnungsrate erreicht einen maximalen Wert bei  $\alpha = 90^\circ$ .
- Der resultierende Dehnungszuwachs infolge einer Polarisationsänderung ist unabhängig von der Anzahl der zurückliegenden Zyklen  $N_P$  vor der Polarisationsänderung. In einer Versuchsreihe wurde der Zeitpunkt des Polarisationswechsels  $N_P$  variiert. Es ist zu beobachten, dass  $N_P$  keine Wirkung auf die resultierende Dehnung hat. Nach 10.000 Zyklen weisen die Versuche fast die gleiche Dehnung auf.
- Wie schnell die infolge eines Polarisationswechsels erhöhte Dehnungsrate wieder abklingt, ist lediglich von der Anzahl der zurückliegenden Zyklen  $N_P$  vor der Polarisationsänderung abhängig. Je größer  $N_P$  ist, desto langsamer sinkt die Dehnungsrate ab.

Die Analyse der Laborversuche hat gezeigt, dass die Einflüsse der Lagerungsdichte  $I_D$ , der Dehnungsamplitude  $\varepsilon^{\text{ampl}}$ , des mittleren Druckes  $p$  und der Zyklenanzahl  $N$  relativ gut mit den Teilfunktionen des HCA-Modells  $f_e, f_{\text{ampl}}, f_p$  und  $f_N$  (nach Niemunis et al. [76] und Wichtmann [108]) beschrieben werden können. Für die Polarisationsänderung ist die Teilfunktion  $f_\pi$  vorgesehen.  $f_\pi$  wird als Verhältnis der erhöhten Dehnungsrate und der Rate der Dehnung im Fall ohne Polarisationswechsel definiert. Nachfolgende Modifizierung für  $f_\pi$  basiert auf den Ergebnissen der multidirektionalen Einfeldversuche:

- Die Polarisationsänderung  $\alpha$  wird als Winkel zwischen der aktuellen Polarisation (Polarisation der aktuellen Zyklen  $\vec{A}_\varepsilon$ ) und der Polarisation der zurückliegenden Zyklen (*back polarization*  $\pi$ ) berechnet.
- Die *back polarization*  $\pi$  speichert die Information über die Orientierung der Sandkörner aus den zurückliegenden Zyklen. Nach einem Polarisationswechsel wird  $\pi$  nach jedem Zyklus aktualisiert. Dabei dreht sich  $\pi$  sukzessiv in Richtung der aktuellen Polarisation  $\vec{A}_\varepsilon$ .
- Die Änderung der Dehnungsrate bei einem Polarisationswechsel mit  $\alpha$  kann mit der Funktion  $f_\pi = 1 + C_{\pi 1} \cdot \sin(\alpha)$  beschrieben werden. Direkt nach einem Wechsel ist  $\alpha = \alpha_P$  und bei einer bleibenden Belastung ist  $\alpha = 0^\circ$  und  $f_\pi = 1$ .
- Der Betrag von  $f_\pi$  direkt nach einem Polarisationswechsel ist lediglich von dem Winkel der Polarisationsänderung abhängig. Die Lagerungsdichte  $I_D$ , die Lastamplitude  $\tau_{yx}^{\text{ampl}}$ , die Normalspannung  $\sigma_{yy}$  sowie die Anzahl der zurückliegenden Zyklen  $N_P$  im Zeitpunkt der Polarisationsänderung hat keinen Einfluss auf  $f_\pi$ .
- $f_\pi$  klingt mit den weiteren Zyklen nach dem Wechsel wieder ab und nähert sich dem Wert 1. Der Abnahmeprozess von  $f_\pi$  wird über die Änderung des Winkels  $\alpha$  mit  $\dot{\alpha} = -\alpha / (C_{\pi 2} N_P + \Delta N_P)$  beschreiben. Der Winkel  $\alpha$  sinkt von

$\alpha_P$  (direkt nach der Polarisationsänderung) auf  $0^\circ$  (nach dem Abklingen von  $f_\pi$ ).

Für die numerische Untersuchung wurde in dieser Arbeit das FEM-Programm ANSYS® 14.0 verwendet. Die implizite Berechnung erfolgte mit dem hypoplastischen Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung. Der verwendete Parametersatz für das HCA-Modell wurde an zyklischen Triaxialversuchen kalibriert. Zur Verifizierung der Implementierung der Stoffmodelle im Programm ANSYS® wurde eine Beispielrechnung aus der einschlägigen Literatur nachgerechnet (zyklisch belastetes Fundament nach Wichtmann [108] und Niemunis et al. [76]). Zur Validierung des HCA-Modells wurden die Einfachscherversuche nachgerechnet. Die Ergebnisse der FE-Berechnung haben gezeigt, dass

- die Verformung der Einfachscherversuche generell gut mit dem HCA-Modell prognostiziert werden kann.
- für die Versuche mit Normalspannung  $\sigma_{yy} > 200$  kPa die Ergebnisse der Laborversuche stets unterschätzt wurden. Für  $\sigma_{yy} < 200$  kPa wurden die Laborversuche zufriedenstellend prognostiziert.

Die Modifikation des Ansatzes von  $f_\pi$  wurde durch die Nachrechnung der multidirektionalen Einfachscherversuch mit einer Polarisationsänderung überprüft. Die Nachrechnungen liefern eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Laborversuche. Das Bodenverhalten bei einer Änderung der Polarisation kann durch die Teilfunktion  $f_\pi$  des HCA-Modells abgebildet werden.

## 8.2 Ausblick

Die Experimentellen Untersuchungen in der vorliegenden Arbeit haben gezeigt, dass neben dem Triaxialversuch auch der Einfachscherversuch für die Aufklärung des zyklischen Verhaltens von Böden sehr gut geeignet ist. Mit zyklischen Einfachscherversuchen wurde Bodenverhalten sowohl unter unidirektionaler als auch multidirektionaler Beanspruchung untersucht. Allerdings sind in verschiedenen Aspekten weiterhin offene Fragen vorhanden. Nachfolgend sind einige offene Punkte aufgelistet, für deren Verständnis in Zukunft weitere vertiefte Studien notwendig sind:

- Zyklisches Verhalten bei großer Zyklenanzahl  $N > 10^5$ .
- Einfluss der mehrmaligen Polarisationsänderungen und deren Reihenfolge auf die Akkumulationsdehnung.
- Zyklisches Verhalten unter kontinuierlicher Änderung der Polarisation.
- Zyklisches Verhalten unter Belastung mit komplizierten Zyklen (3D).
- Der mittlere Druck  $p$  hat einen eindeutigen Einfluss auf das zyklische Verformungsverhalten. Für ein genaueres Verständnis über die Einwirkung von  $p$  auf die Dehnungsakkumulation sollten in Zukunft detailliertere Untersuchungen stattfinden.

Die Materialparameter des HCA-Modells wurden bis jetzt nur anhand der Triaxialversuche ermittelt. Diese Parameter können auch durch die Ergebnisse der Einfachscherversuche kalibriert werden. Eine Prozedur für die Bestimmung der Parameter anhand der Einfachscherversuche ist noch zu erstellen.

Für die Validierung des Stoffmodells (besonders für die Teilfunktion  $f_\pi$ ) ist die Nachrechnung eines Modellversuchs mit Änderungen der Lastangriff Richtung erstrebenswert, bspw. ein lateral belasteter Pfahl mit einer horizontalen Last aus unterschiedlicher Richtung.





# Literaturverzeichnis

- [1] ACHMUS, M. ; ABDEL-RAHMAN, K. ; KUO, Y. S. ; PARALTA, P.: *Untersuchungen zum Tragverhalten von Monopilegründungen unter zyklischer Belasatung*. Veröffentlichung des Institutes für Grundbau, Bodenmechanik und Energie-wasserbau, Leibniz Universität Hannover, 2007
- [2] ADRIAN, R. J.: Twenty years of particle image velocimetry. In: *Experiments in fluids* 39 (2005), S. 159–169
- [3] AIREY, D. W. ; BUDHU, M. ; WOOD, D. M.: Some Aspects of the Behaviour of Soils in Simple Shear. In: *Developments in Soils Mechanic and Foundation Engineering* 2 (1985), Nr. Chapter 2, S. 185–213
- [4] ALBA, P. de ; CHAN, C. K. ; SEED, H. B.: *Determination of Soil Liquefaction Characteristic by Large-Scale Laboratory Tests*. College of Engineering, University of Calofornia, Berkeley California, 1975 (Report No.: EERC 75-14)
- [5] ALBA, P. de ; SEED, H. B. ; CHAN, C. K.: Sand iquefaction in Large-scale simple shear tests. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 102 (1976), Nr. GT9, S. 909–927
- [6] ANDERSEN, K. H. ; KLEVEN, A. ; HEIEN, D.: *Cyclic Soil Data for Design of Offshore Gravity Structures*. Norwegian Geotechnical Institute, Publication No. 175, 1988
- [7] ARTHUR, J. R. F. ; BEKENSTEIN, S. ; GERMAINE, J. T. ; LADD, C. C.: Stress Path Tests with Controlled Rotation of Principal Stress Directions. In: YONG, R. N. (Hrsg.) ; TOWNSEND, F. C. (Hrsg.): *Laboratory shear strength of soil*. Philadelphia, 1981, S. 516–540
- [8] ASTM, D 4015-92: *Standard Test Methods for Modulus and Damping of Soils by the Resonant-Column Method*. ASTM International, West Conshohocken, United States, 1992
- [9] ASTM, D 6528-00: *Standard Test Method for Consolidated Undrained Direct Simple Shear Testing of Cohesive Soils*. ASTM International, West Conshohocken, United States, 2000
- [10] ATKINSON, J. H. ; LAU, W. H. W. ; POWELL, J. J. M.: Measurement of soil strength in Simple Shear tests. In: *Canadian Geotechnical Journal* 28 (1991), Nr. 4, S. 255–262
- [11] AUBRAM, D.: *An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method for Penetration in-*

- to Sand at Finite Deformation, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Berlin, Heft 62, Diss., 2013
- [12] BAI, L.: *Preloading Effects on dynamic sand behavior by resonant column tests*, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Berlin, Heft 53, Diss., 2010
  - [13] BARKSDALE, R. D.: Laboratory evaluation of rutting in base course materials. In: *Proceedings of 3rd International Conference on the Structural Design of Asphalt Pavements*. 1972, S. 161–174
  - [14] BASSETT, R. H.: *The behaviour of granular materials in the simple shear apparatus*, Cambridge University, Diss., 1967
  - [15] BAUER, E.: Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials. In: *Soils and Foundations* 36 (1996), Nr. 1, S. 13–26
  - [16] BJERRUM, L. ; LANDVA, A.: Direct Simple-Shear Tests on a Norwegian Quick Clay. In: *Geotechnique* 16 (1966), Nr. 1, S. 1–20
  - [17] BUDHU, M.: On comparing simple shear and triaxial test results. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 110 (1984), Nr. 12, S. 1809–1814
  - [18] BUDHU, M.: Specimen size effect in simple shear test - Discussion Beitrag von Vucetic & Lacasse von Dez.1982. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division* (1984), S. 442–445
  - [19] CASAGRANDE, A.: Liquefaction and cyclic deformation of sands, A critical review. In: *Fifth Panamerical Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Buenos Aires, Argentina*. Nov. 1975
  - [20] CASAGRANDE, A. ; RENDON, F.: *Gyratory Shear Apparatus; Design, Testing Procedures, and Test Results on Undrained Sand*. Pierce Hall and Harvard University Cambridge. Harvard Soil Mechanics Series No. 89, 1978 (Technical Report S-78-15)
  - [21] CHANG, C. S. ; WHITMAN, R. V.: Drained permanent deformation of sand due to cyclic loading. In: *Journal of Geotechnical Engineering, ASCE* 114 (1988), Nr. 10, S. 1164–1180
  - [22] COLE, E. R. L.: *The behaviour of soils in the simple shear apparatus*, Cambridge University, Diss., 1967
  - [23] DEGROOT, D. J. ; GERMAINE, J. T. ; LADD, C. C.: Effect of Nonuniform Stresses on Measured DSS Stress-Strain Behavior. In: *Journal of Geotechnical Engineering* 150 (1994), Nr. 5, S. 892–912
  - [24] DGGT: *Empfehlung des Arbeitskreises „Baugrunddynamik“*. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT), 2002
  - [25] DÜHRKOP, J.: *Zum Einfluss von Aufweitungen und zyklischen Lasten auf das Verformungsverhalten lateral beanspruchter Pfähle in Sand*. Veröffentlichun-

- gen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb der TU Hamburg-Harburg, Heft 20, 2009
- [26] DIN 18126: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung*. Beuth Verlag, Berlin, Nov. 1996
  - [27] DIN 18137-2: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit. Teil 2: Triaxialversuch*. Beuth Verlag, Berlin, Apr. 2011
  - [28] DIN 18137-3: *Baugrund, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Scherfestigkeit. Teil 3: Direkter Scherversuch*. Beuth Verlag, Berlin, Sept. 2002
  - [29] DUNCAN, J. M. ; DUNLOP, P.: Behavior of soils in simple shear tests. In: *7th Int. Conf. on Soil Mechanics & Foundation Engineering, Mexico City*. 1969, S. 101–109
  - [30] EVGIN, E. ; OUMAROU, T. A.: Two-way cyclic tests on a soil-structure interface. In: TRIANTAFYLIDIS, T. (Hrsg.): *Cyclic behaviour of soils and liquefaction phenomena*. A.A. Balkema, 2004, S. 123–128
  - [31] FRANKE, E. ; KIEKBUSCH, M. ; SCHUPPENER, B.: A new direct simple shear device. In: *Geotechnical Testing Journal* 2 (1979), Nr. 4, S. 190–199
  - [32] GLASENAPP, R.: *Das Verhalten von Sand unter zyklischer irregulärer Belastung*, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Berlin, Heft 67, Diss., 2015
  - [33] GOTSCHOL, A.: *Veränderlich elastisches und plastisches Verhalten nichtbindiger Böden und Schotter unter zyklisch-dynamischer Beanspruchung*, Fachgebiet Geotechnik, Universität Kassel, Heft 12, Diss., 2002
  - [34] GUDEHUS, G.: A comprehensive constitutive equation for granular materials. In: *Soils and Foundations* 36 (1996), Nr. 1, S. 1–12
  - [35] HARDIN, B. O. ; BLACK, W. L.: Sand stiffness under various triaxial stresses. In: *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE* 92 (1966), Nr. SM2, S. 27–42
  - [36] HAUPT, W.: Dynamische Bodeneigenschaften und ihre Ermittlung. In: *Bodendynamik. Grundlagen und Anwendung*. Vieweg, Braunschweig, 1986, S. 225–279
  - [37] HELM, J. ; J.LAUE ; TRIANTAFYLIDIS, T.: Untersuchungen an der RUB zur Verformungsentwicklung von Böden unter zyklischen Belastung. In: *Beiträge zum Workshop: Boden unter fast zyklischer Belastung: Erfahrungen und Forschungsergebnisse*. Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum, Heft Nr. 32, 2000, S. 201–222
  - [38] HERLE, I.: *Hypoplastizität und Granulometrie einfacher Korngerüste*, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana Karlsruhe, Diss., 1997

- [39] HETTLER, A.: Schottertriaxialversuche mit statischem und zyklischem Belastungsverlauf. In: *Eisenbahntechnischer Rundschau* 36 (1987), Nr. 6, S. 399–405
- [40] HINZ, P.: *Beurteilung des Langzeitverhaltens zyklisch horizontal belasteter Monopile-Gründung*. Mitteilungen aus dem Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Universität Duisburg-Essen, Heft 37, 2009
- [41] HODJERA, B.: Das Verhalten von Böden unter dynamischer Dauerbelastung. In: *Geotechnik* 2 (1979), Nr. 2, S. 84–97
- [42] HOSONO, Y. ; YOSHIMINE, M.: Liquefaction of sand in simple shear condition. In: TRIANTAFYLIDIS, T. (Hrsg.): *Cyclic behaviour of soils and liquefaction phenomena*, A.A. Balkema, 2004, S. 129–136
- [43] HUURMAN, M.: *Permanent deformation in concrete block pavements*, Technische Universität Delft, Diss., 1997
- [44] ISHIBASHI, I. ; KAWAMURA, M. ; BHATIA, S. K.: Effect of Initial Shear on Cyclic Behavior of Sand. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 111 (1985), Nr. 12, S. 1395–1410
- [45] ISHIHARA, K. ; NAGASE, H.: Multi-directional irregular loading tests on sand. In: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 7 (1988), Nr. 4, S. 201–212
- [46] ISHIHARA, K. ; YAMAZAKI, F.: Cyclic Simple Shear Tests on Saturated Sand in Multi-Directional Loading. In: *Soils and Foundations, The Japanese Geotechnical Society* 20 (1980), Nr. 1, S. 45–59
- [47] JAKY, J.: The Coefficient of Earth Pressure at Rest. In: *Journal of the Society of Hungarian Architects and Engineers* 7 (1944), S. 355–358
- [48] JONG, J. de: Discussion: Session 2: Stress-strain behaviour of soils. In: *Proceeding of the Roscoe Memorial Symposium, 29-31 March*. 1971, S. 258–261
- [49] KAGGWA, W. S. ; BOOKER, J. R. ; CARTER, J. P.: Residual strains in calcareous sand due to irregular cyclic loading. In: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 117 (1991), Nr. 2, S. 201–218
- [50] KAMMERER, A. M.: *Undrained Response of Monterey 0/30 Sand under Multidirectional Cyclic Simple Shear Loading Conditions*. California, University of California, Berkeley, Diss., 2002
- [51] KAMMERER, A. M. ; WU, J. ; RIEMER, M. ; ESTANA, J. ; SEED, R.: Shear strain development in liquefiable soil under Bi-Directional loading conditions. In: *13th World Conference on Earthquake Engineering Vancouver, B.C., Canada August 1-6*. 2004 (Paper No. 2081)
- [52] KEMFERT, H. G. ; GOTSCHOL, A. ; STÖCKER, T.: Kombiniert zyklische und dynamische Elementversuche zur Beschreibung des Kurz- und Langzeitverhaltens von Schotter und granularen Böden. In: *Beiträge zum Workshop: Boden unter fast zyklischer Belastung: Erfahrungen und Forschungsergebnisse*. Bochum, 2000 (Technical Report 32), S. 241–253

- [53] KEMPFFERT, H. G. ; HU, Y.: Prediction on the long-term behavior of subsoils under high-speed railways. In: *Proceedings of the XIIth European Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering, Amsterdam, Netherlands* Bd. 3. 1999, S. 1823–1828
- [54] KHEDR, S.: Deformation characteristics of granular base course in flexible pavement. In: *Transportation Research Record 1043, Transportation Research Board, Washington, D.C.* 1999, S. 131–138
- [55] KIRSCH, F. ; RICHTER, T.: Ein einfaches Näherungsverfahren zur Prognose des axial-zyklischen Tragverhaltens von Pfählen. In: *Bautechnik* 88 (2011), Nr. 2, S. 113–120
- [56] KJELLMAN, W.: Testing The Shear Strength of Clay in Sweden. In: *Géotechnique* 2 (1951), Nr. 3, S. 225–232
- [57] KLEIN, G.: Bodenmechanik und Erdbeben. In: *Grundbau Taschenbuch*. Ernst & Sohn, 2001, S. 443–495
- [58] KOLYMBAS, D.: *Eine nichtlineares Viskoplastisches Stoffgesetz für Böden*, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 77, Diss., 1978
- [59] KOLYMBAS, D.: *Eine konstitutive Theorie für Böden und andere körnige Stoffe*. Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Karlsruhe, Heft 109, 1988
- [60] KOVACS, W. D. ; LEO, E.: Cyclic simple shear of large scale sand samples. Effects of diameter to height ratio. In: *International Conference on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soils Dynamik* Bd. 3, 1981, S. 897–904
- [61] LENTZ, R. W. ; BALADI, G. Y.: Constitutive equation for permanent strain of sand subjected to cyclic loading. In: *Transportation Research Record 810, Transportation Research Board, Washington, D.C.* 1981, S. 50–54
- [62] LI, X. S.: Analysis of seismic response of granular soil deposits. In: *Entwicklungen in der Bodenmechanik, Bodendynamik und Geotechnik; Festschrift zum 60. Geburtstag vom Prof. S. Savidis*. Springer Verlag, 2004, S. 139–151
- [63] LUCKS, A. S. ; CHRISTIAN, J. T. ; BRANDOW, G. E. ; HØEG, K.: Stress conditions in NGI simple shear test. In: *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 98 (1972), Nr. SM1, S. 155–160
- [64] LUONG, M. P.: Mechanical aspects and thermal effects of cohesionless soils under cyclic and transient loading. In: *Proc. IUTAM conf. on Deformation and Failure of Granular materials*. Delft, 1982
- [65] MALKUS, J.: Untersuchung des Bodenverhaltens im Kontaktbereich zyklisch axial belasteter zylindrischer Gründungselemente. In: *Beiträge zum Workshop: Boden unter fast zyklischer Belastung: Erfahrungen und Forschungsergebnisse*.



- Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum, Heft 32, 2000
- [66] MARR, W. A. ; CHRISTIAN, J. T.: Permanent displacements due to cyclic wave loading. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 107 (1981), Nr. GT8, S. 1129–1149
  - [67] MATSUOKA, H. ; NAKAI, T.: A new failure for soils in three-dimensional stresses. In: *Deformation and Failure of Granular Materials*. Delft : Proc. IUTAM Symp., 1982, S. 253–263
  - [68] MINER, M.: Cumulative damage in fatigue. In: *Journal of Applied Mechanics (ASME)* 12 (1954), Nr. 3, S. 67: A159–A164
  - [69] MONISMITH, C L. ; OGAWA, N. ; FREEME, C. R.: Permanent deformation characteristics of subgrade soils due to repeated loading. In: *Transportation Research Record 537, Transportation Research Board, Washington, D.C.* 1975, S. 1–17
  - [70] MULILIS, J. P. ; SEED, H. B. ; CHAN, C. K. ; MITCHELL, J. K.: Effects of Sample Preparation on Sand Liquefaction. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 103 (1977), Nr. GT2, S. 91–107
  - [71] NAGASE, H. ; ISHIHARA, K.: Effects of load irregularity on the cyclic behaviour of sand. In: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 6 (1987), Nr. 4, S. 239–249
  - [72] NIEMUNIS, A.: Akkumulation der Verformung infolge zyklischer Belastung - numerische Strategien. In: *Beiträge zum Workshop: Boden unter fast zyklischer Belastung: Erfahrungen und Forschungsergebnisse*. Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum, Heft 32, 2000, S. 1–20
  - [73] NIEMUNIS, A.: *Extended hypoplastic models for soils*. Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum, Heft 34, 2002
  - [74] NIEMUNIS, A. ; HERLE, I.: Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. In: *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials* 2 (1997), S. 279–299
  - [75] NIEMUNIS, A. ; WICHTMANN, T. ; TRIANTAFYLLIDIS, T.: Explicit accumulation model for cyclic loading. In: *Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena*. Proc. of CBS04, Bochum, 31 March - 02 April, 2004, S. 65–76
  - [76] NIEMUNIS, A. ; WICHTMANN, T. ; TRIANTAFYLLIDIS, T.: A high-cycle accumulation model for sand. In: *Computers and Geotechnics* 32 (2005), Nr. 4, S. 245–263
  - [77] ODA, M.: On stress-dilatancy relation of sand in simple shear test. In: *Soils and Foundations, The Japanese Geotechnical Society* 5 (1975), Nr. 2, S. 17–29
  - [78] PERALTA, P.: *Investigation on the Behavior of Large Diameter Piles under Long-Term Lateral Cyclic Loading in Cohesionless Soil*, Institut für Grund-

- bau, Bodenmechanik und Energiewasserbau Leibniz Universität Hannover, Heft 71, Diss., 2011
- [79] POULSEN, J. ; SUBSTAD, R. N.: Laboratory testing of cohesive subgrades: results and implications relative to structural pavement design and distress models. In: *Transportation Research Record 671*, *Transportation Research Board, Washington, D.C.* 1978, S. 84–91
  - [80] PRADEL, D. ; ISHIHARA, K. ; GURIERREZ, M.: Yielding and flow of sand under principal stress axes rotation. In: *Soils and Foundations, The Japanese Geotechnical Society* 30 (1990), Nr. 1, S. 87–99
  - [81] PRADHAN, T. B. S. ; TATSUOKA, F. ; HORII, N.: Simple shear testing on sand in a torsional shear apparatus. In: *Soils and Foundations, The Japanese Geotechnical Society* 28 (1988), Nr. 2, S. 95–112
  - [82] PREVOST, J. H. ; HØEG, K.: Reanalysis of Simple Shear Soil Testing. In: *Canadian Geotechnical Journal* 13 (1976), Nr. 11, S. 419–428
  - [83] PYKE, R. ; SEED, H. B. ; CHAN, C. K.: Settlement of sands under multidirectional shaking. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division, ASCE* 101 (1975), Nr. 4, S. 379–398
  - [84] RACKWITZ, F.: *Numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Zugpfählen und Zugpfahlgruppen in Sand auf der Grundlage von Probelbelastungen*, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Berlin, Heft 32, Diss., 2003
  - [85] RACKWITZ, F.: Bestimmung von dynamischen Bodenparametern im RC-Versuch. In: *Vortrag zum 2. Hans Lorenz Symposium*. Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Berlin, Heft 40, 2006
  - [86] RACKWITZ, F. ; SAVIDIS, S. A.: Berührungslose Abstandsmessung mit Wirbelstromsensoren im kombinierten Resonant-Column/Torsional-Shear Versuchsstand. In: STAHLMANN, J. (Hrsg.): *Messen in der Geotechnik, Fachseminar am 23.-24. Februar in Braunschweig*, Institut für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig, 2006, S. 295–408
  - [87] RANDOLPH, M. F. ; WROTH, C. P.: Application of the failure state in undrained simple shear to the shaft capacity of driven piles. In: *Geotechnique* 31 (1981), Nr. 1, S. 143–157
  - [88] ROSCOE, K. H.: An Apparatus for the Application of Simple Shear to Soil Samples. In: *Proc. 3rd ICSMFE, Zürich* (1953), S. 186–191
  - [89] RUDOLPH, Ch. ; GRABE, J.: Untersuchungen zu zyklisch horizontal belasteten Pfählen bei veränderlicher Lastrichtung. In: *Geotechnik* 36 (2013), Nr. 2, S. 90–95
  - [90] SAVIDIS, S.: Bodenmechanische Herausforderung bei der Bemessung von Off-Shore Gründungen. In: *8. Hans Lorenz Symposium*. Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Berlin, Heft 60, 11.10.2012, S. 15–49

- [91] SAVIDIS, S. ; AUBRAM, D. ; CAROW, C. ; GLASENAPP, R. ; KIRSCH, F. ; RICHTER, T.: Theoretische und experimentelle Untersuchungen zum Verflüssigungsverhalten von Sand. In: *Bodenverflüssigung bei Kippen des Lausitzer Braunkohlebergbaus*. Institut für Bergbau und Spezialtiefbau, Technische Universität Bergakademie Freiberg, 14.-15.06.2012
- [92] SAVIDIS, S. ; SCHUPPE, R.: Dynamisches Triaxialgerät zur Untersuchung des Verflüssigungsverhaltens von isotrop und anisotrop konsolidierten Sanden. In: *Bautechnik* (1982), Nr. 1, S. 21–24
- [93] SAWICKI, A. ; SWIDZINSKI, W.: Mechanics of a sandy subsoil subjected to cyclic loading. In: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 13 (1989), S. 511–529
- [94] SEED, H. B. ; PEACOCK, W. H.: *Applicability of laboratory test procedures for measuring soil liquefaction characteristics under cyclic loading*. University of British Columbia, 1970 (Report EERC 70-8)
- [95] SHAHNAZARI, H. ; TOWHATA, I.: Torsional shear tests on cyclic stress\_dilatancy relationship of sand. In: *Soils and Foundations, The Japanese Geotechnical Society* 42 (2002), Nr. 1, S. 105–119
- [96] SHENTON, M. J.: Deformation of railway ballast under repeated loading conditions. In: *Railroad Track Mechanics and Technology, Pergamon Press*, (1978), S. 405–425
- [97] SILVER, M. L. ; SEED, H. B.: Deformation characteristics of sand under cyclic loading. In: *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 97 (1971), Nr. SM8, S. 1081–1098
- [98] SILVER, M. L. ; SEED, H. B.: Volume Changes in sand during cyclic loading. In: *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 97 (1971), Nr. SM9, S. 1171–1182
- [99] SKEMPTON, A. W.: The Pore-Pressure coefficients A and B. In: *Geotechnique* 4 (1954), S. 143–147
- [100] STROUD, M. A.: *The behaviour of sand at low stress levels in the simple shear apparatus*, Cambridge University, Diss., 1971
- [101] TABUCANNON, J. T. ; AIREY, D. W. ; POULOS, H. G.: Pile Skin Friction in Sands from Constant Normal Stiffness Tests. In: *Geotechnical Testing Journal* 18 (1995), Nr. 3, S. 350–364
- [102] TASAN, E.: *Zur Dimensionierung der Monopilegründungen von Offshore-Windenergieanlagen*, Fachgebiet Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Berlin, Heft 52, Diss., 2011
- [103] TATSUOKA, F. ; MURAMATSU, M. ; SASAKI, T.: Cyclic undrained stress-strain behavior of dense sands by torsional simple shear test. In: *Soils and Foundations, The Japanese Geotechnical Society* 22 (1982), Nr. 2, S. 55–70



- [104] TOWHATA, I. ; ISHIHARA, K.: Undrained Strength of Sand Undergoing Cyclic Rotation of Principal Stress Axes. In: *Soils and Foundations, The Japanese Geotechnical Society* 25 (1985), Nr. 2, S. 135–147
- [105] TRIANTAFYLIDIS, T. ; WICHTMANN, T. ; FUENTES, W.: Zustände der Grenztragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit von Böden unter zyklischer Belastung. In: *Aktuelle Forschung in der Bodendynamik, Tagungsband zur 1. Dresden Bodenmechanik Tagung*. Springer Berlin - Heidelberg, 2013, S. 147–176
- [106] VUCETIC, M.: Cyclic Threshold Shear Strains in Soils. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 120 (1994), Nr. 12, S. 2208–2228
- [107] VUCETIC, M. ; LACASSE, S.: Specimen size effect in simple shear test. In: *Journal of the Geotechnical Engineering Division* 108 (1982), Nr. GT12, S. 1567–1585
- [108] WICHTMANN, T.: *Explizites Akkumulationsmodell für nicht bindige Böden unter zyklischer Belastung*, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Ruhr-Universität Bochum, Heft 38, Diss., 2005
- [109] WICHTMANN, T. ; NIEMUNIS, A. ; TRIANTAFYLIDIS, T.: Setzungsakkumulation in nichtbindigen Böden unter hochzyklischer Belastung. In: *Bautechnik* 82 (2005), Nr. 1, S. 18–27
- [110] WICHTMANN, T. ; NIEMUNIS, A. ; TRIANTAFYLIDIS, T.: Gilt die Minersche Regel für Sand? In: *Bautechnik* 83 (2006), Nr. 5, S. 341–350
- [111] WICHTMANN, T. ; NIEMUNIS, A. ; TRIANTAFYLIDIS, T.: Validation and calibration of a high-cyclic triaxial tests on eight sands. In: *Soils and Foundations* 49 (2009), Nr. 5, S. 711–728
- [112] WICHTMANN, T. ; NIEMUNIS, A. ; TRIANTAFYLIDIS, T.: On the elastic stiffness in a high-cycle accumulation model for sand: a comparison of drained and undrained cyclic triaxial tests. In: *Canadian Geotechnical Journal* 47 (2010), Nr. 7, S. 781–805
- [113] WICHTMANN, T. ; NIEMUNIS, A. ; TRIANTAFYLIDIS, T.: Simplified calibration procedure for a high-cycle accumulation model based on cyclic triaxial tests on 22 sands. In: *International Symposium: Frontiers in Offshore Geotechnics*. Perth, Australia, 2010
- [114] WICHTMANN, T. ; TRIANTAFYLIDIS, T.: Influence of a cyclic and dynamic loading history on dynamic properties of dry sand, part I: cyclic and dynamic torsional prestraining. In: *Soil Dynamics and Earthquake Engineering* 24 (2004), Nr. 2, S. 127–147
- [115] WICHTMANN, T. ; TRIANTAFYLIDIS, T.: Dynamische Steifigkeit und Dämpfung von Sand bei kleinen Dehnungen. In: *Bautechnik* 82 (2005), Nr. 4, S. 236–246
- [116] WICHTMANN, T. ; TRIANTAFYLIDIS, T.: Prognose der Langzeitverformungen

- für Gründungen von Offshore-Windenergieanlagen mit einem Akkumulationsmodell. In: *Bautechnik* 88 (2011), Nr. 11, S. 765–781
- [117] WOLFF, H. ; VISSER, A. T.: Incorporating elasto-plasticity in granular layer pavement design. In: *Proceedings of the Institute of Civil Engineers Transport Journal* 105 (1994), S. 448–466
- [118] WOLFFERSDORFF, P. A.: A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. In: *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials* 1 (1996), Nr. 3, S. 251–271
- [119] YAMADA, Y. ; ISHIHARA, K.: Yielding of Loose Sand in Three-Dimensional Stress Condition. In: *Soils and Foundations, The Japanese Geotechnical Society* 22 (1982), Nr. 3, S. 15–31
- [120] YAMADA, Y. ; ISHIHARA, K.: Undrained deformation characteristics of sand in multidirectional shear. In: *Soils and Foundations, The Japanese Geotechnical Society* 23 (1983), Nr. 1, S. 61–79
- [121] YOUNG, T. L.: Compaction of sands by repeated shear straining. In: *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 98 (1972), Nr. SM7, S. 709–725

# Anhang

## Notation

Es wird in dieser Arbeit die Tensornotation verwendet. Für die skalarwertige Variablen werden die Buchstaben in Normalschrift verwendet. Die zweistufigen Tensoren werden mit fetten, vierstufige Tensoren mit „Schreibtafel-fetten“ und achtstufige Tensoren mit kalligraphischen Buchstaben gekennzeichnet.

| Skalar              | Tensor 2. Stufe                                    | Tensor 4. Stufe                      | Tensor 8. Stufe                         |
|---------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------|
| $\varepsilon, C, N$ | $\boldsymbol{\varepsilon}, \mathbf{T}, \mathbf{D}$ | $\mathbb{E}, \mathbb{M}, \mathbb{I}$ | $\mathcal{R}, \mathcal{L}, \mathcal{N}$ |

Tabelle A.1: Tensornotation

Die Definition verschiedener Tensorprodukte wird anhand eines Beispiels an Tensor  $\mathbf{A}$  und  $\mathbf{B}$  geklärt:

- dyadisches Produkt:  $\mathbf{A} \otimes \mathbf{B} = A_{ij}B_{kl}$
- einfache Überschiebung:  $\mathbf{A} \cdot \mathbf{B} = A_{ik}B_{kj}$
- zweifache Überschiebung:  $\mathbf{A} : \mathbf{B} = \text{tr}(\mathbf{A} \cdot \mathbf{B}^T) = A_{kl}B_{kl}$
- vierfache Überschiebung:  $\mathbf{A} :: \mathbf{B} = A_{ijkl}B_{ijkl}$

Die euklidische Norm für Tensor 2. Stufe  $\mathbf{A}$  und 4. Stufe  $\mathbb{A}$  wird definiert als:

$$\|\mathbf{A}\| = \sqrt{\mathbf{A} : \mathbf{A}} = \sqrt{A_{kl}A_{kl}} \quad (\text{A.1})$$

$$\|\mathbb{A}\| = \sqrt{A_{ijkl}A_{ijkl}} \quad (\text{A.2})$$

Die Spur eines Tensors wird aus der Summe der Hauptdiagonalelemente berechnet. Z. B. Spur eines zweistufigen Tensors  $\mathbf{A}$ :

$$\text{tr}(\mathbf{A}) = A_{kk} = A_{11} + A_{22} + A_{33} \quad (\text{A.3})$$

Der deviatorische Anteil eines Tensor wird berechnet als:

$$\mathbf{A}^* = \mathbf{A} - \frac{1}{3}\text{tr}(\mathbf{A})\mathbf{1} \quad (\text{A.4})$$

Der Einheitstensor  $\mathbf{1}$  wird definiert durch  $\mathbf{1} \hat{=} \delta_{ij}$ , das Kronecker-Symbol  $\delta_{ij}$  bedeutet:

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1 & \text{für } i = j \\ 0 & \text{für } i \neq j \end{cases} \quad (\text{A.5})$$

Der vierstufiger Identitätstensor  $\mathbb{I}$  ist:

$$I_{ijkl} = 0,5(\delta_{ik}\delta_{jl} + \delta_{il}\delta_{jk}) \quad (\text{A.6})$$

Die Normierung eines Tensor wird durch einen Pfeil und die Division durch die Spur wird durch ein Dach gekennzeichnet:

$$\vec{\mathbf{A}} = \frac{\mathbf{A}}{\|\mathbf{A}\|} \quad (\text{A.7})$$

$$\hat{\mathbf{A}} = \frac{\mathbf{A}}{\text{tr}(\mathbf{A})} \quad (\text{A.8})$$

## Berechnung der Invarianten

Hier werden die Definitionen für den dreidimensionalen Fall angegeben. Die Tensoren  $\boldsymbol{\sigma}$  und  $\boldsymbol{\varepsilon}$  werden in voller Notation angegeben:

$$\boldsymbol{\sigma} = \begin{pmatrix} \sigma_{11} & \sigma_{12} & \sigma_{13} \\ \sigma_{21} & \sigma_{22} & \sigma_{23} \\ \sigma_{31} & \sigma_{32} & \sigma_{33} \end{pmatrix} \quad \text{und} \quad \boldsymbol{\varepsilon} = \begin{pmatrix} \varepsilon_{11} & \varepsilon_{12} & \varepsilon_{13} \\ \varepsilon_{21} & \varepsilon_{22} & \varepsilon_{23} \\ \varepsilon_{31} & \varepsilon_{32} & \varepsilon_{33} \end{pmatrix} \quad (\text{A.9})$$

Die Roscoe-Invarianten des nach der Vorzeichenkonvention der Bodenmechanik verwendeten Cauchy-Spannungstensors  $\boldsymbol{\sigma} = -\mathbf{T}$  berechnen sich aus:

$$p = \text{tr } \boldsymbol{\sigma} / 3 \quad (\text{A.10})$$

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}} \|\boldsymbol{\sigma}^*\| \quad (\text{A.11})$$

Die Basis-Invarianten von  $\boldsymbol{\sigma}$  sind:

$$I_1 = -(\sigma_{11} + \sigma_{22} + \sigma_{33}) \quad (\text{A.12})$$

$$I_2 = \sigma_{12}^2 + \sigma_{13}^2 - \sigma_{11}\sigma_{22} + \sigma_{23}^2 - \sigma_{11}\sigma_{33} - \sigma_{22}\sigma_{33} \quad (\text{A.13})$$

$$I_3 = \sigma_{13}^2\sigma_{22} - 2\sigma_{12}\sigma_{13}\sigma_{23} + \sigma_{11}\sigma_{23}^2 + \sigma_{12}^2\sigma_{33} - \sigma_{11}\sigma_{22}\sigma_{33} \quad (\text{A.14})$$

Die Hauptinvarianten des Spannungsdeviators sind:

$$J_2 = \frac{(\boldsymbol{\sigma}^* : \boldsymbol{\sigma}^*)}{2} \quad (\text{A.15})$$

$$J_3 = \det(\boldsymbol{\sigma}^*) \quad (\text{A.16})$$

Die oktaedrische Schubspannung ist definiert als:

$$\tau_{\text{oct}} = \frac{(\boldsymbol{\sigma}^* : \boldsymbol{\sigma}^*)}{\sqrt{3}} \quad (\text{A.17})$$

Die deviatorische Dehnung  $\varepsilon_q$  und die volumetrische Dehnung  $\varepsilon_v$  werden allgemein aus dem Dehnungstensor  $\boldsymbol{\varepsilon}$  nach folgenden Formeln berechnet:

$$\varepsilon_v = \text{tr } \boldsymbol{\varepsilon} \quad (\text{A.18})$$

$$\varepsilon_q = \sqrt{\frac{2}{3}} \|\boldsymbol{\varepsilon}^*\| \quad (\text{A.19})$$

Die totale Dehnungsinvariante  $\varepsilon_{\text{tot}}$  ergibt sich aus:

$$e_{\text{tot}} = \|\boldsymbol{\varepsilon}\| \quad (\text{A.20})$$

Die Scherdehnung wird aus

$$\gamma = \sqrt{\frac{3}{2}} \|\boldsymbol{\varepsilon}^*\| \quad (\text{A.21})$$

berechnet. Die tensorielle Rate der Dehnungsakkumulation  $\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{acc}}$  wird als Produkt der Akkumulationsintensität und der Akkumulationsrichtung  $\mathbf{m}$  definiert:

$$\dot{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{acc}} = \dot{\varepsilon}^{\text{acc}} \mathbf{m} \quad (\text{A.22})$$

# Veröffentlichungen des Grundbauinstitutes der Technischen Universität Berlin

Erschienenene Hefte:

**Herausgegeben von H. Müller-Kirchenbauer**

- |     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |              |
|-----|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| [1] | Aufbau und Arbeitsgebiete des Instituts 1977, 166 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3 7983 578 1                                                                                                                                                                                                                                          | (vergriffen) |
| [2] | Allgemeine experimentelle Ergebnisse und Betrachtungen des<br>Spannungs-Deformationsverhaltens von Sand<br>Savidis, S. A.<br>Über die theoretische Erfassung nichtlinearen Spannungs-<br>Verformungsverhaltens von Boden<br>Richter, T., 1978, 100 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3 7983 0622 2                                        | 3,00 €       |
| [3] | Experimentelle und Theoretische Untersuchungen zum<br>Tragverhalten der Spundwand mit Sporn<br>Prager, J., 1978, 165 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3 7983 0621 4                                                                                                                                                                      | 4,50 €       |
| [4] | Der Nachweis der äußeren Standsicherheit suspensionsgestützter<br>Erdwände nach der Elementscheibentheorie<br>Walz, B.; Prager, J., 1978, 124 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3 7983 0627 3                                                                                                                                             | 3,50 €       |
| [5] | Berechnungsverfahren zum aktiven räumlichen Erddruck<br>1979, 124 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3 7983 0665 6<br>enthält:<br>Vergleichende Untersuchungen der Berechnungsverfahren zum Nachweis<br>der Sicherheit gegen Gleitflächenbildung bei suspensionsgestützten<br>Erdwänden<br>Müller-Kirchenbauer, H.; Walz, B.; Kilchert, M. | 4,50 €       |

Berechnungen zum dreidimensionalen aktiven Erddruckproblem  
bei rolligen Böden

Karstedt, J.

Grundlagen und Anwendung der Erdscheibentheorie

Walz, B.

- [6] Pressenkräfte und Bodenverformungen beim Rohrvortrieb 4,00 €  
Salomo, K.-P., 1980, 162 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 0666 4
- [7] Experimentelle und theoretische Untersuchungen zum 4,00 €  
Erddruckproblem auf radialsymmetrische Senkkästen und Schächte  
Müller-Kirchenbauer, H.; Walz, B.; Klapperich, H. 1980, ca. 200 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 0705 9
- [8] Klassische Verfahren zur Berechnung des seismischen Erddruckes 2,50 €  
Savidis, S.A.; Klapperich, H.; Abdel-Karim, M.  
Berechnung der zeitabhängigen Verformung einer mehrfach  
verankerten chemisch verfestigten Baugrubenwand  
Borchert, K.-M.; Müller-Kirchenbauer, H.;  
Hebener, H.; Richter, T., 1980, 73 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 0706 7
- [9] Untersuchung zur Eignung von Silikatgelen für Abdichtungsinjektionen 4,00 €  
Tausch, N., 1980, 191 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 0733 4
- [10] Untersuchungen zum aktiven räumlichen Erddruck im rolligen Boden 8,00 €  
bei hydrostatischer Stützung der Erdwand  
Karstedt, J., 1982, 160 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 0807 1

**Herausgegeben von H. Müller-Kirchenbauer und S.A. Savidis**

- [11] Grundwasserbeeinflussung durch Silikatgelinjektionen 12,00 €  
zweite unveränderte Auflage 1984  
Müller-Kirchenbauer, H. u.a., 1984, 378 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 0817 9

- [12] Untersuchungen zum Tragverhalten von Verpreßankern in Sand 8,00 €  
Mayer, G., 1983, 171 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 0841 1

**Herausgegeben von S.A. Savidis**

- [13] Beiträge aus Forschungsschwerpunkten des Grundbauinstituts 10,50 €  
Savidis, S.A. u.a., 1983, 200 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 0930 2
- [14] Untersuchungen zum dynamischen Erddruck 10,00 €  
Klapperich, H., 1983, 192 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 3940 X
- [15] Vergleich zwischen berechneten und gemessenen 11,50 €  
Kriechverformungen an mit Silikatgel verfestigtem Sand  
Borchert, K.-M., 1985, 200 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 1042 4
- [16] Zur Mechanik der Entwicklung von Erosionskanälen in 10,50 €  
geschichtetem Untergrund unter Stauanlagen  
Hanses, U., 1985, 200 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 1042 4
- [17] Ein allgemeines Berechnungsverfahren für Grenzlastzustände im 10,50 €  
Grundbau, dargestellt am Beispiel des Grund- und Böschungsbruchs  
Sturm, U., 1987, 189 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 1174 9
- [18] Beiträge zur Modellversuchstechnik in der Geotechnik 10,50 €  
1988, 188 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 1269 9
- [19] Beiträge zur Umwelttechnik 10,50 €  
1989, 104 S.  
Universitätsverlag der TU Berlin  
ISBN 3 7983 1320 2



- |      |                                                                                                                                                                                                                                                  |         |
|------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| [20] | Beiträge zur Probabilistik in der Geotechnik<br>1989, 104 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3 7983 1409 8                                                                                                                           | 10,50 € |
| [21] | Zur analytischen Lösung der dreidimensionalen Wellenausbreitung<br>in elastischen Halbraum mit Anwendung auf<br>Interaktionsprobleme Baugrund - Bauwerk<br>Mitakidis, A., 1991, 257 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3 7983 1417 9 | 10,50 € |
| [22] | Numerische Verfahren zur dynamischen Boden - Bauwerk Interaktion<br>Sarfeld, W., 1994, 147 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3 7983 1624 4                                                                                          | 2,60 €  |
| [23] | Vorhersage gebirgsrelevanter Parameter im Tunnelbau<br>mittels stochastischer Prozesse<br>Kleen, H., 1994, 243 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3 7983 1626 0                                                                      | 2,60 €  |
| [24] | Selbstheilungsvermögen toniger Erdstoffe in Dichtungs-<br>systemen von Deponien bei Schädigung durch<br>mechanische Risse und Austrocknung<br>Mallwitz, K., 1996, 266 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3 7983 1693 7               | 2,60 €  |
| [25] | Einflußfunktionen für inhomogene Böden und ihre Anwendung<br>bei der Boden-Bauwerk Interaktion<br>Vrettos, C., 1997, 138 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3 7983 1750 X                                                            | 9,20 €  |
| [26] | Experimentelle Untersuchung des dynamischen Verhaltens<br>starrer Fundamente mit Impulserregungen in situ und an<br>kleinmaßstäblichen Modellen<br>Fritsche, M., 2000, 234 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3 7983 1854 9          | 15,30 € |

- |                                                                                                                                                                                                                                            |                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <p>[27] Untersuchungen zum Filtrationsverhalten von Feinstbindemittelsuspensionen bei der Injektion in Sande<br/>Mittag, J., 2000, 208 S.<br/>Universitätsverlag der TU Berlin<br/>ISBN 3 7983 1855 7</p>                                  | <p>17,90 €</p> |
| <p>[28] Numerische Verfahren zur Berechnung von Baugrund-Bauwerk-Interaktionen im Zeitbereich mittels GREENscher Funktionen für den Halbraum<br/>Bode, C., 2000, 168 S.<br/>Universitätsverlag der TU Berlin<br/>ISBN 3 7983 1856 5</p>    | <p>16,00 €</p> |
| <p>[29] Oberflächenabdichtungen für Deponien - Technische Entwicklungen, Wirtschaftlichkeit, Genehmigungsfähigkeit<br/>Gemeinschaftstagung TUB, BAM, LUAB<br/>2001, 116 S.<br/>Universitätsverlag der TU Berlin<br/>ISBN 3 7983 1857 3</p> | <p>30,70 €</p> |
| <p>[30] Verformbarkeit von Dichtungsasphalt<br/>Franke, J., 2001, 147 S.<br/>Universitätsverlag der TU Berlin<br/>ISBN 3 7983 1862 X</p>                                                                                                   | <p>15,30 €</p> |
| <p>[31] Kopplung von Finiten Elementen mit Rand-Elementen zur Berechnung der dynamischen Baugrund-Bauwerk-Interaktion<br/>Hirschauer, R., 2001, 150 S.<br/>Universitätsverlag der TU Berlin<br/>ISBN 3-7983-1883-2</p>                     | <p>18,00 €</p> |
| <p>[32] Numerische Untersuchungen zum Tragverhalten von Zugpfählen und Zugpfahlgruppen in Sand auf der Grundlage von Probelastungen<br/>Rackwitz, F., 2003, 206 S.<br/>Universitätsverlag der TU Berlin<br/>ISBN 3-7983-1907-3</p>         | <p>18,00 €</p> |
| <p>[33] Untersuchungen zu Verschiebungen von Schlitzwänden beim Unterwasseraushub in Berliner Sanden<br/>Schran, U., 2003, 248 S.<br/>Universitätsverlag der TU Berlin<br/>ISBN 3-7983-1919-7</p>                                          | <p>19,00 €</p> |

- |      |                                                                                                                                                                                                                                                           |         |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| [34] | Untersuchungen zum Trag- und Schädigungsverhalten<br>fester Schienenfahrbahnen in Betonbauweise<br>Bergmann, S., 2005, 230 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3-7983-1923-5                                                                   | 19,00 € |
| [35] | Untersuchungen zum Einfluß der Geologie im Großraum Köln<br>auf die Form elastischer Beschleunigungsantwortspektren<br>Röhner, J., 2005, 60 S. + Anlagen<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3-7983-1925-1                                        | 25,00 € |
| [36] | Qualitätsverbesserung von Schlitzwand- und Düsenstrahlarbeiten<br>unter besonderer Berücksichtigung der Baugrundverhältnisse im<br>Zentralen Bereich Berlins<br>Windelschmidt, B., 2003, 290 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3-7983-1928-6 | 16,50 € |
| [37] | Untersuchung des Setzungsverhaltens von Bahnschotter und der<br>Hohllagenentwicklung auf Schotterfahrbahnen<br>Holtzendorff, K., 2004, 142 S.<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3-7983-1936-7                                                   | 18,00 € |
| [38] | Vorträge zum 1. Hans Lorenz Symposium, Berlin 2005<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3-7983-1993-6                                                                                                                                              | 45,00 € |
| [39] | Vorträge zum Spundwandseminar 2006, Berlin 2006<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3-7983-2012-8                                                                                                                                                 | 45,00 € |
| [40] | Vorträge zum 2. Hans Lorenz Symposium, Berlin 2006<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3-7983-2024-1                                                                                                                                              | 45,00 € |
| [41] | Vorträge zum 3. Hans Lorenz Symposium, Berlin 2007<br>Universitätsverlag der TU Berlin<br>ISBN 3-7983-2063-5                                                                                                                                              | 45,00 € |
| [42] | Vorträge zum 4. Hans Lorenz Symposium, Berlin 2008<br>SHAKER Verlag<br>ISBN 978-3-8322-7597-6                                                                                                                                                             | 49,80 € |

- |      |                                                                                                                                                                               |         |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------|
| [43] | Vorträge zum Spundwandseminar 2009, Berlin 2009<br>SHAKER Verlag<br>ISBN 978-3-8322-8035-2                                                                                    | 48,80 € |
| [44] | Differential Geometry Applied to Continuum Mechanics<br>Aubram, D., 2009, 124 S.<br>SHAKER Verlag<br>ISBN 978-3-8322-8154-0                                                   | 45,80 € |
| [45] | Lageveränderungen des Schottergleises durch zyklische und dynamische Beanspruchungen<br>Baessler, M.<br>SHAKER Verlag<br>in Vorbereitung                                      |         |
| [46] | Einflussgrößen für das Schwingungsverfahren von Gebäuden zur Prognose von Erschütterungsimmissionen<br>Meinhardt, C., 2011, 161 S.<br>SHAKER Verlag<br>ISBN 978-3-8440-0334-5 | 48,80 € |
| [47] | Vorträge zum 5. Hans Lorenz Symposium, Berlin 2009<br>SHAKER Verlag<br>ISBN 978-3-8322-8336-0                                                                                 | 49,80 € |
| [48] | Modeling and Numerical Analysis of Wave Propagation in Saturated and Partially Saturated Porous Media<br>Albers, B., 2010, 342 S.<br>SHAKER Verlag<br>ISBN 978-3-8322-9008-5  | 49,80 € |
| [49] | Der Einfluss der Gestängelänge auf die Ergebnisse von Rammsondierungen<br>Röhner, R., 2010, 166 S.<br>SHAKER Verlag<br>ISBN 978-3-8322-9373-4                                 | 48,80 € |
| [50] | Vorträge zum 6. Hans Lorenz Symposium, Berlin 2010<br>SHAKER Verlag<br>ISBN 978-3-8322-9457-1                                                                                 | 49,80 € |
| [51] | State-of-the-Art. Fault Rupture Propagation to the Ground Surface and Soil-Structure Interaction<br>El Soud, S. A., 2011, 107 S.<br>SHAKER Verlag<br>ISBN 978-3-8440-0312-3   | 45,80 € |

- [52] Zur Dimensionierung der Monopile-Gründungen von Offshore  
Windenergieanlagen  
Tasan, E.  
in Vorbereitung
- [53] Preloading Effects on Dynamic Sand Behavior by Resonant Column Tests 49,80 €  
Bai, L., 2011, 224 S.  
SHAKER Verlag  
ISBN 978-3-8440-0120-4
- [54] Piled foundations for offshore wind turbines: Numerical and experimental  
investigations for a design model  
Cuellar, P.  
in Vorbereitung
- [55] Einfluss der Steifigkeit von Baugrund und Gründung auf die Abschirmung von  
Schienenverkehrserschütterungen mit Elastomermatten  
Appel, S.  
in Vorbereitung
- [56] Vorträge zum Workshop OWEA Gründungen, Berlin 2011 49,80 €  
SHAKER Verlag  
ISBN 978-3-8440-1090-9
- [57] Durch Tunnelblick zu erweiterter Perspektive 39,80 €  
Balthaus, H., 2011, 64 S.  
SHAKER Verlag  
ISBN 978-3-8440-0239-3
- [58] Vorträge zum 7. Hans Lorenz Symposium, Berlin 2011 49,80 €  
SHAKER Verlag  
ISBN 978-3-8440-0407-6
- [59] Untersuchungen zum Trag-und Verformungsverhalten von Untergrund-  
verbesserungen mit Sandsäulen in Böden mit organischen Anteilen 49,80 €  
Schüssler, M., 2012, 374 S.  
SHAKER Verlag  
ISBN 978-3-8440-0943-9
- [60] Vorträge zum 8. Hans Lorenz Symposium, Berlin 2012 49,80 €  
Gründungen von Offshore-Bauwerken  
SHAKER Verlag  
ISBN 978-3-8440-1377-1

- |                                                                                                                                                                                                          |                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------|
| <p>[61] Numerical Investigation of Dynamic Railway Vehicle-Track-Subgrade Interaction<br/>         Shan, Y., 2013, 130 S.<br/>         SHAKER Verlag<br/>         ISBN 978-3-8440-2294-0</p>             | <p>45,80 €</p> |
| <p>[62] An Arbitrary Lagrangian-Eulerian Method for Penetration into Sand at Finite Deformation<br/>         Aubram, D., 2013, 392 S.<br/>         SHAKER Verlag<br/>         ISBN 978-3-8440-2507-1</p> | <p>49,80 €</p> |
| <p>[63] Vorträge zum 9. Hans Lorenz Symposium, Berlin 2013<br/>         SHAKER Verlag<br/>         ISBN 978-3-8440-2201-8</p>                                                                            | <p>49,80 €</p> |
| <p>[64] Vorträge zum 10. Hans Lorenz Symposium, Berlin 2014<br/>         SHAKER Verlag<br/>         ISBN 978-3-8440-2988-8</p>                                                                           | <p>49,80€</p>  |
| <p>[65] Berechnungsverfahren für praxisnahe Boden-Bauwerks-Interaktionsprobleme im Frequenzbereich<br/>         Schepers, W.,<br/>         in Vorbereitung</p>                                           |                |
| <p>[66] Zum Verhalten von Sand unter Beanspruchung mit Polarisationswechsel im Einfeldversuch<br/>         Le, V. H., 2015, 221 S.<br/>         SHAKER Verlag<br/>         ISBN 978-3-8440-4081-4</p>    | <p>49,80€</p>  |
| <p>[67] Kybernetik in der (Spezialtief-) Bauplanung<br/>         Mejschik, M.,<br/>         in Vorbereitung</p>                                                                                          |                |
| <p>[68] Das Verhalten von Sand unter zyklischer irregulärer Belastung<br/>         Glasenapp, R.,<br/>         in Vorbereitung</p>                                                                       |                |
| <p>[69] Vorträge zum 11. Hans Lorenz Symposium, Berlin 2015<br/>         SHAKER Verlag<br/>         ISBN 978-3-8440-3898-9</p>                                                                           | <p>49,80€</p>  |

## Weitere Veröffentlichungen des Grundbauinstituts

|                                                                                                                    |              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|
| Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugrunddynamik"<br>Herausgegeben von der DGGT, 2003, 67 S.<br>ISBN 3-7983-1909-X | (vergriffen) |
| Grundbauseminar<br>Vorstellung der neuen EAB mit dem Teilsicherheitskonzept, 2007, 236 S                           | 25,00 €      |
| DIN 1054 Seminar<br>Neues Sicherheitskonzept in der Geotechnik, 2009, 156 S.                                       | 25,00 €      |

