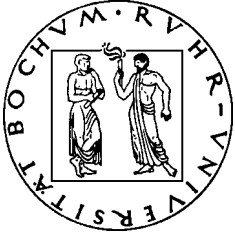
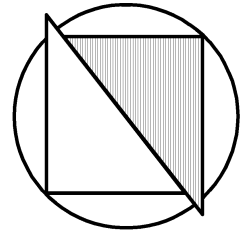


# Schriftenreihe



DES INSTITUTES FÜR  
GRUNDBAU UND BODENMECHANIK  
DER RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM



Herausgeber: Th. Triantafyllidis

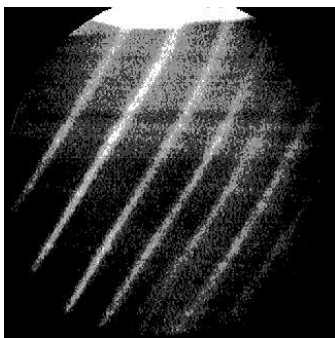
---

Heft 37

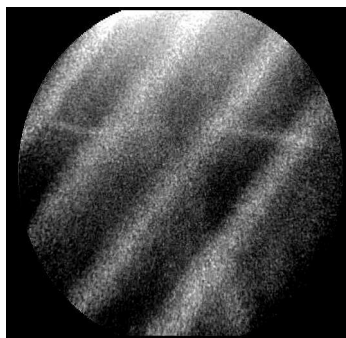
## Zur Scherfugenbänderung granularer Materialien unter Extensionsbeanspruchung

von

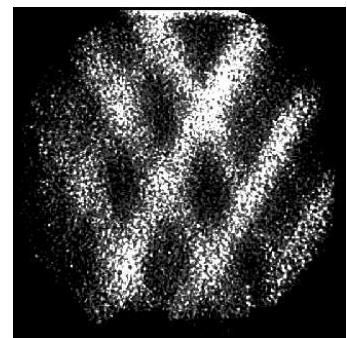
Henning Wolf



$d_{50} = 0,35 \text{ mm}$



$d_{50} = 0,89 \text{ mm}$



$d_{50} = 1,58 \text{ mm}$

Von der Fakultät für Bauingenieurwesen  
der Ruhr-Universität Bochum genehmigte

DISSERTATION

von

Dipl.-Ing. Henning Wolf

aus Schüttorf

Wissenschaftlicher Mitarbeiter am  
Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik  
der Ruhr-Universität Bochum

Tag der mündlichen Prüfung:  
30. Mai 2005

Referenten

Prof. Dr.-Ing. habil. T. Triantafyllidis  
Prof. Dr.-Ing. habil. A. Hettler  
Prof. Dr.-Ing. habil. M. Scherer

## Vorwort des Herausgebers

Die Scherfugenbildung im Boden und Fels ist eine der interessantesten Erscheinungen in der Geomechanik und hat einen direkten Einfluss bei der Lösung von praktischen Fragestellungen, wie z.B. bei der Abdichtung von unterirdischen Speichern von Rohstoffen, dem seismischen Verhalten von tektonischen Formationen wie auch der Wechselwirkung von Strukturen (Verbauwände, Tunnel) mit dem Baugrund. Fragen der Belastungsgeschichte und der Rheologie der Oberkruste der Erde sind mit der Scherfugenbildung und Bänderung oftmals verknüpft. Viele namhafte Wissenschaftler im Bereich der Bodenmechanik und der Geowissenschaften haben sich mit der Entstehung und der Geometrie von Lokalisierungszonen beschäftigt, wobei im Vordergrund der Arbeiten die Neigung und die Dicke einzelner Scherfugen standen. Sehr wenige Arbeiten beschäftigten sich mit der Bänderung von Lokalisierungszonen und speziell mit deren Abständen. Das Thema ist extrem anspruchsvoll sowohl in experimenteller als auch in theoretischer Hinsicht.

Diese Arbeit von Herrn H. Wolf hat als primäres Ziel die systematische experimentelle Untersuchung der Entstehung der Scherfugenbänderung in granularen Materialien, welche einer Extensionsbeanspruchung unterzogen werden. Zunächst hat der Autor ein Extensionsgerät konzipiert, welches im Gegensatz zu bereits vorhandenen Systemen homogene Deformationen in einem Bodenkörper erzeugt, so dass unter diesen Bedingungen das Material mit Lokalisierungen ohne geometrischen Zwang reagieren muss. Zur Bestimmung der Scherfugenabstände sowie des Zeitpunktes der Entstehung der Lokalisierungen hat Herr Wolf die DIC-Technik (Digital Image Correlation) sowie die in diesem Gebiet bewährte Röntgentechnik eingesetzt. In den durchgeführten Modellversuchen wurden die Materialeigenschaften, die Zustandsgrößen und die Geometrie der Proben systematisch verändert, um potentielle Einflüsse auf die Scherfugenbänderung zu untersuchen. Aus der Arbeit sind Erkenntnisse entstanden, welche die möglichen Einflußfaktoren der Scherfugenbänderung eingrenzen.

Die vorliegende Arbeit stellt einen Grundstein für weitere Untersuchungen dar, die den bisherigen Kenntnisstand erweitern und uns der Lösung des Problems der Bänderung von Scherfugen näher bringen. Diese Arbeit ist im Rahmen des Teilprojektes A1 des SFB 526 „Rheologie der Erde“ entstanden, wobei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die finanzielle Unterstützung gedankt wird.

*Theodoros Triantafyllidis*

## Vorwort des Verfassers

Diese Arbeit entstand in den Jahren 1999 bis 2005 im Rahmen meiner Tätigkeit am Lehrstuhl für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum und wurde von der Fakultät für Bauingenieurwesen als Dissertation anerkannt.

An erster Stelle möchte ich meinem Hauptreferenten Prof. Theodoros Triantafyllidis für seine stete Unterstützung und Gesprächsbereitschaft danken. Ohne seine Denkanstöße und Ratschläge wäre die Anfertigung dieser Arbeit nicht möglich gewesen. Prof. Achim Hettler danke ich für die Übernahme des 2. Referats. Die fachlichen Diskussionen mit Prof. Hettler trugen wesentlich zum Gelingen dieser Arbeit bei. Prof. Michael Scherer sei für die Übernahme des fachfremden Referats gedankt.

Dr. Diethard König danke ich für die stete Unterstützung und Diskussionsbereitschaft. Seine Erfahrung auf dem Gebiet der geotechnischen Versuchstechnik half mir insbesondere bei der Planung und der Ausführung der durchgeführten Modellversuche. Dr. Andrzej Niemunis danke ich für die fruchtbaren Diskussionen und Anregungen in Bezug auf die theoretischen Aspekte der vorliegenden Arbeit. Bernd Schmidt und Ralf Schudy danke ich für die Anfertigung des Extensionsgerätes. Bernhard Sperl, Werner Müller, Jochen Blazytko und Michael Skubisch sei für die gewissenhafte Vorbereitung der Modellversuche und die Unterstützung bei der Durchführung der Experimente gedankt. Weiterhin bedanke ich mich bei meinen studentischen Hilfskräften Dr. Daniele Gualco, MSc. Natasa Katic und Robert Hayford.

Ein ganz besonderer freundschaftlicher Dank gebührt Dr. René Schäfer, mit dem ich in unserer gemeinsamen Zeit am Lehrstuhl das Zimmer geteilt habe.

Zuletzt möchte ich mich im Besonderen bei meiner Freundin Daniela und bei meiner Familie bedanken. Ohne ihre Unterstützung wäre eine erfolgreiche Fertigstellung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

*Henning Wolf*

## Abstract

The appearance of shear banding in granular materials has been investigated intensively during the last decades and is still of ongoing importance in terms of understanding the stress-strain behavior of the material, the localization phenomena and the interaction between soil and structure. The research on the phenomenon of shear banding is mainly concentrated on the investigation of shear localization in single shear bands. Only less attention has been paid to the occurrence of systems of parallel and conjugated shear bands although such systems can be frequently observed in the field of geotechnical engineering (retaining walls, slopes) as well as in the field of geology (faults, plate boundaries). It remains unknown in what extent the geometry of shear band patterns, which can be defined by the shear band spacing and the inclination of the shear bands, depends on the boundary conditions of the selected system and/or on the properties of the material under investigation.

In order to evaluate the influence of different boundary conditions and material properties on the geometry of shear band systems results of geotechnical model tests are presented within this thesis. The model tests are carried out in a specific testing device that has been designed by the author. In this device extensional strain is applied to a sample of granular material. Radiography is used to determine the spacing and the inclination of the developing shear zones, an optical measurement system called Digital Image Correlation (DIC) is applied to identify the deformation mechanism and the point of localization.

It is found that the geometry of the shear band systems is mainly influenced by the geometry of the sample at the beginning of the straining process. A linear relationship between the initial height of sample and the shear band spacing has been derived from the model tests. Additionally it is found that the shear band spacing increases with decreasing initial density of the specimen. As the initial density of a specimen is directly linked with the stress-strain behavior of the model material, this observation implies that a localization of deformation in shear bands is only possible if the model material owns softening behavior. This is confirmed by means of an analytical description of the deformation process inside the sample. By determining the maximum dissipated energy inside the shear band system it can be shown that the shear band spacing is dependent on the magnitude of the material softening gradient and on the stress ratios inside the sample.

Other boundary conditions as the strain rate or the stress level as well as material pro-

perties, e.g. the uniformity of the model material, seem to be of minor importance with respect to the geometry of the shear band systems.

# Inhaltsverzeichnis

Vorwort des Herausgebers	iii
Vorwort des Verfassers	iv
Abstract	v
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Einführung . . . . .	1
1.2 Zielsetzung und Gliederung . . . . .	4
<b>2 Allgemeine Erkenntnisse zur Scherfugenbildung</b>	<b>7</b>
2.1 Allgemeines zur Bildung von Scherfugensystemen . . . . .	7
2.1.1 Scherfugenbänderung im Labor- und Ingenieurmaßstab . . . . .	7
2.1.2 Scherfugenbänderung in geologischen Formationen . . . . .	11
2.2 Granulometrie . . . . .	18
2.3 Dynamische Materialeigenschaften . . . . .	21
2.4 Geometrie . . . . .	23
2.5 Spannungsniveau . . . . .	24
2.6 Spannungs-Verformungsverhalten und Lagerungsdichte . . . . .	26

<b>3</b>	<b>Modellversuche zur Simulation von Scherfugenmustern</b>	<b>29</b>
3.1	Methode . . . . .	30
3.2	Versuchsbehälter und Versuchsvorbereitung . . . . .	32
3.3	Messtechnik . . . . .	34
3.3.1	Allgemeines . . . . .	34
3.3.2	Röntgentechnik . . . . .	36
3.3.3	Digital Image Correlation . . . . .	36
3.3.4	Weitere Komponenten der Messtechnik . . . . .	41
3.4	Versuchsauswertung . . . . .	42
3.4.1	Auswertung der Scherfugenabstände und Scherfugenneigungen . . .	42
3.4.2	Bestimmung der Lokalisierungsdehnung . . . . .	42
3.4.3	Bestimmung der Scherfugendicke . . . . .	47
3.4.4	Auswertung der Probenoberflächendeformation . . . . .	48
3.5	Materialien . . . . .	49
3.6	Versuchsprogramm . . . . .	51
<b>4</b>	<b>Grundlagen zur Interpretation der Versuchsergebnisse</b>	<b>52</b>
4.1	Definitionen . . . . .	52
4.2	Hypoplastisches Stoffgesetz . . . . .	53
4.2.1	Formulierung . . . . .	53
4.2.2	Intergranulare Dehnung . . . . .	56
4.2.3	Fluktuation der Porenzahl . . . . .	57
4.3	Triaxialversuche . . . . .	59
4.3.1	Bestimmung des maßgeblichen Spannungspfades . . . . .	59
4.3.2	Darstellung der Versuchsergebnisse . . . . .	66



<b>5</b>	<b>Darstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse</b>	<b>71</b>
5.1	Allgemeine Beobachtungen . . . . .	71
5.1.1	Homogenität der eingepprägten Dehnung . . . . .	71
5.1.2	Allgemeines Verhalten der Probekörper und Beschreibung des De- formationsmechanismus . . . . .	74
5.2	Lokalisierungsdehnung . . . . .	83
5.3	Scherfugendicke . . . . .	93
5.4	Der Einfluss der granulometrischen Materialeigenschaften . . . . .	99
5.4.1	Methodik und Versuchsprogramm . . . . .	99
5.4.2	Versuchsergebnisse . . . . .	100
5.5	Der Einfluss der dynamischen Materialeigenschaften . . . . .	109
5.5.1	Methodik und Versuchsprogramm . . . . .	109
5.5.2	Versuchsergebnisse . . . . .	111
5.6	Der Einfluss der Probengeometrie . . . . .	117
5.6.1	Methodik und Versuchsprogramm . . . . .	117
5.6.2	Versuchsergebnisse . . . . .	118
5.7	Der Einfluss des Spannungsniveaus . . . . .	121
5.7.1	Methodik und Versuchsprogramm . . . . .	121
5.7.2	Versuchsergebnisse . . . . .	122
5.8	Der Einfluss des Spannungs-Verformungsverhaltens des Modellmaterials . .	126
5.8.1	Methodik und Versuchsprogramm . . . . .	126
5.8.2	Versuchsergebnisse . . . . .	127
<b>6</b>	<b>Beschreibung des Deformationsmechanismus</b>	<b>138</b>
6.1	Allgemeines . . . . .	138
6.2	Beschreibung der Kinematik . . . . .	139
6.2.1	Kinematik der Blöcke . . . . .	140

6.2.2	Kinematik der Keile . . . . .	145
6.2.3	Änderung der Probenhöhe . . . . .	147
6.3	Isotrope Entfestigung des Materials . . . . .	148
6.4	Anisotrope Entfestigung des Materials . . . . .	157
6.5	Energiedissipation ohne Berücksichtigung der Entfestigung des Materials .	158
6.6	Energiedissipation unter Berücksichtigung der Entfestigung des Materials .	161
<b>7</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>166</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>172</b>
<b>A</b>	<b>Materialeigenschaften der verwendeten Granulate</b>	<b>185</b>
A.1	Materialkennwerte . . . . .	186
A.2	Kornverteilungen . . . . .	187
A.3	Ergebnisse der Kompressionsversuche an feinem Quarzsand (Material 1) . .	188
A.4	Hypoplastische Materialparameter für feinkörnigen Quarzsand (Material 1)	188
<b>B</b>	<b>Skalierungsfaktoren für geotechnische und geologische Modellversuche im natürlichen und im erhöhten Schwerfeld</b>	<b>189</b>

# Kapitel 1

## Einleitung

### 1.1 Einführung

Wird der Boden durch einen isotropen Druck belastet, sind bei rolligen Böden nur vergleichsweise geringfügige Verformungen zu beobachten. Große Verformungen treten dagegen auf, wenn eine anisotrope Belastung des Bodens vorliegt, d.h. wenn unterschiedlich große Druckspannungen auf den Bodenkörper einwirken. Ein Maß für die Größe der Spannungsdifferenz ist die Deviatorspannung [24].

Der Boden hat die Fähigkeit, einer Spannungsdifferenz einen Widerstand entgegenzusetzen. Dieser Widerstand beruht auf den Kontaktkräften zwischen den Körnern und wird als Schub- oder Scherfestigkeit bezeichnet. Die Scherfestigkeit des Bodens setzt sich aus den Anteilen Kohäsion und Reibung zusammen. Die Kohäsion beschreibt die Scherfestigkeit des Bodens bei Normalspannungsfreiheit und wird aus diesem Grund auch als Haftfestigkeit bezeichnet. Der Scherfestigkeitsanteil aus Reibung ist abhängig von der Größe der Normalspannung zwischen den Körnern. Das Verhältnis von Scherfestigkeit und Normalspannung wird durch den Reibungswinkel des Bodens beschrieben.

Plastische Verformungen treten innerhalb eines Bodenkörpers mit dem Erreichen des plastischen Grenzzustandes auf. In DIN 18137 [24] werden zwei unterschiedliche Formen des Versagenszustandes beschrieben. Beim Versagen in Form eines Zonenbruchs tritt eine kontinuierliche plastische Verformung des räumlichen Bodenelements auf. Dieser Versagensform liegt die Theorie von Rankine [104] zu Grunde, wonach beim Erreichen des Grenzzustandes in jedem Punkt innerhalb des Körpers die Bruchbedingung erfüllt ist

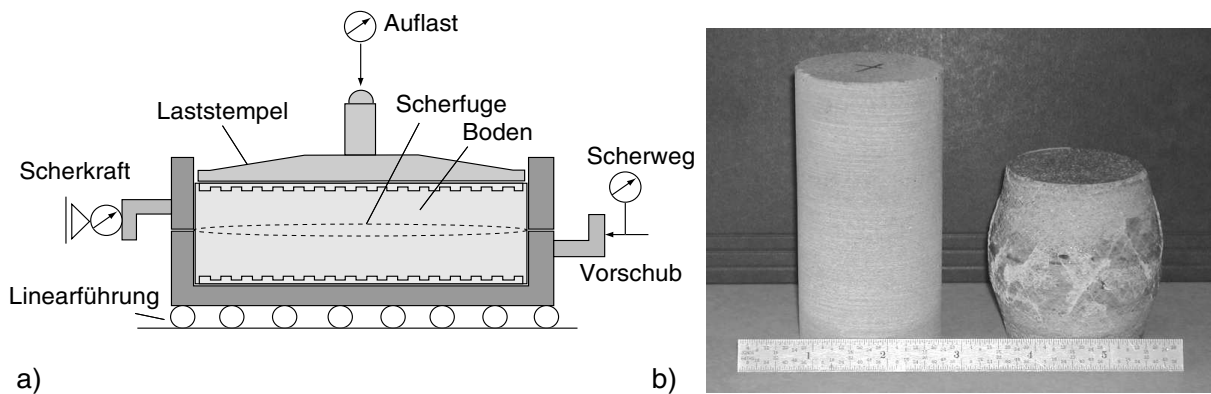


Bild 1.1: a) Scherfuge im Rahmenschergerät b) im Triaxialgerät plastisch verformte Kalksteinprobe

und sich ein symmetrisches Gleitflächensystem entwickelt. Beim Versagen von verschiedenen geotechnischen Bauwerken, wie z.B. beim Böschungs- oder Geländebruch, lässt sich nur eine Gleitfläche beobachten. Die plastische Verformung konzentriert sich bei dieser Versagensform in einem dünnen Bereich, der so genannten Scherfuge. Der umgebende Bereich befindet sich im elastischen Zustand.

Beide Versagensformen lassen sich im Rahmen der Elementversuche zur Bestimmung der Scherfestigkeit beobachten. Bei der Versuchsdurchführung im Rahmenschergerät wird die Entwicklung einer einzelnen Scherfuge durch die Verschiebung der beiden Rahmenhälften erzwungen (vgl. Bild 1.1a). Im Triaxialgerät kann beim Erreichen des Grenzzustandes eine räumliche plastische Verformung des Probekörpers in Form eines Zonenbruchs auftreten. Das kennzeichnende Muster von sich kreuzenden Gleitflächen ist am Beispiel eines abgescherten Probekörpers aus Kalkstein in Bild 1.1b dargestellt. Der Probekörper wurde unter hohen Seitendrücken abgeschert. Die plastische Verformung in Form eines Zonenbruchs ist auf die duktilen Materialeigenschaften des Kalksteins bei hohen Drücken zurückzuführen.

Die bei Zonenbrüchen auftretenden Scherfugenscharen können unter homogenen Randbedingungen regelmäßige Muster bilden. Dieses Verhalten wird als Scherfugenbänderung bezeichnet. Scherfugenmuster sind sowohl kleinmaßstäblich im Modellversuch als auch im Ingenieurmaßstab in unmittelbarer Nähe der Oberfläche des Erdbodens zu beobachten. Bild 1.2a zeigt ein System von parallelen Scherfugen, das hinter einer Verbauwand durch die Rotation der Wand um den Wandfuß beim Aushub der Baugrube hervorgerufen wird. Auch in größeren Skalen sind Systeme von Scherfugen zu beobachten. Im Bereich des rheinisch-westfälischen Bergbaugebiets treten durch den Abbau eines Steinkohleflözes

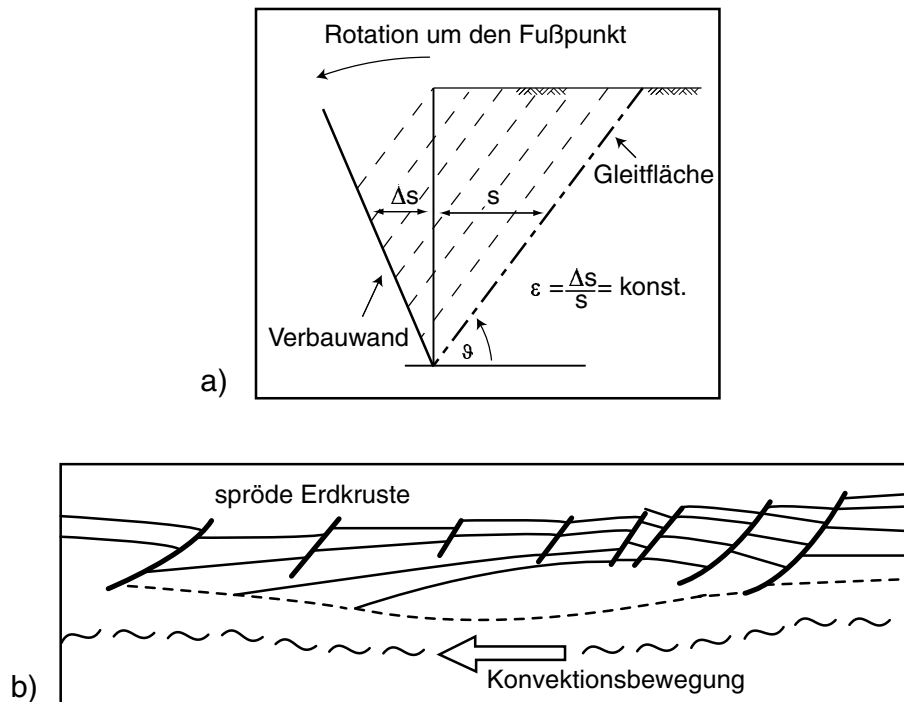


Bild 1.2: Beispiele für die Scherfugenbänderung a) im Ingenieurmaßstab [49] und b) im geologischen Maßstab [66]

Bergsenkungen auf, die zur Bildung eines Setzungstrog führen. An den Rändern dieses Troges werden die anstehenden Schichten aus Lockergestein gedehnt. Mit dem fortschreitenden Abbau eines Flözes bildet sich in diesen Randbereichen sukzessiv eine Schar von Scherflächen aus, die an der Oberfläche durch die Entstehung von Erdstufen sichtbar werden kann [59, 100]. Im Bereich von dilatanten und kontraktanten Kontinentalplatten Grenzen bilden sich in den spröden Schichten der oberen Erdkruste (Lithosphäre) Verwerfungen, die in den geologischen Formationen regelmäßig oder unregelmäßig angeordnet sind. Diese Muster entstehen zum Beispiel durch Aufwölbungen innerhalb der Erdkruste oder durch Konvektionsbewegungen der duktilen unteren Schichten des Erdaufbaus. Bild 1.2b zeigt beispielhaft die Scherfugenbänderung in der spröden oberen Erdkruste aufgrund der kontinuierlichen Konvektionsbewegung der Materialien im Erdmantel.

Die Form und die Geometrie der Scherfugenbänderung wird durch die Abstände der Scherfugen und die Neigung der einzelnen Scherflächen festgelegt. Über die Einflussparameter auf die Scherfugenneigung liegen zahlreiche gesicherte Erkenntnisse vor. Neben verschiedenen theoretischen Herleitungen der Scherfugenneigung [18, 106] wurden experimentell zahlreiche Einflussfaktoren untersucht. Die Scherfugenneigung wird demnach unter anderem von der Größe des mittleren Korndurchmessers [5, 22, 128] beeinflusst. Auch in

Bezug auf die Entstehung und Entwicklung von einzelnen Scherfugen wurden zahlreiche Untersuchungen durchgeführt [3, 82, 86, 93, 109, 121]. Die Bildung und das Verhalten von Scherfugengruppen bleibt dagegen weitgehend unerforscht. Insbesondere sind die Faktoren unbekannt, die den Abstand der Scherfugen bestimmen. So bleibt bis zum heutigen Zeitpunkt unklar, nach welchen Gesetzmäßigkeiten sich die Scherfugenabstände ausbilden oder ob bestimmte Abstände, welche in der Natur vorliegen oder im Modellversuch ermittelt werden, charakteristisch für bestimmte Randbedingungen oder Materialeigenschaften sind.

Mögliche Einflussfaktoren auf die Form und die Geometrie der Scherfugenbänderung in Lockergesteinen stellen die Materialeigenschaften wie zum Beispiel die mittlere Korngröße und die Kornverteilung dar. Ebenso wird die Bänderung möglicherweise durch die Form der Beanspruchung oder durch die geometrischen Eigenschaften des Probekörpers beeinflusst. Neuere Erkenntnisse lassen einen Zusammenhang der Scherfugenabstände innerhalb einer Scherfugengruppe mit den dynamischen Eigenschaften (dynamischer Schubmodul und Kompressionswellengeschwindigkeit) des Materials oder den dynamischen Randbedingungen des Systems (Belastungsgeschwindigkeit) vermuten.

## 1.2 Zielsetzung und Gliederung

Inhalt der bisherigen Arbeiten auf dem Gebiet der Scherfugenbildung war es, Bedingungen und Einflussfaktoren für die Bildung von einzelnen Scherfugen zu untersuchen. Die Randbedingungen und Voraussetzungen zur Bildung von Scherfugensystemen wurden nur eingeschränkt betrachtet. Im Rahmen dieser Arbeit soll die Forschung auf dem Gebiet der Lokalisierung von Verformungen in Scherfugen auf die Untersuchung von Scherfugengruppen erweitert werden. Ziel ist es, die Bildung und Entwicklung der Scherfugenmuster experimentell nachzuvollziehen und die Abhängigkeit der Geometrie der Scherfugengruppen von verschiedenen Einflussparametern zu erfassen.

Im zweiten Kapitel werden die Einflussparameter beschrieben, die im Rahmen dieser Arbeit untersucht werden. Vorab wird der aktuelle Forschungsstand auf dem Gebiet der Scherfugenbildung zusammengefasst und die vorliegende Arbeit in den Kontext der vorhandenen Untersuchungen eingeordnet. Ein wichtiger Einflussfaktor, der untersucht wird, ist die Granulometrie des Modellmaterials. Diese kann insbesondere durch die Faktoren mittlere Korngröße und Ungleichförmigkeit des Materials beschrieben werden. Bei der Un-

tersuchung des Einflusses der dynamischen Materialeigenschaften und Randbedingungen wird auf die Arbeit von Poliakov et al. [98] Bezug genommen. Weiterhin wird in diesem Zusammenhang die Abhängigkeit der Form der Scherfugenbänderung von der Belastungsgeschwindigkeit untersucht. Nachdem der mögliche Einfluss der Geometrie beschrieben worden ist, wird die Abhängigkeit der Scherfugeengeometrie von der Größe des Spannungsniveaus betrachtet. Abschließend wird der Einfluss des Spannungs-Verformungsverhaltens und der Einfluss der Lagerungsdichte der Probekörper im Ausgangszustand untersucht.

Zur Untersuchung der Einflüsse auf die Geometrie der Scherfugenmuster werden für die verschiedenen Einflussfaktoren Modellversuche unter Extensionsbeanspruchung durchgeführt. Die Theorie und die Methodik zu den Modellversuchen wird im dritten Kapitel beschrieben. Eine Voraussetzung zur Vergleichbarkeit und zur Reproduktion der Ergebnisse sind gleich bleibende Randbedingungen bei der Versuchsdurchführung. Der Entwicklung und der Konstruktion eines geeigneten Modellbehälters wurde dementsprechend eine hohe Bedeutung beigemessen. Um die Modellversuche exakt und umfassend auswerten zu können, ist die Anwendung einer umfangreichen Messtechnik notwendig. Hierzu werden neben der analogen Speicherung relevanter Messdaten die Röntgentechnik und eine digitale Bildauswertung eingesetzt. Nach der Beschreibung der verwendeten Messtechniken und der Versuchsauswertung werden die verwendeten Materialien vorgestellt.

Neben den Modellversuchen im Extensionsgerät werden zur Bestimmung des Spannungs-Verformungsverhaltens der Materialien und zur Bestimmung der für die Versuchsauswertung und die Interpretation benötigten Scherparameter Triaxialversuche durchgeführt. Um die Ergebnisse der Triaxialversuche in die Interpretation der Modellversuchsergebnisse einfließen zu lassen, ist die Kenntnis des maßgebenden Spannungszustandes im Extensionsgerät während der Versuchsdurchführung notwendig. Hierzu wird der Extensionsversuch mit Hilfe der Finiten-Element-Methode simuliert. Das hierfür verwendete Stoffgesetz wird im vierten Kapitel beschrieben. Anschließend werden die Ergebnisse der Simulation dargestellt. Die aufgrund der Ergebnisse der FE-Berechnung durchgeführten triaxialen Extensionsversuche werden abschließend erläutert.

Eine besondere Bedeutung kommt bei der Durchführung der Modellversuche im Extensionsgerät die Gewährleistung einer homogenen Versuchsrandbedingung zu. Die Ergebnisse der Überwachung dieser wichtigen Randbedingung werden einleitend im fünften Kapitel dargestellt. Nach der Beschreibung des allgemeinen Verhaltens der Probekörper unter einer Extensionsbeanspruchung während der Versuchsdurchführung, werden die Größen der Lokalisierungsdehnung und der Dicke der Scherfugen in Abhängigkeit der verschiedenen

Einflussparameter zusammengefasst. Der Einfluss der untersuchten Materialeigenschaften und Randbedingungen auf die Geometrie der Scherfugenmuster wird im Anschluss beschrieben. Hierbei werden für jeden Einflussfaktor vorab etwaige Besonderheiten in der Versuchsdurchführung und das Versuchsprogramm vorgestellt. Anschließend erfolgt die Präsentation und die Interpretation der Ergebnisse der Modellversuche.

Auf Grundlage der in den vorangehenden Kapiteln erarbeiteten Ergebnisse wird im sechsten Kapitel die Kinematik des beobachteten Deformationsmechanismus beschrieben. Mit Hilfe von energetischen Kriterien wird die energetisch günstigste Geometrie des Scherfugensystems ermittelt.

Die Zusammenfassung der Ergebnisse im siebten Kapitel beinhaltet die Bewertung der erzielten Ergebnisse und gibt einen Ausblick auf mögliche zukünftige Untersuchungen.



# Kapitel 2

## Allgemeine Erkenntnisse zur Ausbildung von einzelnen Scherfugen und von Scherfugensystemen

Die Darstellung der theoretischen und experimentellen Erkenntnisse in Bezug auf die Ausbildung von einzelnen Scherfugen und von Scherfugenscharen in granularen Medien in diesem Kapitel hat zum Ziel, die Wahl der in Kapitel 3 im Modellversuch untersuchten Einflussparameter auf die Geometrie der entstehenden Scherfugensysteme zu verdeutlichen. Hierzu wird nach einer allgemeinen Darstellung der Erkenntnisse zur Ausbildung von einzelnen Scherfugen und von Scherfugensystemen die Bedeutung der verschiedenen Einflussparameter auf die Entstehung von Lokalisierungen beschrieben und diese mit dem aktuellen Forschungsstand hinterlegt.

### 2.1 Allgemeines zur Bildung von Scherfugensystemen

#### 2.1.1 Scherfugenbänderung im Labor- und Ingenieurmaßstab

Auf dem Gebiet der Bodenmechanik wird in der Regel die Entwicklung von einzelnen Scherflächen in Bezug auf die nichthomogene Verformung von Bodenkörpern unter Scherbeanspruchung betrachtet. Neben der analytischen und numerischen Herleitung von Bedingungen, die für eine nichthomogene Verformung eines Bodenkörpers notwendig sind,

werden durch numerische Simulationen und durch Experimente verschiedene Bodeneigenschaften und Randbedingungen untersucht, welche die Geometrie, die Form und die Mikrostruktur der sich entwickelnden Scherflächen beeinflussen [3, 22, 31, 38, 81, 82, 93, 95, 119, 121, 122, 141].

Das Auftreten von parallelen Scherflächen in der Nähe von geotechnischen Bauwerken und in geologischen Formationen ist eng mit der Theorie des plastischen Grenzzustandes in einem unendlichen Halbraum nach Rankine [104] verknüpft (vgl. Bild 2.1). Befindet sich ein Boden als ein unendlicher Halbraum im Ruhezustand, wirken in einem senkrechten Schnitt durch den Halbraum die horizontalen Spannungen

$$\sigma_h = K_0 \cdot \sigma_v = K_0 \cdot \gamma \cdot z, \quad (2.1)$$

wobei mit  $K_0$  das Verhältnis von horizontaler und vertikaler Spannung im Ruhezustand, mit  $\gamma$  die Wichte des Bodens und mit  $z$  die Tiefenordinate bezeichnet wird. Bei einer Auflockerung des Halbraums werden im Boden Schubspannungen aktiviert, die der Bewegung des Bodens entgegenwirken und die zu einer Verminderung der horizontalen Spannung führen. Wird die Auflockerung des Bodens bis zum Erreichen des plastischen Grenzzustandes gesteigert, bilden sich im Bodenkörper konjugierte Scherflächenpaare aus, die nach Rankine mit der Richtung der kleinsten Hauptspannung den Winkel nach Coulomb [18] (vgl. Gleichung (2.7)) einschließen. Das Verhältnis der horizontalen und vertikalen Spannungen in diesem 'aktiven' Grenzzustand wird mit  $K_a$  beschrieben, die horizontalen Spannungen ergeben sich dementsprechend zu

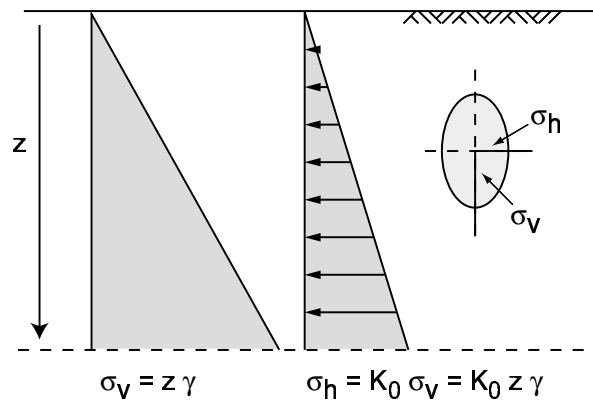
$$\sigma_h = K_a \cdot \sigma_v. \quad (2.2)$$

Bei einer Verdichtung des Halbraums durch eine seitliche Zusammendrückung des Bodens werden die horizontalen Spannungen größer. Das Erreichen des plastischen Grenzzustandes ist wiederum durch die Ausbildung von konjugierten Gleitflächen unter der Coulomb'schen Scherflächenneigung in Bezug auf die größere Hauptspannung gekennzeichnet. Das Hauptspannungsverhältnis im 'passiven' Grenzzustand wird mit  $K_p$  bezeichnet, die horizontalen Spannungen haben also die folgende Größe:

$$\sigma_h = K_p \cdot \sigma_v. \quad (2.3)$$

Eine der wenigen experimentellen Untersuchungen, die explizit das Auftreten von Scherfugenmustern behandeln, wurde von Bransby & Milligan [11] durchgeführt. Bransby &

a)



b)

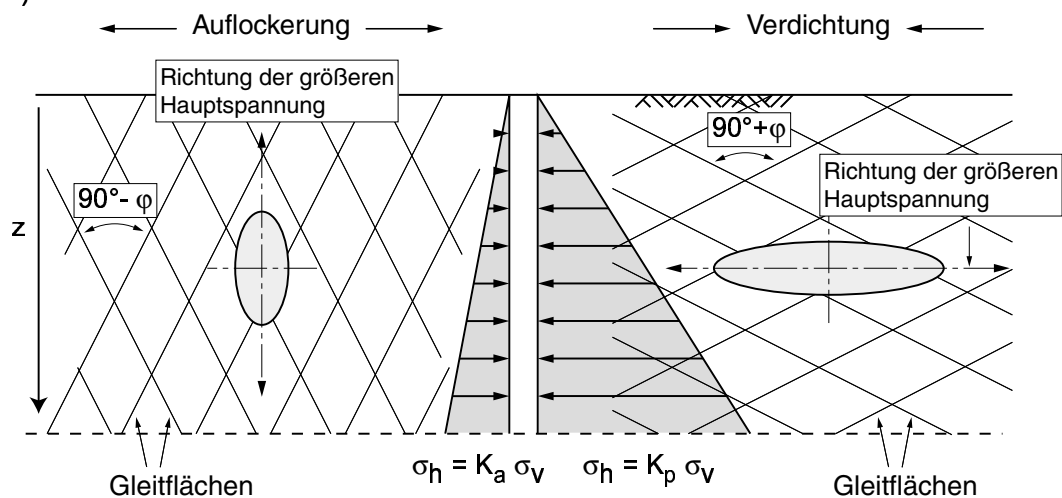


Bild 2.1: Der Halbraum im Rankineschen Spannungsraum [49] a) Spannungsverteilung im Ruhezustand b) Spannungsverteilung bei Auflockerung und Verdichtung

Milligan zeigen in Modellversuchen mit Hilfe der Röntgentechnik, dass der Boden hinter flexiblen und steifen Verbauwänden bei aktiver Belastung (Rotation der Wand um den Wandfuß) unter der Bildung von parallelen Scherflächen versagt. Die Neigungsrichtung der Scherfugen schließt mit der Richtung der kleinsten Hauptspannung den Winkel nach Roscoe (Gleichung (2.8)) ein. Leśniewska & Mróz [63, 64] entwickeln einen analytischen Ansatz für flexible Verbauwände, mit dem sie nach dem Erreichen des Peaks der Spannungs-Verformungs-Kurve unter Berücksichtigung der Entfestigung des Bodens Abstände der Scherflächen in guter Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen von Bransby & Milligan [11] berechnen.

In einigen weiteren Veröffentlichungen auf dem Gebiet der experimentellen Bodenmechanik werden Muster von Scherfugen beschrieben, dies allerdings ohne die Angabe spezifischer Scherflächenabstände oder Einflussfaktoren auf die Bänderung. Bolton et al. [10] führen Zentrifugenmodellversuche im Hinblick auf die Untersuchung von Bruchmechanismen in überkonsolidierten Tonen hinter Verbauwänden durch und beobachten die parallele Ausbildung von Scherflächen im Bruchkörper im aktiven Bereich hinter der Wand. Finno et al. [31] untersuchen die Scherfugenbildung in locker gelagerten Sandkörpern. Bei der Durchführung von biaxialen Kompressionsversuchen unter drainierten und undrainierten Bedingungen beobachten sie einen Übergang von einer temporär auftretenden Schar von Scherflächen zu einer resultierenden Scherfuge. Saada et al. [108, 109] führen Torsionscherversuche an normal und überkonsolidierten Tonen durch und beobachten Muster von Scherfugen, deren Neigung der theoretischen Neigung nach Coulomb (Gleichung (2.7)) entspricht.

Im Gegensatz zu den experimentellen Untersuchungen existieren im Zusammenhang mit der numerischen Simulation von Lokalisierungen in granularen Medien einige Veröffentlichungen, die sich speziell mit der Entwicklung von Scherfugenmustern beschäftigen. Hobbs & Ord [45] simulieren mit Hilfe der Finite-Differenz-Methode die Verformung eines rechteckigen Bodenkörpers mit bindigem und reibungsbehaftetem Materialverhalten, welches elasto-plastisch mit nicht assoziierter Fließregel beschrieben wird. Sowohl die Simulation mit homogenen als auch mit nicht homogenen Materialeigenschaften im Ausgangszustand führt zur Bildung von parallelen und konjugierten Scherflächen, die in Abhängigkeit der Wahl des Reibungs- und des Dilatanzwinkels unterschiedlich stark ausgeprägt sind. Tejchman & Wu [120] untersuchen numerisch das Verformungsverhalten quaderförmiger Bodenkörper im Biaxialversuch. Das Materialverhalten wird elasto-plastisch beschrieben, die Netzabhängigkeit konventioneller Materialmodelle wird durch die Einführung von zusätzlichen mikropolaren Freiheitsgraden im Sinne der Cosserat-Theorie eliminiert. Die Ergebnisse von Tejchman & Wu zeigen, dass die Wahl der Fließfunktion die Entwicklung von einzelnen Scherflächen oder von Scherflächenscharen bestimmt. Während bei der Verwendung einer Fließfunktion mit integrierter Entfestigung des Bodens nur einzelne Scherfugen zu beobachten sind, entwickeln sich bei der Verwendung einer Fließfunktion mit Entfestigung und anschließender erneuter Verfestigung mehrere Scherflächen. Nübel & Karcher [91] untersuchen numerisch das Verformungsverhalten eines Sandkörpers mit hypoplastischem Materialverhalten unter Extensionsbeanspruchung. Während die Simulation mit einer homogenen Anfangsporenzahlverteilung lediglich eine homogene Verformung

der Probe bewirkt, entwickelt sich bei der Simulation mit einer stochastisch verteilten Porenzahl ein System von konjugierten Scherflächen, welches durch Beobachtungen aus Modellversuchen bestätigt werden kann. Nübel & Gudehus [90] verwenden das um zusätzliche Rotationsfreiheitsgrade erweiterte hypoplastische Materialmodell zur Simulation von Biaxialversuchen und Extensionsversuchen von quaderförmigen Sandproben. Als Ergebnis der numerischen Simulation mit stochastisch verteilter Ausgangsporenzahl zeigen sich Scherfugensmuster in guter Übereinstimmung mit experimentellen Ergebnissen.

### 2.1.2 Scherfugensbänderung in geologischen Formationen

Im Zusammenhang mit dem Auftreten von Scherflächenscharen in geologischen Formationen unter Extensionseinfluss wird nach Mandl [66, 68] in drei Dehnungsmechanismen der spröden Erdkruste unterschieden (vgl. Bild 2.2):

- Dehnung, die in der Erdkruste ohne Einfluss der tiefer gelegenen Erdschichten z.B. durch Wölbungen der Erdkruste verursacht wird,
- Dehnung, die durch Bewegungen von duktilen unteren Schichten verursacht wird und
- Dehnung, die durch Bewegungen von festen unteren Schichten verursacht wird.

Das stark unterschiedliche rheologische Verhalten der Materialien, aus denen sich die obere und untere Erdkruste und der obere und untere Erdmantel zusammensetzen, stellt an das Versuchsmaterial bei geologischen Modellversuchen zur Simulation der oben aufgelisteten Dehnungsmechanismen hohe Anforderungen. Nahe der Erdoberfläche in der oberen Erdkruste bestimmen Gesteine, die aus Mineralien hoher Festigkeit zusammengesetzt sind (Quarz, Feldspat), das spröde mechanische Verhalten der oberen Erdkruste (vgl. Bild 2.3). Mit zunehmender Tiefe, d.h. mit zunehmendem Druck und ansteigender Temperatur, werden diese Gesteine bildsam und weisen ein duktileres Verhalten auf. Der Bereich, in dem sich das rheologische Verhalten ändert, wird als spröd-duktiler Übergang der Kruste bezeichnet und trennt die obere von der unteren Erdkruste. An der Trennfläche von Erdkruste und Erdmantel, der Mohorovičić-Diskontinuität, tritt ein lithologischer Wechsel auf, welcher durch die Ansammlung von Olivin-reichen Peridotiten im oberen Erdmantel gekennzeichnet ist und sich in einer sprunghaften Änderung der Kompressionswellengeschwindigkeit

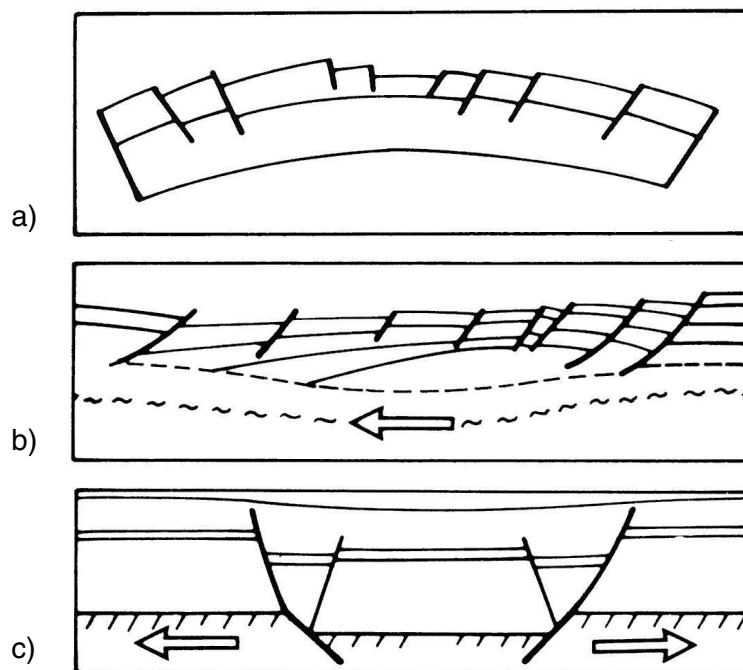


Bild 2.2: Dehnungsmechanismen der spröden Erdkruste a) Wölbung b) Deformation durch Bewegung duktiler Erdschichten c) Deformation durch Bewegung fester Erdschichten [66, 68]

widerspiegelt. Das Olivin weist eine höhere Festigkeit auf als die Mineralien der krus-talen Gesteine, dementsprechend ist das Verformungsverhalten des oberen Erdmantels wieder durch ein sprödes mechanisches Verhalten gekennzeichnet. Mit zunehmender Tiefe werden auch die Olivin-haltigen Peridotite bildsam, dieser erneute Wechsel von spröden zu duktilen Verformungseigenschaften bezeichnet den Übergang von der Lithosphäre zur Asthenosphäre und gleichzeitig den Übergang zwischen oberem und unterem Erdman-tel [70]. Hinzuweisen ist auf die Tatsache, dass die in Bild 2.3 gegebene Einteilung der geologischen Schichten sowohl in der Mächtigkeit der Schichtung und in der Abfolge der Schichten, als auch im Verhalten der Materialien starken Schwankungen unterworfen ist und dementsprechend nur als qualitative Darstellung des Erdaufbaus verstanden werden soll.

Der Skalierung der verschiedenen Materialien und ihres unterschiedlichen Materialverhal-tens kommt in der geologischen Modelltechnik besondere Bedeutung zu [26, 102, 103]. Eine genaue Reproduktion der Verhältnisse in-situ in Bezug auf die geometrische, kinematische und dynamische Ähnlichkeit zwischen Modell und geologischer Formation ermöglicht die naturgetreue Modellierung der rheologischen Prozesse des Prototyps bei verringerten geo-

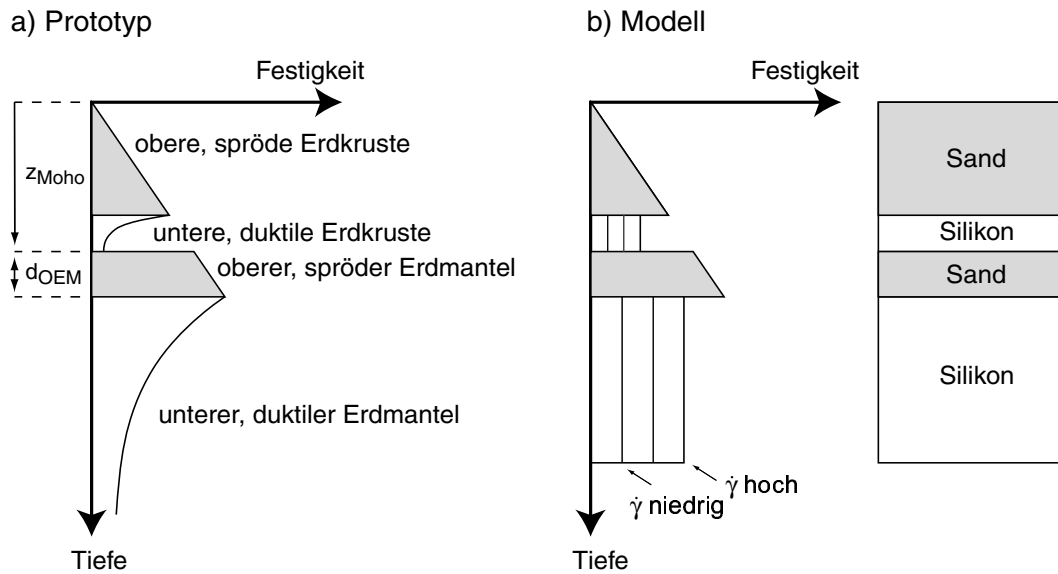


Bild 2.3: Modellierung der spröd-duktilen Lithosphäre im Modellversuch a) Festigkeit in Abhängigkeit der Tiefe im Prototyp und b) Festigkeit in Abhängigkeit der Tiefe im Modell und Modellmaterialien [8, 12, 117]

metrischen Abmessungen und mit einer deutlich reduzierten Verformungsrate. Grundlage der adäquaten Erstellung eines Modells ist es, einen funktionalen Zusammenhang zwischen der Zielgröße und den diese Zielgröße beschreibenden voneinander unabhängigen physikalischen Größen herzustellen. Die Modellmaterialien und die geometrischen Abmessungen des Modells müssen so gewählt werden, dass bei der dimensionslosen Darstellung der Zusammenhänge gleiche Verhältniswerte für das Modell und den Prototyp erkennbar werden. Nur unter Einhaltung dieser Voraussetzung kann aus den Modellergebnissen unmittelbar auf das Verhalten des Prototyps geschlossen werden [48].

Oftmals müssen allerdings bei der Wahl der Modellmaterialien oder der Modellgeometrie Kompromisse eingegangen werden, wenn z.B. bestimmte Materialeigenschaften unter Berücksichtigung des geometrischen Maßstabsfaktors nicht exakt nachgebildet werden können. Eine vereinfachte Anpassung der Eigenschaften der Modellmaterialien und der Modellgeometrie an die Gegebenheiten in-situ kann mit der Durchführung der Modellversuche im erhöhten Schwerfeld einer Zentrifuge erzielt werden. In Modellversuchen im natürlichen Schwerfeld sind die geometrischen Abmessungen in einem Verhältnis  $n$  zu denen des Prototyps verkleinert. Der Spannungszustand aus Bodeneigengewicht ist deswegen gegenüber dem Spannungszustand im Prototyp abgemindert (vgl. Bild 2.4). Bei der Versuchsdurchführung in der Zentrifuge werden die um den geometrischen Faktor  $n$

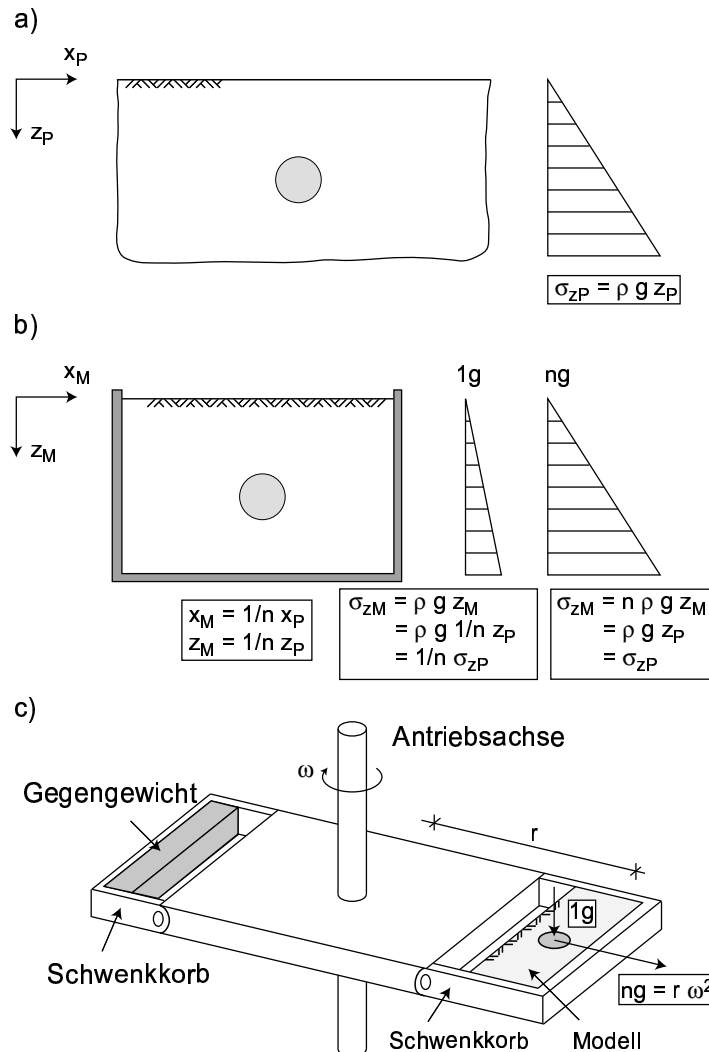


Bild 2.4: Prinzip der Zentrifugenmodelltechnik am Beispiel eines Tunnelquerschnitts: a) Spannungsverhältnis im Prototyp b) Spannungsverhältnisse im 1g- und ng-Modell c) Modell in der Zentrifuge

verkleinerten Modelle auf einer Kreisbahn bewegt. Auf das Modell wirkt in diesem Fall eine erhöhte Zentripetalbeschleunigung

$$a = \omega^2 \cdot r, \quad (2.4)$$

die bei einem konstanten Radius der Zentrifuge  $r$  durch die Regulierung der Winkelgeschwindigkeit  $\omega$  auf die Größe der  $n$ -fachen Erdbeschleunigung eingestellt werden kann:

$$n \cdot g = a = \omega^2 \cdot r. \quad (2.5)$$

Aufgrund dieser Anpassung an das  $n$ -fache Beschleunigungsniveau wirken an den korrespondierenden Punkten im Modell und im Prototyp die gleichen Spannungen. Ebenso



können die auftretenden Dehnungen direkt vom Modell auf den Prototypen übertragen werden. In Bezug auf die Skalierung der in der geologischen Modelltechnik wichtigen Materialeigenschaft Viskosität und auf die Skalierung der Verformungsrate führen die genannten Eigenschaften dazu, dass durch die Steuerung der Viskosität des Modellmaterials die Zeitdauer der Verformung bedeutend verkürzt werden kann (vgl. Anhang B).

Brun [12] gibt einen Überblick über gebräuchliche Methoden zur Modellierung unterschiedlicher geologischer Vorgänge. Vorab fasst er die grundlegenden Techniken und Skalierungsmethoden zusammen, anschließend werden Beispiele zu Kompressions- und Extensionsvorgängen in der Lithosphäre und zum Deformationsverhalten der Erdkruste in der Nähe von Subduktionszonen zusammengefasst. Das grundlegende Verformungsverhalten der spröden Erdkruste wird von Mandl [67] beschrieben. Er beschreibt die tektonischen Verwerfungen als Ort konzentrierter Schervorgänge und führt aus, dass die Charakteristiken der tektonischen Verwerfungen wie Ort, Abstand und Orientierung der Scherflächen, bereits in einem frühen Entwicklungsstadium festgelegt werden. Mandl [66, 68] untersucht in Modellversuchen im natürlichen Schwerfeld an quaderförmigen und abgebochten Sandproben das Verformungsverhalten der Erdkruste unter Extensionsbeanspruchung. Als Ergebnis stellt er eine Abhängigkeit der Scherfugenneigung von der Schichtung der Probe und eine Abhängigkeit des Scherflächenabstandes von der Höhe der Probe fest. Während bei horizontal geschichteten Probekörpern so genannte 'Horst und Graben'-Verformungen, d.h. unregelmäßig in unterschiedliche Richtungen geneigte Scherfugen, auftreten, sind bei schräger Schichtung der Sandlagen nur einseitig geneigte Scherflächen zu beobachten, die in Richtung der vorgegebenen Schichtung einfallen.

In einer Reihe von Modellversuchen untersuchen McClay [74, 75, 76] und McClay & Ellis [77, 78] das Verformungsverhalten der Erdkruste unter verschiedenen Belastungseinflüssen. In den Bodenkörpern entwickeln sich unter Kompressions- oder Extensionsbeanspruchung Scherflächenmuster, die mit zunehmender Belastung oder bei einer Umkehr des Belastungspfades ihre Geometrie ändern. McClay und McClay & Ellis beschreiben die zeitliche Abfolge der Scherflächenentwicklung, untersuchen die Geometrie der Verwerfungen und vergleichen die Ergebnisse mit Verformungsmustern, die aus Beobachtungen in-situ bekannt sind. Angaben über die Abstände der Scherflächen oder über Einflussfaktoren, welche die Abstände der Verwerfungen bestimmen, sind in den genannten Veröffentlichungen nicht zu finden. Modellversuche, die in Bezug auf das Versuchsprinzip mit den Experimenten von McClay und McClay & Ellis vergleichbar sind werden von Vendeville et al. [127] durchgeführt. In den Versuchen wird unter anderem der Einfluss

der Mächtigkeit der modellierten Schichten auf die Geometrie der Verwerfungsmuster untersucht. Später untersuchen Vendeville & Cobbold [126] die fortschreitende Entwicklung von Scherflächen unter Extensionsbeanspruchung in schrittweise aufgebrauchten neuen Erdschichten. Exadaktylos et al. [30] untersuchen experimentell und numerisch die Entwicklung von Abschiebungsverwerfungen, welche durch das Gleiten entlang einer bereits existierenden geneigten geologischen Störung hervorgerufen werden.

Zentrifugenmodellversuche zur Simulation von Kompressionsvorgängen in der Erdkruste werden unter anderem von Dixon [25], Koyi [55], Mulugeta [83, 84, 85] und Peltzer & Garnier [96] durchgeführt. Jeng et al. [47] (vgl. Kapitel 2.5), Koyi [56] und Koyi & Skelton [57] untersuchen das Verformungsverhalten der Erdkruste unter Extensionsbeanspruchung. In der Arbeit von Koyi & Skelton [57] wird das Material des Erdmantels mit einer Mischung aus Plastilin und Silikon modelliert und zeigt duktilen Verhalten. Das Modell der Erdkruste wird aus einer Mischung von Plastilin und Zucker aufgebaut und beinhaltet mittelsprödes Materialverhalten. Koyi & Skelton führen verschiedene Zentrifugenmodellversuche mit unterschiedlichen Dichten und Steifigkeiten der Modellmaterialien durch. Im erhöhten Schwerfeld dehnen sich die duktilen Materialien seitlich aus und initiieren Verschiebungen entlang vorab eingprägter Einschnitte im überlagerten Material. Wird das Obermaterial mit parallelen Einschnitten versehen, die unter einem Winkel von ca.  $60^\circ$  zur Horizontalen einfallen, rotieren die zwischen den Schnitten liegenden Blöcke im erhöhten Schwerfeld um eine horizontale Achse. Koyi & Skelton beobachten keine Krümmung der Scherflächen bei diesem Versagensmodus.

Während die bisher beschriebenen Untersuchungsergebnisse auf der visuellen Auswertung der Probenseitenflächen oder auf der Auswertung von künstlichen Schnitten durch den Probekörper (Dünnschliffe, feuchte Böden) beruhen, werden die Modellversuche von Colletta et al. [17] und Schreurs et al. [115] mit Hilfe der Röntgentechnik ausgewertet und ermöglichen somit eine direkte Beobachtung der Veränderungen der Probenstruktur im Inneren der Probe (vgl. Kapitel 3). Schreurs et al. [115] simulieren den Aufbau der Erdkruste und des Erdmantels gemäß Bild 2.3 mit wechselnden Schichten aus Sand und einem viskosen Polymer und beobachten unter Extensionsbeanspruchung eine unregelmäßige Entwicklung von Scherflächen unterschiedlicher Neigung, die mit zunehmender Dehnung Rotationsbewegungen ausführen.

Neben den beschriebenen Modellversuchen existieren zahlreiche Veröffentlichungen, die das natürliche Deformationsverhalten der Erdkruste unter verschiedenen Belastungsarten beschreiben. Häufig ist dabei das Auftreten von Scherfugenmustern als Ansammlung

paralleler Scherflächen zu beobachten [7, 15, 28, 29, 33, 132, 135], nur wenige Forscher gehen jedoch detailliert auf die Abstände und Neigungen der entstehenden Scherflächen ein. Vielmehr werden die Geometrie der Verwerfungsscharen im Allgemeinen und die die Verwerfungen bedingenden Randbedingungen analysiert.

Eine Ausnahme bildet die Arbeit von Wernicke [133], in der von der Auswertung von maßstäblichen Schnitten durch geologische Formationen auf dem nordamerikanischen Kontinent (Colorado Plateau) auf den Abstand unter Extensionseinfluss entstandener Verwerfungen geschlossen werden kann. Wernicke & Burchfiel [134] ordnen Verwerfungen in der Erdkruste unter Extensionseinfluss in zwei Gruppen ein. Die erste Gruppe fasst Systeme von Verwerfungen zusammen, bei denen Rotationsbewegungen des Untergrundes und/oder der Scherflächen-Block-Systeme zu beobachten sind. Die zweite Gruppe wird von Verwerfungssystemen gebildet, die keine Rotationsbewegungen aufweisen. Wernicke & Burchfiel zeigen anhand einiger Beispiele geologischer Formationen des nordamerikanischen Kontinents, dass die nichtrotierenden Systeme in der Regel von ebenen Scherflächen begrenzt werden, während bei den rotierenden Systemen sowohl ebene als auch gekrümmte Scherflächen zu beobachten sind. Für beide geometrischen Formen geben sie einfache Gleichungen an, mit denen lokal die Größe der Dehnung innerhalb der jeweiligen Formation bestimmt werden kann.

McIntosh et al. [79] veröffentlichen Ergebnisse seismologischer Reflektionsmessungen im Bereich der Subduktionszone vor der Küste Costa Ricas. Die Interpretation der seismologischen Profile zeigen Scharen von parallelen Scherflächen, die sich unter Extensionsbeanspruchung in der überlagernden Kontinentalplatte entwickelt haben. McIntosh et al. messen durchschnittliche Abstände der Klüfte zwischen 200 m und 500 m bei einer durchschnittlichen Mächtigkeit der Platte von 2 km. Die Scherflächen weisen Fallwinkel zwischen  $10^\circ$  und  $40^\circ$  zur geneigten Oberfläche der überlagernden Platte auf und sind überwiegend landseitig orientiert. Ein möglicher Deformationsmechanismus besteht in der Rotation der Blöcke zwischen den Scherflächen um eine horizontale Achse, hervorgerufen durch unterschiedlich starke Verformungsgeschwindigkeiten der tektonischen Schichten.

Spadini & Podladchikov [117] beschreiben das Deformationsverhalten der Erdkruste im Bereich des Tyrrhenischen Meeres, einem Teil des Mittelmeers, das von Sardinien, Sizilien und dem italienischen Festland begrenzt wird. Mit Hilfe der Theorie der elastischen Biegung einer dünnen Platte berechnen sie Abstände der Abschiebungsverwerfungen in Abhängigkeit von der 'elastischen Mächtigkeit' der anstehenden geologischen Schichten. Die 'elastische Mächtigkeit' der geologischen Formation wird in Abhängigkeit der Tiefenla-

ge  $z_{\text{Moho}}$  der Mohorovičić-Diskontinuität und der Mächtigkeit  $d_{\text{OEM}}$  des oberen Erdmantels bestimmt (vgl. Bild 2.3). Die Ergebnisse der Berechnung stimmen in guter Näherung mit den in-situ gemessenen Distanzen überein.

## 2.2 Granulometrie

Eine wesentliche Voraussetzung zur Beschreibung der Eigenschaften eines Bodens und von ausschlaggebender Bedeutung für baupraktische Zwecke ist die Kenntnis der Korngrößenverteilung des Bodens. So werden die zulässigen Bodenpressungen für nichtbindigen Baugrund nach DIN 1054 in Abhängigkeit der Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke nach DIN 18196 bestimmt. Die Grundlage der Bodenklassifikation bildet die Bestimmung der Korngrößenverteilung durch eine Sieb- oder eine Sieb-Schlämmanalyse nach DIN 18123. Die Körnungskurve wird dabei unter anderem durch die mittlere Korngröße des Bodens  $d_{50}$  und die Ungleichförmigkeitszahl

$$U = \frac{d_{60}}{d_{10}} \quad (2.6)$$

charakterisiert. Die Größen  $d_{10}$  und  $d_{60}$  repräsentieren hierbei die Korngrößen, die den Ordinaten 10 % und 60 % Massenanteil des Siebdurchgangs der Körnungslinie entsprechen. Der Einfluss dieser granulometrischen Parameter auf verschiedene bodenmechanische Fragestellungen wird in der Literatur ausgiebig diskutiert.

Die Abhängigkeit des Winkels zwischen den sich bildenden Scherflächen und der Richtung der kleinsten Hauptspannung von der Korngröße des untersuchten Materials beschreibt Vermeer [128]. Er fasst Ergebnisse von direkten Scher- und biaxialen Kompressionsversuchen [4, 5, 22, 27] zusammen. Die Ergebnisse der Modellversuche zeigen, dass sich bei einem Material mit feiner Körnung bevorzugt Winkel zwischen der Scherfläche und der Richtung der kleinsten Hauptspannung gemäß der Definition nach Coulomb [18] entwickeln und sich bei der Verwendung von grobem Material bevorzugt Winkel nach der Definition nach Roscoe [106] einstellen.

Der Scherflächenwinkel nach Coulomb gibt dabei den Winkel zwischen der Richtung der kleinsten Hauptspannung und der Richtung der Fläche an, auf der das Verhältnis von Schub- und Normalspannung maximal ist und damit die Coulomb'sche Bruchbedingung erfüllt (statische Bedingung):

$$\vartheta_C = 45^\circ + \varphi/2, \quad (2.7)$$

wobei  $\varphi$  den inneren Reibungswinkel des untersuchten Materials bezeichnet. Die Theorie nach Roscoe basiert auf der Verwendung einer plastischen Fließregel in Kombination mit der Annahme von Koaxialität zwischen Spannung und plastischer Dehnungsrate. Der aus dieser kinematischen Bedingung resultierende Winkel zwischen der Scherfläche und der Richtung der kleinsten Hauptspannung ergibt sich in Abhängigkeit des Dilatanzwinkels  $\psi$  zu

$$\vartheta_R = 45^\circ + \psi/2. \quad (2.8)$$

Eine Verzweigungsuntersuchung unter Annahme einer plastischen Verformung innerhalb und einer elastischen Entspannung des Materials außerhalb der Scherfläche hat zum Ergebnis, dass Scherflächenneigungen zwischen den beiden Lösungen nach Coulomb und Roscoe möglich sind. Ebenfalls unter dem Gesichtspunkt eines Verzweigungsproblems untersuchen Vardoulakis [121] und Vardoulakis et al. [123] die spontane Bildung von Scherfugen. Experimentelle Untersuchungen an sandigen Bodenproben im Biaxialgerät bestätigen die Berechnungen, nach denen die sich einstellenden Scherflächenwinkel zwischen den klassischen Lösungen von Coulomb und Roscoe liegen. Die Bruchflächen schließen in Abhängigkeit des inneren Reibungswinkels und des Dilatanzwinkels folgenden Winkel mit der Richtung der kleinsten Hauptspannung ein:

$$\vartheta_V = 45^\circ + \zeta/2 \quad (2.9)$$

mit

$$\sin \zeta = \frac{\sin \left[ \frac{\varphi + \psi}{2} \right]}{\cos \left[ \frac{\varphi - \psi}{2} \right]}. \quad (2.10)$$

Ist die Differenz zwischen dem Reibungswinkel  $\varphi$  und dem Dilatanzwinkel  $\psi$  am peak klein, resultiert aus den Gleichungen (2.9) und (2.10) eine Scherflächenneigung, die einen Mittelwert der Scherflächenwinkel nach Coulomb und Roscoe darstellt:

$$\vartheta_A = 45^\circ + (\varphi + \psi)/4. \quad (2.11)$$

Diese Neigung der Scherflächen zur Richtung der kleinsten Hauptspannung wurde bereits von Arthur et al. [5] bei der Durchführung von direkten Scherversuchen beobachtet. Rechenmacher & Finno [105] stellen bei Biaxialversuchen ebenfalls eine deutliche Korrelation der Scherfugenneigung mit der Neigung nach Arthur et al. [5] fest. Bei der Verwendung von feinem Quarzsand stellen sich geringfügig höhere Neigungen und damit Neigungen zwischen den Lösungen von Arthur und Coulomb [18] ein, bei der Verwendung von grobem

Sand sind Neigungen zwischen den Lösungen nach Roscoe [106] und Arthur zu beobachten.

Koenders et al. [51] geben mittlere Korngrößen  $d_{50}$  an, die Grenzen für die Scherflächenwinkel nach Coulomb, Arthur und Roscoe darstellen. Lade et al. [60] führen triaxiale Extensionsversuche an verschiedenen Sanden durch, deren mittlerer Korndurchmesser jeweils in den von Koenders et al. ermittelten Grenzen liegt. Unabhängig von dem Verhältnis von Probenhöhe und Probendurchmesser  $H/D$  werden nur Scherfugenneigungen beobachtet, die der Neigung nach Coulomb entsprechen oder zwischen den Neigungen nach Coulomb und Arthur liegen.

Zahlreiche weitere theoretische und experimentelle Untersuchungen bestätigen das Auftreten von Scherfugenneigungen zwischen den Neigungen nach Coulomb und Roscoe und insbesondere zwischen den Neigungen von Coulomb und Vardoulakis/Arthur [2, 22, 31, 38, 78, 81, 82, 93, 95, 111, 119, 141, 142].

Die Dicke der Scherflächen wird bei nichtbindigen Böden in der Regel als ein Vielfaches des mittleren Korndurchmessers  $d_{50}$  angegeben. In Abhängigkeit der Lagerungsdichte des granularen Materials liegen die experimentell gemessen und theoretisch bestimmten Scherflächendicken zwischen acht- und 20-fachem mittleren Korndurchmesser. Als Ergebnis der Auswertung von Einzelscherversuchen und direkten Scherversuchen messen Roscoe [106] und Scarpelli & Wood [111] Scherfugendicken, welche dem 10-fachen mittleren Korndurchmesser des untersuchten Sandes entsprechen. Aus Biaxialversuchen von Vardoulakis & Graf [124] resultieren Scherfugendicken mit einem 16-fachen mittleren Korndurchmesser. Oda & Kazama [93] bestimmen anhand von Röntgenbildern von Biaxialversuchen und anhand von Dünnschliffen der Proben Dicken der Scherflächen von sieben- bis achtfachem mittleren Korndurchmesser. Yoshida et al. [142] führen Biaxialversuche an verschiedenen enggestuften Sanden durch und messen Scherfugendicken, die dem sieben- bis 20-fachen des mittleren Korndurchmessers entsprechen. Mühlhaus & Vardoulakis [82] behandeln die Scherfugenbildung als Verzweigungsproblem und beschreiben das Materialverhalten des Bodens mit Hilfe der Cosserat-Theorie. Aus ihren Berechnungen von Biaxialversuchen resultiert eine Scherfugendicke von 16-fachem mittleren Korndurchmesser. Nemat-Nasser & Okada [86] beobachten mit Hilfe der Röntgentechnik die Scherverformungen von Sandproben im Hohlzylinder unter Torsionsbelastung. Die Auswertung der Röntgenbilder und der angefertigten Dünnschliffe der Proben ergibt Scherfugendicken zwischen 10-fachem und 15-fachem mittleren Korndurchmesser. Rechenmacher & Finno [105] bestimmen bei

Biaxialversuchen mit Hilfe optischer Bildauswertung Scherfugendicken zwischen 15- und 20-fachem mittleren Korndurchmesser.

Den Zusammenhang zwischen der Scherfugengeometrie und den Charakteristiken der Korngrößenverteilung des Versuchsmaterials, ausgedrückt durch die mittlere Korngröße  $d_{50}$  und die Ungleichförmigkeit  $U$ , untersuchen Viggiani et al. [129]. Viggiani et al. führen Biaxialversuche an Sanden durch, die bei gleichen mittleren Korngrößen durch Unterschiede in den Ungleichförmigkeitszahlen und bei gleichen Ungleichförmigkeiten durch unterschiedliche mittlere Korndurchmesser gekennzeichnet sind. Als Ergebnis der Untersuchungen zeigt sich, dass im Gegensatz zu Ergebnissen der oben beschriebenen Modellversuche von Arthur & Dunstan [4] die Neigung der Scherflächen nicht allein vom mittleren Korndurchmesser  $d_{50}$  bestimmt wird. Vielmehr zeigen sich bei der Variation der Ungleichförmigkeit bei konstantem  $d_{50}$  unterschiedliche Scherfugenneigungen. Viggiani et al. folgern daraus, dass eine generelle Abhängigkeit der Scherfugenneigung von einem bestimmten granulometrischen Einflussfaktor nicht gegeben ist. In Bezug auf die Dicke der Scherflächen bestätigen die Versuche die aus theoretischen und experimentellen Untersuchungen bekannten Größen von zehn- bis 20-facher mittlerer Korngröße  $d_{50}$ .

## 2.3 Dynamische Materialeigenschaften

Die Ergebnisse numerischer Simulationen [97, 98] legen den Schluss nahe, dass die Bildung von einzelnen Scherflächen und von Scherfugensystemen als dynamischer Prozess in Abhängigkeit der dynamischen Materialparameter dynamischer Schubmodul  $G_{dyn}$  und Kompressionswellengeschwindigkeit  $v_p$  verstanden werden kann.

Poliakov et al. [98] untersuchen numerisch die Abhängigkeit der Scherfugemustergeometrie von den dynamischen Materialparametern Schubmodul  $G_{dyn}$  und Kompressionswellengeschwindigkeit  $v_p$ . Unter Verwendung von Finite-Differenzen-Methoden erzeugen sie Scherfugemuster, indem einer quadratische Probe mit elasto-plastischen Materialeigenschaften eine einfache Scherung eingeprägt wird. Neben der Schergeschwindigkeit an den Rändern der Probe, dem Umgebungsdruck und einigen Materialeigenschaften (Kohäsion, innerer Reibungswinkel und Dilatanzwinkel) werden die dynamischen Materialparameter Kompressionswellengeschwindigkeit und dynamischer Schubmodul variiert. Die Ergebnisse der Simulationen zeigen, dass sich in den Bereichen mit plastischer Verformung spontan Scherflächen entwickeln, die mit der Richtung der kleinsten Hauptspannung Winkel

zwischen der Lösung nach Coulomb (Gleichung (2.7)) und der Lösung nach Roscoe (Gleichung (2.8)) einschließen. Die Dicke der Scherflächen ist nach Poliakov et al. [98] allein von der Differenz des inneren Reibungswinkels und des Dilatanzwinkels des simulierten Materials abhängig. Ist der Betrag dieser Differenz klein, sind breite Lokalisierungszonen zu beobachten, ist der Betrag der Differenz groß, resultieren hieraus dünne Scherflächen.

Auf der Basis der erzielten Ergebnisse führen Poliakov et al. einen dimensionslosen Parameter ein, von dem die Anzahl der sich entwickelnden Scherflächen und deren Abstand direkt abhängig ist. Dieser Parameter  $B$  ist wie folgt definiert:

$$B = \frac{\sigma \cdot v_p}{G_{dyn} \cdot v_{bc}} \quad (2.12)$$

wobei mit  $\sigma$  die auf das Modell wirkende isotrope Spannung, mit  $G_{dyn}$  der dynamische Schubmodul des simulierten Materials und mit  $v_p/v_{bc}$  der Quotient aus Kompressionswellengeschwindigkeit und Belastungsgeschwindigkeit an den Rändern der Probe bezeichnet wird. Zwei Ergebnisse lassen sich aus den Variationsrechnungen direkt ableiten. Werden das geometrische Verhältnis  $L$ , definiert als Verhältnis von Systemgröße und Netzgröße, und der dimensionslose Parameter  $B$  konstant gehalten, während der dynamische Schubmodul, die isotrope Spannung, die Kompressionswellengeschwindigkeit und die Belastungsgeschwindigkeit variiert werden, ist bei allen Rechnungen, unabhängig von der Variation der Parameter, ein Scherfugensystem mit gleichen geometrischen Eigenschaften, d.h. mit konstanter Scherflächenneigung, Scherflächendicke und Scherflächenanzahl zu beobachten. Wird dagegen der Parameter  $B$  bei konstantem geometrischen Verhältnis  $L$  durch eine Änderung z.B. der Belastungsgeschwindigkeit  $v_{bc}$  variiert, zeigt sich, dass für kleine Werte von  $B$  regelmäßige Muster von parallelen Scherfugen mit geringen Abständen entstehen. Wird der Wert  $B$  vergrößert, werden die Muster unregelmäßiger und die Abstände der Scherflächen größer. Die Darstellung der berechneten Scherfugenabstände im doppelt-logarithmischen Diagramm lässt auf einen linearen Zusammenhang zwischen dem Scherfugenabstand und dem Parameter  $B$  schließen.

Experimentelle Arbeiten, welche die von Poliakov et al. festgestellte Abhängigkeit der Scherfugemustergeometrie von den dynamischen Materialeigenschaften des Bodens bestätigen oder widerlegen, sind nicht bekannt.



## 2.4 Geometrie

Um die Entwicklung von Verwerfungsansammlungen in einer geologischen Formation besser zu verstehen, werden bei geologischen Modellversuchen verschiedene Eigenschaften der Scherflächen wie Länge und Neigung häufig stochastisch ausgewertet. Ackermann et al. [1] verwenden eine solche Auswertung, um den Einfluss unterschiedlicher Mächtigkeiten der geologischen Schichten auf die Entwicklung der Scherflächenmuster zu untersuchen. Ackermann et al. führen Modellversuche im natürlichen Schwerfeld durch, in denen einer auf einer Gummimatte angeordneten bindigen Bodenprobe eine Extensionsbeanspruchung durch die Dehnung der Gummimatte eingeprägt wird. In der Draufsicht bilden sich die Scherflächen senkrecht zur Belastungsrichtung aus und werden anhand des Auftretens von Verwerfungen an der ursprünglich glatten Modelloberfläche identifiziert. Die Beobachtungen zeigen, dass für beide untersuchten Mächtigkeiten der Modelle die absolute Anzahl an Verwerfungen mit zunehmender Dehnung der Probe ansteigt und erst bei großen Dehnungen von ca. 20 % einem konstanten Wert zustrebt. Zwischen der Mächtigkeit der Schichten und der Anzahl der Scherflächen besteht für einen konstanten Dehnungszustand ein linearer Zusammenhang.

Die mittlere, die maximale und die akkumulierte Länge aller auf der Oberfläche der Proben identifizierbaren Verwerfungen vergrößert sich für beide Mächtigkeiten mit fortschreitender Dehnung der Probe, wobei alle Längen für die dünnere Probe jeweils größer sind als für die Proben größerer Mächtigkeit. Insbesondere sind die akkumulierten Längen der Verwerfungen bei den dünneren Proben jeweils ungefähr doppelt so groß wie bei den dickeren Proben. In Bezug auf die gemittelten Abstände der Scherflächen senkrecht zu deren Einfallrichtung stellen Ackermann et al. fest, dass sich der Abstand nach Beginn der Belastung bis zu einer Dehnung von ca. 15 % unabhängig von der Schichtdicke vergrößert und danach bei großen Dehnungsbeträgen einem konstanten Wert zustrebt. Unterschiede in den Scherflächenabständen in Abhängigkeit der Schichtmächtigkeiten lassen sich nur zu Beginn der Probenverformung beobachten, ab einer Dehnung von wiederum ca. 15 % treten annähernd identische Abstände auf.

Vendeville et al. [127] untersuchen, ob stark vereinfachte rheologische Modelle die Verformungen innerhalb der Erdkruste realistisch abbilden können. In einer ersten Versuchsreihe wird das Verformungsverhalten der oberen Erdkruste durch die Dehnung einer Sandprobe unterschiedlicher Mächtigkeiten mit Hilfe einer elastischen Matte modelliert (Einschichtmodelle). Durch die Verwendung von Honig zur Modellierung des oberen Erdmantels

und von Silikonölen verschiedener Dichten zur Modellierung der unteren Erdkruste wird in einer zweiten Versuchsreihe zusätzlich das Deformationsverhalten der viskosen tieferen Schichten des Erdaufbaus berücksichtigt (Mehrschichtmodelle). Dünnschliffe der Einschichtmodellversuche mit horizontaler Bettung des Sandkörpers zeigen deutlich, dass ein Zusammenhang zwischen der Mächtigkeit des modellierten Stratum und dem Abstand der sich entwickelnden Scherflächen besteht. Es bildet sich eine 'Horst und Graben'-Struktur mit wechselnden Bereichen paralleler Scherfugen aus. Die gedehnten Einschichtmodelle mit geneigter Grundfläche zeigen Gruppen von parallelen Verwerfungen, die ausschließlich in Fallrichtung der Böschung einfallen. Die durch die Dehnung der Mehrschichtmodelle erzeugten Scherfugensysteme weisen komplexere Strukturen als die Einschichtmodelle auf. Eine Abhängigkeit der Strukturen von der Mächtigkeit des Stratum wird nicht untersucht.

In Extensionsmodellversuchen im erhöhten Schwerfeld einer Geotechnischen Zentrifuge stellen Jeng et al. [47] eine Abhängigkeit der Scherflächenabstände von der Mächtigkeit des Modellmaterials fest (siehe hierzu Kapitel 2.5).

## 2.5 Spannungsniveau

Wie in Abschnitt 2.1 bereits beschrieben wurde, stellen Modellversuche im erhöhten Schwerfeld einer Zentrifuge ein geeignetes Mittel dar, bodenmechanische Problemstellungen, geotechnische Konstruktionen oder geologische Vorgänge unter realistischen Spannungszuständen zu modellieren und abzubilden [114]. Vergleicht man Ergebnisse von Modellversuchen im natürlichen und im erhöhten Schwerfeld, stellt man fest, dass die Geometrie der sich ausbildenden Verformungsmuster maßgeblich von der Höhe des Spannungsniveaus beeinflusst wird [85]. Insbesondere bei der Verwendung von Modellmaterialien mit kohäsiven Eigenschaften ist dieser Effekt zu beobachten. Unabhängig von der in Kapitel 2.1 beschriebenen Problematik der Skalierung der Modellmaterialien und deren Stoffeigenschaften beeinflusst aus diesem Grund möglicherweise der Spannungszustand die zu untersuchende Scherfugengeometrie.

Anhand von Vergleichsmodellversuchen im natürlichen und erhöhten Schwerfeld untersuchen Stone & Muir Wood [118] den Einfluss der Korngröße und des Dilatanzverhaltens des Modellmaterials auf das Verformungsverhalten einer Sandprobe. Die Ergebnisse der durchgeführten Falltürversuche zeigen, dass die Geometrie des Lokalisierungsmusters bei

gleichem Spannungsniveau von der mittleren Korngröße des Materials abhängt. Wird derselbe Sand unter verschiedenen großen Beschleunigungen getestet, sind analoge Verformungsmuster zu beobachten. In Bezug auf die Skalierungsfragestellung stellen Stone & Muir Wood fest, dass sich bei einem identischen Spannungsniveau und einem konstanten Verhältnis von Korngröße und Verschiebung der Falltür identische Lokalisierungsmuster entwickeln.

Das Verformungsverhalten von Sandproben unter Extensionsbeanspruchung wird von Jeng et al. [47] mit Hilfe von Modellversuchen im natürlichen Schwerfeld und im erhöhten Schwerfeld einer Zentrifuge untersucht. Auf der Basis der Versuchsergebnisse werden Skalierungsbeziehungen abgeleitet, die eine repräsentative Modellierung von geologischen Prozessen in der Erdkruste ermöglichen sollen. Die Variation des Spannungsniveaus bei konstanten geometrischen Randbedingungen zeigt qualitativ ähnliche Ergebnisse in Bezug auf die resultierende Scherflächengeometrie. Eine Abhängigkeit der Scherflächenabstände und -neigungen vom Spannungsniveau wird von Jeng et al. nicht festgestellt. Die Änderung der Probenhöhe bei konstantem Beschleunigungsniveau führt zu einer proportionalen Änderung der Scherflächenanzahl. Aus diesem Ergebnis kann auf ein proportionales Verhältnis zwischen Scherflächenabstand und Probenhöhe geschlossen werden, eine quantitative Bestätigung fehlt bisher. Weiterhin weisen Jeng et al. auf die Problematik der erhöhten Reibung zwischen dem Behälterboden und der die Dehnung übertragenden Gummimatte bei erhöhter Beschleunigung hin. Diese Problematik schlägt sich in einer nicht homogenen Verteilung der Verformungen in der gedehnten Bodenprobe nieder. In Wiederholungsversuchen werden die hohen Reibungskräfte durch die Wahl einer stärkeren Gummimatte und durch die Schmierung der Kontaktfläche Gummimatte-Boden mit einer Gleitmasse minimiert.

Peltzer & Garnier [96] führen Modellversuche im natürlichen und erhöhten Schwerfeld durch, in denen die Verschiebung und die Verformung der tektonischen Platten im süd-ostasiatischen Raum simuliert wird. Sie untersuchen die Fragestellung, ob Modellversuche im natürlichen Schwerfeld, die keine Skalierung des Spannungszustandes ermöglichen, ähnliche Ergebnisse wie Versuche im erhöhten Schwerfeld liefern. Die Ergebnisse zeigen, dass die Modelle im natürlichen Schwerfeld die ebenen Bewegungen und Verformungen der Platten in guter Näherung nachbilden können. Insbesondere aber in Bezug auf die vertikale Verformung der tektonischen Platten in den Bereichen kontraktanter Plattengrenzen liefern die gravimetrisch ähnlichen Modelle im erhöhten Schwerfeld realistischere Ergebnisse.

## 2.6 Spannungs-Verformungsverhalten und Lagerungsdichte

Das Spannungs-Verformungsverhalten granularer Materialien wird maßgeblich von zwei Einflussfaktoren bestimmt, zum einen von der Lagerungsdichte des Materials und zum anderen vom Spannungszustand.

Dicht gelagerte Materialien zeigen in der Regel unter Scherbelastung ein Verhalten, das von einer Verfestigung des Materials vor dem Erreichen des Grenzzustandes und einer Entfestigung des Materials bis zu einer Restfestigkeit nach Erreichen des Grenzzustandes geprägt ist (Bild 2.5a). Zu Beginn der Belastung wird das Material gezwungen, sich in einer Struktur mit größtmöglicher Packung anzuordnen. Der Boden verhält sich hierbei kontraktant, d.h. das Volumen der Bodenprobe verringert sich. Wird der Boden in dieser Anordnung weiter belastet, beginnen die Körner aneinander aufzugleiten und das Volumen des Probekörpers vergrößert sich. In der Regel ist diese dilatante Volumenänderung um ein Vielfaches größer als die Kontraktanz des Bodens zu Beginn der Belastung. Am Peak der Spannung-Dehnungs-Kurve wird die Steigung der Volumenverformungskurve maximal. Während der Entfestigung des Materials nimmt die Volumenvergrößerung bis zur Volumenkonstanz beim Erreichen der Restfestigkeit des Bodens ab.

Ein ausgeprägter Peak im Verlauf der Spannungs-Verformungs-Kurve ist bei anfänglich locker gelagerten Proben nicht zu erkennen (Bild 2.5b). Vielmehr ist der Verlauf durch einen Anstieg der Spannung mit zunehmender Dehnung gekennzeichnet, der sich asymptotisch der Restfestigkeit des Materials nähert. Ein locker gelagerter Boden zeigt unter Scherbeanspruchung ausnahmslos kontraktantes Verhalten d.h., das Volumen verringert sich bis zur Volumenkonstanz beim Erreichen der Restfestigkeit des Bodens. Der Unterschied im volumetrischen Verhalten locker und dicht gelagerter Böden wird besonders in der Entwicklung der Porenzahl unter einer fortlaufenden Belastung deutlich (Bild 2.5c). In Abhängigkeit der Ausgangslagerungsdichte, charakterisiert durch die Porenzahl im lockeren Ausgangszustand  $e_{0,l}$  bzw. dichten Ausgangszustand  $e_{0,d}$ , zeigt der Boden entweder kontraktantes oder dilatantes Verhalten und nähert sich mit dem Erreichen der Restfestigkeit des Bodens der kritischen Lagerungsdichte an ( $e_k$ ). Bild 2.5c zeigt weiterhin, dass bei der Ausgangslagerungsdichte  $e_k$  weder eine Auflockerung noch eine Verdichtung zu erwarten ist. Die kritische Dichte ist keine Konstante, sondern eine vom Spannungszustand abhängige Größe.

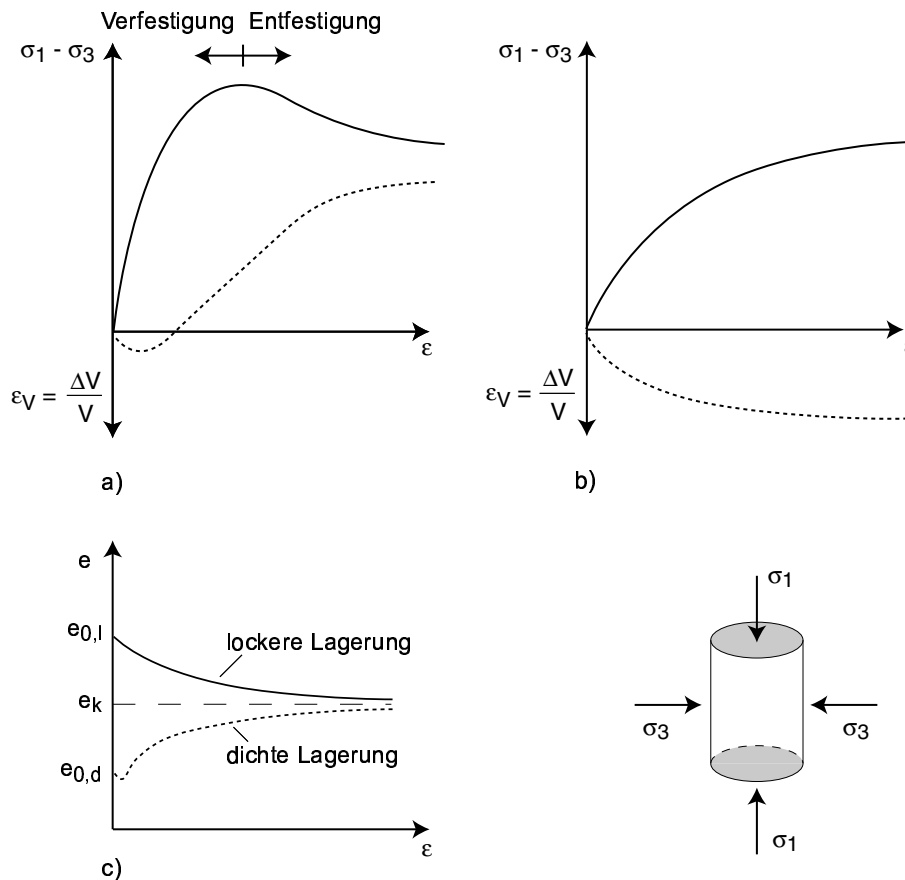


Bild 2.5: Spannungs-Verformungsverhalten und Volumenänderung am Beispiel eines Triaxialversuchs für a) dicht gelagerte Böden und b) für locker gelagerte Böden und c) Porenzahlentwicklung

In der Regel werden in der bodenmechanischen Fachliteratur experimentelle und theoretische Untersuchungen beschrieben, denen dicht gelagerte Materialien zu Grunde liegen. Die Beschränkung auf die Untersuchung dicht gelagerter Materialien gründet sich auf zahlreiche Untersuchungen, die zeigen, dass nur dicht gelagerte Materialien unter Scherbeanspruchung eine Lokalisierung der Deformation in dünnen Scherbändern aufzeigen, wohingegen bei locker gelagerten Materialien eine homogene Verformung des Materials bis zum Erreichen der Restscherfestigkeit beobachtet wird. Arbeiten, in denen eine mögliche Lokalisierung der Verformung auch bei locker und mitteldicht gelagerten Proben untersucht wird, sind nur selten zu finden.

Han & Vardoulakis [39] untersuchen das Spannungs-Verformungsverhalten von wassergesättigten, feinkörnigen Bodenproben anhand von Biaxialversuchen. Die unter drainierten Bedingungen ausgeführten Versuche mit unterschiedlichen Anfangslagerungsdichten

zeigen, dass nur bei mitteldicht oder dicht gelagerten Proben eine Lokalisierung der Verformung in einer Scherfuge beobachtet werden kann. Während sich bei zwei Proben mit bezogenen Ausgangslagerungsdichten von  $I_D = 0,76$  und  $I_D = 0,52$  Scherflächen mit annähernd Coulomb'schem Scherflächenwinkel (Gleichung (2.7)) zur Richtung der kleinsten Hauptspannung entwickeln, ist bei einem Versuch mit bezogener Lagerungsdichte im Ausgangszustand von  $I_D = 0,19$  keine Lokalisierung zu beobachten. Die Probe verformt sich während der gesamten Belastungsphase homogen.

Desrues et al. [21] zeigen dagegen, dass sich auch bei locker gelagerten Proben im Triaxialversuch Lokalisierungen beobachten lassen. Nähere Angaben über den Betrag der Lagerungsdichte werden nicht gemacht, das rein kontraktante Verhalten der Probekörper lässt aber darauf schließen, dass ein sehr locker gelagerter Boden untersucht wurde. Bestätigt werden die Ergebnisse von Finno et al. [31]. Sie zeigen, dass sich auch bei sehr locker gelagerten Proben ( $I_D = 0,05$ ) Lokalisierungen im unter drainierten Bedingungen durchgeführten Biaxialversuch beobachten lassen. Finno et al. weisen mit Hilfe der Stereophotogrammetrie (vgl. Kapitel 3) nach, dass sich zu Beginn der Belastung über die gesamte Probenhöhe parallele Bereiche ausbilden, in denen sich die Scherdehnung konzentriert. Kurz vor der Aktivierung der maximalen Reibung innerhalb der Probe konzentriert sich die Scherdehnung in nur noch zwei parallelen Zonen, die im Vergleich zu den ursprünglichen Bereichen konjugiert geneigt sind. Nach der Aktivierung der maximalen Reibung verbleibt eine Scherfläche innerhalb des Bodenkörpers. Eine Lokalisierung von Dehnung in locker gelagerten Proben wird ebenfalls von Mokni & Desrues [81] beobachtet. Mokni & Desrues führen undrainierte Biaxialversuche an dicht und locker gelagerten Proben durch und vergleichen die Ergebnisse mit Resultaten aus drainiert gefahrenen Biaxialversuchen. Saada et al. [109] zeigen anhand der Ergebnisse von Scherversuchen im Hohlzylinder, dass sowohl bei dicht als auch bei locker gelagerten Proben eine Bildung von Scherfugen kurz vor dem Peak der Spannung-Dehnung-Kurve zu beobachten ist. Ein Einfluss der Lagerungsdichte auf die resultierende Scherfugeneigung wird von Saada et al. nicht beobachtet.

# Kapitel 3

## Modellversuche zur Simulation von Scherfugenmustern

In Kapitel 2 wurden zahlreiche Modellversuche auf dem Gebiet der Geologie und der Bodenmechanik beschrieben, in denen die Entwicklung von einzelnen Scherfugen und Verwerfungen oder von Gruppen von Lokalisierungszonen untersucht wird [74, 75, 77, 78, 127].

Im Hinblick auf eine detaillierte Untersuchung der Geometrie von Scherflächensystemen, ausgedrückt durch den Abstand der Scherfugen und durch die Neigung der Scherflächen, werden in diesem Kapitel die durchgeführten Modellversuche zur Extensionsbeanspruchung von Sandproben beschrieben. Nach der Darstellung des Versuchsprinzips wird der entwickelte Versuchsbehälter mit seinen besonderen Spezifikationen beschrieben und anschließend die verwendete Messtechnik erläutert. Hierbei wird besonderer Wert auf die Beschreibung der Röntgentechnik und der eingesetzten optischen Messtechnik gelegt. Anschließend werden die Methoden erläutert, mit denen die Parameter zur Beschreibung der Geometrie der Scherfugenmuster bestimmt werden. Hierzu zählen der Abstand und die Neigung der Scherfugen, die Scherflächendicke und der Betrag der Dehnung, bei dem eine Lokalisierung der Verformung beobachtet werden kann. Nach der Beschreibung der verwendeten Modellmaterialien wird abschließend das durchgeführte Versuchsprogramm zusammengefasst.

### 3.1 Methode

Das Grundprinzip der durchgeführten Extensionsversuche ist in Bild 3.1 dargestellt. Eine quaderförmige Materialprobe wird auf einer Gummimatte platziert, welche auf einer Bodenplatte aus Glas aufliegt. Die Probe ist allseitig von Wänden umgeben, die an einem Aluminiumrahmen befestigt sind. Eine dieser Wände ist mit einem Antrieb verbunden und beweglich ausgeführt. Die Gummimatte ist an einer Seite fest mit dem Versuchsbehälter verbunden, auf der gegenüberliegenden Seite ist sie an der beweglich ausgeführten Wand befestigt.

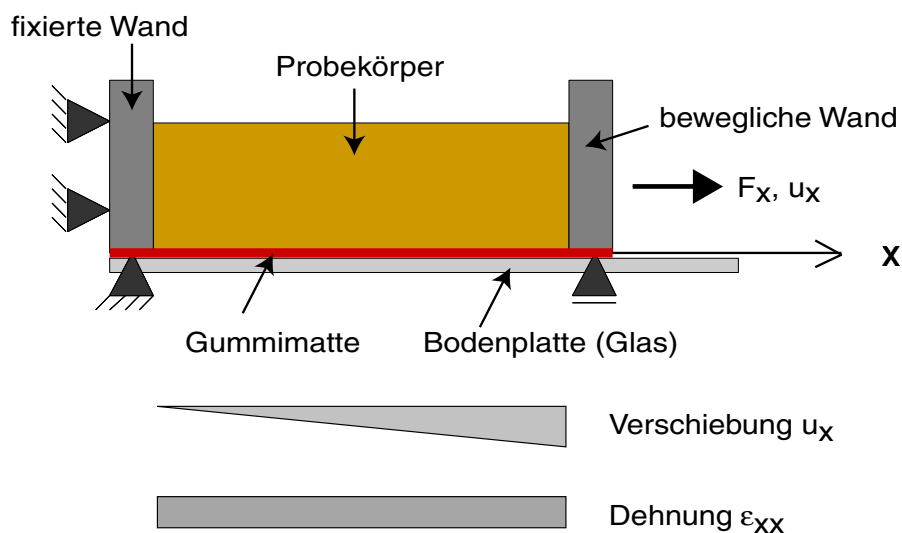


Bild 3.1: Versuchskonzept der Extensionsversuche

Durch die Verschiebung  $u_x$  der Wand wird die Gummimatte gedehnt. Die Eigenschaften des gewählten Gummimaterials unterstützen eine lineare Verteilung der Verschiebung einzelner Punkte innerhalb der Gummimatte in  $x$ -Richtung. Es stellt sich eine konstante Dehnungsverteilung  $\epsilon_{xx}$  in der Gummimatte ein. Die in die Gummimatte eingeprägte Dehnung wird über die Reibung zwischen Gummimatte und Probe in die Materialprobe übertragen.

Grundlage der Theorie des plastischen Grenzzustandes ist, dass sich der anstehende Boden gleichmäßig auflockert. Dieses ist nur möglich, wenn homogene Bedingungen an den Rändern des Halbraums vorliegen. Übertragen auf die Modellversuche im Rahmen dieser Arbeit muss daher zu jedem Versuchszeitpunkt eine homogene Dehnungsverteilung in der Gummimatte unterhalb der Materialprobe gewährleistet sein. Harper et al. [40]



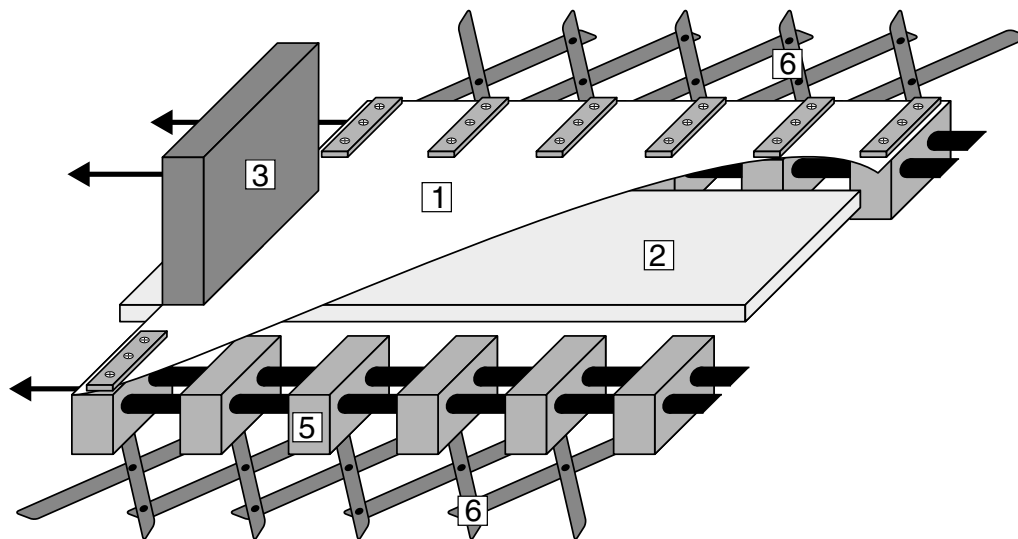
untersuchen mit Hilfe von numerischen Simulationen den Einfluss von homogenen und inhomogenen Randbedingungen auf die Ausbildung von Scherflächenmustern unter Extensionsbeanspruchung. Die Ergebnisse der Berechnungen zeigen, dass sich bei einer unregelmäßigen Dehnungsverteilung innerhalb der elastischen Schicht unterhalb des spröden Überdeckungsmaterials Scherfugenscharen entwickeln, deren Geometrie nachhaltig von der Konzentration der Dehnung in bestimmten Bereichen der elastischen Schicht beeinflusst wird. Um eine nichthomogene Dehnungsverteilung als Randbedingung und damit als weiteren möglichen Einflussfaktor auf die Scherfugegeometrie auszuschließen, wird daher bei den Modellversuchen im Rahmen dieser Arbeit der Gewährleistung der Homogenität der Dehnung besondere Bedeutung beigemessen. Da insbesondere bei der Versuchsdurchführung im erhöhten Schwerfeld hohe Reibungskräfte zwischen der Gummimatte und der Bodenplatte des Versuchsbehälters zu erwarten sind, werden vor der Planung und der Konstruktion des Versuchsbehälters Vorversuche durchgeführt, in denen die Größe der auftretenden Reibung und deren Einfluss auf die Verteilung der Dehnungen in der Gummimatte untersucht werden.

Die Ergebnisse der Versuche zeigen, dass ein großes Kräfteverhältnis zwischen der Zugkraft in der Gummimatte und der Reibungskraft zwischen Gummi und Bodenplatte den Einfluss der Reibung auf die Verteilung der Dehnung minimiert. Dieses Kräfteverhältnis kann maximiert werden, indem die Zugkraft durch die Wahl einer entsprechend dicken Gummimatte gesteigert und die Reibungskraft durch den Einsatz eines geeigneten Schmiermittels vermindert wird. Während der Hauptversuche wird aus diesem Grund die Kontaktfläche Gummi-Bodenplatte mit Talkum-Pulver (1g-Versuche) oder mit Silikonöl (ng-Versuche) präpariert. Für die Versuche im natürlichen Schwerfeld wird eine 1 mm starke Gummimatte, im erhöhten Schwerfeld eine 2 mm starke Gummimatte verwendet. Trotz dieser Maßnahmen zeigt sich, dass eine homogene Verteilung der Dehnungen in der Gummimatte allein durch eine Minimierung der Reibung zwischen Gummimatte und Bodenplatte und durch eine Erhöhung der Zugkraft in der Gummimatte nicht gewährleistet werden kann. Aus diesem Grund wird bei der Konstruktion des Versuchsbehälters eine besondere Mechanik zur Unterstützung der Gummimattendehnung angeordnet, die im nachfolgenden Kapitel beschrieben wird.

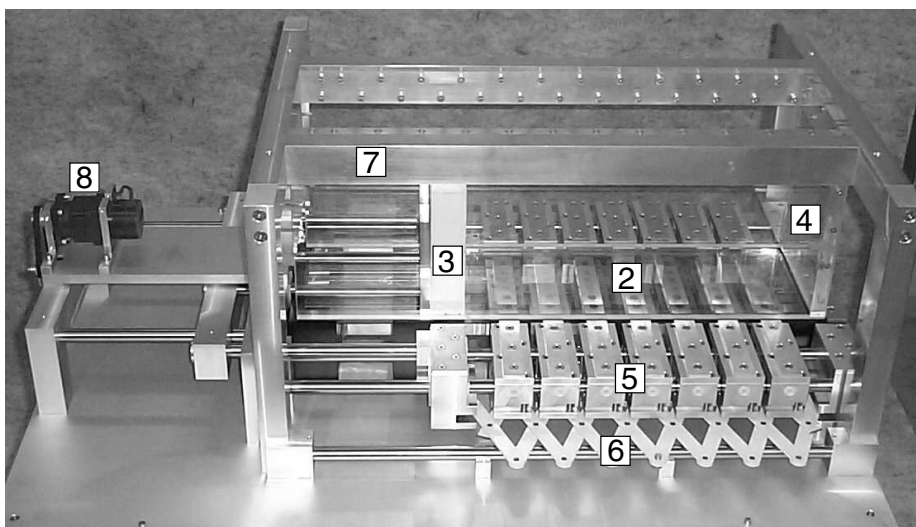
## 3.2 Versuchsbehälter und Versuchsvorbereitung

Details des Versuchsbehälters zur Durchführung der Extensionsversuche sind in Bild 3.2a dargestellt, Bild 3.2b zeigt den Versuchsbehälter ohne eingebauten Probekörper. Die in Abschnitt 3.1 beschriebene Gummimatte (1) - in Bild 3.2b aus Gründen der Übersichtbarkeit nicht dargestellt - wird auf der Bodenplatte des Gerätes (2) angeordnet und mit der beweglichen (3) und der festen Wand (4) über Schrauben verbunden. Die Bodenplatte aus Glas wird vorher mit Talkum (Versuche im natürlichen Schwerfeld) oder Silikonöl (Versuche im erhöhten Schwerfeld) präpariert, um die Reibung zwischen der Gummimatte und der Platte zu minimieren. Anschließend wird die Matte an den seitlich angeordneten Metallplatten (5) befestigt. Diese Metallplatten gleiten auf Kugellagern und sind über einen Scherenmechanismus (6) verbunden. Der Scherenmechanismus stellt sicher, dass die Metallplatten zu jedem Versuchszeitpunkt den selben Abstand aufweisen. Hierdurch wird gewährleistet, dass dem Probekörper eine kontinuierlich homogene Dehnung eingeprägt wird. Im weiteren Verlauf der Versuchsvorbereitung wird ein Rahmen mit angehängten durchsichtigen Wänden (7) über der Gummimatte installiert. Das Material der Wände, Glas oder Plexiglas, wird in Abhängigkeit der durchzuführenden Versuche gewählt. Die Wände aus Plexiglas werden vor dem Einbau des Modellbodens zur Reibungsreduktion poliert. Auf die Wände aus Glas wird vor dem Einbau eine spezielle Politur zur Verminderung der Reibung zwischen Probekörper und Wand aufgebracht. Nach der Installation der Wände kann die Materialprobe eingebaut werden. Während der Versuchsdurchführung werden die bewegliche Wand (3) und die Metallplatten (5) über Zugstangen verschoben, welche durch einen Schrittmotor (8) angetrieben werden.

Die Länge der Materialprobe im Ausgangszustand beträgt bei allen Versuchen 50 cm. Der Behälter ist so ausgelegt, dass die bewegliche Wand um einen Betrag von 20 cm verschoben werden kann. Diese Verschiebung entspricht einer konstanten Dehnung der Materialprobe von 40 %. Die Einbauhöhe beträgt maximal 30 cm, die Breite des Versuchskörpers wurde zu 20 cm gewählt. Die durchgeführten Vorversuche haben gezeigt, dass bei einer geringeren Breite der Probe die Reibung zwischen dem Material und den Seitenwänden die Geometrie der sich ausbildenden Lokalisierungszonen stark beeinflusst. Dieser Einfluss spiegelt sich in der starken Krümmung der an der Probenoberseite sichtbaren Scherflächen wieder. Eine größere Breite der Probe beeinträchtigt wiederum die Möglichkeiten, die entstehenden Scherfugen mit Hilfe der vorhandenen Messtechnik sichtbar zu machen (vgl. Abschnitt 3.3). Der Versuchsbehälter wurde für die Verwendung in der Geotechnischen



- a)
- |   |                    |   |                    |   |        |
|---|--------------------|---|--------------------|---|--------|
| 1 | Gummimatte         | 4 | feste Endwand      | 7 | Rahmen |
| 2 | Bodenplatte (Glas) | 5 | Metallplatten      | 8 | Motor  |
| 3 | bewegliche Wand    | 6 | Scherenmechanismus |   |        |



b)

Bild 3.2: Versuchsbehälter: a) Skizze b) nach der Fertigstellung

Großzentrifuge Bochum konzipiert, d.h. alle Bauteile des Versuchsbehälters wurden auf eine Belastung in erhöhten Schwerfeld von bis zu 30-facher Erdbeschleunigung (30g) bemessen.

Dem Einbau der Materialprobe in das Versuchsgerät kommt besondere Bedeutung zu, da eine homogene oder inhomogene Lagerung der verwendeten Materialien und damit die mechanischen Eigenschaften der Materialien in hohem Maße von der Einbaumethode

beeinflusst werden [16, 58, 69, 101, 113]. Entscheidenden Einfluss auf den Neigungswinkel der sich entwickelnden Scherflächen hat weiterhin eine etwaige Anisotropie des Modellbodens nach dem Einbau [119]. Für die durchgeführten Modellversuche werden aus diesen Gründen die Materialien nach der 'Rieselmethode' eingebracht. Nach dieser Methode wird das Modellmaterial, welches in einem Vorratsbehälter oberhalb des Modellbehälters angeordnet ist, über verschiedene Siebe geleitet und fällt anschließend in den Versuchsbehälter. Durch die Wahl und die Variation 1) der Lochweite der Siebe, 2) des Abstandes zwischen dem untersten Sieb und der Probenoberfläche und 3) des Volumenstroms des Materials können homogene Probekörper mit unterschiedlichen Lagerungsdichten  $I_D$  hergestellt werden. Da bei der Herstellung von locker gelagerten Proben in der Regel ein starker Volumenstrom des Modellmaterials gewählt werden muss, wird eventuell überschüssiges Material nach Abschluss des Rieselvorgangs vorsichtig bis auf die erforderliche Probenhöhe abgesaugt. Bei den Versuchen, die nicht mit Hilfe der Methode der Digital Image Correlation (vgl. Kapitel 3.3) ausgewertet werden, wird der Rieselvorgang nach der Herstellung von jeweils 2, 5 cm mächtigen Schichten gestoppt und eine dünne Schicht von gefärbten Körnern des selben Materials eingefügt. Anschließend wird der Rieselvorgang fortgesetzt. Anhand der unter Dehnungseinfluss auftretenden Abstufungen innerhalb der gefärbten Schichten können die Scherfugen identifiziert werden.

## 3.3 Messtechnik

### 3.3.1 Allgemeines

Der Methode zur Erfassung der zur Versuchsauswertung erforderlichen Messwerte kommt in der bodenmechanischen und geotechnischen Versuchstechnik eine besondere Bedeutung zu. In Bezug auf die Identifizierung und die Darstellung von Lokalisierungszonen werden unterschiedliche Methoden zur Visualisierung der entstehenden Lokalisierungen verwendet. Generell können diese in zwei Gruppen unterteilt werden.

In der ersten Gruppe sind Methoden zusammengefasst, die einen Einblick in die innere Struktur der Probekörper ermöglichen. Vornehmlich kommen hier die Röntgentechnik [11, 39, 93, 124] und die Computertomographie [3, 17, 20, 21, 94] zum Einsatz. Beide Verfahren haben gemein, dass sie Dichteunterschiede innerhalb eines Probekörpers sichtbar machen. Werden dicht gelagerte Proben einer Scherverformung unterworfen, sind die

auftretenden Lokalisierungszonen auf den Röntgenbildern aufgrund ihrer durch die Dilatanz in den Scherfugen hervorgerufenen geringeren Dichte als helle Bereiche sichtbar. Während bei der Computertomographie dreidimensionale Aufnahmen der Probenstruktur dokumentiert werden können, muss die Lokalisierungsebene bei der klassischen Röntgentechnik einen rechten Winkel mit der Röntgenbildebene einschließen. Scherzonen in sehr locker gelagerte Proben können mit beiden Verfahren nicht sichtbar gemacht werden, da die Dichteunterschiede zwischen dem Material in der Scherfuge und dem umgebenden Material in der Regel klein sind.

Die zweite Gruppe bilden diejenigen Aufnahmeverfahren, die Verformungen der Ober- oder Seitenflächen von Probekörpern dokumentieren. Die Aufnahmen bilden die Grundlage für die sich anschließende Berechnung von Verformungs- oder Dehnungsfeldern. Eine einfache Methode stellt die Verwendung von Markern dar, die während der Versuchsvorbereitung in einem regelmäßigem Muster an den Seitenflächen der Probekörper innerhalb des Modellmaterials angeordnet werden. Die Verschiebung der Marker während der Versuchsdurchführung kann manuell oder durch analoge bzw. digitale Fotografie aufgezeichnet werden. Lokalisierungen können zwischen unterschiedlich verschobenen Marken identifiziert werden. Die Genauigkeit dieser Methode ist u. a. erheblich von der Anzahl der eingesetzten Markierungen pro Flächeneinheit abhängig. Hierbei ist zu beachten, dass eine große Anzahl von Markern das Verformungsverhalten des Materials nachhaltig beeinflussen kann.

Die Stereophotogrammetrie verzichtet auf den Einsatz von Markern. Sie wurde von Butterfield et al. [13] erstmals auf dem Gebiet der Bodenmechanik angewendet. Später fand diese Methode unter anderem in den Arbeiten von Desrues et al. [22], Finno et al. [31] oder Harris et al. [41] Anwendung. Die Stereophotogrammetrie basiert auf zwei Fotografien der Oberflächen- oder Seitenflächenstruktur eines sich verformenden Probekörpers, die mit einer bestimmten Zeitdifferenz und damit einem spezifischen Verschiebungsincrement angefertigt werden. Unter Verwendung eines speziellen Gerätes kann mit den beiden Bildern ein künstlicher 3-D-Effekt simuliert werden. Besitzt der untersuchte Bodenkörper einen hinreichend abgestuften Kontrast, besteht die Möglichkeit, gleiche Körner auf beiden Aufnahmen zu erkennen und die Verschiebung der Körner innerhalb des Dehnungsincrementes zu bestimmen. Aus dem mit dieser Methode ermittelten Verschiebungsfeld können anschließend die Verformungen der Oberfläche oder der Seitenfläche berechnet werden.

### 3.3.2 Röntgentechnik

Zur Bestimmung der Scherfugenabstände und der Neigung der Scherfugen wird in den Modellversuchen die in Abschnitt 3.3.1 beschriebene klassische Röntgentechnik in digitaler Form verwendet. Hierzu wird das in Bild 3.3 dargestellte mobile C-Bogen-Röntgengerät eingesetzt. An dem C-Bogen sind die Röntgenröhre (1) und die digitale Röntgenempfangseinheit, der Bildverstärker, (2) angebracht. Die Position des Bogens kann in allen drei Achsen verändert werden, was eine optimale Anpassung der Röntgenapparatur an die Versuchsrandbedingungen ermöglicht. Während der Aufnahme durchdringen die Röntgenstrahlen die Bodenprobe (3), auf einem Monitor kann ohne Zeitverzögerung das Ergebnis der Durchleuchtung betrachtet werden. Durch die kontinuierliche Durchleuchtung des Probekörpers können der Entstehungszeitpunkt der Lokalisierungszone abgeschätzt und die anschließende Entwicklung der Scherflächen innerhalb des Körpers im Hinblick auf die Scherfugenabstände und die Scherfugenneigungen beobachtet werden. Die Durchleuchtung des Probekörpers wird als Film digital in einem Rechner festgehalten, alternativ ist die Aufnahme von digitalen Einzelbildern möglich.

Die maximale Breite des Aufnahmebereichs variiert bei dem verwendeten Röntgengerät in Abhängigkeit der Position des Probekörpers zwischen 10 cm und 20 cm. Um die Abstände und die Neigungen aller Scherflächen innerhalb des Probekörpers zu dokumentieren, wird die Verschiebung der beweglichen Wand und damit die Einprägung der horizontalen Dehnung bei horizontalen Dehnungszuständen von  $\varepsilon_{xx,1} = 10\%$  (entspricht einer Verschiebung der beweglichen Wand von  $u_x = 5$  cm),  $\varepsilon_{xx,2} = 20\%$  ( $u_x = 10$  cm),  $\varepsilon_{xx,3} = 30\%$  ( $u_x = 15$  cm) und  $\varepsilon_{xx,4} = 40\%$  ( $u_x = 20$  cm) unterbrochen. Anschließend werden an verschiedenen, vorab definierten Positionen Röntgenaufnahmen angefertigt, digital gespeichert und anhand dieser Bilder der Abstand der Scherflächen und deren Neigung bestimmt (vgl. Kapitel 3.4). Durch Vorversuche wurde sichergestellt, dass die Unterbrechung des Dehnungsvorgangs die spezifischen Scherflächenabstände und die Scherflächenneigungen nicht beeinflusst. Es zeigte sich, dass sich die Scherflächenmuster vor der ersten Unterbrechung des Dehnungsvorgangs entwickeln und sich die Anzahl der Scherflächen im weiteren Verlauf des Versuches nicht mehr ändert (vgl. Kapitel 5.1.2).

### 3.3.3 Digital Image Correlation

Das „Digital Image Correlation“ - Verfahren (DIC) wurde ursprünglich für die Visualisierung von Luft- und Gasströmungen auf dem Gebiet der Strömungstechnik unter dem

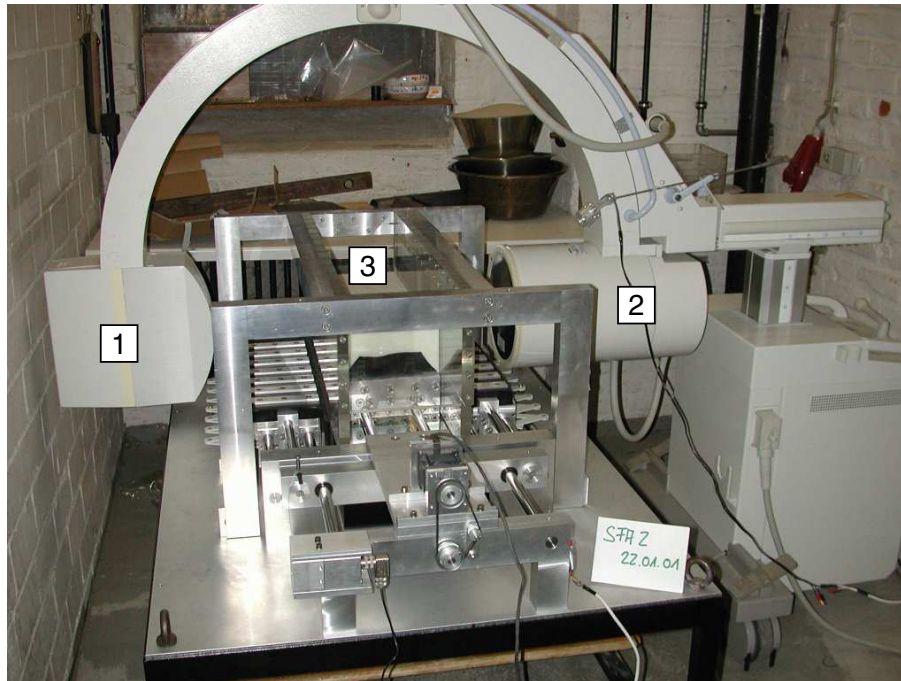


Bild 3.3: Messwerterfassung mit Hilfe eines C-Bogen Röntgengerätes, 1) Röntgenröhre 2) Empfangseinheit (Bildverstärker) 3) Probekörper

Namen „Particle Image Velocimetry“ (PIV) entwickelt und findet seit kurzem Anwendung auf dem Gebiet der Versuchstechnik in der Bodenmechanik [42, 89, 105, 136, 137, 138]. Als Input für die Bildauswertungssoftware dient in Analogie zur Stereophotogrammetrie eine Folge von mindestens zwei digitalen Aufnahmen der Probenstruktur an einer Seiten- oder Oberfläche der untersuchten Bodenprobe. Hierzu werden bei den durchgeführten Versuchen digitale Aufnahmen durch die durchsichtigen Plexiglas- oder Glasscheiben des Versuchsbehälters angefertigt. In Bild 3.4 ist das Funktionsprinzip der DIC-Methode dargestellt.

Bild 3.4a zeigt eine typische Aufnahme der Seitenflächenstruktur einer Probe zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten  $t$  und  $t + \Delta t$ . Die Aufnahmen wurden durch die transparenten Seitenwände des Versuchsbehälters aufgenommen. Um eine maximale Anzahl an Informationen über die Verschiebung der Bodenteilchen und über die Dehnungen an der Seitenfläche zu erhalten, wird die Brennweite des Objektivs eingestellt, dass keine störenden Behälterbestandteile aufgenommen werden. Der Bereich, auf den die Digital Image Correlation angewendet wird, wird durch die Wahl des so genannten 'area of interest' festgelegt. Dieser Bereich wird wiederum in eine Anzahl von Abfragefenstern identischer Größe, so genannten 'interrogation windows', unterteilt. Durch die Wahl der Größe der

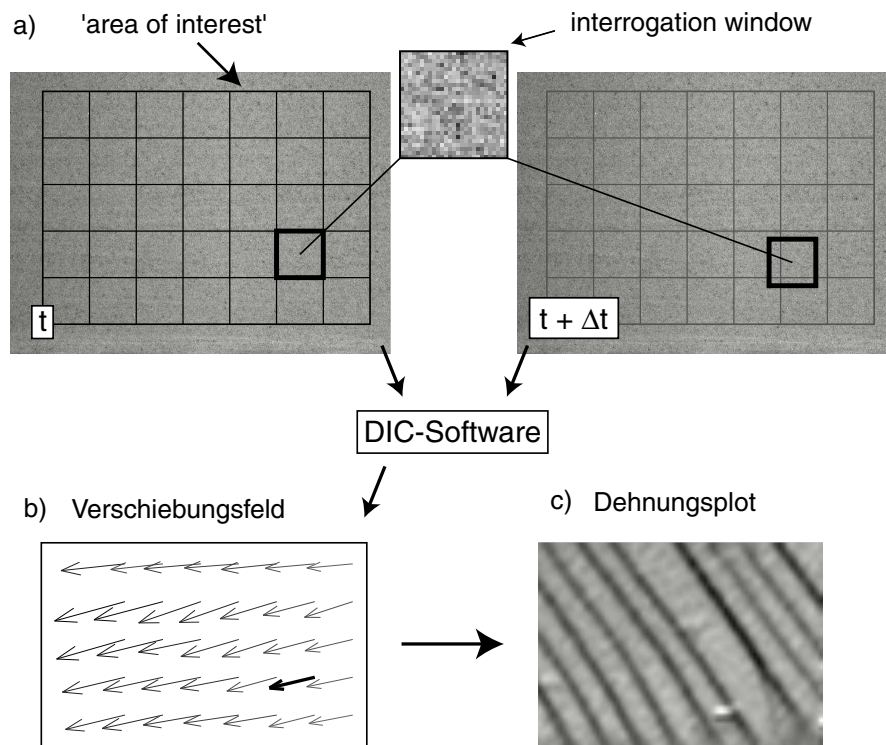


Bild 3.4: Funktionsprinzip der Digital Image Correlation Methode (DIC)

Abfragefenster wird die Anzahl der zu berechnenden Verschiebungsvektoren und damit die Auflösung der Auswertung bestimmt. Jedes einzelne Abfragefenster beinhaltet eine spezifische Pixelstruktur von verschiedenen Graustufen. Unter der Annahme, dass diese Struktur ihre Graustufenkonfiguration zwischen zwei Bildern weitgehend beibehält und nur ihre Position verändert, kann die Verschiebung der Abfragefenster - und damit die Verschiebung der Kornstruktur - mit Hilfe von Kreuzkorrelationsalgorithmen bestimmt werden. Die Kreuzkorrelationsalgorithmen leiten sich von folgender Korrelationsgleichung ab:

$$C(dx, dy) = \sum_{x=0, y=0}^{x < n, y < n} I_1(x, y) \cdot I_2(x + dx, y + dy), \quad -\frac{n}{2} < dx, dy < \frac{n}{2}. \quad (3.1)$$

Hierbei bezeichnen  $I_1$  und  $I_2$  die Graustufenintensitäten von den gleichen Abfragefenstern zweier aufeinander folgender Bilder,  $C$  den Korrelationswert für alle Verschiebungsvektoren  $(dx, dy)$  und  $n$  die Größe des Abfragefensters. Der Peak in der Korrelationsebene  $c$  ergibt einen Verschiebungsvektor zwischen den Abfragefenstern gleicher Graustufenkonfiguration zweier nachfolgender Bilder, die Summe aller Vektoren ein Verschiebungsfeld (Bild 3.4b). Aus diesem Verschiebungsfeld kann anschließend die gewünschte Dehnungsgröße berechnet werden (Bild 3.4c).

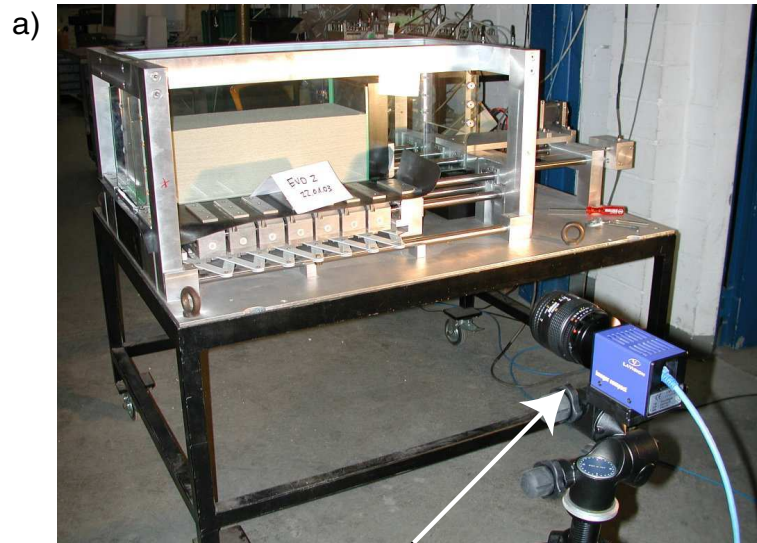


Der Vorteil der DIC-Methode im Vergleich zu anderen optischen Bildauswertungsmethoden liegt in der Einfachheit des Verfahrens. Außer einem leistungsfähigen Rechner und einer digitalen CCD-Kamera werden keine weiteren technischen Geräte benötigt. Die Wahl der CCD-Kamera legt hierbei das Einsatzgebiet der Digital Image Correlation Methode fest. Mit handelsüblichen digitalen Kompaktkameras lassen sich nur statische Problemstellungen untersuchen. Sollen zyklische oder dynamische Prozesse festgehalten werden, ist die Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera notwendig. Ein großer Vorteil gegenüber anderen optischen Methoden besteht darin, dass die Genauigkeit des Verfahrens nicht mit der Rasterweite von in den Probekörper eingebetteten Markern gekoppelt ist. Natürlich ist auch die Auflösung der Verschiebungsfelder bei der DIC-Methode begrenzt. Ihre Anwendungsgrenze erreicht die Methode dann, wenn sich der Bereich der Probe, der durch das gewählte Abfragefenster bestimmt wird, zwischen zwei Bildern um einen größeren Betrag als die halbe Kantenlänge des Fensters verschiebt. Sind die Verschiebungen der Körner zwischen zwei nachfolgenden Aufnahmen aber klein, können Abfragefenster mit sehr geringer Größe gewählt werden, wodurch eine große Anzahl an Vektoren und somit eine hohe Auflösung der Dehnungsplots erzielt werden kann. Zusätzlich kann bei der Berechnung der Verschiebungsvektoren ein Überlappungsfaktor der Abfragefenster bis zu 75 % gewählt werden, was die Auflösung des Ergebnisses des Verfahrens weiter erhöht.

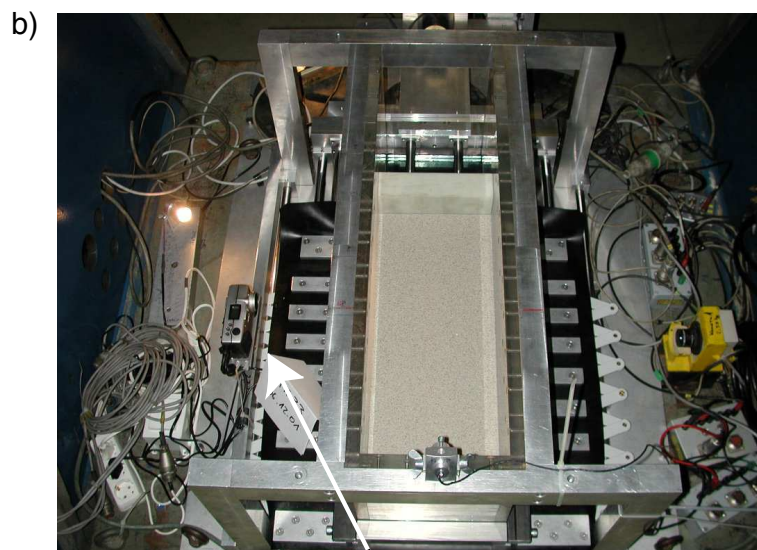
Die Anwendung der Digital Image Correlation während der Durchführung der Extensionsmodellversuche ermöglicht eine genaue Beschreibung der Scherflächengeometrie und bietet im Vergleich zu anderen Messtechniken einige wesentliche Vorteile:

- Da keine Marker innerhalb der Probe angeordnet werden müssen, werden die Probenstruktur und die Verformung der Probe nicht beeinflusst.
- Mit Hilfe der DIC-Methode können Lokalisierungen schon zu sehr frühen Zeitpunkten identifiziert werden.
- Außer einer digitalen Kamera und der DIC-Software werden keine weiteren Komponenten benötigt.
- Die Genauigkeit des Verfahrens ist nicht von der Anzahl künstlicher Messpunkte innerhalb des Probekörpers abhängig.

Die durchgeführten Versuche im natürlichen Schwerfeld werden mit Hilfe einer speziellen CCD-Kamera dokumentiert. Diese Kamera ermöglicht Bildaufnahmeraten bis zu 12 Bilder pro Sekunde (12 Hertz), die CCD-Matrix der Kamera besitzt eine Auflösung von 1280



digitale Hochgeschwindigkeitskamera



digitale Kompaktkamera

Bild 3.5: Versuchsanordnung mit optischer Messtechnik für die Modellversuche a) im natürlichen Schwerfeld und b) im erhöhten Schwerfeld

x 1024 Pixel. Da diese hochempfindliche Kamera im erhöhten Schwerfeld nicht eingesetzt werden kann, wird die Deformation der Probe in den Zentrifugen-Modellversuchen mit Hilfe einer digitalen Kompaktkamera aufgenommen. Die Auflösung des CCD-Chips beträgt bei diesen Versuchen 1152 x 864 Pixel. Die aufgenommenen digitalen Einzelbilder werden während der Versuchsdurchführung im erhöhten Schwerfeld über die Schleifringe der

Zentrifuge an einen Rechner übertragen und gespeichert. Zur Versuchsauswertung werden die Bilder in die verwendete optische Bildauswertungssoftware importiert und ausgewertet. Bei der Verwendung der Hochgeschwindigkeitskamera können parallel zur Aufnahme der digitalen Bilder analoge Versuchsdaten, wie z.B. die aufgebrachte Verschiebung, aufgezeichnet werden. Damit ist eine exakte Zuordnung der berechneten Deformationen zu einer bestimmten Verschiebung der beweglichen Stirnwand und damit zu einem bestimmten Dehnungszustand innerhalb der Probe möglich. Die Versuchsanordnungen für die Modellversuche im natürlichen und erhöhten Schwerfeld mit angeordneter digitaler Messtechnik sind in Bild 3.5 dargestellt.

### 3.3.4 Weitere Komponenten der Messtechnik

Die Homogenität der Dehnungsverteilung innerhalb der Gummimatte wird während der Modellversuche im natürlichen Schwerfeld über die Auswertung der Geometrie eines auf der Unterseite der Gummimatte aufgezeichneten Musters kontrolliert. Dieses orthogonale Muster ist aus zehn Rechtecken zusammengesetzt. Eine homogene Dehnungsverteilung innerhalb der Gummimatte hat sich dann eingestellt, wenn nach dem Aufbringen einer Verschiebung der beweglichen Wand und der damit verbundenen Dehnung der Matte keine Verzerrungen der Rechtecke zu beobachten sind und sich die Abstände der Kanten der Rechtecke in Richtung der Verschiebung entsprechend der eingepprägten Dehnung gleichmäßig verändern. Eine Querkontraktion der Gummimatte kann ausgeschlossen werden, wenn sich die Abstände der Rechteckseiten in allen Dehnungszuständen nicht ändern. Bei einigen Versuchen wird die Verformung der Gummimatte zusätzlich mit Hilfe von digitalen Kameras aufgezeichnet. Die Dehnungen innerhalb der Matte in Richtung der Verschiebung der beweglichen Wand und in Querrichtung werden anschließend mit Hilfe der Methode der Digital Image Correlation berechnet und auf ihre Gleichmäßigkeit überprüft.

Während der Versuchsdurchführung im erhöhten Schwerfeld der geotechnischen Großzentrifuge werden alle versuchstechnisch relevanten Bauteile wie Antrieb, Seitenwände und Gummimatte mit Videokameras überwacht.

Um die Verschiebung der beweglichen Wand und damit die Größe der eingepprägten horizontalen Dehnung während der Versuchsdurchführung beobachten und kontrollieren zu können, wird die Wandverschiebung mit einem induktiven Wegaufnehmer erfasst.

## 3.4 Versuchsauswertung

### 3.4.1 Auswertung der Scherfugenabstände und Scherfugenneigungen

Zur Bestimmung der Scherfugenabstände und der Scherfugenneigungen werden die mit dem Röntgengerät erzeugten Einzelbilder mit Hilfe einer speziellen Bildbearbeitungssoftware ausgewertet. Auf den Röntgenbildern zeichnen sich die entstandenen Scherflächen als aufgehellte Bereiche mit geringerer Dichte von dem umgebenden dichter gelagerten Material ab. Zu Beginn des Dehnungsvorgangs oder bei der Untersuchung von mitteldicht oder locker gelagerten Proben sind diese Dichteunterschiede auf den Röntgenbildern nicht immer eindeutig zu identifizieren. In diesem Fall wird eine Software verwendet, mit der Modifikationen in Bezug auf den Kontrast der Röntgenbilder vorgenommen oder Bereiche mit identischen Dichtebeträgen verbunden werden können. Anschließend werden die Mittelachsen der Scherflächen gekennzeichnet und die Koordinaten dieser Achsen in Pixelkoordinaten festgehalten.

Da die Röntgeneinheit nicht fest an dem Versuchsbehälter installiert ist und die Röntgenstrahlen nicht parallel, sondern punktförmig ausgestrahlt werden, ist bei der Umrechnung der gespeicherten Pixelkoordinaten in wahre Koordinaten die Position der Probe zwischen Röntgenquelle und Empfangseinheit zu berücksichtigen. Aus diesem Grund wurden vorab Kalibrierungsversuche durchgeführt und die hieraus abgeleitete Funktion zwischen dem Koordinatenumrechnungsfaktor und der Position der Probe im C-Bogen in die Auswertungssoftware implementiert. Mit Hilfe der Software werden die Pixelkoordinaten in wahre Koordinaten umgerechnet. Anhand dieser Koordinaten können die Neigungen der Scherflächen und die Abstände der Lokalisierungszonen untereinander mit einer Genauigkeit von  $0,1^\circ$  bzw.  $0,1$  mm bestimmt werden. Da in der Regel die Scherflächenabstände über die gesamte Probenlänge nur wenig variieren, werden abschließend sowohl für den Abstand der Scherflächen als auch für deren Neigung Mittelwerte aus allen aufgenommenen Röntgenbildern für einen bestimmten horizontalen Dehnungsbetrag gebildet.

### 3.4.2 Bestimmung der Lokalisierungsdehnung

Zur Bestimmung der Größe der Dehnung, bei der sich die Scherfugen innerhalb der Probe entwickeln, werden sowohl die Röntgentechnik als auch die Digital Image Correlati-

on verwendet. Bei der Identifizierung der Scherfugen mit Hilfe der Röntgentechnik sind die Lokalisierungszonen auf den angefertigten Röntgenbildern erst sichtbar, wenn sich die Kornstruktur innerhalb der Scherflächen um ein ausreichendes Maß volumetrisch verformt und sich damit die Dichte innerhalb der Scherfuge im Vergleich zum umgebenden Bodbereich signifikant geändert hat. Unter Umständen ist es möglich, dass die nötigen Volumenverformungen so groß sind, dass die Scherflächen erst nach dem Erreichen des Peaks in der Spannungs-Dehnungskurve und damit nach der Lokalisierung erkannt werden (vgl. Bild 2.5). Aus diesem Grund ist mit Hilfe der Röntgentechnik nur eine Abschätzung der Dehnungsgröße beim Aufspringen der Scherflächen möglich. Die Digital Image Correlation in Kombination mit Ergebnissen von Triaxialversuchen (vgl. Kapitel 4.3) ermöglicht dagegen eine genaue Bestimmung dieser Größe, da durch die Möglichkeit der Visualisierung sehr kleiner Volumenänderungen mit der DIC-Methode der Ort der sich entwickelnden Scherfläche bereits zu einem sehr frühen Versuchszeitpunkt identifiziert werden kann.

Zur Bestimmung des Lokalisierungszeitpunktes bzw. der Lokalisierungsdehnung mit Hilfe der Digital Image Correlation werden aus einer Serie von digitalen Aufnahmen der Seitenflächenstruktur innerhalb des ersten Dehnungsabschnitts zwischen  $\varepsilon_{xx} = 0 \%$  und  $\varepsilon_{xx} = 10 \%$  die Verschiebungsvektoren berechnet. Die Anzahl der zu berechnenden Vektorfelder kann in einem ersten Schritt relativ klein gewählt werden. Für jedes Vektorfeld wird anschließend die Verteilung der Scherdehnung bestimmt. Beispielfhaft sind für den Versuch PIV06 die Dehnungsplots für verschiedene Beträge der horizontal eingepprägten Dehnung  $\varepsilon_{xx}$  in Bild 3.6 zusammengefasst. Die hellen Bereiche innerhalb der einzelnen Plots kennzeichnen Bereiche hoher Scherdehnungskonzentrationen.

Anhand der Dehnungsplots kann grob der Betrag der horizontalen Dehnungen  $\varepsilon_{xx}$  abgeschätzt werden, bei dem eine Lokalisierung stattgefunden hat. Deutlich ist zu erkennen, dass sich die Probe bis zu einer horizontalen Dehnung von  $\varepsilon_{xx} = 1,65 \%$  annähernd homogen verformt und keine Lokalisierungen innerhalb der Probenstruktur auftreten (Bild 3.6a). Bei einer horizontalen Dehnung von  $\varepsilon_{xx} = 3,44 \%$  (Bild 3.6b) kann eine leichte Konzentration der Scherdehnung beobachtet werden. Zwischen den horizontalen Dehnungszuständen  $\varepsilon_{xx} = 3,44 \%$  und  $\varepsilon_{xx} = 5,19 \%$  (Bild 3.6c) konzentriert sich die deviatorische Dehnung in schmalen Lokalisierungszonen, wohingegen die Größe der Scherdehnung in den umliegenden Bereichen annähernd konstant bleibt. Wird die in die Probe eingepprägte Dehnung weiter gesteigert, akkumuliert sich die daraus resultierende Scherdehnung in den bereits vorhandenen Scherfugen. Die Entstehung neuer Scherflächen kann auch bei größeren horizontalen Dehnungsbeträgen nicht beobachtet werden (Bilder 3.6d und 3.6e).

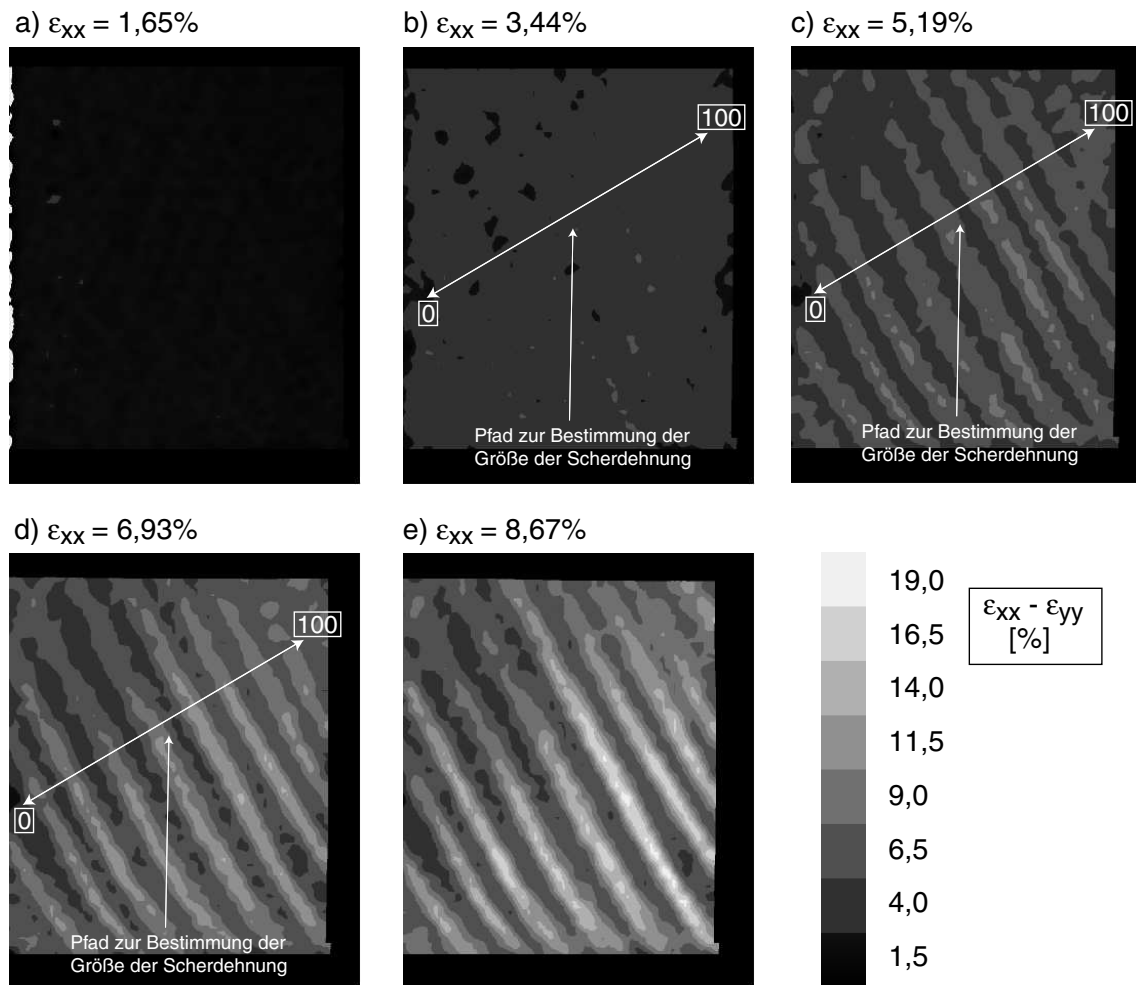


Bild 3.6: Entwicklung der Scherdehnung an der Seitenfläche des Versuchs PIV06 bei verschiedenen Dehnungszuständen der eingprägten Dehnung  $\varepsilon_{xx}$

Um genauere Informationen über den Betrag der Lokalisierungsdehnung zu erhalten, wird ein Pfad senkrecht zu den deutlich erkennbaren Scherfugen festgelegt (vgl. Bild 3.6b-d). Entlang dieses Pfades wird die Größe der Scherdehnung mit Hilfe der DIC-Software für verschiedene Beträge der horizontal eingprägten Dehnung extrahiert. Wurde die Anzahl der zur groben Bestimmung der Lokalisierungsdehnung berechneten Dehnungsplots relativ klein gewählt, kann es dabei sinnvoll sein, vorab eine Berechnung mit kleineren horizontalen Dehnungsincrementen durchzuführen, um die Genauigkeit des Ergebnisses zu erhöhen.

In Bild 3.7 sind beispielhaft die Verläufe der Beträge der Scherdehnung entlang des in den Bildern 3.6b bis 3.6d definierten Pfades für verschiedene Beträge horizontal eingprägter Dehnung  $\varepsilon_{xx}$  zusammengefasst. Jede einzelne Kurve entspricht dabei dem Verlauf

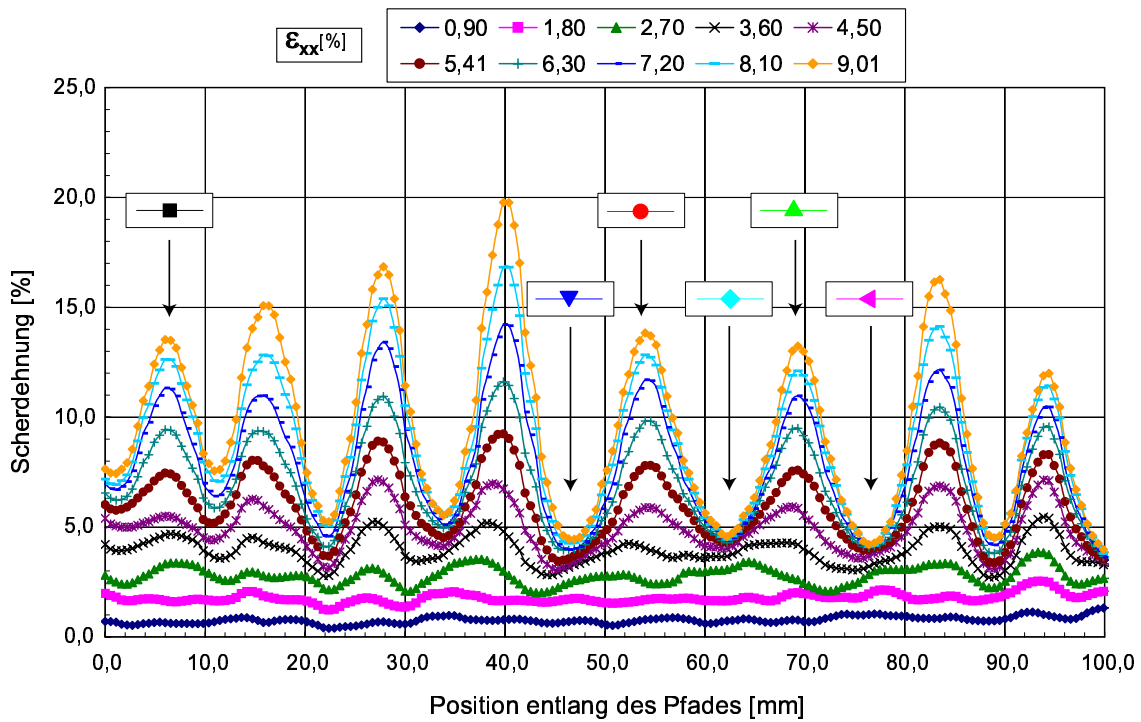


Bild 3.7: Darstellung der Scherdehnung entlang des in Bild 3.6b bis Bild 3.6d definierten Pfades für verschiedene Beträge horizontal eingepprägter Dehnung  $\epsilon_{xx}$

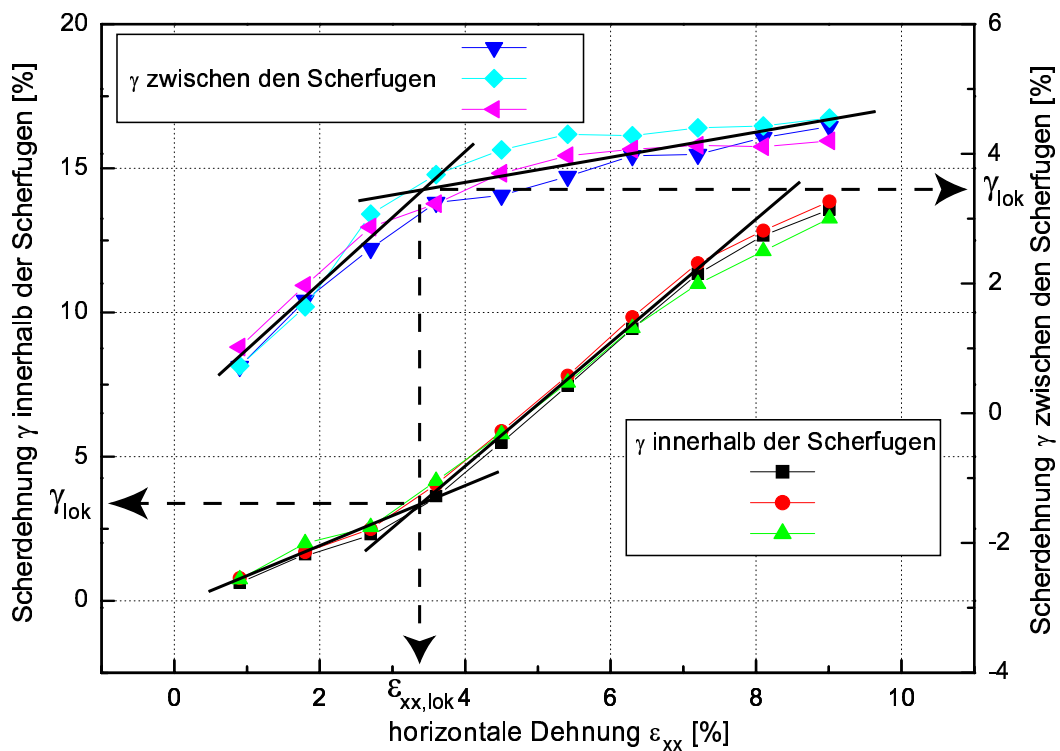


Bild 3.8: Bestimmung der Lokalisierungsdehnungen  $\gamma_{lok}$  und  $\epsilon_{xx,lok}$

der Scherdehnung  $\gamma$  entlang des Pfades für eine bestimmte Größe der horizontalen Dehnung  $\varepsilon_{xx}$ . Es ist deutlich zu erkennen, dass bis zu einem Betrag von  $\gamma \approx 2,5\%$  die Größe der Scherdehnung in der gesamten Probe gleichmäßig ansteigt. Ab einer Scherdehnung von  $\gamma \approx 2,5\%$  ist eine Konzentration der Scherdehnung in bestimmten Bereichen festzustellen. Zwischen diesen Bereichen kann auch für große Beträge horizontal eingepprägter Dehnung  $\varepsilon_{xx}$  keine signifikante Änderung mehr beobachtet werden. Die Zonen, in denen eine fortschreitende Akkumulation der Scherdehnung registriert wird, stellen die Scherfugen dar. Die Bereiche zwischen den Scherfugen sind aufgrund der gegen Null strebenden Scherdehnungsrate keiner weiteren Verformung unterworfen.

Eine eindeutige Bestimmung der Lokalisierungsdehnung ist möglich, wenn die Scherdehnung  $\gamma$  in einem Diagramm über die horizontal eingepprägte Dehnung  $\varepsilon_{xx}$  aufgetragen wird. In Bild 3.8 sind die entsprechenden Werte für verschiedene Lokalisierungs-zonen und Bereiche zwischen diesen Zonen dargestellt. Die zugehörigen Orte entlang des Pfades sind durch die Darstellung der jeweiligen Symbole in Bild 3.7 kenntlich gemacht. Sowohl für die Scherdehnung in den Scherfugen als auch für die Scherdehnung zwischen den Scherfugen sind deutlich Knicke im ansonsten linearen Verlauf der Kurven zu erkennen. Die Knicke kennzeichnen den Übergang zwischen der homogenen Verformung des Probekörpers und der beginnenden Konzentration der Scherdehnung in den Scherfugen bzw. der Verringerung der Scherdehnungsakkumulation, da die Dehnungsrate nach dem Knick deutlich ansteigt bzw. abnimmt. Werden die Kurvenabschnitte mit Geraden angenähert, zeigt sich, dass die Schnittpunkte der Geraden für die Scherdehnung innerhalb und zwischen den Scherfugen einem identischen Wert der horizontalen Dehnung  $\varepsilon_{xx}$  zugeordnet werden können. Dieser Wert wird im Folgenden als horizontal eingepprägte Dehnung am Lokalisierungszeitpunkt  $\varepsilon_{xx,lok}$  bezeichnet. Bestimmt man die Größe der Scherdehnung an den Schnittpunkten der Geraden durch Ablesung an den zugehörigen Ordinatenachsen, ergeben sich annähernd gleiche Scherdehnungsbeträge für die Dehnung innerhalb und zwischen den Scherflächen. Diese Dehnung wird als die Scherdehnung am Lokalisierungszeitpunkt  $\gamma_{lok}$  definiert. Anzumerken ist, dass sowohl die Scherdehnung am Lokalisierungszeitpunkt als auch die horizontal eingepprägte Dehnung am Lokalisierungszeitpunkt für die Bereiche innerhalb und zwischen den Scherfugen nicht zwangsläufig übereinstimmen müssen.

Für das Beispiel in den Bildern 3.6 bis 3.8 ergibt sich eine horizontal eingepprägte Dehnung am Lokalisierungszeitpunkt von  $\varepsilon_{xx,lok} = 3,4\%$  und eine Scherdehnung am Lokalisierungszeitpunkt zwischen  $\gamma_{lok,1} = 3,4\%$  und  $\gamma_{lok,1} = 3,5\%$ .



### 3.4.3 Bestimmung der Scherfugendicke

Auch im Hinblick auf die Bestimmung der Scherfugendicke bietet die DIC-Methode im Vergleich zur Röntgentechnik Vorteile. Bei der Anwendung der Röntgentechnik werden die Ränder der auf den angefertigten Röntgenbildern sichtbaren Scherfugen markiert und die Koordinaten dieser Markierungen gespeichert. Anschließend werden die Pixelkoordinaten in wahre Koordinaten umgerechnet (vgl. Kapitel 3.4.1) und die Dicke der Scherflächen bestimmt. Die Methode der Bestimmung der Scherfugendicke mit Hilfe der Röntgentechnik stößt an ihre Grenzen, wenn grobkörnige Materialien oder locker gelagerte Materialproben untersucht werden. Bei beiden Versuchsarten ist keine klare Abgrenzung zwischen der Lokalisierungszone und deren Umgebungsbereich festzustellen und eine eindeutige Definition der Scherfugenränder somit nicht möglich [140]. Durch eine spezielle Auswertung der Seitenflächenstrukturen der Probe mit Hilfe der Digital Image Correlation ist eine genaue Bestimmung der Scherfugendicke auch bei grobkörnigen oder locker gelagerten Materialien möglich.

Aus den während der Versuchsdurchführung aufgenommenen digitalen Bildern der Seitenfläche der untersuchten Probe werden zunächst Verschiebungsfelder und aus diesen anschließend die deviatorischen Dehnungen für die relevanten Dehnungsbereiche berechnet. Senkrecht zu den im Dehnungsplot durch die Konzentration der Scherdehnung in bestimmten Bereichen erkennbaren Scherflächen wird anschließend ein Pfad gelegt (Bild 3.9a), entlang dessen die Größe der Scherdehnung bestimmt und in einem Diagramm normiert wiedergegeben wird (Bild 3.9b).

Nach Nübel [89] können die Peaks der normierten Scherdehnungskurve mit einer Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nach Gauss approximiert werden:

$$\varepsilon_q(x) = \gamma(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{x - \bar{x}}{\sigma} \right)^2} \quad (3.2)$$

wobei  $\varepsilon_q(x) = \gamma(x)$  die deviatorische Dehnung,  $\bar{x}$  die Position am Peak der Scherdehnungskurve und  $\sigma$  die Standardabweichung darstellt. Beispielhaft wird die Approximation für die Peaks bei  $x = 2,75$  cm und  $x = 3,9$  cm in Bild 3.10 dargestellt. Die Dicke  $d_{SB}$  der Scherfugen wird als doppelter Wert der Standardabweichung  $\sigma$  als Vielfaches  $x$  des mittleren Korndurchmessers  $d_{50}$  definiert:

$$d_{SB} = 2\sigma = x \cdot d_{50}. \quad (3.3)$$

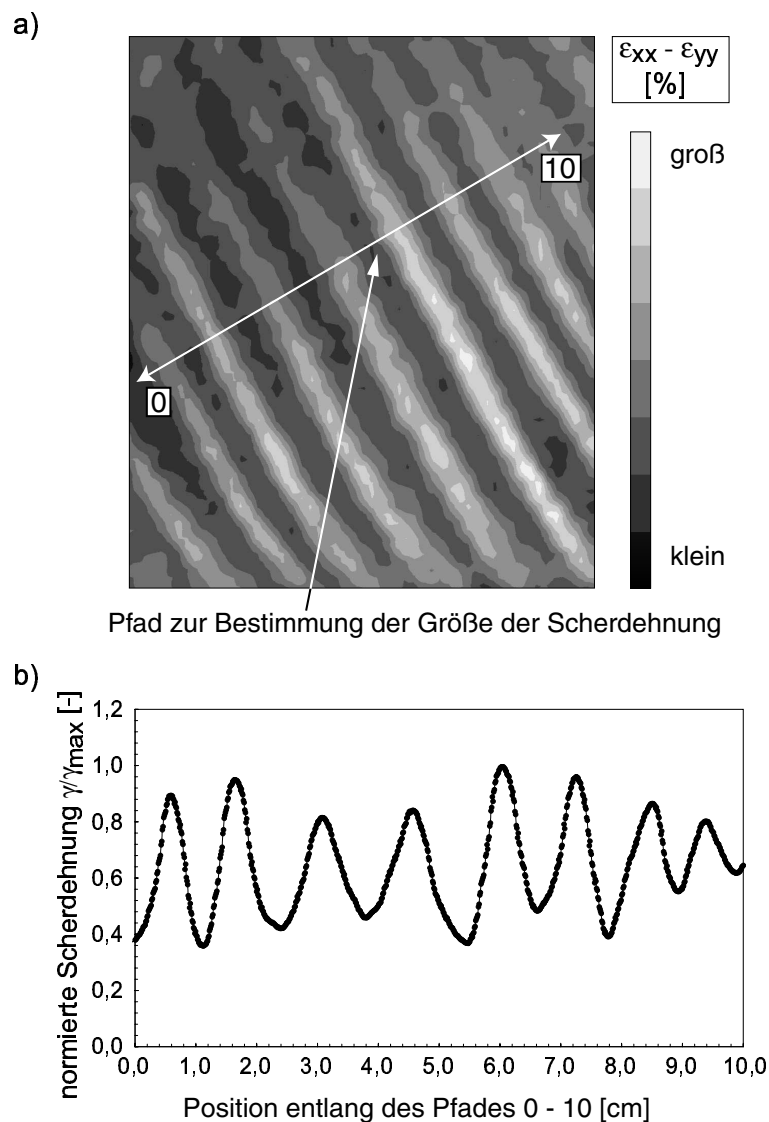


Bild 3.9: (a) Darstellung der Scherdehnung in einem Konturplot und (b) Scherdehnung entlang eines Pfades senkrecht zu den erkennbaren Scherfugen

### 3.4.4 Auswertung der Probenoberflächendeformation

Zusätzlich zu den durchgeführten Auswertungen der inneren Probenstruktur mit Hilfe der Röntgentechnik und der Seitenflächendeformationen mit Hilfe der zweidimensionalen DIC-Methode, liefern auch die sich auf der Oberfläche der Probe abzeichnenden Setzungen und Verwerfungen wertvolle Erkenntnisse im Hinblick auf die Fragestellung dieser Arbeit. Zur Auswertung der Oberflächenverformungen wird eine dreidimensionale Digital Image Correlation Methode verwendet. Im Gegensatz zur 2D-DIC-Methode wird hierbei

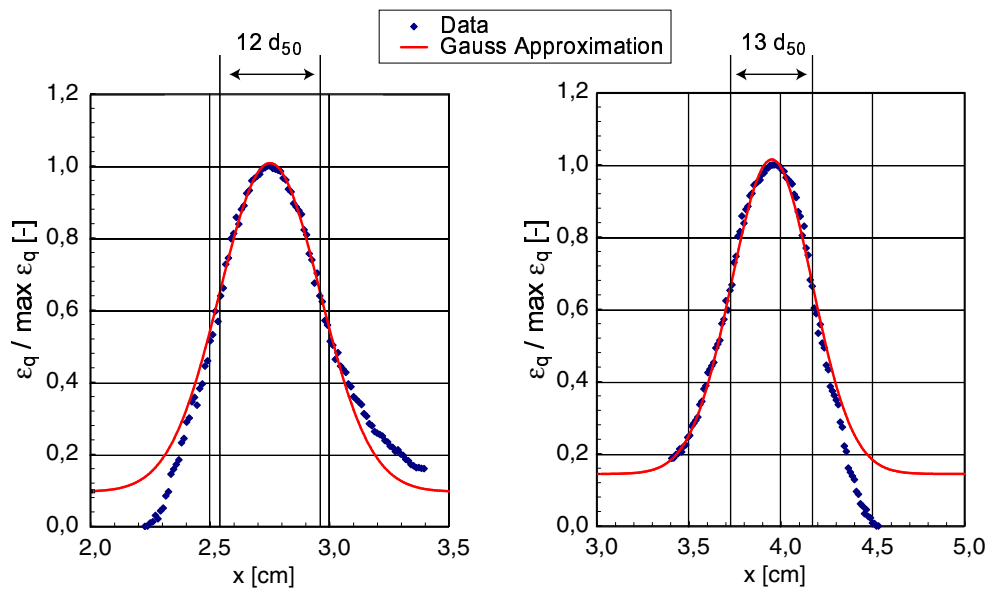


Bild 3.10: Bestimmung der Scherfugendicke mit Hilfe einer Gauss'schen Näherung

ein Teilbereich der Oberfläche der Probe mit zwei digitalen Kameras aus unterschiedlichen Blickwinkeln aufgenommen. Aus den Aufnahmen lässt sich mit Hilfe der verwendeten 3D-Software ein Höhenprofil der Oberfläche berechnen, aus dem wiederum über eine nachträgliche Auswertung des Verschiebungsfeldes die dreidimensionalen Dehnungsanteile der Oberflächenverformung abgeleitet werden können. Durch eine vorab durchgeführte dimensionsgebundene Eichung der digitalen Kameras mit Hilfe der in Bild 3.11 gekennzeichneten Lineareinheit kann die sich einstellende Geometrie exakt vermessen und mit den Ergebnissen der Röntgenbilder und der 2D-DIC Auswertung verglichen werden. Der Versuchsaufbau zur dreidimensionalen Bestimmung des Höhenprofils ist in Bild 3.11 dargestellt.

## 3.5 Materialien

Bei den Modellversuchen kommen unterschiedliche granulare Materialien zum Einsatz. Verwendet werden neben Quarzsand auch Kunststoffpartikel, Glasperlen und Eisenpartikel. Bei der Wahl der Versuchsmaterialien wurde darauf Wert gelegt, Granulate mit annähernd identischer Kornform zu verwenden. Die Wahl ähnlicher Kornformen ist von Bedeutung, da diese das mechanische Verhalten der Materialien beeinflusst [35] und dieser Einfluss im Rahmen der durchgeführten Modellversuche nicht untersucht wird. Die Körner aus Quarzsand, Kunststoff und Eisen weisen eine gedrungene Gestalt auf, die

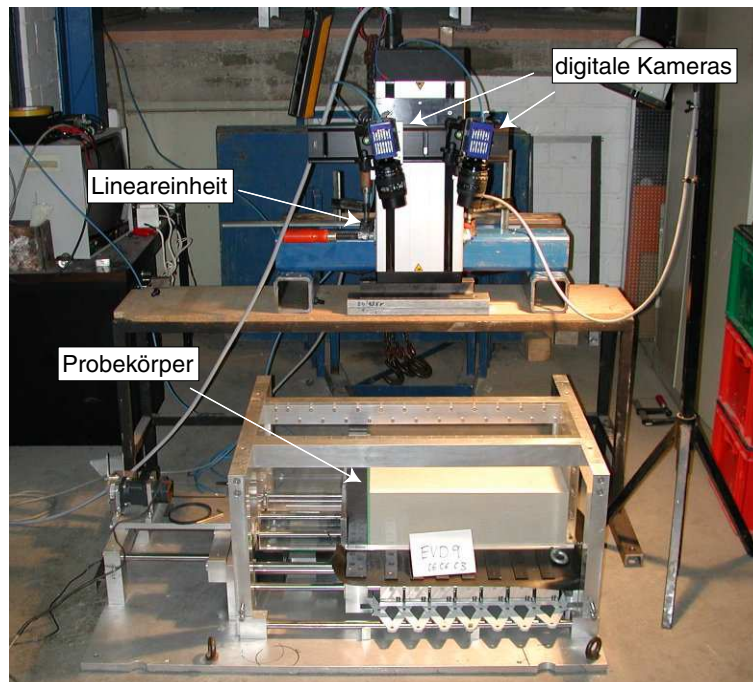


Bild 3.11: Versuchsaufbau zur dreidimensionalen Bestimmung des Höhenprofils

Glasperlen sind rund und verfügen im Gegensatz zu allen anderen Granulaten über eine glatte Kornoberfläche. Die Unterschiede in Kornform und Oberflächenbeschaffenheit werden anhand von Rasterelektronenmikroskop-Aufnahmen von Quarzsand- und Glaskörnern deutlich (vgl. Bild 5.33).

Eine Zusammenfassung der bodenmechanischen Materialparameter kann der Anlage A entnommen werden. Alle Parameter wurden in den Laboratorien des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik der Ruhr-Universität Bochum bestimmt. Die dynamischen Eigenschaften der Materialien wurden in Versuchen im Resonant-Column-Gerät des Lehrstuhls für Grundbau und Bodenmechanik ermittelt. In diesem Gerät können die dynamischen Eigenschaften von Versuchsmaterialien wie z.B. Scherwellengeschwindigkeit, dynamischer Schubmodul und Dämpfungsfaktor direkt bestimmt werden [139].

## 3.6 Versuchsprogramm

Es werden insgesamt fünf Versuchsreihen durchgeführt. Jede einzelne Versuchsreihe beinhaltet die Untersuchung des Einflusses einer speziellen Randbedingung oder einer Materialeigenschaft auf die Form und die Entwicklung der sich einstellenden Scherfugenmuster (vgl. Kapitel 2). Folgende mögliche Einflussparameter werden untersucht:

- die granulometrischen Materialeigenschaften, ausgedrückt durch den mittleren Korndurchmesser  $d_{50}$  und die Ungleichförmigkeit  $U = d_{60}/d_{10}$ ,
- die dynamischen Materialeigenschaften,
- die Probengeometrie,
- das Spannungsniveau innerhalb des Probekörpers und
- das Spannungs-Verformungsverhalten und die Lagerungsdichte des Materials.

Alle Versuche werden doppelt ausgeführt, um die Reproduzierbarkeit der Versuchsergebnisse nachzuweisen. Das jeweilige Versuchsprogramm und die Methoden zur Realisierung der Parametervariation sind der Darstellung und der Interpretation der Ergebnisse in Kapitel 5 vorangestellt.

# Kapitel 4

## Grundlagen zur Interpretation der Versuchsergebnisse

Neben der Definition der zur Beschreibung der Scherfugengeometrie verwendeten Begriffe werden in diesem Kapitel die Grundlagen beschrieben, die zur Interpretation und Diskussion der Ergebnisse der einzelnen Versuchsserien in Kapitel 5 benötigt werden. Hierzu gehören numerische Simulationen der Modellversuche, die mit Hilfe des Finite-Element-Programmsystems ABAQUS<sup>1</sup> und mit einem hypoplastischen Stoffgesetz nach von Wolffersdorff [130] durchgeführt wurden. Das Spannungs-Verformungsverhalten der Modellmaterialien wird durch Triaxialversuche bestimmt.

Nachfolgend werden anhand einer beispielhaften Röntgenaufnahme die zur Beschreibung der Scherfugengeometrie notwendigen Begriffe definiert. Anschließend werden die Grundlagen des bei den numerischen Simulationen verwendeten hypoplastischen Stoffgesetzes erläutert. Die Ergebnisse der Triaxialversuche werden in einem weiteren Unterkapitel dargestellt.

### 4.1 Definitionen

Bild 4.1 zeigt ein Röntgenbild des Versuchs SFA03 bei einer Dehnung von  $\varepsilon_{xx} = 10\%$ . Die aufgehellten Bereiche stellen Scherfugen dar, welche sich aufgrund der eingepprägten horizontalen Dehnung gebildet haben. Anhand von Bild 4.1 werden folgende Größen definiert:

---

<sup>1</sup>ABAQUS ist ein eingetragenes Warenzeichen der HKS Inc., Hibbit, Karlson & Sorenson, USA

- die Abstände der Scherfugen  $a$  und  $a_h$  werden als lotrechter und horizontaler Abstand der Mittelachsen zweier benachbarter Scherflächen bezeichnet,
- die Dicke der Scherfugen wird mit  $d_{SB}$  definiert,
- die Breite der Blöcke zwischen zwei benachbarten Scherfugen wird mit  $b$  abgekürzt und
- die Scherflächen schließen mit der Horizontalen den Winkel  $\vartheta$  ein.

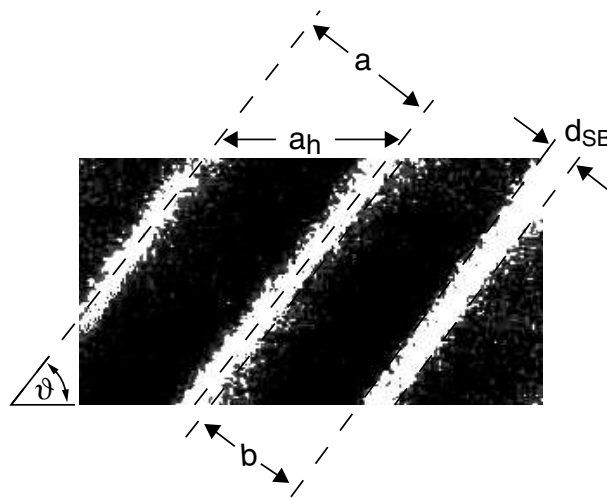


Bild 4.1: Definition der Scherfugengeometrie

## 4.2 Hypoplastisches Stoffgesetz

### 4.2.1 Formulierung

Im Rahmen dieser Arbeit werden zur Interpretation der Versuchsergebnisse numerische Simulationen der Modellversuche herangezogen. Hierbei wird das hypoplastische Stoffgesetz zur Beschreibung des Materialverhaltens verwendet.

Mit dem hypoplastischen Stoffgesetz wird das Spannungs-Verformungsverhalten einfacher Korngerüste mittels einer tensoriellen, inkrementell-nichtlinearen Gleichung beschrieben. Die Deformation des Korngerüsts wird dabei nicht in elastische und plastische Anteile aufgeteilt, eine explizite Definition von Fließfläche, Fließregel, Verfestigung und Entfestigung ist aus diesem Grund nicht erforderlich. Nach Kolymbas [54] ist der Zustand eines

einfachen Korngerüsts durch den Cauchy-Spannungstensor  $\mathbf{T}$ , die Deformationsrate  $\mathbf{D}$  und die Porenzahl  $e$  definiert, diese Abhängigkeit kann durch die allgemeine Gleichung des Hypoplastischen Stoffgesetzes beschrieben werden:

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathbf{h}(\mathbf{T}, \mathbf{D}, e). \quad (4.1)$$

Als objektive Spannungsrate wird die Jaumann-Spannungsrate verwendet:

$$\dot{\mathbf{T}} = \dot{\mathbf{T}} - \mathbf{W} \cdot \mathbf{T} + \mathbf{T} \cdot \mathbf{W}. \quad (4.2)$$

Hierbei werden  $\dot{\mathbf{T}}$  als die Ableitung des Cauchy-Spannungstensors nach der Zeit und  $\mathbf{W}$  als Drehgeschwindigkeitstensor bezeichnet.

Den mathematischen Anforderungen an die tensorielle Funktion  $\mathbf{h}$  [43, 52, 71] wird durch die Darstellung von Gleichung (4.1) in folgender Form Rechnung getragen:

$$\dot{\mathbf{T}} = \mathcal{L}(\mathbf{T}, e) : \mathbf{D} + \mathbf{N}(\mathbf{T}, e) \parallel \mathbf{D} \parallel. \quad (4.3)$$

Nach der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Form des hypoplastischen Stoffgesetzes von von Wolffersdorff [130] werden die tensoriellen Funktionen  $\mathcal{L}(\mathbf{T}, e)$  und  $\mathbf{N}(\mathbf{T}, e)$  wie folgt beschrieben:

$$\mathcal{L} := f_b f_e \frac{1}{\hat{\mathbf{T}} : \hat{\mathbf{T}}} \left( F^2 \mathcal{I} + a^2 \hat{\mathbf{T}} \hat{\mathbf{T}} \right), \quad (4.4)$$

$$\mathbf{N} := f_a f_b f_e \frac{F a}{\hat{\mathbf{T}} : \hat{\mathbf{T}}} \left( \hat{\mathbf{T}} + \hat{\mathbf{T}}^* \right). \quad (4.5)$$

Definitionsgemäß gilt für die bezogenen Spannungstensoren:

$$\hat{\mathbf{T}} := \frac{\mathbf{T}}{\text{tr} \mathbf{T}} \quad \hat{\mathbf{T}}^* := \hat{\mathbf{T}} - \frac{1}{3} \mathbf{1}. \quad (4.6)$$

$\mathcal{I}$  bezeichnet den Einheitstensor vierter Stufe, die Materialkonstante  $a$  ist abhängig vom kritischen Reibungswinkel  $\varphi_c$  und ist wie folgt definiert:

$$a := \frac{\sqrt{3}(3 - \sin \varphi_c)}{2\sqrt{2} \sin \varphi_c}. \quad (4.7)$$

Der druckabhängige skalare Faktor  $F$  leitet sich aus der Fließfunktion nach Matsuoka-Nakai [72] ab:

$$F := \sqrt{\frac{1}{8} \tan^2 \psi + \frac{2 - \tan^2 \psi}{2 + \sqrt{2} \tan \psi \cos 3\theta}} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \tan \psi \quad (4.8)$$



mit

$$\tan \psi := \sqrt{3} \|\hat{\mathbf{T}}^*\| \quad \cos 3\theta := -\sqrt{6} \frac{\text{tr}(\hat{\mathbf{T}}^* \cdot \hat{\mathbf{T}}^* \cdot \hat{\mathbf{T}}^*)}{[\hat{\mathbf{T}}^* : \hat{\mathbf{T}}^*]^{3/2}}. \quad (4.9)$$

Durch die skalaren Funktionen  $f_d$  und  $f_e$  werden der Einfluss der Dichte (Pyknotropie) und durch  $f_b$  der Einfluss des Druckes (Barotropie) berücksichtigt [6, 36]. Sie sind wie folgt definiert:

$$f_d := \left( \frac{e - e_d}{e_c - e_d} \right)^\alpha \quad f_e := \left( \frac{e_c}{e} \right)^\beta \quad (4.10)$$

und

$$f_b := \frac{h_s}{h} \left( \frac{e_{i0}}{e_{c0}} \right)^\beta \frac{1 + e_i}{e_i} \left( \frac{3p_s}{h_s} \right)^{1-n} \left[ 3 + a^2 - a\sqrt{3} \left( \frac{e_{i0} - e_{d0}}{e_{c0} - e_{d0}} \right)^\alpha \right]^{-1}. \quad (4.11)$$

Die Porenzahlen  $e_d$ ,  $e_c$  und  $e_i$  in den Gleichungen (4.10) und (4.11) bezeichnen die Porenzahlen bei größtmöglicher Verdichtung durch kleine Scherzyklen, im kritischen Zustand und bei lockerster Lagerung bei isotroper Kompression,  $e_{d0}$ ,  $e_{c0}$  und  $e_{i0}$  entsprechen den Porenzahlen  $e_d$ ,  $e_c$  und  $e_i$  bei verschwindendem Druck [44].

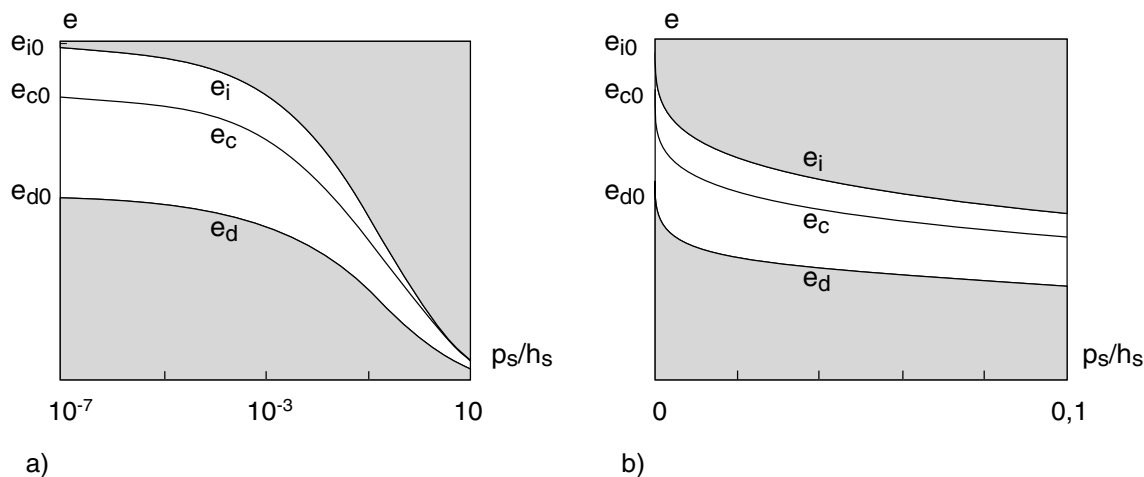


Bild 4.2: Änderung der Porenzahlen  $e_d$ ,  $e_c$  und  $e_i$  mit dem mittleren Korndruck nach Herle [43], a) logarithmische Teilung der Abszisse b) lineare Teilung der Abszisse

Bild 4.2 zeigt, dass die Porenzahlen mit dem mittleren Korndruck  $p_s := -\text{tr}\mathbf{T}/3$  abnehmen. Die Grenzporanzahlen  $e_i$  und  $e_d$  bilden somit eine obere und untere Grenze für die Gültigkeit der Porenzahl im hypoplastischen Stoffgesetz. Nach Bauer [6] kann die Größe der Porenzahl in Abhängigkeit des mittleren Druckes  $p_s$  mit folgender Gleichung beschrieben werden:

$$\frac{e_i}{e_{i0}} = \frac{e_c}{e_{c0}} = \frac{e_d}{e_{d0}} := \exp \left[ - \left( \frac{-\text{tr}\mathbf{T}}{h_s} \right)^n \right]. \quad (4.12)$$

Mit der Granulathärte  $h_s$  und dem Exponent  $n$  wird der Korndruck skaliert, beide Werte sind von den Korneigenschaften abhängig.

Die vollständige Formulierung des hypoplastischen Stoffgesetzes erfordert die Ermittlung von acht Stoffkonstanten, die nicht von der Spannung  $\mathbf{T}$  und der aktuellen Porenzahl  $e$  abhängen. Die physikalische Bedeutung und die Ermittlung der Stoffkonstanten mit Hilfe von Experimenten kann Herle [43, 44] entnommen werden. In Anlage A.4 sind die hypoplastischen Materialparameter für den verwendeten feinkörnigen Quarzsand (Material 1) zusammengefasst.

## 4.2.2 Intergranulare Dehnung

Häufig treten in der Belastungsgeschichte geotechnischer Bauwerke Änderungen des Spannungspfades und des Dehnungspfades auf. Ursache hierfür können zum Beispiel der Herstellungsvorgang von Schlitzwänden und der anschließende Baugrubenaushub sein [73]. Die mit der Änderung des Dehnungspfades verbundene Erhöhung der Steifigkeit des Bodens wird bei der in Abschnitt 4.2.1 beschriebenen Form des hypoplastischen Stoffgesetzes nicht berücksichtigt. Dieses äußert sich in einer starken Akkumulation der Dehnungen bei der Beaufschlagung des Bodenkörpers mit kleinen Spannungszyklen (vgl. Bild 4.3).

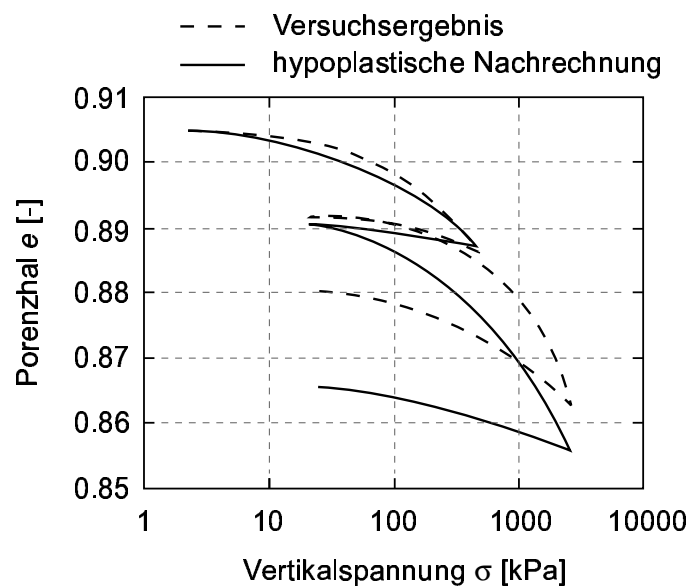


Bild 4.3: Ödometerversuch und Nachrechnung mit Hypoplastizität ohne intergranulare Dehnung [73]

Um den Einfluss der erhöhten Steifigkeit zu berücksichtigen, wird das hypoplastische Stoffgesetz von Niemunis & Herle [87] um die so genannte intergranulare Dehnung erweitert. Mit dem größtmöglichen Betrag der intergranularen Dehnung  $R$  und den Verhältnissen der Steifigkeiten  $m_R$  und  $m_T$  bei einer Änderung der Dehnungsrichtung um  $90^\circ$  bzw.  $180^\circ$ , benötigt das erweiterte hypoplastische Stoffgesetz drei zusätzliche Stoffkonstanten. Vergleichsrechnungen der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten numerischen Simulationen haben gezeigt, dass die Ergebnisse der Berechnungen mit und ohne Verwendung der intergranularen Dehnung identische Ergebnisse liefern.

### 4.2.3 Fluktuation der Porenzahl

Die mechanischen Eigenschaften von nicht bindigen Granulaten werden maßgeblich von der Lagerungsdichte des Materials bestimmt. Die Lagerungsdichte kann dabei durch den Porenanteil  $n$  oder die Porenzahl  $e$  beschrieben werden. Letztere ist definiert als das Verhältnis zwischen dem Porenvolumen  $V_P$  eines Volumenelements und dem Volumen der Festmasse  $V_S$ :

$$e := \frac{V_P}{V_S}. \quad (4.13)$$

Bei der Beschreibung der Lagerungsdichte des Bodens wird in der Regel ein Wert für die Porenzahl  $e$  angegeben, der die makroskopische Porosität des Bodens repräsentiert. Hierbei wird oft übersehen, dass diese makroskopische Porenzahl lediglich einen Mittelwert der lokalen Porenzahlen  $e_i$  auf der Mikroebene darstellt. Nach Shahinpoor [116] kann die makroskopische Porosität des Bodens wie folgt definiert werden:

$$e = \sum_{n=1}^N \Omega_n e_n, \quad (4.14)$$

wobei  $\Omega_n$  die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von  $m_n$  so genannten Voronoi-Zellen mit der mikroskopischen Porenzahl  $e_n$  bezeichnet. Die Voronoi-Zellen stellen einen mikroskopischen Raum dar, in dem sich eine bestimmte Anzahl von Körnern und Poren befindet (vgl. Bild 4.4). Eine Pore wird innerhalb einer Voronoi-Zelle durch die Fläche beschrieben, die durch die Verbindung der Massenschwerpunkte der umgebenden Körner entsteht. Die mikroskopische Porenzahl  $e_n$  einer Voronoi-Zelle ist dann als das Verhältnis der Fläche aller Poren zur Fläche aller Körner innerhalb des mikroskopischen Raums definiert.

Bei der numerischen Simulation von geotechnischen Problemstellungen, bei denen eine Lokalisierung der Dehnungen in schmalen Scherflächen zu erwarten ist, kommt der Fluktuation der mikroskopischen Porenzahl entscheidende Bedeutung zu, da gerade innerhalb

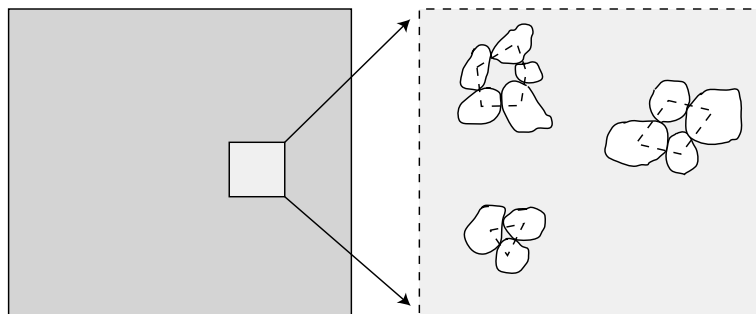


Bild 4.4: Definition der mikroskopischen Porenzahl  $e_n$  einer Voronoi-Zelle [91]

der Scherflächen starke Schwankungen der Porenzahl zu beobachten sind [93]. Ohne Implementierung einer räumlich fluktuierenden Porenzahl kann eine Lokalisierung bei der Verwendung des hypoplastischen Stoffgesetzes nicht beobachtet werden [91].

Aus diesem Grund wird bei den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten numerischen Simulationen des Extensions-Modellversuchs die Porenzahl stochastisch verteilt. Die Porenzahlverteilung wird in Form einer Normalverteilung nach *Gauss* angenommen:

$$p(e_i) = \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{e_i - \mu}{\sigma} \right)^2}. \quad (4.15)$$

Hierbei wird die Porenzahl  $e$  im homogenen Zustand dem Erwartungswert der Zufallsvariablen  $\mu$  gleichgesetzt. Die Standardabweichung  $\sigma$  wird so gewählt, dass die Porenzahlen  $e_n$  zu 99,75 % im Bereich  $e_d < e_n < e_i^*$  liegen. Im Allgemeinen gilt hierbei  $e_i^* > e_i$ , da im lockersten Zustand eines Korngerüsts Bereiche vorhanden sein müssen, die aufgrund der Porenzahlfluktuation lockerer sind als  $e_i$ .  $e_i^*$  ist nach Shahinpoor [116] mit der Beziehung

$$e_c = \frac{1}{2} (e_i^* - e_d) \quad (4.16)$$

zu bestimmen, da  $e_c$  und  $e_d$  aus Elementversuchen mit Scherbelastung relativ einfach hergeleitet werden können [43].

Die angenommene Wahrscheinlichkeitsverteilung gilt mathematisch gesehen nur für ein unabhängiges normalverteiltes Zufallsereignis. Um die wirklichen Verhältnisse bei der numerischen Simulation zu berücksichtigen, wird die Anzahl der Mikroporen  $n$  mit 40 Poren pro  $\text{cm}^2$  abgeschätzt. Die Anzahl  $n$  stellt die Gesamtheit der unabhängigen Ereignisse dar. Nach Sachs [110] ist die Varianz des Mittelwertes gleich dem  $n$ -ten Teil der Varianz der Einzelereignisse  $i$ :

$$\sigma_n^2 = \frac{\sigma_i^2}{n} \quad \text{oder} \quad \sigma_n = \frac{\sigma_i}{\sqrt{n}}. \quad (4.17)$$

Die Standardabweichung ist also abhängig von der gewählten Größe des Elements.

Zur Generierung der Porenzahl werden mit Hilfe eines Zufallszahlengenerators Zufallszahlen mit gleicher Wahrscheinlichkeit zwischen 0 und 1 erzeugt. Die Funktion zur Bestimmung der Porenzahl ist die Umkehrfunktion der Wahrscheinlichkeitsdichtefunktion nach Gauss (4.15):

$$F^{-1}(x) = \left[ \frac{1}{\sqrt{2\pi} \cdot \sigma} \cdot \int_{-\infty}^x e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{-\mu}{\sigma} \right)^2} dt \right]^{-1} \quad (4.18)$$

Da  $F^{-1}(x)$  analytisch nicht existiert, muss sie numerisch approximiert werden. Die Algorithmen hierzu wurden zum Teil [99] entnommen und der Problemstellung angepasst.

## 4.3 Triaxialversuche

### 4.3.1 Bestimmung des maßgeblichen Spannungspfades

Ein möglicher Einflussfaktor auf die Geometrie der Scherfugenmuster, der im Rahmen dieser Arbeit untersucht wurde, ist das Spannungs-Verformungsverhalten des Bodens (vgl. Kapitel 2.6 und 5.8). Hierzu wurden Modellversuche im Extensionsgerät mit feinem Quarzsand (Material 1) und unterschiedlichen Lagerungsdichten der Probekörper im Ausgangszustand durchgeführt. Die Lagerungsdichte bestimmt maßgeblich das Spannungs-Verformungsverhalten des Materials und dabei insbesondere die Ausprägung des Peaks in der Spannungs-Verformungs-Beziehung und den Betrag der eingepprägten Dehnung, bei dem das Maximum der Kurve erreicht ist. Auch das volumetrische Verhalten des Bodens wird von der Größe der Lagerungsdichte im Ausgangszustand entscheidend geprägt.

Da bei der Durchführung der Modellversuche im Extensionsgerät die auf die Seitenwände und auf den Boden des Behälters wirkenden Spannungen nicht gemessen werden, wird zum Vergleich der Versuchsergebnisse mit den Charakteristiken der Spannungs-Dehnungs-Beziehung die deviatorische Dehnung (Scherdehnung) innerhalb der Proben herangezogen. Diese wird bei den Modellversuchen mit Hilfe der DIC-Methode bestimmt. Bei der Auswertung der Triaxialversuche wird die deviatorische Dehnung als Differenz zwischen axialer und radialer Dehnung berechnet:

$$\gamma = \varepsilon_{axial} - \varepsilon_{radial} = \varepsilon_1 - \varepsilon_3. \quad (4.19)$$

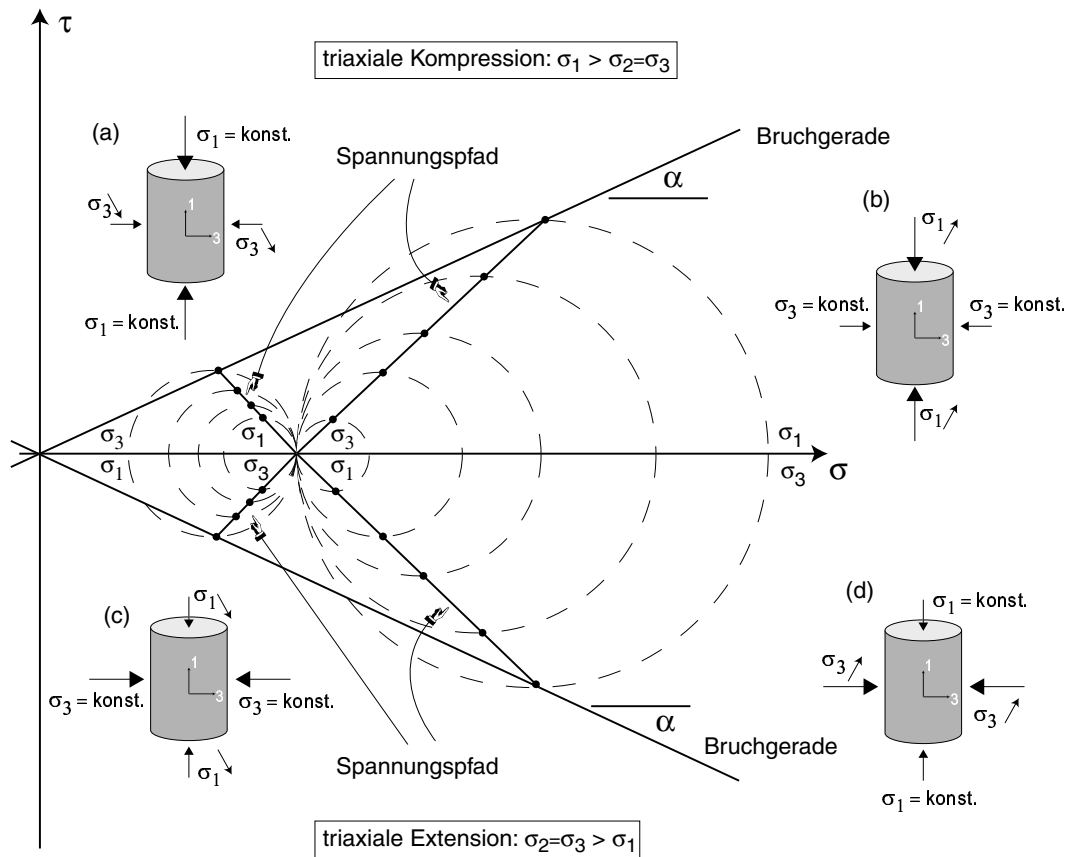


Bild 4.5: Triaxiale Kompression und triaxiale Extension

Die deviatorische Dehnung kann als Bezugsgröße nur herangezogen werden, solange sich die Probe im Triaxialgerät gleichmäßig verformt. Lokalisiert sich die Verformung beim Erreichen des Peaks der Spannungs-Dehnungs-Kurve in einer Scherfuge oder in einem System von Scherflächen, wird die Verformung inhomogen.

Sowohl Vorversuche im Triaxialgerät als auch experimentelle Ergebnisse in der Literatur [39, 95] lassen vermuten, dass neben der Lagerungsdichte der Probe auch der aufgebraute Spannungspfad die Größe der deviatorischen Dehnung am Peak der Spannungs-Dehnungs-Kurve der Probe entscheidend beeinflusst. In Bild 4.5 sind am Beispiel des Triaxialversuchs ( $\sigma_2 = \sigma_3$ ) vier mögliche Spannungspfade im  $\tau - \sigma$ -Diagramm dargestellt. Die triaxiale Kompression ist dadurch gekennzeichnet, dass die axiale Spannung  $\sigma_1$  bei jedem Spannungszustand größer als die radiale Spannung  $\sigma_3$  ist, für den triaxialen Extensionsfall gilt entsprechend für jeden Spannungszustand:  $\sigma_3 \geq \sigma_1$ . Ausgehend vom isotropen Spannungszustand ( $\sigma_1 = \sigma_3$ ) kann sowohl für den Kompressions- als auch für den Extensionsfall der Spannungszustand innerhalb der Probe auf zwei verschiedene

Weisen verändert und damit die Probe zum Versagen gebracht werden. Wird die Materialprobe gemäß Fall (a) in Bild 4.5 abgeschert, wird bei einer konstanten axialen Spannung die radiale Spannung bis zum Erreichen der Bruchgeraden vermindert, bei Fall (b) wird die axiale Spannung bei konstantem Umgebungsdruck bis zum Versagen gesteigert. Im Gegensatz hierzu wird beim triaxialen Extensionsversuch wahlweise die axiale Spannung unter konstantem radialen Druck vermindert (Fall (c)) oder die radiale Spannung bei konstanter axialer Spannung bis zum Erreichen des Bruchzustands erhöht (Fall (d)). Die Bruchgeraden für den Kompressions- und den Extensionsfall ergeben sich aus der Verbindung der Scheitelpunkte der Mohrschen Spannungskreise und schließen für beide Fälle mit der Hauptspannungsachse denselben Winkel  $\alpha$  ein. Der Neigungswinkel  $\alpha$  der Bruchgeraden kann über einfache trigonometrische Beziehungen in den inneren Reibungswinkel des Bodens  $\varphi$  umgerechnet werden.

In Bezug auf die Fragestellung, welcher der vier in Bild 4.5 dargestellten Spannungspfade auf die Verhältnisse der durchgeführten Modellversuche übertragbar ist, können die Fälle (b) und (d) grundsätzlich ausgeschlossen werden. Bei diesen Belastungspfaden wird eine Hauptspannung (Fall (b)) bzw. werden zwei Hauptspannungen (Fall (d)) erhöht, während die übrigen Hauptspannungen konstant verbleiben. Dieser Spannungszustand ist nicht mit der Theorie des aktiven plastischen Grenzzustandes (vgl. Kapitel 2) vereinbar. Um zu überprüfen, welcher der beiden Fälle (a) und (c) maßgebend wird, wurde der Modellversuch mit dem Finite Elemente (FE) Programm ABAQUS unter Verwendung des in Kapitel 4.2 beschriebenen Stoffgesetzes numerisch simuliert und die Entwicklung der Hauptspannungen mit zunehmender Dehnung der Probe aufgezeichnet.

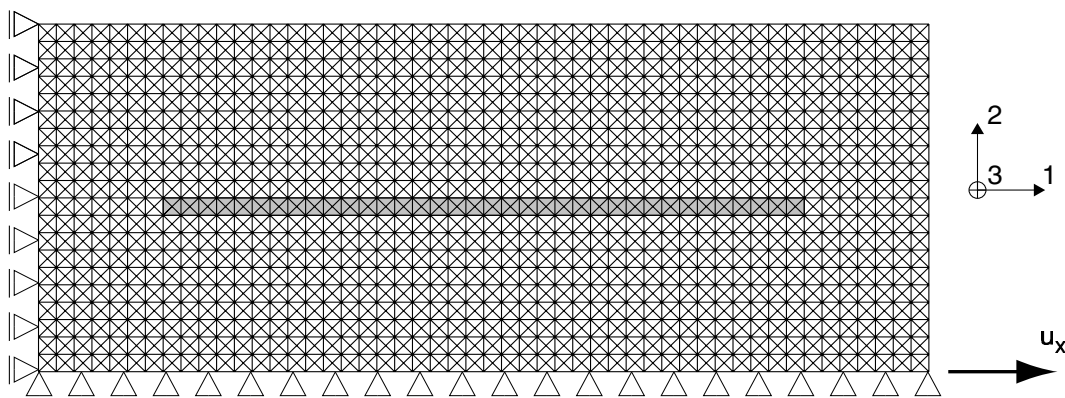


Bild 4.6: Vereinfachte Darstellung des FE-Modells des Extensions-Modellversuchs

In Bild 4.6 ist das verwendete zweidimensionale FE-Modell mit den zugewiesenen Rand-

bedingungen vereinfachend dargestellt. Das Modell mit einer Länge von  $l = 50$  cm und einer Höhe von  $h = 20$  cm wird aus 16.000 dreiknotigen Kontinuumsselementen mit jeweils zwei Verschiebungsfreiheitsgraden aufgebaut. Die Form der Ansatzfunktion der Verschiebung ist linear. Die Knoten an der linken Seite und an der Unterseite des Modells sind verschieblich gelagert, wobei die Verschiebung der linken Knotenreihe in horizontaler Richtung und die Verschiebung der unteren Knotenreihe in vertikaler Richtung verhindert wird. Die rechte Knotenreihe wird um  $u_x = 20$  cm in x-Richtung verschoben. Um eine homogene Dehnungsrandbedingung an der Unterseite des Modells zu gewährleisten, wird der unteren Knotenreihe eine lineare Verschiebungsverteilung in x-Richtung eingeprägt (vgl. Bild 3.1). Die Verschiebung des Knotens in der rechten unteren Ecke entspricht der Verschiebung der rechten Knotenreihe, die Verschiebung des Knotens in der linken unteren Ecke ist null.

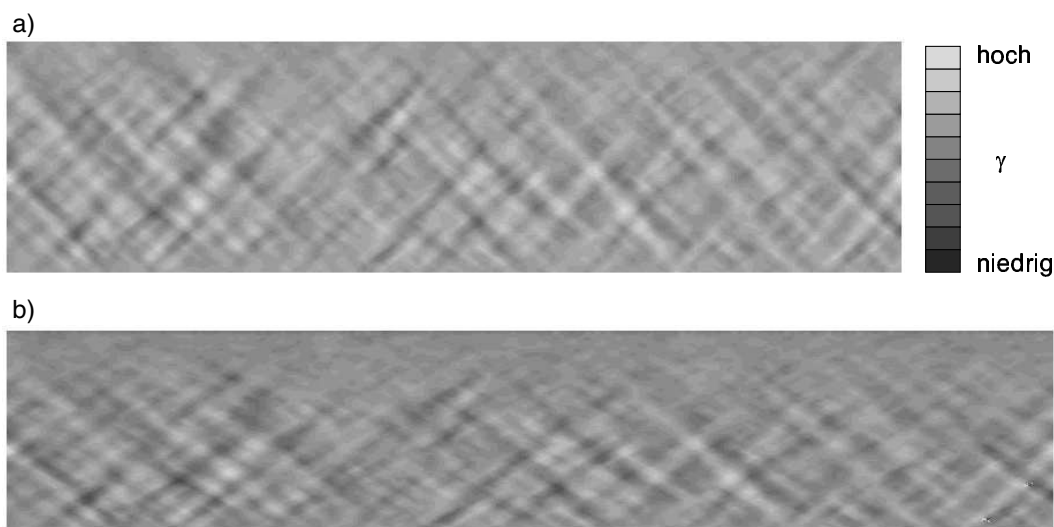


Bild 4.7: Deviatorische Dehnung bei einer horizontalen Dehnung der Probe von a)  $\varepsilon_{xx} = 20$  % und b)  $\varepsilon_{xx} = 40$  %

Das Ergebnis der Simulation als qualitativer Konturplot der deviatorischen Dehnung  $\gamma$  ist für die horizontalen Dehnungen der Probe von  $\varepsilon_x = 20$  % und  $\varepsilon_x = 40$  % in Bild 4.7 zusammengefasst. Die hellen Bereiche repräsentieren Zonen großer deviatorischer Dehnungen. In beiden Bildern ist eine Konzentration der deviatorischen Dehnungen in parallelen, konjugiert geneigten Bereichen zu erkennen. Das Muster dieser Bereiche weist starke Ähnlichkeiten zu den Scherflächenmustern auf, die sich gemäß der Theorie des aktiven plastischen Grenzzustandes nach Rankine [104] in einem Bodenkörper unter homogener



Extensionsbeanspruchung einstellen (vgl. Kapitel 2). Aufgrund der homogenen Randbedingungen an der Unterseite des Modells entwickeln sich die Scherflächen zeitgleich über die ganze Länge des Probekörpers. Mit zunehmender Dehnung verringert sich der Winkel zwischen der Scherfugenachse und der Horizontalen, der Abstand der Scherzonen untereinander ändert sich nicht.

Das im Rahmen dieser Arbeit verwendete hypoplastische Stoffgesetz (vgl. Kapitel 4.2) ist geeignet, die wichtigsten Eigenschaften des Materialverhaltens des Bodens abzubilden [88, 91, 112, 131]. Es ist in seiner klassischen Formulierung aber nicht in der Lage, Lokalisierungsvorgänge zu modellieren, da es keine charakteristische Länge aufweist und damit die Mikrostruktur des Körpers nicht berücksichtigt [71, 125]. Die nicht vorhandene Berücksichtigung dieser internen Variable äußert sich in einer Netzabhängigkeit der Berechnungsergebnisse. Bezogen auf die numerische Simulation eines biaxialen Kompressionsversuches bedeutet dies, dass sich sowohl die Neigung als auch die Dicke der sich ausbildenden Scherzone mit der Feinheit der Diskretisierung des Modellkörpers ändern [71]. Die beschriebenen Nachteile des hypoplastischen Stoffgesetzes können durch die Anwendung so genannter Regularisierungsmethoden behoben werden. Diese Methoden berücksichtigen durch die Einführung einer charakteristischen Länge die Mikrostruktur eines Körpers. Nübel [89] wendet als Regularisierungsmethode ein polares Kontinuum (Cosserat-Theorie) an, Maier [71] verwendet zusätzlich die nichtlokale Theorie und das Gradientenkontinuum. Da im Rahmen dieser Arbeit mit der klassischen Formulierung des hypoplastischen Stoffgesetzes ohne Berücksichtigung einer Regularisierungsmethode gerechnet wurde, sind die in Bild 4.7 dargestellten Konturplots als qualitatives Ergebnis zu interpretieren. Die Dicke der Scherfugen würde sich bei einer feineren oder gröberen Diskretisierung des Körpers entsprechend ändern. Auf die Auswertung des Spannungsverlaufs innerhalb des Probekörpers hat die Nichtberücksichtigung einer Regularisierungsmethode keinen Einfluss, da zur Bestimmung des maßgeblichen Spannungspfades nur der qualitative Verlauf der Spannungen benötigt wird.

Der Verlauf der Spannungen innerhalb des Probekörpers ist als Mittelwert der in Bild 4.6 grau unterlegten Elemente als Funktion der horizontalen Dehnung  $\varepsilon_{xx}$  in Bild 4.8a dargestellt. Dem Bild kann entnommen werden, dass die vertikale Spannung  $\sigma_2$  mit zunehmender horizontaler Dehnung kleiner wird. Da die Oberfläche der Probe nicht belastet wird und nur Spannungen aus Eigengewicht in vertikaler Richtung wirken, ist die Reduktion der Spannung durch die Verringerung der Höhe mit zunehmender Dehnung des Probekörpers zu erklären. In horizontaler Richtung, d.h. in Längsrichtung des Pro-

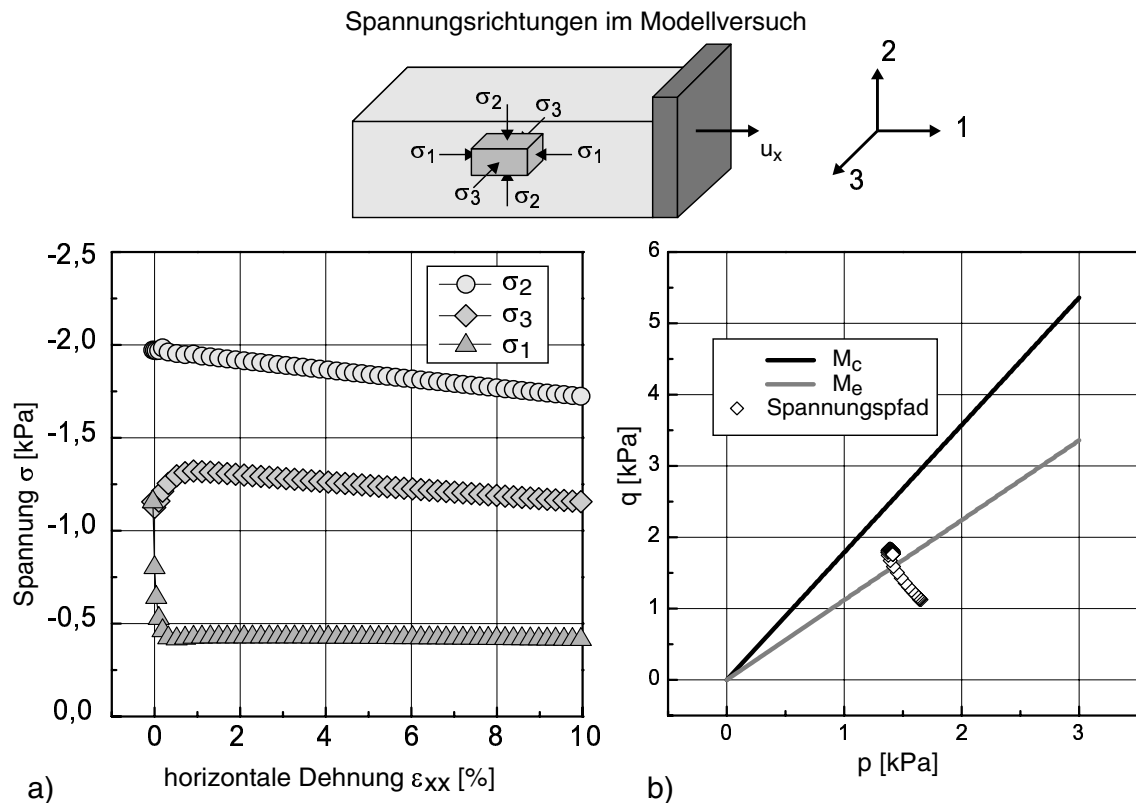


Bild 4.8: (a) Spannungsverlauf im Modellversuch, (b) Spannungspfad im  $p_R - q_R$  Diagramm

bekörpers, fällt die Spannung  $\sigma_1$  ausgehend vom  $K_0$ -Ausgangsspannungszustand unmittelbar nach Beginn der Verschiebung der rechten Knotenreihe aufgrund der Auflockerung des Probekörpers stark ab und nimmt ab einer horizontalen Dehnung von  $\varepsilon_{xx} \approx 1,0$  % einen konstanten Wert an. Die Spannung senkrecht zur Wand des Modellbehälters (3-Richtung) steigt, ebenfalls ausgehend vom  $K_0$ -Ausgangsspannungszustand, nach Beginn der Verschiebung der beweglichen Querwand leicht an und verringert sich mit zunehmender horizontaler Dehnung. Der Anstieg der Spannungen ist durch das dilatante Materialverhalten der dicht gelagerten Probe begründet (vgl. Kapitel 4.3.2). Da sich die Probe senkrecht zur Verschiebungsrichtung der beweglichen Wand aufgrund der fixierten Längswände des Behälters nicht verformen kann, die dilatante Verformung aber auch in die Richtung senkrecht zur Verschiebungsrichtung der Wand wirkt, erhöhen sich die horizontalen Spannungen in 3-Richtung. Die Abnahme der Spannungen  $\sigma_3$  mit zunehmender horizontaler Dehnung kann auf die Abnahme der vertikalen Spannungen  $\sigma_2$  aufgrund der Verringerung der Probenhöhe zurückgeführt werden, da beide Spannungen über den Erddruckbeiwert  $K$  gekoppelt sind.

Die Entwicklung der Spannungen mit zunehmender Dehnung deutet darauf hin, dass bei den durchgeführten Modellversuchen in Bezug auf den Spannungspfad weder die klassische triaxiale Kompression noch die klassische triaxiale Extension maßgebend wird. Die Tatsache, dass sich eine Spannung stark vermindert ( $\sigma_1$ ), während die beiden anderen Spannungen  $\sigma_2$  und  $\sigma_3$  ihre Werte nur wenig ändern, lässt vermuten, dass echte triaxiale Extensionsverhältnisse vorliegen, d.h., dass sich eine Spannung im Verhältnis zu den beiden anderen deutlich verringert und diese beiden unterschiedliche Größen aufweisen. Der in Abbildung 4.8b im  $p$ - $q$ -Diagramm nach Roscoe dargestellte Spannungspfad, der aus der numerischen Simulation des Modellversuchs resultiert, unterstützt diese Vermutung. Die Werte auf der Abszisse des Diagramms geben die mittlere Hauptspannung des Spannungstensors  $\mathbf{T}$  an und sind definiert als

$$p = \frac{1}{3}(\mathbf{T}_1 + \mathbf{T}_2 + \mathbf{T}_3). \quad (4.20)$$

Die Roscoesche Variable  $q$  auf der Ordinatenachse wird aus dem Spannungstensor über den Spannungsdeviator

$$\mathbf{T}^* = \mathbf{T} - \frac{1}{3} \operatorname{tr}(\mathbf{T}) \mathbf{1} \quad (4.21)$$

wie folgt berechnet:

$$q = \sqrt{\frac{3}{2}} \|\mathbf{T}^*\|. \quad (4.22)$$

Die Geraden  $M_c$  und  $M_e$  stellen das Festigkeitskriterium nach Coulomb im  $p$ - $q$ -Diagramm dar, für den Fall der triaxialen Kompression und der triaxialen Extension ergeben sich die Steigungen der Geraden zu

$$M_c = \frac{6 \sin(\varphi)}{3 - \sin(\varphi)} \quad (4.23)$$

bzw.

$$M_e = \frac{-6 \sin(\varphi)}{3 + \sin(\varphi)}. \quad (4.24)$$

Die Steigungen der Coulomb'schen Geraden in Bild 4.8b wurden mit einem Reibungswinkel  $\varphi = 39,8^\circ$  berechnet, dieser Wert wurde in triaxialen Kompressionsversuchen an dem verwendeten Versuchsmaterial bestimmt. Eine Kohäsion des Quarzsandes konnte in diesen Versuchen nicht festgestellt werden.

Der Verlauf des Spannungspfades in Bild 4.8b zeigt, dass die Spannung ihr Maximum zwischen den beiden Geraden erreicht, wobei eine deutliche Orientierung zu der Geraden der triaxialen Extension zu erkennen ist. Obwohl die vertikale Spannung  $\sigma_2$  und die Spannung senkrecht zu den Längswänden des Modellbehälters  $\sigma_3$  unterschiedliche Werte aufweisen und deshalb kein klassischer triaxialer Extensionsfall auftritt, kann aufgrund

der Annäherung des Spannungspfades an die Extensionsgerade der klassische triaxiale Extensionsfall zur Bestimmung des Spannungs-Verformungs-Verhalten des Versuchsmaterials herangezogen werden (Fall (c) in Bild 4.5).

### 4.3.2 Darstellung der Versuchsergebnisse

In Bild 4.9a ist das unter triaxialen Extensionsbedingungen ermittelte Spannungs-Verformungs-Verhalten des feinkörnigen Quarzsandes dargestellt (Material 1), der für die Untersuchung des Einflusses der Lagerungsdichte auf die Geometrie der Scherfugenmuster verwendet wird (vgl. Kapitel 5.8). Auf der Ordinatenachse ist der mobilisierte Reibungswinkel aufgetragen, der aus den aktuellen globalen Spannungen nach folgender Gleichung berechnet wurde:

$$\varphi_{mob} = -\arcsin \left[ \frac{\sigma_v - \sigma_h}{\sigma_v + \sigma_h} \right]. \quad (4.25)$$

Ein Kohäsionsanteil wurde nicht angesetzt, da bei den durchgeführten triaxialen Vorversuchen keine nennenswerte Kohäsion des Versuchssandes gemessen werden konnte. Die Werte auf der Abszisse geben die aus den globalen Verformungen ermittelte Scherdehnung innerhalb der Probe wieder. In dem Diagramm sind Extensionsversuche an Probekörpern mit unterschiedlichen Lagerungsdichten zwischen  $I_{D,min} = 0,40$  und  $I_{D,max} = 1,05$  zusammengefasst. Die Herstellung lockerer Proben mit einer Lagerungsdichte kleiner  $I_D = 0,40$  ist aus versuchstechnischen Gründen nicht möglich.

Anhand von Bild 4.9a wird deutlich, dass zu Beginn der Verschiebung des Laststempels der mobilisierte Reibungswinkel innerhalb des Probekörpers unabhängig von der Lagerungsdichte stark ansteigt. Je dichter die Probe gelagert ist, desto spröder verhält sich das Material im Bereich des Peaks der Spannungs-Verformungs-Kurve. Ist das Probenmaterial locker gelagert, steigt der Reibungswinkel während der Verfestigung des Materials nur langsam an. Die Größe des Reibungswinkels am Peak wird mit abnehmender Lagerungsdichte kleiner. Die Scherdehnung am Peak wird umso größer, je lockerer die Proben im Ausgangszustand gelagert sind. Nach dem Erreichen der maximalen Spannung findet bei einer weiteren Verschiebung des Laststempels eine Entfestigung der Probe statt, diese ist durch die Abnahme des Reibungswinkels mit zunehmender Scherdehnung gekennzeichnet. Kurz nach dem Erreichen des Maximums der Spannungs-Verformungs-Kurve ist bei der visuellen Auswertung der Probendeformation eine deutliche Einschnürung des Probekörpers zu beobachten. Die Werte für die maximalen Reibungswinkel und die Größe der Scherdehnung am Peak der Spannungs-Verformungs-Kurve sind in Abhängigkeit der

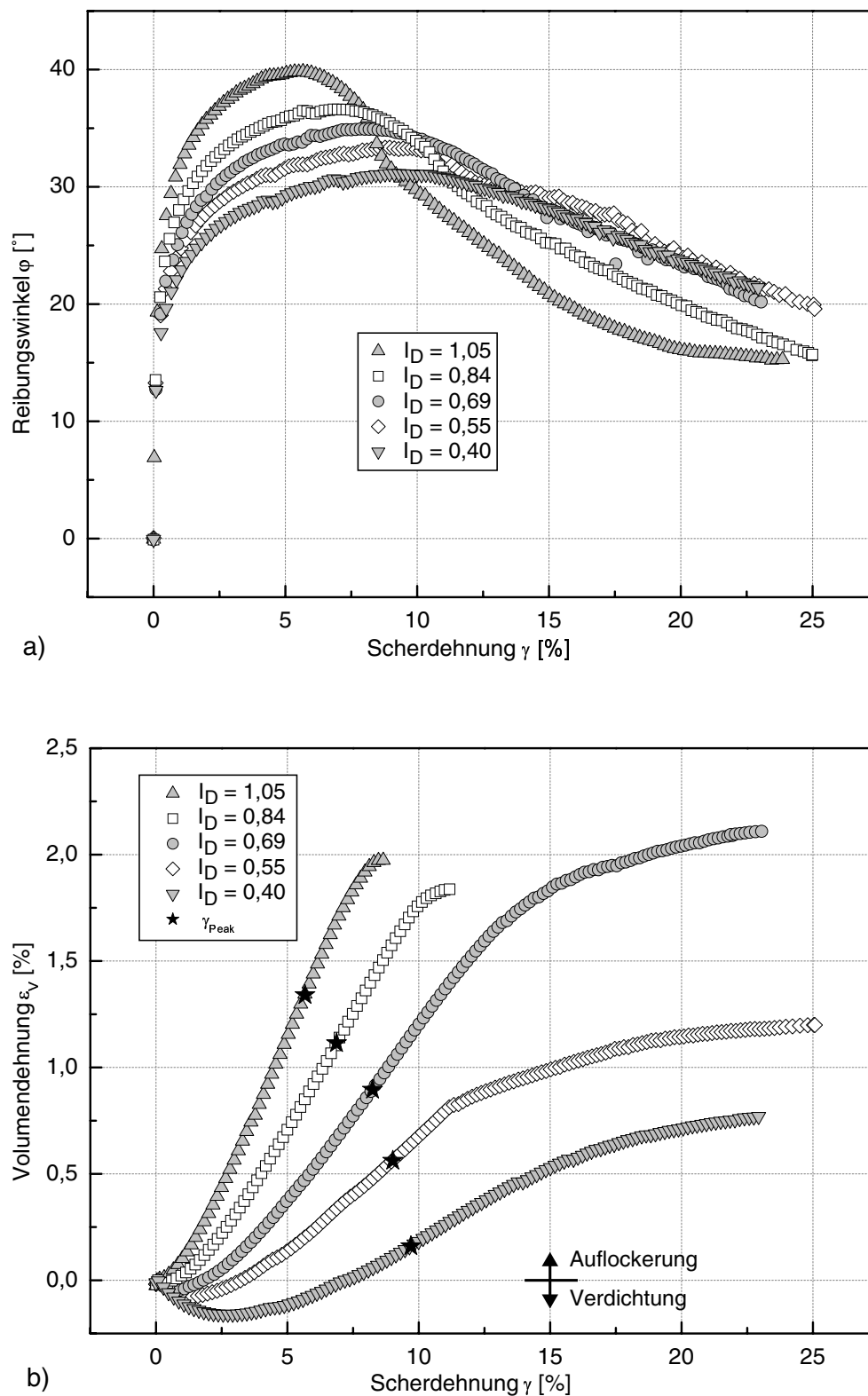


Bild 4.9: Entwicklung (a) des Reibungswinkels und (b) der Volumendehnung für feinen Quarzsand (Material 1) unter verschiedenen Lagerungsdichten im triaxialen Extensionsversuch

Lagerungsdichte in Tabelle 4.1 zusammengefasst und in den Bildern 4.10a und 4.10b in Abhängigkeit der Porenzahl im Ausgangszustand dargestellt.

Tabelle 4.1: Reibungswinkel, Dilatanzwinkel, Scherdehnung am Peak und theoretische Neigungen in Abhängigkeit der Lagerungsdichte der Probekörper

$I_D^1$ [-]	$\varphi_{Peak}^2$ [°]	$\psi_{Peak}^3$ [°]	$\gamma_{Peak}^{Triax}^4$ [%]	$\vartheta_C^5$ [°]	$\vartheta_A^6$ [°]	$\vartheta_R^7$ [°]
1,05	39,8	14,5	5,67	64,9	58,6	52,3
0,84	36,6	10,6	6,87	63,3	56,8	50,3
0,69	35,0	7,8	8,24	62,5	55,7	48,9
0,55	33,3	5,3	8,96	61,7	54,7	47,7
0,40	31,1	2,8	9,70	60,6	53,5	46,4

<sup>1</sup>bezogene Lagerungsdichte <sup>2</sup>Reibungswinkel am Peak <sup>3</sup>Dilatanzwinkel am Peak

<sup>4</sup>Scherdehnung am Peak <sup>5</sup>Coulomb Neigung <sup>6</sup>Arthur Neigung <sup>7</sup>Roscoe Neigung

Die Darstellung der Volumendehnung  $\varepsilon_V$  über die Scherdehnung  $\gamma$  in Bild 4.9b zeigt ebenfalls eine Abhängigkeit der volumetrischen Verformung von der Lagerungsdichte des Probekörpers. Bei allen Kurven ist nach dem Beginn der Verschiebung des Laststempels eine Verdichtung des Probekörpers zu beobachten. In Abhängigkeit von der Ausgangslagerungsdichte des Probekörpers ist die Verdichtung mehr oder weniger stark ausgeprägt. Ist die Probe vor Versuchsbeginn relativ locker gelagert ( $I_D = 0,40$ ), ist der kontraktante Verformungsanteil im Verhältnis zur nachfolgenden dilatanten Verformung groß. Ist die Probe dicht gelagert ( $I_D = 1,05$ ), kann nur eine geringe Kontraktanz beobachtet werden. Die Volumendehnung im dilatanten Bereich ist umso größer, je dichter der Probekörper im Ausgangszustand gelagert ist. Dieser Umstand spiegelt sich auch in der Größe des Dilatanzwinkels  $\psi$  wieder, der als Steigung der Tangente an die jeweilige Volumendehnungskurve in Bild 4.9b wie folgt definiert ist [35]:

$$\psi = \arctan \left[ \frac{\varepsilon_{vol}}{\gamma} \right] = \arctan \left[ \frac{\varepsilon_1 + 2\varepsilon_3}{\varepsilon_1 - \varepsilon_3} \right]. \quad (4.26)$$

Im Bereich des Peaks der Spannungs-Verformungs-Kurve in Bild 4.9a weist die Volumendehnungskurve eine gleichmäßige Steigung auf, dementsprechend ist der Dilatanzwinkel in diesem Bereich konstant. Die Volumendehnung am Peak der Spannungs-Verformungs-Kurve ist durch einen Stern gekennzeichnet. Der entsprechende Dilatanzwinkel kann der Zusammenstellung in Tabelle 4.1 entnommen werden. Zusätzlich sind in Tabelle 4.1 die

theoretischen Scherflächenneigungen nach Coulomb, Roscoe und Arthur et al. aufgeführt. Diese wurden mit den Reibungs- und Dilatanzwinkeln am Peak der Spannungs-Dehnung-Kurven anhand der Gleichungen (2.7), (2.8) und (2.11) bestimmt.

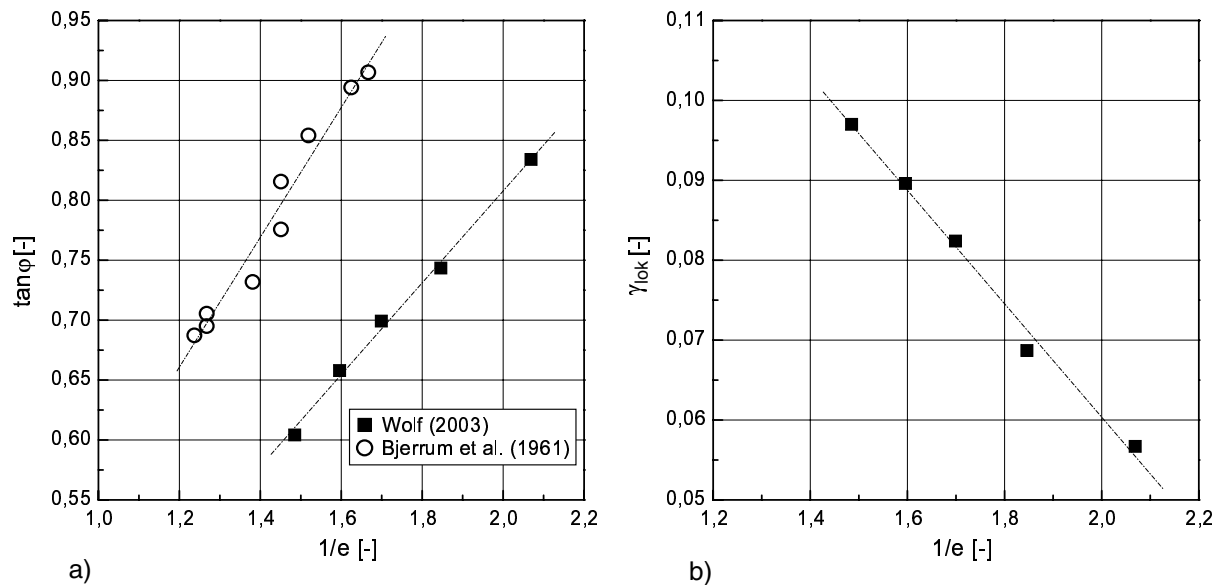


Bild 4.10: Reibungswinkel (a) und Lokalisierungsdehnung (b) in Abhängigkeit der Ausgangsporenzahl

In Bild 4.10a sind neben den in den Triaxialversuchen im Rahmen dieser Arbeit gemessenen Reibungswinkeln zusätzlich die Ergebnisse von Triaxialversuchen an mitteldicht und dicht gelagerten Triaxialproben von Bjerrum et al. [9] dargestellt. Aufgetragen sind jeweils die gemessenen Winkel am Peak der Spannungs-Dehnungs-Kurven über den Kehrwert der Ausgangsporenzahl. Im Gegensatz zu den Versuchsergebnissen von Rowe [107], aus denen ein überlinearer Anstieg der Scherfestigkeit mit zunehmender Porenzahl hervorgeht, lässt sich aus beiden abgebildeten Datenreihen ein linearer Zusammenhang zwischen dem Tangens des Reibungswinkels und der Ausgangsporenzahl ableiten. Das Produkt der beiden Größen ist demnach konstant [14]:

$$\tan \varphi \cdot e = c_1 = \text{konstant.} \quad (4.27)$$

Eine lineare Beziehung ergibt sich ebenfalls zwischen der Lokalisierungsdehnung  $\gamma_{lok}$ , gemessen am Peak der Spannungs-Dehnung-Kurve, und der Porenzahl im Ausgangszustand. Dieser Zusammenhang ist aus Bild 4.10b ersichtlich und lässt sich ebenfalls in einem kon-

stanten Produkt der beiden Größen ausdrücken:

$$\gamma_{lok} \cdot e = c_2 = \text{konstant.} \quad (4.28)$$

Die Steigung der Geraden ist negativ d.h., die Größe der Lokalisierungsdehnung verringert sich mit abnehmender Porenzahl und damit mit zunehmender Anfangs-Lagerungsdichte der Triaxialproben. Das Material verhält sich also umso 'spröder', je dichter die Proben im Ausgangszustand gelagert sind.



# Kapitel 5

## Darstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der durchgeführten Modellversuche zusammengefasst und interpretiert. Nach einer allgemeinen Beschreibung des Verhaltens der Probekörper unter der eingprägten Extensionsbeanspruchung wird der Einfluss verschiedener Materialparameter und Randbedingungen auf die GröÙe der Dehnungen am Lokalisierungspunkt und auf die Dicke der sich entwickelnden Scherflächen dargestellt. Anschließend erfolgt die Darstellung und Interpretation der Versuchsergebnisse innerhalb der einzelnen Versuchsreihen. Hierbei wird vorab das Versuchsprogramm für jeden untersuchten Einflussparameter zusammengefasst und die Variation der Parameter erläutert.

### 5.1 Allgemeine Beobachtungen

#### 5.1.1 Homogenität der eingprägten Dehnung

Wie in Kapitel 3.1 bereits beschrieben wurde, ist im Hinblick auf die Reproduzierbarkeit der Modellversuche und zur Vermeidung nicht eindeutiger Versuchsrandbedingungen zu jedem Zeitpunkt des Versuches sicherzustellen, dass die horizontal eingprägte Dehnung innerhalb der Gummimatte gleichmäßig verteilt ist. Diese Forderung gilt insbesondere bis zu dem Zeitpunkt, an dem sich das Scherfugenmuster innerhalb der Materialprobe entwickelt. Die Methoden zur Überprüfung der Gleichmäßigkeit wurden in Kapitel 3.3.4 beschrieben.

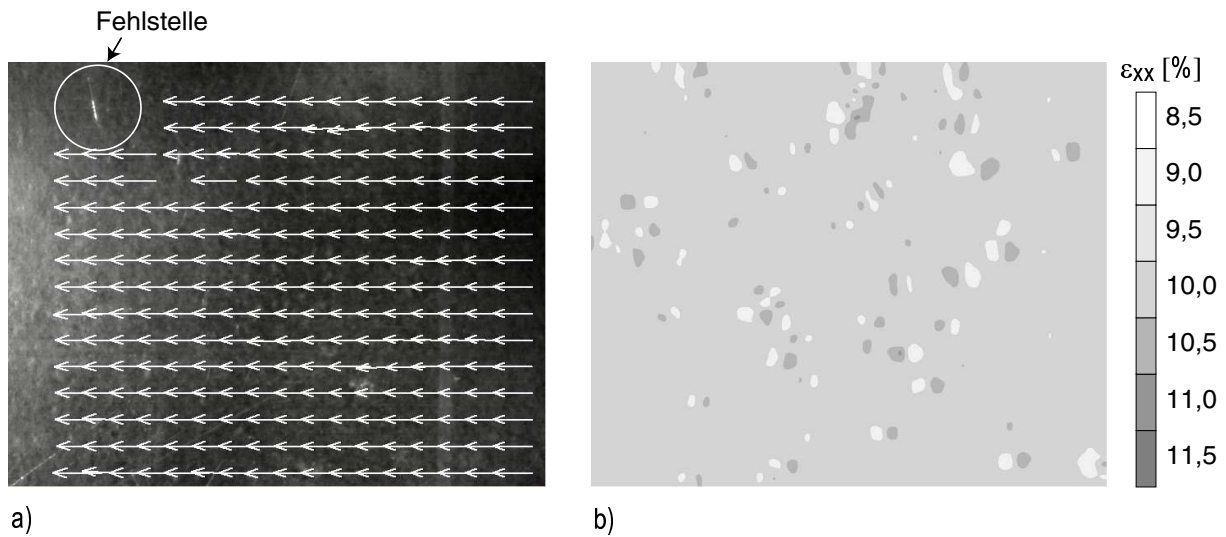


Bild 5.1: DIC-Auswertung der Dehnungsverteilung innerhalb der Gummimatte bei einer Verschiebung der beweglichen Wand von  $u_x = 5,0$  cm bzw.  $\epsilon_{xx} = 10\%$  (Versuch EVD14)

Die Auswertung des auf der Unterseite der Gummimatte aufgezeichneten Rechteckmusters zeigt, dass aufgrund der seitlichen Befestigung der dehnbaren Matte auch bei großen Dehnungen keine Verformung der Gummimatte senkrecht zur Belastungsrichtung auftritt. Im Gegensatz zu den konstanten Abständen der seitlichen Kanten der Rechtecke sind mit zunehmender Dehnung in der Belastungsrichtung Vergrößerungen des Abstandes der Rechteckkanten zu beobachten. Die Änderung der lokalen Dehnung, die anhand der Zunahme der Abstände der Kanten berechnet wird, entspricht dabei bei allen Versuchen der Größe der global gemessenen horizontal eingepprägten Dehnung.

Neben der Auswertung der Geometrie des Musters auf der Unterseite der Gummimatten wird bei einigen Versuchen zur Kontrolle der Homogenität der eingepprägten horizontalen Dehnung die lokale Verformung der Gummimatte in einem Teilbereich digital aufgezeichnet und mit Hilfe der Digital Image Correlation Software ausgewertet. Das Ergebnis der Auswertung von Versuch EVD14 ist in Bild 5.1 als (a) Vektorfeld der horizontalen Verschiebungen und (b) als Konturplot der horizontalen Dehnungen  $\epsilon_{xx}$  nach einer Verschiebung der beweglichen Wand von  $u_x = 5$  cm ( $\epsilon_{xx} = 10\%$ ) dargestellt. Eine Dehnung der Gummimatte senkrecht zur Verschiebungsrichtung kann nicht festgestellt werden, da alle Vektoren in Bild 5.1a in die Verschiebungsrichtung der beweglichen Wand zeigen. In Bild 5.1b ist deutlich zu erkennen, dass die Größe der lokalen Dehnung im aufgenommenen Teilbereich dem Betrag der Dehnung entspricht, die über die verschiebliche

Wand und das Scherensystem in die Probe eingeleitet wird. Die lokalen Abweichungen von der mittleren Dehnung von  $\varepsilon_{xx} = 10\%$  resultieren aus Fehlstellen und Kratzern in der Bodenplatte aus Glas, durch die die digitalen Aufnahmen der Verformung der Gummimatte angefertigt werden. Aufgrund der Ergebnisse der Auswertung der Verformungen des Rechteckmusters und der Auswertung der lokalen Dehnungsverteilung mit Hilfe der DIC-Methode kann eine Beeinflussung der Scherfugengeometrie durch Inhomogenitäten in der Gummimattendehnung ausgeschlossen werden.

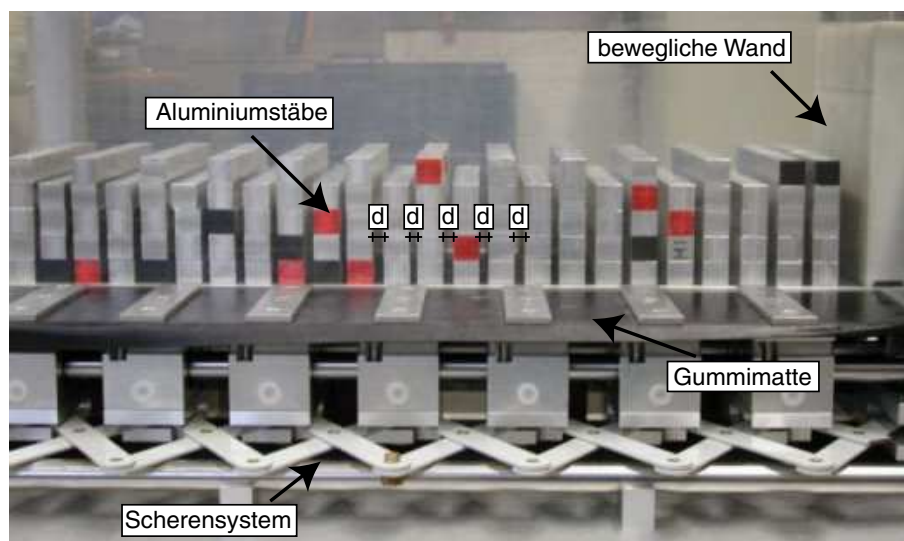


Bild 5.2: Konstanter Abstand der Aluminiumstäbe als Indikator einer homogenen Dehnungsverteilung in der Gummimatte nach der Versuchsdurchführung bei 30g

Die Auswertung der Verformungen des Rechteckmusters und die Aufnahme von digitalen Bildern zur DIC-Auswertung sind bei den durchgeführten Modellversuchen im erhöhten Schwerfeld nicht möglich. Um auch bei diesen Versuchen eine homogene Verteilung der Dehnungen sicherzustellen, werden vorab Versuche mit Aluminiumstäben als Ersatz für den Quarzsand durchgeführt. Die Stäbe weisen ein der Masse des Versuchsmaterials entsprechendes Gewicht auf und werden auf der Gummimatte angeordnet. Die beim Beginn des Experimentes nah beieinander platzierten Stäbe zeigen auch nach der Streckung der Gummimatte unter einer 30-fachen Erdbeschleunigung einen konstanten Abstand  $d$  (vgl. Bild 5.2). Hieraus kann auf eine gleichmäßige Verteilung der Dehnungen in der Gummimatte und damit in der Materialprobe auch im erhöhten Schwerfeld geschlossen werden. Weitere Rückschlüsse in Bezug auf die Homogenität der Dehnungsverteilung können aus der visuellen Beurteilung des verformten Probekörpers im Vergleich zu verformten Proben

im natürlichen Schwerfeld gezogen werden.

### 5.1.2 Allgemeines Verhalten der Probekörper und Beschreibung des Deformationsmechanismus

Die nachfolgend dargestellten allgemeinen Ergebnisse in Bezug auf die Entstehung der Scherflächenmuster und auf deren weitere Entwicklung unter kontinuierlicher Extensionsbeanspruchung sind für alle durchgeführten Modellversuche gültig. Sollten sich Abweichungen in der Evolution der Scherfugenmuster in Abhängigkeit verschiedener Einflussfaktoren ergeben, wird hierauf besonders hingewiesen.

Wird mit der Streckung der eingebauten Materialprobe durch die Verschiebung der beweglichen Wand und der damit verbundenen Dehnung der Gummimatte begonnen, werden durch die Gestaltänderung der Probe innerhalb des Probekörpers Schubspannungen und damit Widerstände aktiviert, die den Verformungen innerhalb des Körpers entgegen wirken. Durch die fortschreitende Auflockerung des Materials mit zunehmender horizontaler Dehnung der Probe erhöhen sich die Schubspannungen, bis das Maximum (Peak) der Spannungs-Verformungs-Kurve erreicht ist (vgl. Kapitel 4.3). Die Aktivierung der maximalen Schubspannung innerhalb der Materialprobe ist durch eine spontane Bildung eines Scherflächenmusters innerhalb des Probekörpers gekennzeichnet. Die Größe der Scherdehnung und damit der Betrag der horizontal eingepprägten Dehnung bis zur maximalen Schubspannung ist dabei von der Lagerungsdichte des Materials im Ausgangszustand abhängig (vgl. Kapitel 5.2).

Für alle Modellversuche, die mit den verschiedenen Quarzsanden durchgeführt wurden, ist das in Bild 5.3a dargestellte Verformungsmuster charakteristisch. Die Sprünge in den gefärbten Sandschichten, die über die Höhe der Probe versetzt angeordnet sind und durch eine Linie verbunden werden können, repräsentieren dabei die durch die Dehnung der Probe entstandenen Scherflächen. Diese Scherfugen streichen an der Oberfläche des Sandkörpers aus und sind hier durch Verwerfungen in der Oberflächenstruktur gekennzeichnet. Durch die Geometrie der Verwerfungen ist die Orientierung der Scherflächen eindeutig festgelegt [32, 50, 62, 92, 134]. Bild 5.3b stellt schematisch die Geometrie der Verwerfungen an der Oberfläche in einem Schnitt dar. Bild 5.3c zeigt die dreidimensionale Auswertung der Oberflächenverformung mit Hilfe der DIC-Methode. Die Fallrichtung der Scherfugen ergibt sich bei beiden Bildern als Verlängerung der steil abfallenden Kanten der 'Sägezahn'-Struktur.

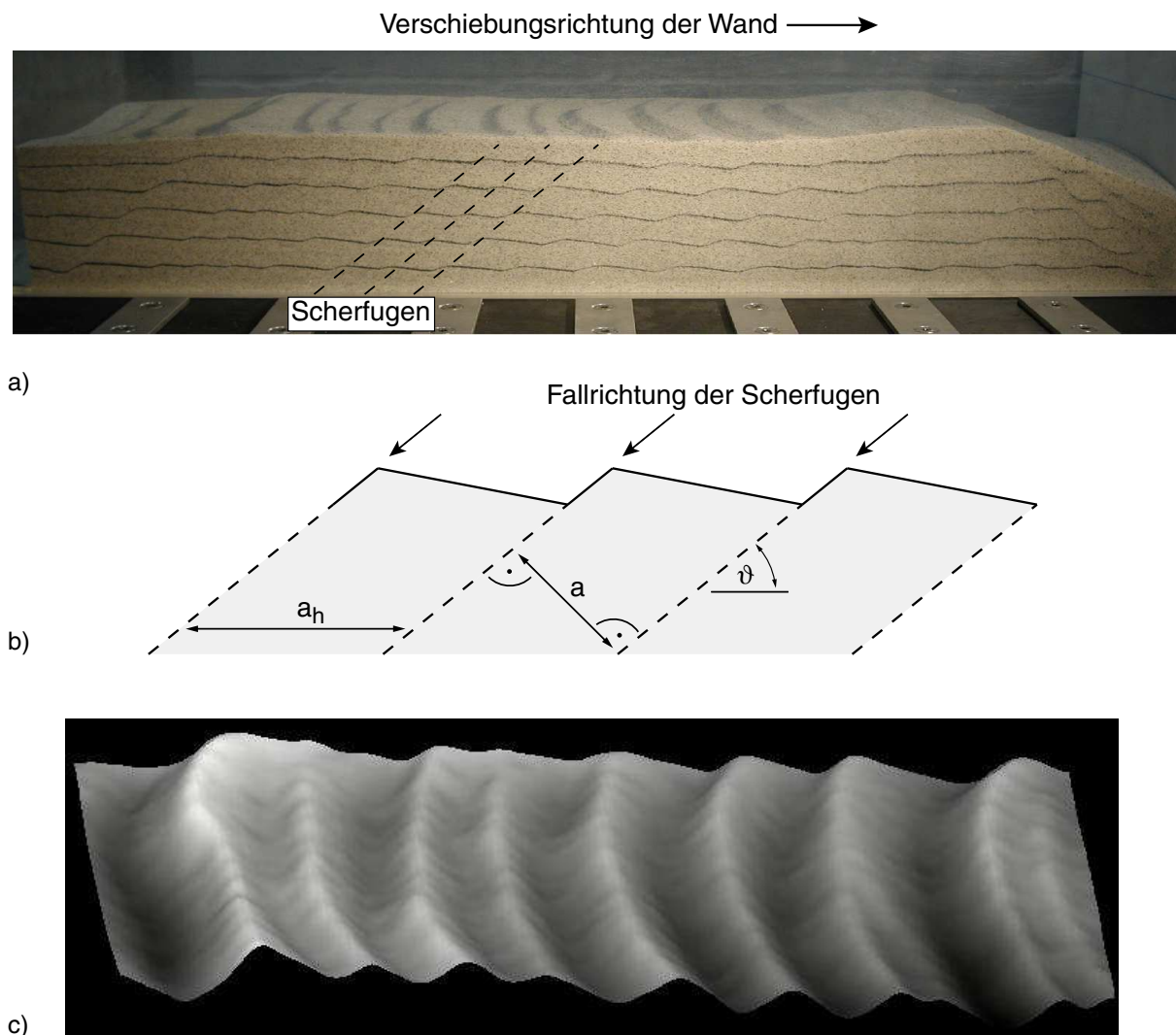


Bild 5.3: (a) Charakteristisches Verformungsmuster einer Probe aus feinem Quarzsand bei einer horizontalen Dehnung von  $\varepsilon_{xx} = 40\%$  (b) Schematische Darstellung der Geometrie der Verwerfungen an der Probenoberfläche (c) 3-D Auswertung der Oberflächengeometrie mit Hilfe der DIC-Methode

In den Bereichen hinter der beweglichen Querwand auf der rechten Seite und der unbeweglichen Querwand am linken Rand des Bildes 5.3a sind deutlich ausgeprägte Gleitflächen zu erkennen. Diese entsprechen den aus der Bodenmechanik und der Geotechnik bekannten Gleitflächen hinter starren Wänden bei einer Rotation der Wand um den vorderen Wandfußpunkt. Röntgenbilder dieser 'aktiven' Bereiche zeigen, dass sich zeitgleich zur Lokalisierung der Verformung in der Hauptscherfuge innerhalb des Gleitkörpers parallele Scherflächen entwickeln. Die Neigung dieser Scherflächenschar stellt sich in Abhängigkeit der mittleren Korngröße des verwendeten Materials zwischen den charakteristischen

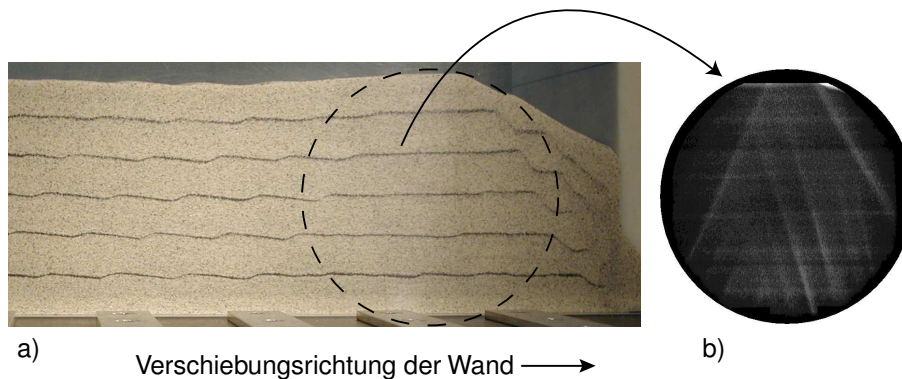


Bild 5.4: Änderung der Scherfugenorientierung hinter der beweglichen Wand: a) Seitenansicht der Probe, b) Röntgenaufnahme

Neigungen für die Scherfugenwinkel nach Roscoe [106] und Coulomb [18] ein.

Hinter der beweglichen Wand ist die Ausbildung eines Rückens zu beobachten, in dem sich die Scherfugeneigung umkehrt. Dieser Bereich ist vergrößert in Bild 5.4 dargestellt. Die Auswertung der Röntgenbilder dieses Bereichs zeigt, dass auch der Rücken, der den aktiven Gleitkeil hinter der beweglichen Wand und das Scherfugenmuster trennt, Scherverformungen unterworfen ist. Im Gegensatz zum allgemeinen Scherfugensystem sind diese Scherflächen an der Seitenfläche der Probe nicht sichtbar. Im Bereich zwischen dem Rücken und der fixierten Querwand bildet sich bei weiterer Dehnung der Probe beim Erreichen des Peaks der Spannungs-Verformungs-Kurve zeitgleich ein System von parallelen Scherflächen aus, die ausschließlich in Richtung der fixierten Querwand einfallen. Konjugierte Scherflächenmuster, wie sie nach der Theorie des plastischen Grenzzustandes nach Rankine [104] zu erwarten wären, sind nur bei der Verwendung von grobkörnigen Böden zu beobachten (vgl. Kapitel 5.4.2).

In Bezug auf den Lokalisierungszeitpunkt der Scherflächen hinter der beweglichen und der festen Querwand kann festgestellt werden, dass sich die beiden Scherflächen in diesem Bereich zeitgleich und dabei deutlich vor den Scherfugenmustern im mittleren Bereich des Probekörpers ausbilden. Dieses Verhalten ist darauf zurückzuführen, dass die vertikale Verformung der Probe während der Auflockerung im Bereich der beiden Wände durch die Reibung zwischen Wand und Material behindert wird (vgl. Bild 5.5a). Dies führt dazu, dass die horizontale Auflockerung und damit die Verminderung der horizontalen Spannung in diesen Bereichen größer ist als zum gleichen Zeitpunkt und bei gleichen Dehnungsbeträgen im Mittelbereich der Probe. Folglich wird in der Nähe der Wand der aktive Grenzzustand eher erreicht (vgl. Bild 5.5b).

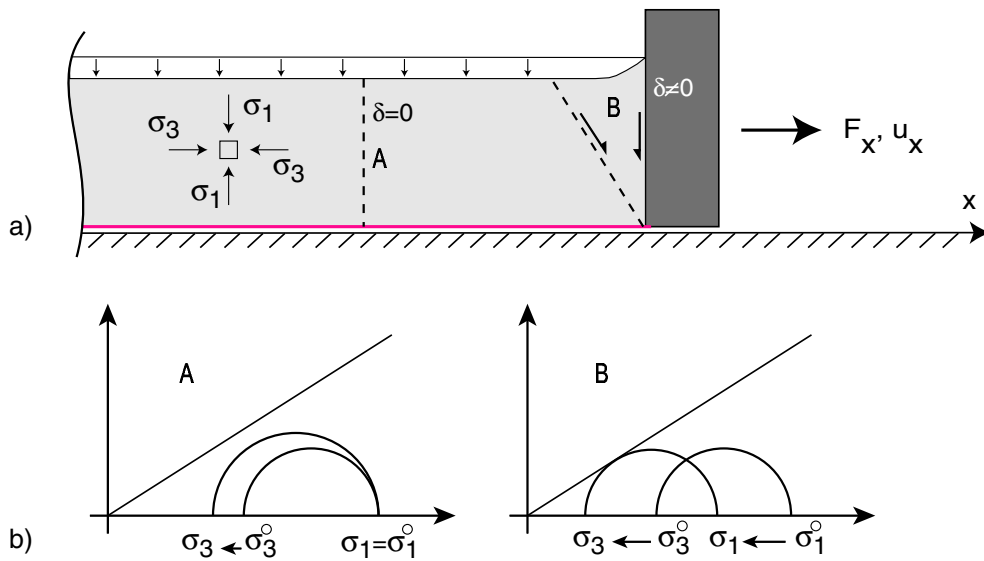


Bild 5.5: Verformungsverhalten des Probekörpers unter Extensionsbeanspruchung (a) und Spannungsentwicklung (b) in verschiedenen Bereichen der Probe

Besondere Bedeutung kommt der Tatsache zu, dass die parallelen Scherflächen außerhalb des Randbereiches, die das Verformungsverhalten der Probekörper dominieren, zeitgleich entstehen. Dieses Verhalten konnte zum einen durch die kontinuierliche Beobachtung der Entwicklungen innerhalb der Probe mit Hilfe der Röntgentechnik und zum anderen durch die Auswertung der Verformungen an den Probenseitenflächen mit Hilfe der DIC-Technik verifiziert werden. Das gleichzeitige Entstehen der einzelnen Scherflächen bestätigt die in Kapitel 5.1.1 beschriebenen Ergebnisse der Überprüfung der Dehnungsverteilung in der Gummimatte, wonach sich aufgrund der Anordnung der Scherenmechanismen an den Seiten des Modellbehälters eine homogene Dehnungsverteilung innerhalb der Gummimatte einstellt. Weiterhin werden durch diese Beobachtung Erkenntnisse von Experimenten widerlegt, bei denen eine gleichmäßige Auflockerung der Proben angenommen wird, die Scherflächen innerhalb des Probekörpers sich aber zeitlich versetzt entwickeln [46]. McClay [74] und McClay & Ellis [77, 78] setzen bei ihren experimentellen Untersuchungen bezüglich der Verformung von Sandproben unter Extensionsbeanspruchung ebenfalls eine homogene Dehnung innerhalb der unter dem Sandkörper angeordneten Gummimatte voraus. Gleichzeitig veröffentlichen sie Diagramme, aus denen eine sukzessive Entwicklung der Scherflächen abgeleitet werden kann. Aufgrund der Versuchsergebnisse im Rahmen dieser Arbeit und der theoretischen Überlegungen muss eine homogene Dehnungsverteilung innerhalb der Gummimatte bei den Versuchen von McClay [74] und McClay & Ellis [77, 78] angezweifelt werden. Unterstützt wird diese These durch die Ergebnisse der nume-



rischen Simulationen bezüglich des Einflusses einer homogenen oder inhomogenen Verformung des duktilen Untergrundes auf die Geometrie der Scherfugenmuster von Harper et al. [40]. Auch Harper et al. stellen aufgrund der Simulationsergebnisse die gleichmäßigen Versuchsrandbedingungen bei den genannten Modellversuchen in Frage. Die Bestimmung des Lokalisierungspunktes für das System aus parallelen Scherfugen wird detailliert in Kapitel 5.2 beschrieben.

Betrachtet man das Scherfugenmuster in Bild 5.3 stellt sich zwangsläufig die Frage, ob die Geometrie des sich einstellenden Musters von den seitlichen Befestigungselementen der Gummimatte beeinflusst wird. Um diese Fragestellung zu untersuchen, wurden zwei Sonderversuche im Extensionsgerät durchgeführt. Im ersten Versuch wurde die Gummimembran an allen Befestigungspunkten angebracht, im zweiten Versuch wurde nur jeder zweite Fixpunkt genutzt. Alle sonstigen Randbedingungen und Materialparameter waren für beide Versuche identisch. Die Auswertung dieser Experimente zeigt, dass sich bei beiden durchgeführten Versuchen ein identisches Scherfugenmuster innerhalb des Probekörpers entwickelt. Eine Beeinflussung der Versuchsergebnisse durch den Abstand der Befestigungspunkte der Gummimatte kann dementsprechend ausgeschlossen werden.

Die Entwicklung der Scherfugenmuster nach der Lokalisierung ist in den Bildern 5.6 bis 5.8 dargestellt. Bild 5.6 zeigt die Ansicht der Seitenfläche einer dicht gelagerten Sandprobe, Bild 5.7 die Röntgenaufnahmen des Probekörpers und Bild 5.8 die Ergebnisse der DIC-Auswertung der digitalen Bilder der Seitenflächenansicht, jeweils bei unterschiedlichen horizontalen Dehnungen von  $\varepsilon_{xx} = 10\%$  bis  $\varepsilon_{xx} = 40\%$ . Die bewegliche Wand wird in Richtung des rechten Bildrandes verschoben. Da die Röntgenaufnahmen für alle Verschiebungszustände von einer definierten Position aufgenommen wurden, wandern die Scherflächen vom linken zum rechten Bildrand. Identische Scherfugen sind in den einzelnen Bildern mit gleichen Symbolen gekennzeichnet.

Die dargestellten Versuchsergebnisse in den Bildern 5.6 bis 5.8 verdeutlichen, dass sich die Verformung innerhalb der Probekörper unter den speziellen Randbedingungen dieses Versuches bei einer kleineren horizontalen Dehnung als  $\varepsilon_{xx} = 10\%$  lokalisiert. Ein Vergleich der Bilder 5.6 und 5.7 bzw. der Bilder 5.6 und 5.8 zeigt dabei die Vorteile der Versuchsauswertung mit Hilfe der Röntgentechnik und der Methode der Digital Image Correlation gegenüber einer rein visuellen Auswertung der Probenverformung anhand der Versätze der farblich abgesetzten Schichten. Während auf den Röntgenbildern und auf den Scherdehnungsplots der DIC-Analyse bei einer horizontalen Dehnung von  $\varepsilon_{xx} = 10\%$  bereits ein ausgeprägtes Muster von Scherflächen zu identifizieren ist, ist eine eindeutige



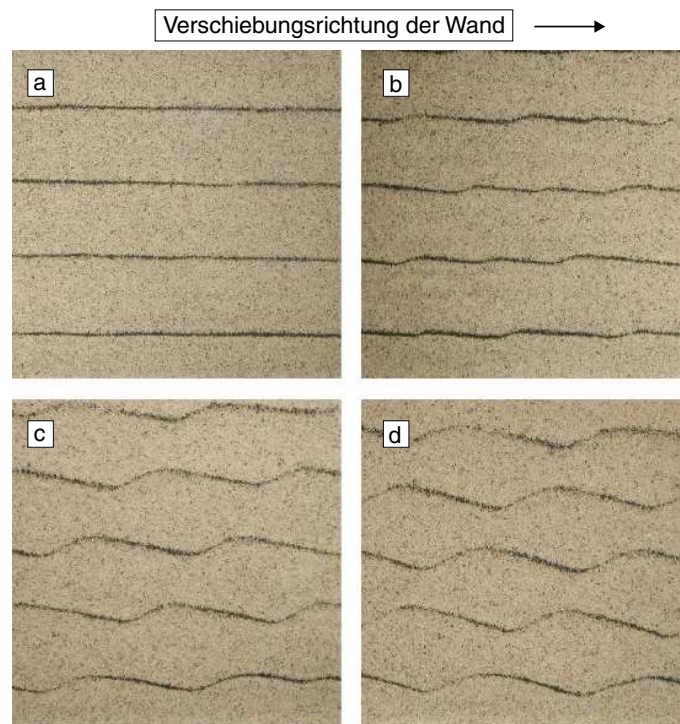


Bild 5.6: Aufnahmen der Probenseitenflächen bei unterschiedlichen Dehnungen: a)  $\varepsilon_{xx} = 10\%$ , b)  $\varepsilon_{xx} = 20\%$ , c)  $\varepsilon_{xx} = 30\%$ , d)  $\varepsilon_{xx} = 40\%$

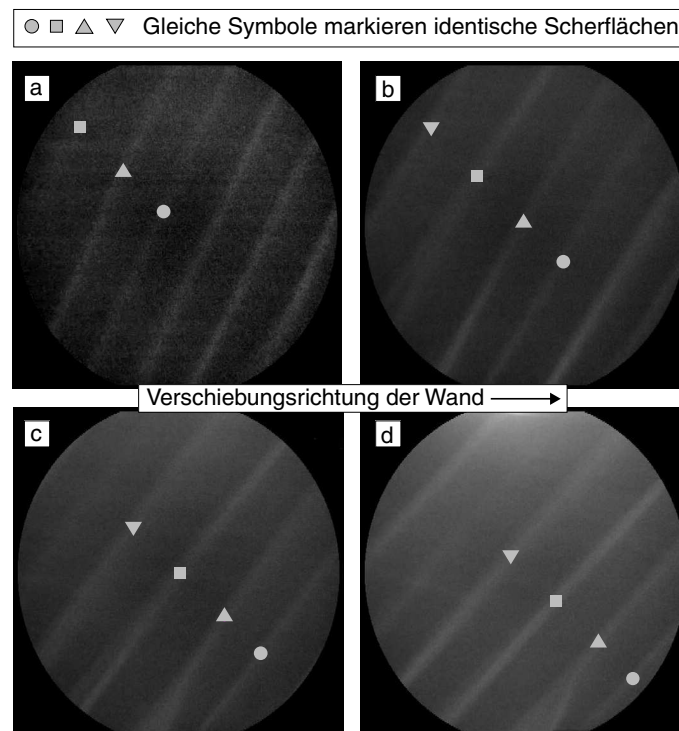


Bild 5.7: Röntgenaufnahmen des Probekörpers bei unterschiedlichen Dehnungen: a)  $\varepsilon_{xx} = 10\%$ , b)  $\varepsilon_{xx} = 20\%$ , c)  $\varepsilon_{xx} = 30\%$ , d)  $\varepsilon_{xx} = 40\%$

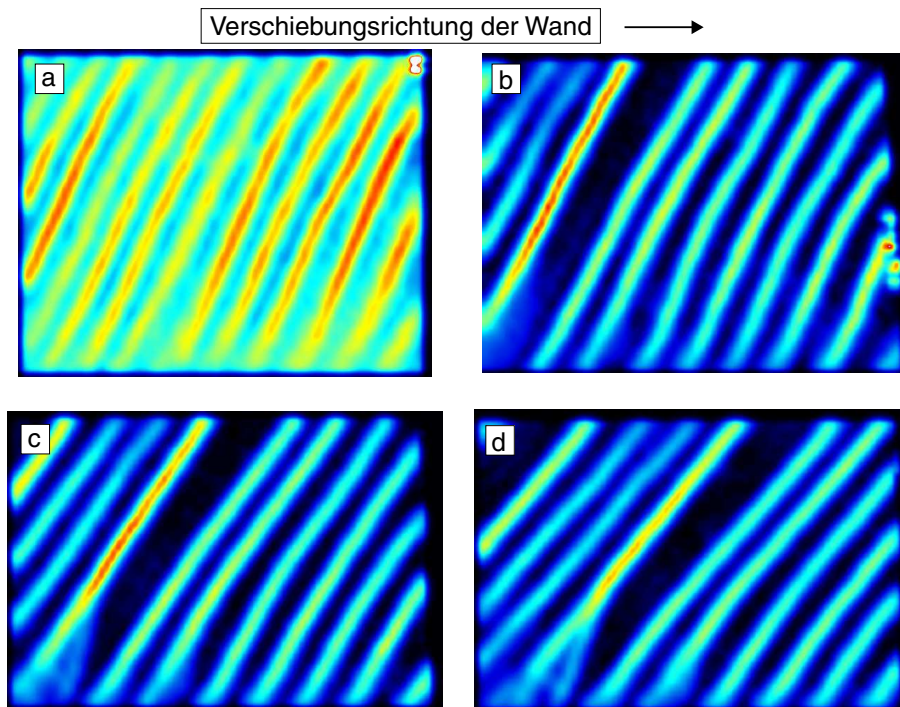


Bild 5.8: Ergebnisse der Auswertung der Scherdehnung an den Probenseitenflächen mit Hilfe der DIC-Methode bei unterschiedlichen Dehnungen: a)  $\varepsilon_{xx} = 10 \%$ , b)  $\varepsilon_{xx} = 20 \%$ , c)  $\varepsilon_{xx} = 30 \%$ , d)  $\varepsilon_{xx} = 40 \%$

Scherflächenbildung durch die Beobachtung der Probenseitenfläche nicht festzustellen.

Die Bilder 5.6 bis 5.8 zeigen weiterhin, dass das Scherflächensystem mit zunehmender horizontaler Dehnung in Richtung der beweglichen Wand rotiert, die Scherflächen bleiben dabei eben. Die Rotation ist durch die Verringerung der Scherflächenneigung gekennzeichnet, der Abstand  $a$  der Scherflächen ändert seine Größe nicht. Diese Beobachtungen decken sich mit den Ergebnissen der numerischen Simulation des Modellversuchs, die in Kapitel 4.3 beschrieben wurden. Unabhängig von der Art der Auswertung zeigen alle Bilder, dass sich auch bei sehr großen Dehnungen keine zusätzlichen Scherflächen zwischen den ursprünglich entstandenen Scherfugen entwickeln. Auch diese wichtige Beobachtung stellt die homogenen Randbedingungen der Versuche von McClay [74] und McClay & Ellis [77, 78] in Frage, da in ihren Modellversuchen neben der zeitlich versetzten Entstehung der Scherfugen auch eine unregelmäßige Entwicklung in Bezug auf den Lokalisierungsort beobachtet werden kann.

Der konstante Abstand der Scherflächen und die Rotation der Scherfugen deuten darauf hin, dass der zu beschreibende Deformationsmechanismus mit dem in der geologischen Li-

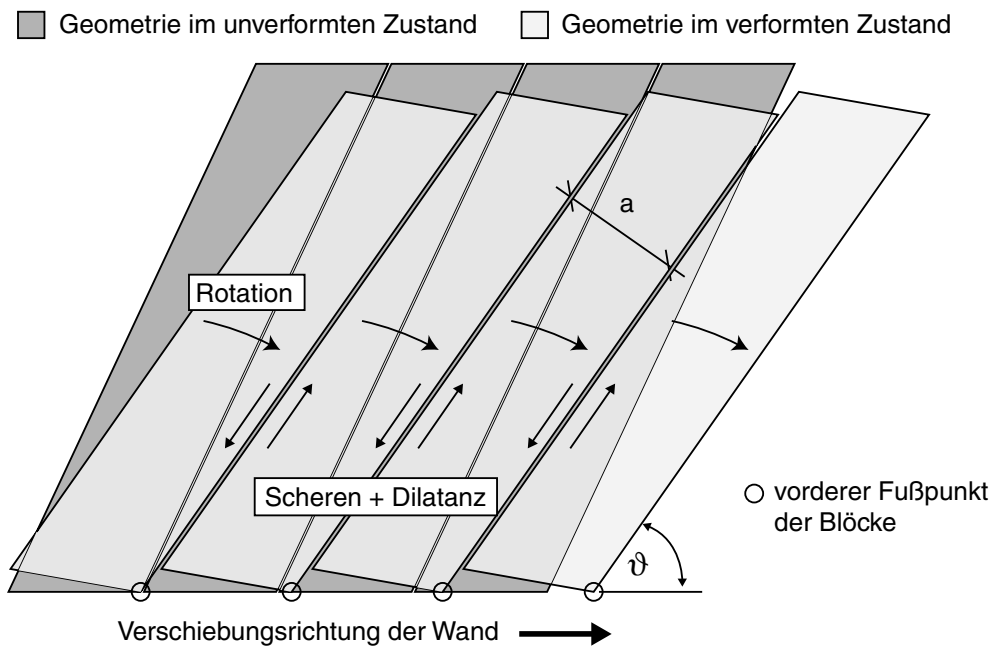


Bild 5.9: Schematische Darstellung der 'Domino'-Verformung [67] als Deformationsmechanismus innerhalb der Probekörper

teratur als 'Domino'- oder 'Kippschollen'-Mechanismus bezeichneten Verformungsmuster vergleichbar ist. Schematisch ist dieser Deformationsmechanismus in Bild 5.9 dargestellt. Die dunkelgrau hinterlegten Bereiche zeigen die Blockgeometrie im Ausgangszustand, die hellgrauen Bereiche zeigen das Scherfugensystem nach einer Drehung der Scherfugen um den Winkel  $\Delta\vartheta$  um den jeweils vorderen Fußpunkt der Blöcke. Die Geometrie des Scherfugensystems ist durch den Abstand  $a$  der Scherfugen und deren Neigung  $\vartheta_0$  zum Lokalisierungszeitpunkt gekennzeichnet. In der Regel werden die Bodenkörper als starre Körper angenommen d.h., bei einer weiteren Dehnung der Probe behalten die Körper ihre Geometrie und werden nicht verzerrt. Im Zuge der fortlaufenden Dehnung der Probe rotieren die Körper um eine Achse senkrecht zur Bildebene. Durch die Drehung und der damit verbundenen Relativverschiebung zwischen den beiden benachbarten Blöcken werden in der Scherfuge Reibungskräfte aktiviert. Beispiele für das Auftreten eines solchen Mechanismus in-situ und daraus abgeleitete Modellvorstellungen lassen sich z.B. bei Gibbs [33], Leeder & Gawthorpe [62], Nur et al. [92] und Wernecke [132, 134] finden. Im Modellversuch wird das Auftreten von 'Domino'-Verformungen bei Ishikawa & Otsuki [46], Koyi & Skelton [57], McClay [74, 75, 76], McClay & Ellis [77, 78], McKenzie & Jackson [80] und Vendeville et al. [127] beschrieben. Die Kinematik beschreiben z.B. Freund [32], Kligfield & Crespi [50], Mandl [68] und Nur et al. [92].

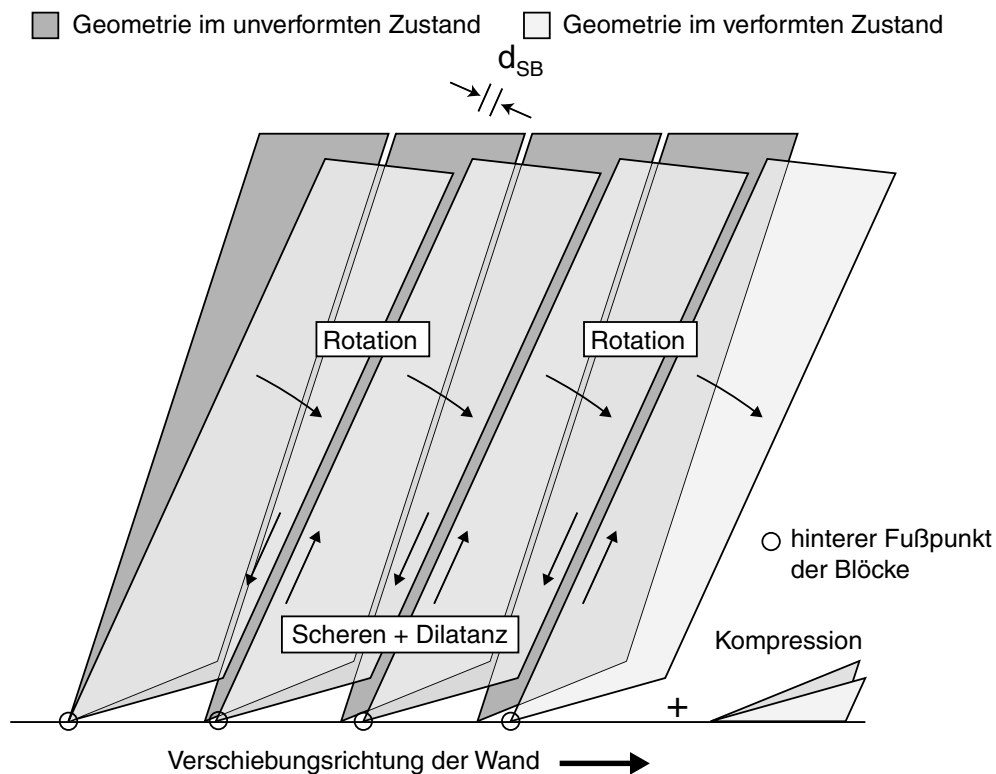


Bild 5.10: Rotation der Blöcke um den hinteren Fußpunkt

Legt man für die Beschreibung der Verformung des Scherfugensystems das in Bild 5.9 dargestellte Prinzip der 'Domino'-Verformung zu Grunde, müssten sich bei einer Rotation der Blöcke um den vorderen Fußpunkt die rückwärtigen Bereiche der Blöcke von der Gummimatte abheben. Dies ist aufgrund der granularen Eigenschaften des Modellmaterials nicht möglich. Eine genaue Auswertung der Probendeformation im Bereich des Auflagers mit Hilfe der DIC-Methode zeigt, dass sich die Drehung der Blöcke vielmehr durch eine Rotation um den hinteren Fußpunkt der Rotationskörper beschreiben lässt (vgl. Bild 5.10). Im Bereich des vorderen Fußauflagers ist dabei eine ausgeprägte Deformation der ansonsten verzerrungsfreien Rotationskörper zu beobachten. Bild 5.11 zeigt qualitativ die Scherverformung innerhalb des Scherfugensystems im Bereich des Auflagers der Blöcke.

Bereiche, in denen große Scherverformungen zu beobachten sind, stellen die Scherfugen und der vordere Auflagerpunkt des Blockes dar. Die Scherverformung innerhalb der Scherfugen resultiert aus der Relativverschiebung der Blöcke während der Rotationsbewegung. Im Bereich des vorderen Fußpunktes treten bei der Rotation der Blöcke große plastische Deformationen auf. Diese verursachen starke Scherverformungen. Deutlich ist zu erkennen, dass die Blöcke im Bereich des hinteren Auflagerpunktes nur geringen Scherverformungen

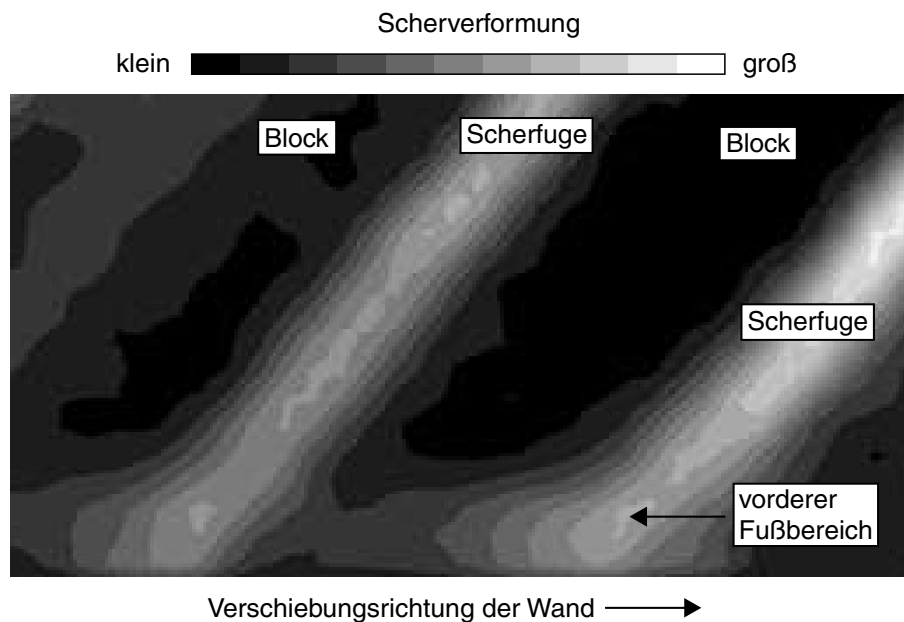


Bild 5.11: Scherverformung im Bereich des Auflagers eines Blocks

unterworfen sind. Oberhalb des Auflagerbereiches zeigen die Blöcke zwischen den Scherflächen ausschließlich Rotationsbewegungen. Ausführlich wird die Kinematik des gesamten Scherfugensystems in Kapitel 6.2.1 beschrieben.

## 5.2 Lokalisierungsdehnung

Im Abschnitt 3.4.2 wurde der Begriff der Lokalisierungsdehnung definiert und die Methode zur Bestimmung der Lokalisierungsdehnung dargestellt. Im Folgenden werden die Berechnungsergebnisse in Abhängigkeit der verschiedenen Materialparameter und Randbedingungen zusammengefasst. Hierzu werden vorab drei Auswertungen von Modellversuchen mit unterschiedlichen Randbedingungen in Bezug auf die Bestimmung der Lokalisierungsdehnungen  $\varepsilon_{xx,lok}$  und  $\gamma_{lok}$  vorgestellt. Anschließend werden alle bestimmten Größen tabellarisch zusammengefasst und die Unterschiede in Abhängigkeit der verschiedenen Randbedingungen und Materialparameter erläutert.

In Bild 5.12 ist die Scherdehnung entlang eines Pfades, der senkrecht zu den erkennbaren Scherfugen definiert wurde, zu unterschiedlichen Beträgen der horizontal eingepprägten Dehnung  $\varepsilon_{xx}$  dargestellt. Der in diesem Bild beschriebene Modellversuch EVD02 wurde mit feinem, enggestuften Quarzsand (Material 1, vgl. Anhang A) durchgeführt, die bezogene Lagerungsdichte zu Versuchsbeginn beträgt  $I_D = 1,0$ . In Bild 5.12 wird deutlich,

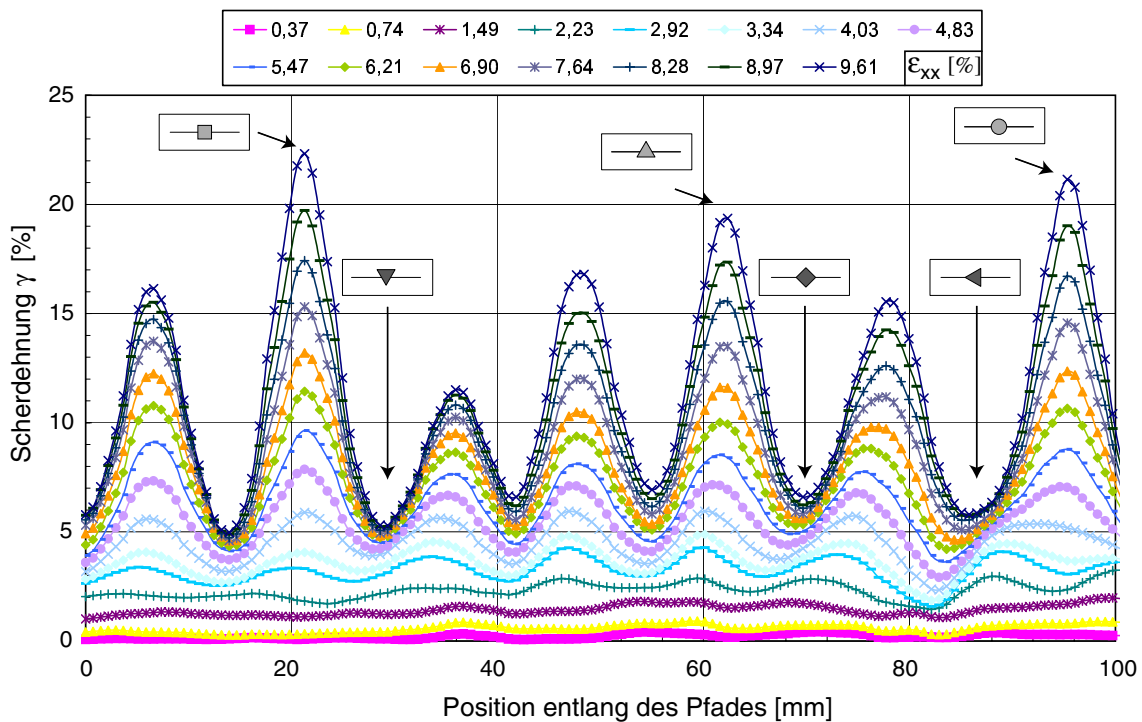


Bild 5.12: Darstellung der Scherdehnung für den Versuch EVD02 mit Quarzsand,  $I_D = 1,0$ ,  $d_{50} = 0,35$  mm und  $U = 1,5$

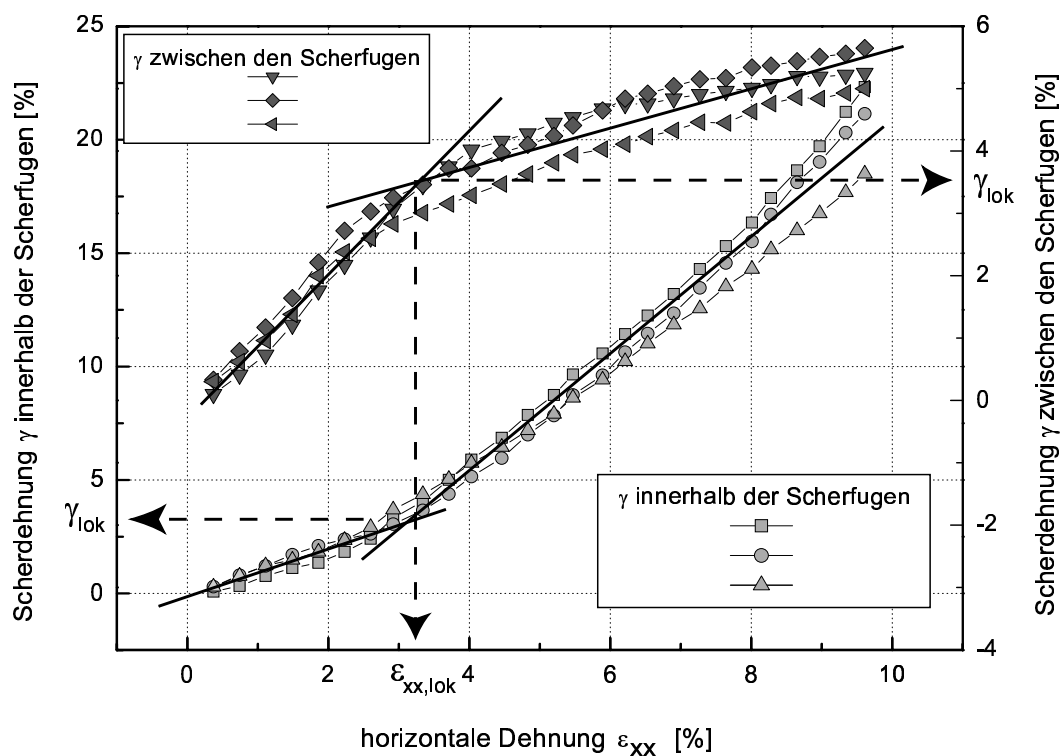


Bild 5.13: Bestimmung der Lokalisierungsdehnungen  $\gamma_{lok}$  und  $\varepsilon_{xx,lok}$  für Versuch EVD02



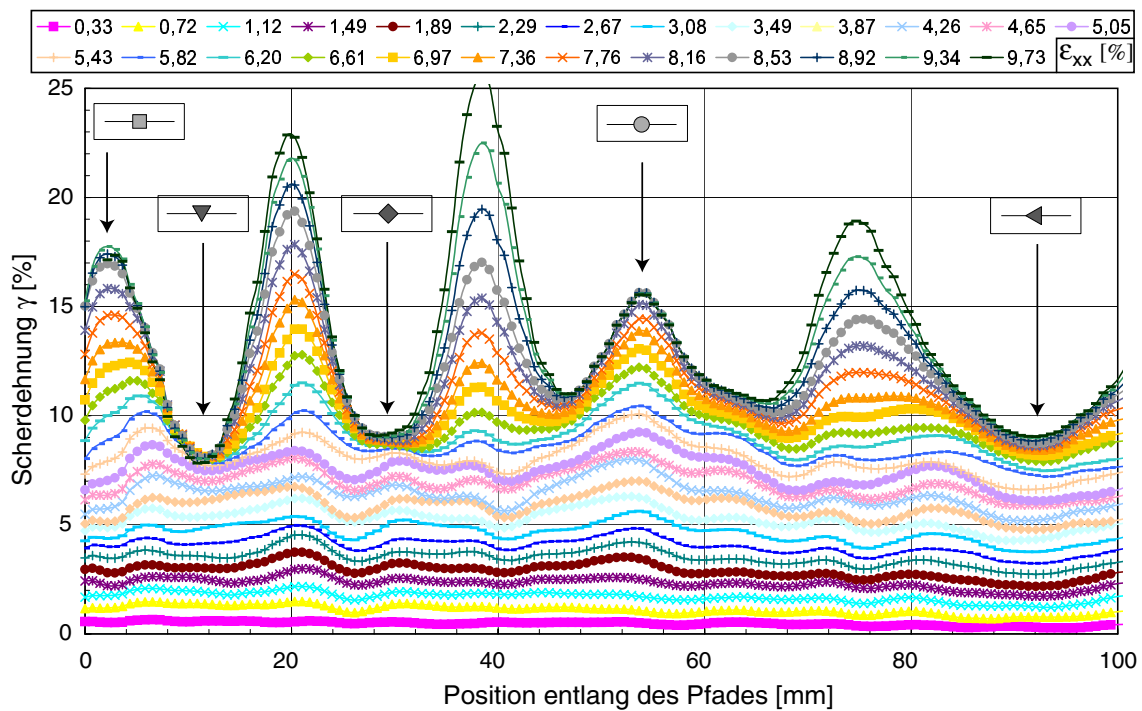


Bild 5.14: Darstellung der Lokalisierungsdehnung für den Versuch EVD13 mit Quarzsand mit  $I_D = 0,70$ ,  $d_{50} = 0,35$  mm und  $U = 1,5$

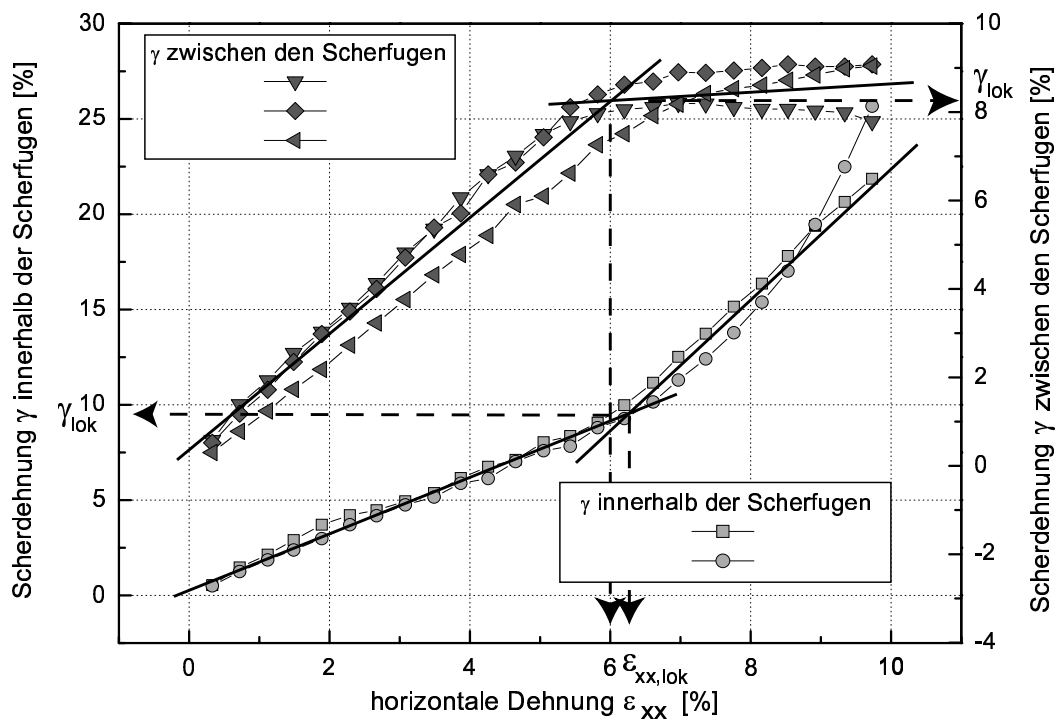


Bild 5.15: Bestimmung der Lokalisierungsdehnungen  $\gamma_{lok}$  und  $\epsilon_{xx,lok}$  für Versuch EVD13

dass die Scherdehnung innerhalb der Probe zu Beginn der Dehnung des Probekörpers gleichmäßig ansteigt. Dieser Anstieg ist gekennzeichnet durch den parallelen Verlauf der Scherdehnungskurven für kleine Beträge horizontal eingepprägter Dehnung  $\varepsilon_{xx}$ . Ausgeprägte Minima oder Maxima sind zu diesem Zeitpunkt nicht zu erkennen. Wird ein bestimmter Wert der horizontalen Dehnung erreicht ( $\varepsilon_{xx} = 2,92\%$  in Bild 5.12), lassen sich Extremwerte der Scherdehnung identifizieren. Diese Extremwerte markieren tendenziell die Orte entlang des Pfades, an denen sich die Scherdehnung konzentriert und sich damit eine Scherfuge ausbilden kann. Wird die horizontale Dehnung weiter gesteigert, akkumuliert sich die Scherdehnung in einigen Bereichen entlang des Pfades, zwischen diesen Bereichen nimmt die Akkumulationsrate ab und tendiert bei großen Beträgen horizontal eingepprägter Dehnung gegen null. Eine genauere Betrachtung der Kurvenverläufe für eine Scherdehnung von  $0\% \leq \gamma \leq 5\%$  lässt erkennen, dass auch schon bei kleinen Werten der horizontalen Dehnung ( $0,37\% \leq \varepsilon_{xx} \leq 1,86\%$ ) Peaks im Scherdehnungsverlauf vorhanden sind, an diesen Positionen bei fortschreitender Dehnung der Probe aber nicht zwangsläufig eine Lokalisierung auftreten muss. Die Darstellung der Scherdehnung in den Bereichen innerhalb und zwischen den Scherflächen über die horizontale Dehnung in Bild 5.13 zeigt ein übereinstimmendes Ergebnis in Bezug auf den Betrag der horizontalen Dehnung am Lokalisierungszeitpunkt von  $\varepsilon_{xx,lok} = 3,2\%$ . Die entsprechenden Scherdehnungen am Lokalisierungspunkt ergeben sich zu  $\gamma_{lok} = 3,3\%$  für die Dehnung innerhalb der Scherfugen und zu  $\gamma_{lok} = 3,5\%$  für die Scherdehnung zwischen den Scherflächen. Die Positionen, an denen die Scherdehnung in Abhängigkeit der horizontalen Dehnung bestimmt wurde, sind in Bild 5.12 durch die zu den Kurvensymbolen korrespondierenden Markierungen gekennzeichnet.

Unterschiede in Bezug auf die Größe der Lokalisierungsdehnung in Abhängigkeit der Lagerungsdichte der Probekörper im Ausgangszustand sind durch einen Vergleich der Scherdehnungsverläufe in den Bildern 5.12 und 5.14 erkennbar. In Bild 5.14 ist die extrahierte Scherdehnung für verschiedene Beträge horizontal eingepprägter Dehnung des Modellversuchs EVD13 dargestellt, der ebenfalls mit feinkörnigem Quarzsand (Material 1, vgl. Anhang A) bei einer geringeren bezogenen Lagerungsdichte von  $I_D = 0,70$  durchgeführt wurde. Bis zu einer horizontalen Dehnung der Probe von  $\varepsilon_{xx} = 5,05\%$  ist keine Lokalisierung zu beobachten. Wird die Probe weiter gedehnt, ist plötzlich eine Konzentration der Scherdehnung in bestimmten Bereichen festzustellen, zwischen diesen Bereichen tendiert die Scherdehnungsrate gegen null. In Bild 5.15 ist die Scherdehnung an den Seitenflächen des Probekörpers über die horizontal eingepprägte Dehnung an verschiedenen Positionen



dargestellt. Die korrespondierenden Orte und Scherdehnungsverläufe sind wiederum durch Symbole in gleichen Graustufen in Bild 5.14 gekennzeichnet. Obwohl die Schnittpunkte der den bi-linearen Verlauf der Kurven beschreibenden Geraden in Bezug auf die horizontale Dehnung am Lokalisierungspunkt nahe beieinander liegen, ergeben sich für die Lokalisierungsdehnungen  $\gamma_{\text{lok}}$  und  $\varepsilon_{\text{xx,lok}}$  Unterschiede in Abhängigkeit der Betrachtung der Scherdehnung innerhalb und zwischen den Scherflächen. Die horizontal eingeprägte Dehnung am Lokalisierungspunkt ergibt sich zu  $6,0 \% \leq \varepsilon_{\text{xx,lok}} \leq 6,2 \%$ . Die Größe der Scherdehnung am Lokalisierungspunkt zwischen den Scherfugen wird zu  $\gamma_{\text{lok}} = 8,3 \%$ , die Größe der Scherdehnung am Lokalisierungspunkt innerhalb der Scherfugen zu  $\gamma_{\text{lok}} = 9,5 \%$  bestimmt.

In Bild 5.16 sind die Ergebnisse der Auswertung der Seitenflächendeformation für einen Probekörper hoher Lagerungsdichte mit weitgestufter Kornverteilungskurve (Material 4, Anhang A) dargestellt (Versuch SFA06). Bild 5.17 zeigt die Scherdehnung innerhalb und zwischen den Scherflächen in Abhängigkeit der horizontal eingepprägten Dehnung. In Analogie zu dem Modellversuch EVD02 in Bild 5.12 ist in Bild 5.16 eine erste Identifikation der Positionen möglicher Scherfugen bei einer horizontalen Dehnung der Probe von  $\varepsilon_{\text{xx}} = 2,69 \%$  möglich. Im Vergleich zum Versuch EVD02 ist bei fortschreitender Dehnung des Probekörpers zwar eine erhöhte Konzentration der Scherdehnung in bestimmten Bereichen zu beobachten, zwischen diesen Bereichen kommt die Akkumulation der Scherdehnung aber nicht zum Stillstand. Die Zunahme der Scherdehnung zwischen den Lokalisierungsbereichen wird erst vernachlässigbar, wenn ein Betrag der Scherdehnung zwischen  $\gamma = 5,9 \%$  und  $\gamma = 10,2 \%$  erreicht wird. Die fortschreitende Akkumulation der Scherdehnung auch in den Bereichen zwischen den Scherflächen kommt in Bild 5.17 durch den nur schwach ausgeprägten Knick in den dargestellten bi-linearen Verläufen der Ausgleichskurve zum Ausdruck. In Bezug auf die horizontale Dehnung  $\varepsilon_{\text{xx,lok}}$  am Lokalisierungspunkt ergeben sich Werte von  $\varepsilon_{\text{xx,lok}} = 3,6 \%$  für die Bereiche innerhalb der Scherfugen und von  $\varepsilon_{\text{xx,lok}} = 3,8 \%$  für die Bereiche zwischen den Scherfugen. Die entsprechenden Scherdehnungen am Lokalisierungspunkt betragen  $\gamma_{\text{lok}} = 5,3 \%$  bzw.  $\gamma_{\text{lok}} = 3,8 \%$ . Die Abweichungen in den Lokalisierungsscherdehnungen ergeben sich aus dem unregelmäßigen Verlauf der Scherdehnung entlang des gewählten Pfades. Die Unregelmäßigkeiten sind wiederum auf die große Bandbreite unterschiedlicher Korngrößen innerhalb des Modellmaterials zurückzuführen. Bild 5.16 ist weiterhin zu entnehmen, dass bei den Modellversuchen mit weitgestuften Quarzsanden die erkennbare Scherfugenstruktur unregelmäßiger erscheint als die Scherfugenstruktur enggestufter Quarzsande. Dieses kommt insbesondere in den

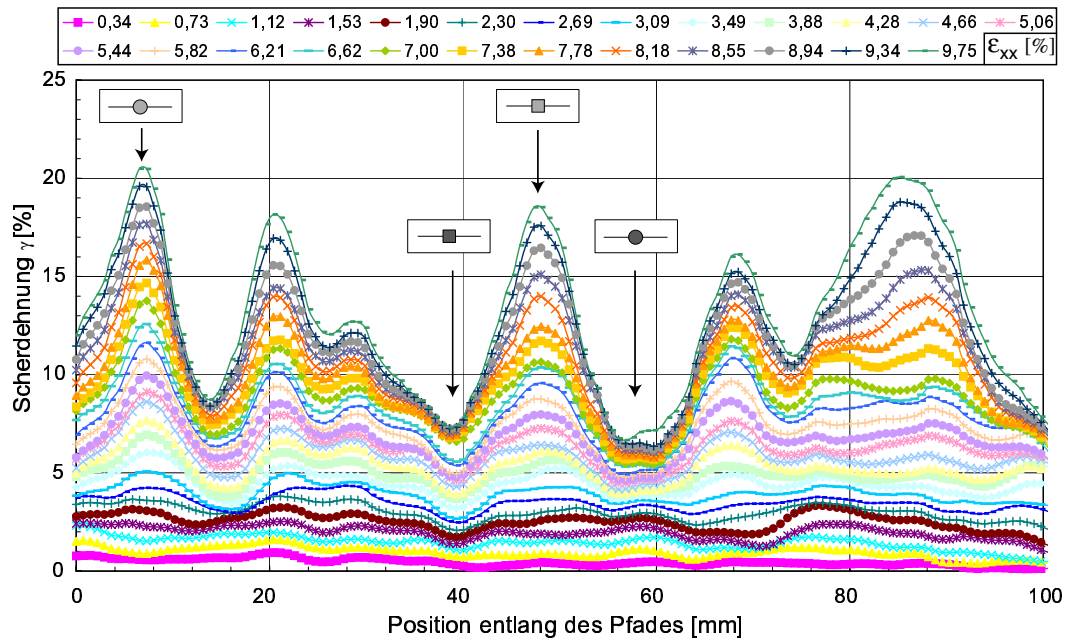


Bild 5.16: Darstellung der Lokalisierungsdehnung für Versuch SFA06 mit Quarzsand mit  $I_D = 1,0$ ,  $d_{50} = 0,89$  mm und  $U = 5,1$

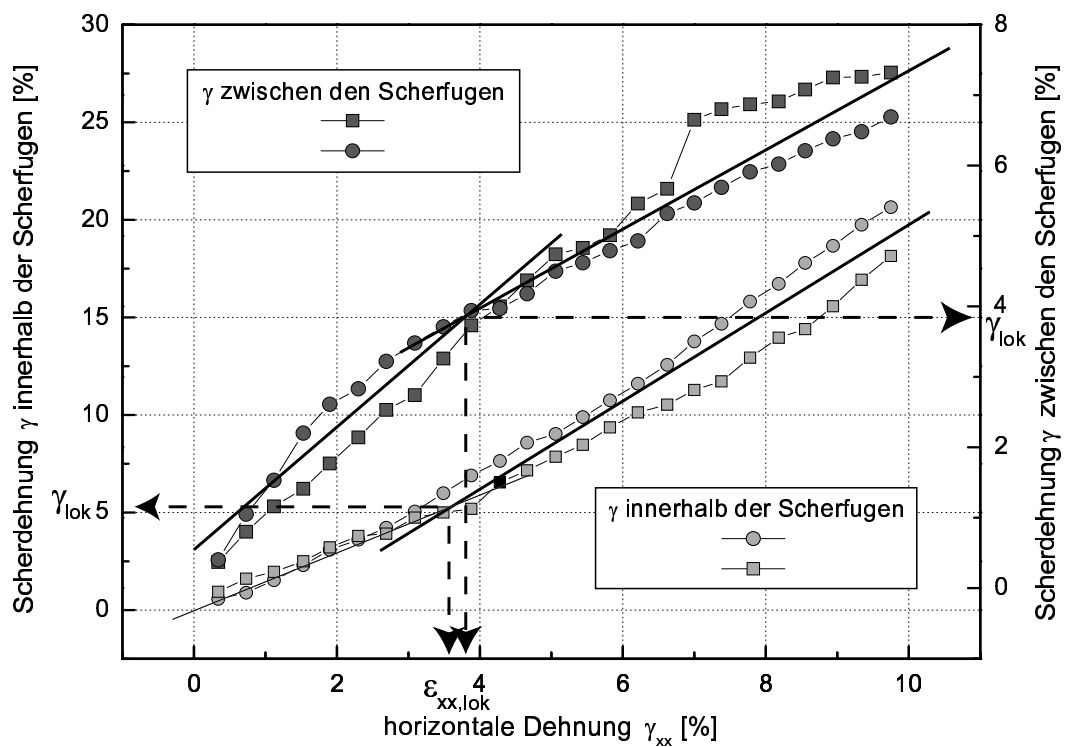


Bild 5.17: Bestimmung der Lokalisierungsdehnungen  $\gamma_{lok}$  und  $\epsilon_{xx,lok}$  für Versuch SFA06

erkennbaren „Doppel-Peaks“ zum Ausdruck. Die Scherfugendicke variiert stark, da sich in den Scherfugen jeweils Körner gleicher Größe ansammeln können, deren absolute Größe sich von Scherfuge zu Scherfuge deutlich unterscheiden kann (vgl. Abschnitt 5.3).

In Tabelle 5.1 sind die Lokalisierungsdehnungen  $\varepsilon_{xx,lok}$  und  $\gamma_{lok}$  in Abhängigkeit der Lagerungsdichte des Materials im Ausgangszustand der Modellversuche zusammengefasst. Da die Lokalisierungsdehnungen für die Bereiche innerhalb und zwischen den Scherfugen in der Regel voneinander abweichen, sind in der Tabelle sowohl die minimalen als auch die maximalen Beträge angegeben. Der Mittelwert für alle Versuche unter identischen Randbedingungen ist jeweils fett dargestellt. Bei den durchgeführten Modellversuchen mit einer Lagerungsdichte von  $I_D = 0,40$  war eine Auswertung der Verformungen an den Seitenflächen der Proben nicht möglich, da sich, bedingt durch die geringe Lagerungsdichte, bei der Verformung der Proben die Körner der feinen Kornfraktionen bevorzugt an der Glasscheibe anlagern. Die feinen Körner bleiben an der Scheibe haften und verdecken die eigentliche Verformung des Probekörpers. Aus diesem Grund ist eine Bestimmung des Deformationsfelds und der Dehnung an den Seitenflächen der Proben mit Hilfe der DIC-Methode und damit die exakte Bestimmung des Lokalisierungspunktes nicht möglich. Um die Größe der Lokalisierungsdehnung für die Versuche mit der Lagerungsdichte  $I_D = 0,40$  abzuschätzen, werden die Röntgenaufnahmen ausgewertet. Aus dieser Auswertung wird deutlich, dass sich die Scherfugen bei einer horizontalen Dehnung der Probe entwickeln, die im Bereich zwischen  $\varepsilon_{xx} = 7,5 \%$  und  $\varepsilon_{xx} = 10,0 \%$  liegt.

Die Werte in der Tabelle 5.1 zeigen, dass die Größe der Lokalisierungsdehnungen  $\varepsilon_{xx,lok}$  und  $\gamma_{lok}$  stark von der Lagerungsdichte des Probekörpers im Ausgangszustand beeinflusst wird. Während bei einer dicht gelagerten Probe die Lokalisierung der Verformung bei einer horizontal eingepprägten Dehnung von  $\varepsilon_{xx,lok,I_D=1,0} = 3,30 \%$  beobachtet wird, beträgt die horizontale Dehnung am Lokalisierungspunkt bei einer bezogenen Lagerungsdichte von  $I_D = 0,82$   $\varepsilon_{xx,lok,I_D=0,82} = 5,20 \%$ , bei einer bezogenen Lagerungsdichte von  $I_D \approx 0,70$  im Mittel  $\varepsilon_{xx,lok,I_D=0,70} = 6,16 \%$  und bei einer bezogenen Lagerungsdichte von  $I_D \approx 0,55$  im Mittel  $\varepsilon_{xx,lok,I_D=0,55} = 7,42 \%$ . Die Differenz zwischen dem minimalen und maximalen Wert entspricht einem Unterschied in der Verschiebung der beweglichen Wand des Versuchsbehälters von  $\Delta u_{xx,lok} = 2,06$  cm. Die Größe der Scherdehnung am Lokalisierungspunkt in einem dicht gelagerten Sand beträgt  $\gamma_{lok,I_D=1,0} = 3,40 \%$ , die Scherdehnung am Lokalisierungspunkt für einen mitteldicht gelagerten Quarzsand weist mit einem Wert von  $\gamma_{lok,I_D=0,55} = 11,17 \%$  einen um  $\Delta \gamma_{lok} = 7,77 \%$  höheren Betrag auf. Anhand dieser Werte wird deutlich, dass mit abnehmender Lagerungsdichte eine größere Scherdehnung

Tabelle 5.1: Der Einfluss der bezogenen Lagerungsdichte  $I_D$  auf die Größe der Lokalisierungsdehnungen  $\varepsilon_{xx,lok}$  und  $\gamma_{lok}$ 

Versuch	$I_D$ [-]	$\varepsilon_{xx,lok}$ [%]			$\gamma_{lok}$ [%]		
		min	max	$\emptyset$	min	max	$\emptyset$
EVD02	1,08	3,20	3,20	3,20	3,30	3,50	3,40
PIV06	1,00	3,35	3,43	3,39	3,40	3,40	3,40
$\emptyset$	1,04	3,28	3,32	<b>3,30</b>	3,35	3,45	<b>3,40</b>
EVD16	0,82	4,70	5,70	<b>5,20</b>	6,30	7,90	<b>7,10</b>
EVD05	0,63	7,05	7,13	7,09	8,78	12,01	10,40
EVD11	0,67	4,90	5,63	5,27	8,52	10,51	9,52
EVD12	0,67	5,88	6,45	6,17	8,50	10,00	9,25
EVD13	0,65	6,00	6,20	6,10	8,30	9,50	8,90
$\emptyset$	0,66	5,96	6,35	<b>6,16</b>	8,53	10,51	<b>9,52</b>
EVD15	0,55	6,80	8,04	<b>7,42</b>	10,15	12,18	<b>11,17</b>
EVD09/10	0,41	7,50	10,00	-	-	-	-

innerhalb der Probe aktiviert werden muss, um eine Lokalisierung der Verformung in einem System von Scherfugen zu ermöglichen. Die Darstellung der Lokalisierungsdehnungen über die bezogene Lagerungsdichte in Bild 5.18 zeigt sowohl für die horizontal eingeprägte Dehnung als auch für die Scherdehnung einen linearen Zusammenhang. Extrapoliert man die Größe der Lokalisierungsdehnung gemäß dieses Zusammenhangs auf eine bezogene Lagerungsdichte von  $I_D = 0,40$ , ergibt sich ein Wert von  $\varepsilon_{xx,lok,I_D=0,40} = 8,30$  %. Dieser Wert bestätigt das Ergebnis der Auswertung der Röntgenbilder der Versuche mit lockerer Lagerung, wonach die Größe der Lokalisierungsdehnung im Bereich  $7,5\% \leq \varepsilon_{xx} \leq 10,0\%$  liegt.

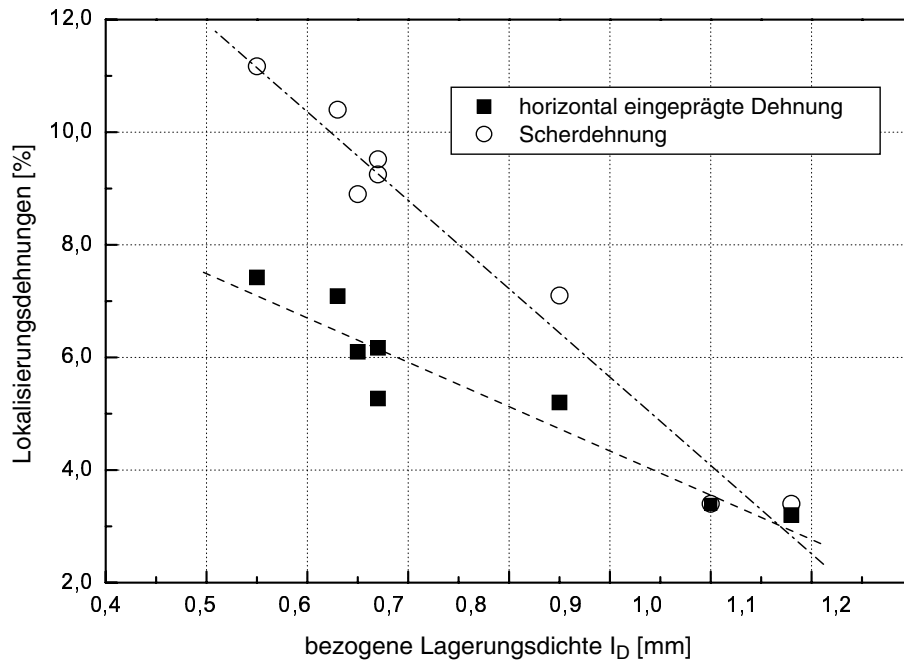
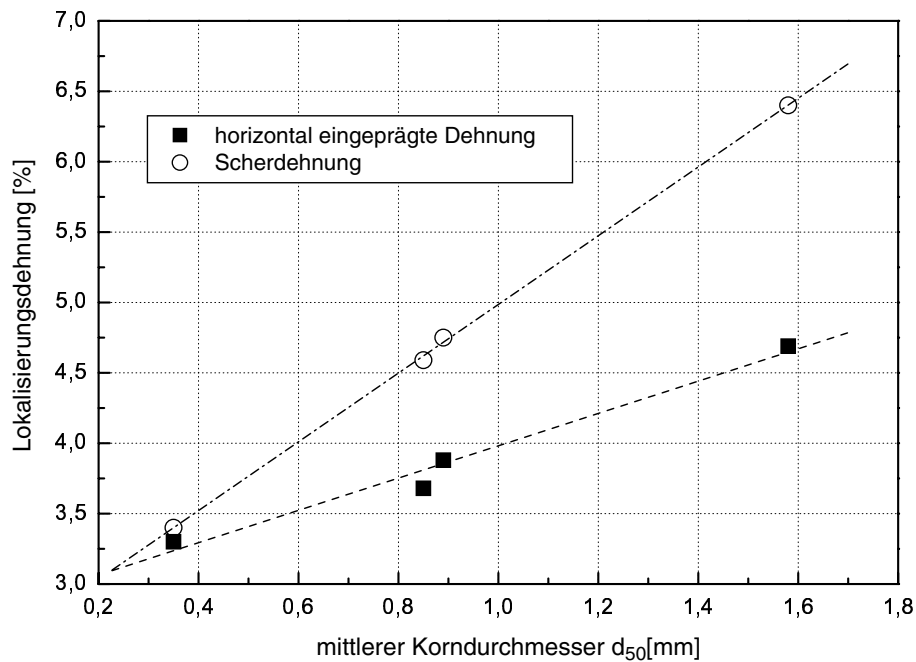
Tabelle 5.1 ist weiterhin zu entnehmen, dass die Abweichung der Einzelwerte vom Mittelwert einer Gruppe mit identischer Lagerungsdichte bei abnehmender Lagerungsdichte zunimmt. In der Darstellung der Scherdehnungsverläufe entlang der jeweiligen Pfade für eine dichte Lagerung in Bild 5.12 und der Darstellung der Scherdehnungsverläufe für eine mitteldichte Lagerung in Bild 5.14 wird dieser Unterschied durch die Regelmäßigkeit bzw. Unregelmäßigkeit der Ausprägung der Minima und Maxima der Kurven deutlich. Während bei dichter Lagerung ein regelmäßiger Kurvenverlauf und annähernd identische

Werte insbesondere für die Minima der Kurven zu beobachten sind, weisen sowohl die Maximal- als auch die Minimalwerte bei mitteldichter Lagerung starke Unterschiede auf.

Tabelle 5.2: Die Lokalisierungsdehnungen  $\varepsilon_{xx,lok}$  und  $\gamma_{lok}$  in Abhängigkeit der granulometrischen Materialparameter mit  $I_D \geq 1,0$

Versuch	$d_{50}$ [mm]	$U$ [-]	$\varepsilon_{xx,lok}$ [%]			$\gamma_{lok}$ [%]		
			min	max	$\emptyset$	min	max	$\emptyset$
EVD02	0,35	1,5	3,20	3,20	3,20	3,30	3,50	3,40
PIV06	0,35	1,5	3,35	3,43	3,39	3,40	3,40	3,40
$\emptyset$			3,28	3,32	<b>3,30</b>	3,35	3,45	<b>3,40</b>
SFA19	0,89	1,5	3,76	4,00	<b>3,88</b>	4,20	5,30	<b>4,75</b>
SFA04	1,58	1,5	4,69	4,69	<b>4,69</b>	6,40	6,40	<b>6,40</b>
SFA06	0,85	5,1	3,56	3,79	<b>3,68</b>	3,83	5,34	<b>4,59</b>

Liegt eine konstant dichte Lagerung der Probekörper vor und werden die granulometrischen Eigenschaften des Probenmaterials geändert, wird die Größe der Lokalisierungsdehnungen von der mittleren Korngröße  $d_{50}$  des Modellmaterials beeinflusst. Der Einfluss der Ungleichförmigkeit  $U$  kann dagegen vernachlässigt werden. Dieses wird anhand der in Tabelle 5.2 zusammengefassten Werte deutlich. Für eine konstante Ungleichförmigkeit von  $U = 1,5$  vergrößert sich die horizontal eingeprägte Dehnung am Lokalisierungspunkt linear von  $\varepsilon_{xx,lok} = 3,30$  % für eine mittlere Korngröße von  $d_{50} = 0,35$  mm über  $\varepsilon_{xx,lok} = 3,88$  % für eine mittlere Korngröße von  $d_{50} = 0,89$  mm bis auf eine Größe von  $\varepsilon_{xx,lok} = 4,69$  % für eine mittlere Korngröße von  $d_{50} = 1,58$  mm. Auch die Werte für die Scherdehnung am Lokalisierungspunkt zeigen einen Anstieg der Lokalisierungsdehnung mit zunehmender mittlerer Korngröße von  $\gamma_{lok} = 3,40$  % über  $\gamma_{lok} = 4,75$  % auf  $\gamma_{lok} = 6,40$  %. Die Beträge der Lokalisierungsdehnungen aus Tabelle 5.2 sind in Bild 5.19 als Funktion des mittleren Korndurchmessers dargestellt. Sowohl die Werte für die horizontal eingeprägten Dehnungen als auch Scherdehnungsgrößen können durch eine lineare Funktion approximiert werden. Wird die Ungleichförmigkeit des Materials bei ähnlichem mittleren Korndurchmesser variiert (Versuche SFA06 und SFA19), sind keine signifikanten Änderungen in den Größen der Lokalisierungsdehnungen zu beobachten (vgl. Tabelle 5.2).

Bild 5.18: Lokalisierungsdehnungen in Abhängigkeit der bezogenen Lagerungsdichte  $I_D$ Bild 5.19: Lokalisierungsdehnungen in Abhängigkeit des mittleren Korndurchmessers  $d_{50}$

Die Extensions-Modellversuche innerhalb der Versuchsreihen zur Variation der Probengeometrie und des Spannungsniveaus und zur Untersuchung des Einflusses der dynamischen Materialparameter ( $B \neq \text{konst.}$ ) wurden ausschließlich unter Verwendung von dicht gelagertem Quarzsand mit einem konstanten mittleren Korndurchmesser und einer konstanten Ungleichförmigkeit durchgeführt. Die Versuchsauswertung in Bezug auf die Bestimmung der Lokalisierungsdehnungen ergibt für die genannten Versuchsreihen ausschließlich Größen, die im Wertebereich der in Tabelle 5.2 zusammengefassten Ergebnisse für dicht gelagerte Proben mit konstanter Ungleichförmigkeit von  $U = 1,5$  und mittlerem Korndurchmesser  $d_{50} = 0,35$  mm liegen. Die Größe der Lokalisierungsdehnung wird von der geänderten Probengeometrie im Ausgangszustand, der Variation des Spannungsniveaus und der Änderung des Parameters  $B$  (Variation der Belastungsgeschwindigkeit) nicht beeinflusst.

### 5.3 Scherfugendicke

Die Bestimmung der Scherfugendicke wird gemäß Abschnitt 3.4.3 mit Hilfe der Approximation der normierten Scherdehnung mit einer Gauss-Verteilung entlang eines Pfades senkrecht zu den existierenden Scherflächen durchgeführt (vgl. Bild 3.9). Nach dieser Methode können auch schon vor dem in Kapitel 5.2 definierten Lokalisierungspunkt Anhaltswerte für die 'Breite' der Scherflächen bestimmt werden. Im Folgenden wird unter der Breite einer Scherfuge allerdings die Dicke der Scherfugen nach dem Entstehungszeitpunkt verstanden. Es ist darauf hinzuweisen, dass die messbare Scherfugendicke für die einzelnen Versuche jeweils in einem gewissen Wertebereich um einen Mittelwert schwankt. Aus diesem Grund werden nachfolgend obere und untere Grenzen für die Scherfugendicke angegeben.

In Bild 5.20 sind die normierten Scherdehnungsverläufe und die Scherfugendicken für den Versuch PIV06 zu verschiedenen Dehnungsbeträgen nach dem Erreichen der Lokalisierungsdehnung  $\varepsilon_{xx,lok} = 3,39$  % zusammengefasst. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Dicke der Scherflächen mit zunehmender horizontaler Dehnung des Probekörpers ansteigt. Dieser Anstieg ist bei allen durchgeführten Modellversuchen zu beobachten, bei dicht gelagerten Proben wird die Zunahme der Scherfugendicke maximal. Zurückgeführt werden kann die Änderung der Scherflächendicke auf das dilatante Verformungsverhalten des Materials unter einer Scherbeanspruchung. Aus Bild 4.9 wird deutlich, dass die volumetrische Vergrößerung der Proben am Peak der Spannungs-Dehnungskurve und damit am Lokali-

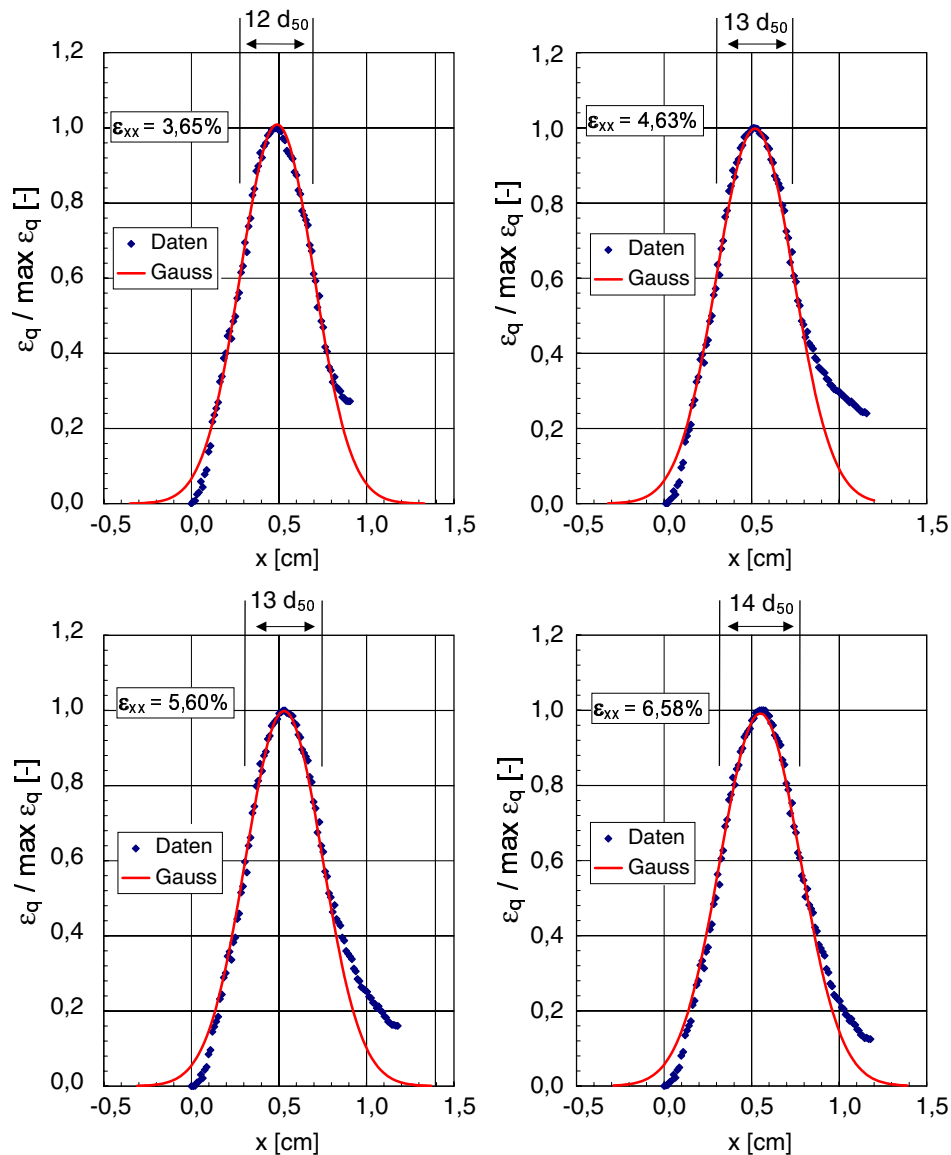


Bild 5.20: Vergrößerung der Scherfugendicke bei verschiedenen horizontalen Dehnungsbeiträgen nach dem Erreichen der Lokalisierungsdehnung (PIV06)

sierungspunkt noch nicht beendet ist. Wird die Probe einer weiteren Scherbeanspruchung ausgesetzt, nimmt die Dicke der Scherflächen weiter bis zum Erreichen der Volumenkonstanz zu. Bild 4.9b ist weiterhin zu entnehmen, dass die Größe der Volumenzunahme der Triaxialproben unter vergleichbaren Belastungssinkrementen mit zunehmender Lagerungsdichte ansteigt. Dieses Verhalten ist auf die beobachtete Abhängigkeit der Vergrößerung der Scherfugendicke von der Lagerungsdichte des Probekörpers zurückzuführen. Die Erkenntnis ansteigender Scherfugendicken bestätigt experimentelle Ergebnisse von Yoshida et al. [142] oder Yoshida & Tatsuoka [141], die bei Biaxialversuchen eine Verbreiterung



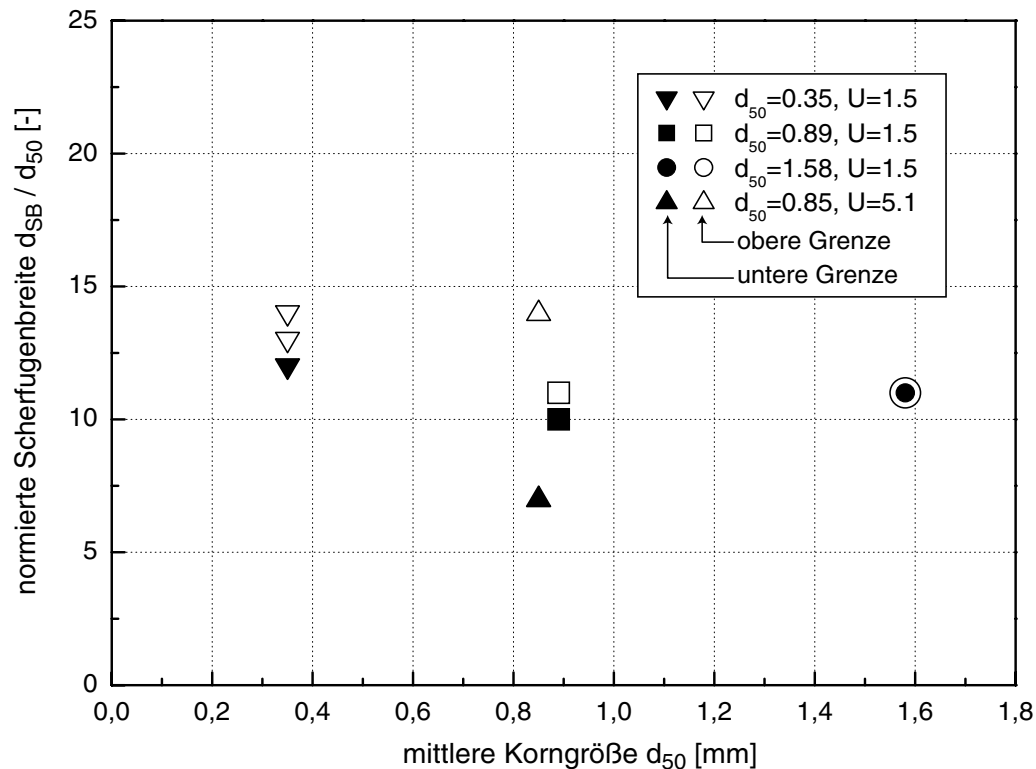


Bild 5.21: Scherfugendicke  $d_{SB}$  in Abhängigkeit der mittleren Korngröße  $d_{50}$  und der Ungleichförmigkeitszahl  $U$ ,  $I_D \geq 1,0 = \text{konstant}$

der Lokalisierungszone mit fortschreitender Stauchung der Probe beobachten.

In Bild 5.21 ist die mit der mittleren Korngröße normierte Scherfugendicke  $d_{SB}/d_{50}$  über die mittlere Korngröße  $d_{50}$  für verschiedene Extensions-Modellversuche mit dicht gelagerten Quarzsanden aufgetragen. Die nicht ausgefüllten Symbole bezeichnen dabei die obere Grenze, die ausgefüllten Symbole repräsentieren die untere Grenze der gemessenen Dicken. Deutlich ist zu erkennen, dass sich für alle Sande mit konstanter Ungleichförmigkeit  $U$  und variablem mittleren Korndurchmesser annähernd identische Scherfugendicken einstellen. Die Dicken liegen zwischen zwölf- und 14-fachem mittleren Korndurchmesser für  $d_{50} = 0,35$  mm, zwischen zehn- und elf-fachem mittleren Korndurchmesser für  $d_{50} = 0,89$  mm und elf-fachem mittleren Korndurchmesser für  $d_{50} = 1,58$  mm. Die Abweichung der zu einer Korngröße gehörenden Werte ist aufgrund der dichten Lagerung der Materialien mit  $I_D \geq 1,0$  und der enggestuften Körnungslinie sehr gering.

Vergleicht man die Scherfugendicken in den Modellversuchen, die mit Sanden annähernd gleicher mittlerer Korndurchmesser ( $0,85 \leq d_{50} \leq 0,89$ ), aber unterschiedlicher Ungleichförmigkeit  $U$  durchgeführt wurden, stellt man fest, dass mit zunehmender Un-

gleichförmigkeit die Abweichung der einzelnen Scherfugendicken vom Mittelwert ansteigt. Während das Verhältnis  $d_{SB}/d_{50}$  für eine Ungleichförmigkeit von  $U = 1,5$  den Wert zehn bis elf annimmt, variiert die Scherfugendicke für einen weitgestuften Sand mit  $U = 5,1$  zwischen sieben- und 14-fachem mittleren Korndurchmesser. Der Mittelwert ist für beide Ungleichförmigkeiten mit  $d_{SB,U=1,5} = 10,5 d_{50} = d_{SB,U=5,1}$  identisch.

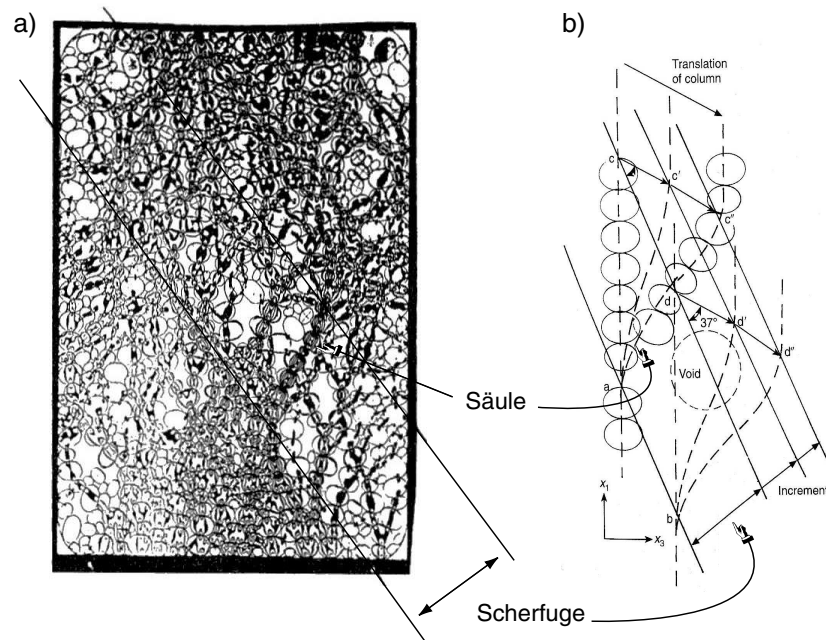


Bild 5.22: Mikrostruktur einer Scherfuge a) photoelastische Aufnahme b) Modell (Oda & Kazama [93])

Die erhöhte Abweichung vom Mittelwert der Scherfugendicke lässt sich erklären, wenn man die Mikrostruktur der Scherfuge näher betrachtet. Nach Oda & Kazama [93] kann die Mikrostruktur einer sich bildenden Scherfuge mit einem Modell beschrieben werden, das auf der experimentellen Untersuchung von Sandproben unter biaxialer Belastung beruht (vgl. Bild 5.22). Mit Hilfe photoelastischer Methoden und anhand von Dünnschliffen der Probekörper stellen Oda & Kazama fest, dass sich während der Verfestigungsphase des Modellbodens unter Belastung in den Bereichen späterer Scherfugen die Bodenkörner säulenartig anordnen. Jede Säule wird dabei von sieben bis acht Körnern aufgebaut. Ist der Peak der Spannungs-Verformungs-Kurve erreicht, knicken die Kornsäulen aus. Die einzelnen Körner rotieren dabei in Richtung des abgleitenden Sandkörpers, die Mittelpunkte bewegen sich auf Geraden, die mit der Scherfugenachse den Dilatanzwinkel des Modellmaterials einschließen. Zwischen den ausknickenden Kornsäulen bilden sich auf-

grund der Auflockerung des Bodens sehr große Poren mit einer Porenzahl, die größer ist als die mit bodenmechanischen Standardversuchen bestimmte Porenzahl  $e_{max}$ . Aufgrund des Rotationswiderstandes der Körner, der aus der Reibung zwischen den einzelnen Partikeln resultiert, kollabieren die Kornsäulen erst bei sehr großen Verformungen. Bei enggestuften Böden werden die Kornsäulen aus sieben bis acht Körnern ähnlicher Größe gebildet. Hieraus resultiert eine Scherfugendicke, deren Maximal- und Minimalwerte nur geringfügig von dem Mittelwert abweichen. Bei weitgestuften Böden ist es möglich, dass in den Säulen innerhalb einer Scherfuge vorwiegend Körner angeordnet sind, deren Durchmesser sich stark von dem mittleren Korndurchmesser unterscheiden. Aus dem vermehrten Auftreten von Kornsäulen, die aus vorwiegend kleinen oder großen Partikeln zusammengesetzt sind, resultieren Scherfugendicken, deren Mächtigkeit ebenfalls stark um eine mittlere Größe schwankt. Dieses schlägt sich in der unterschiedlichen Varianz der Scherfugendicken in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeit  $U$  in Bild 5.21 nieder.

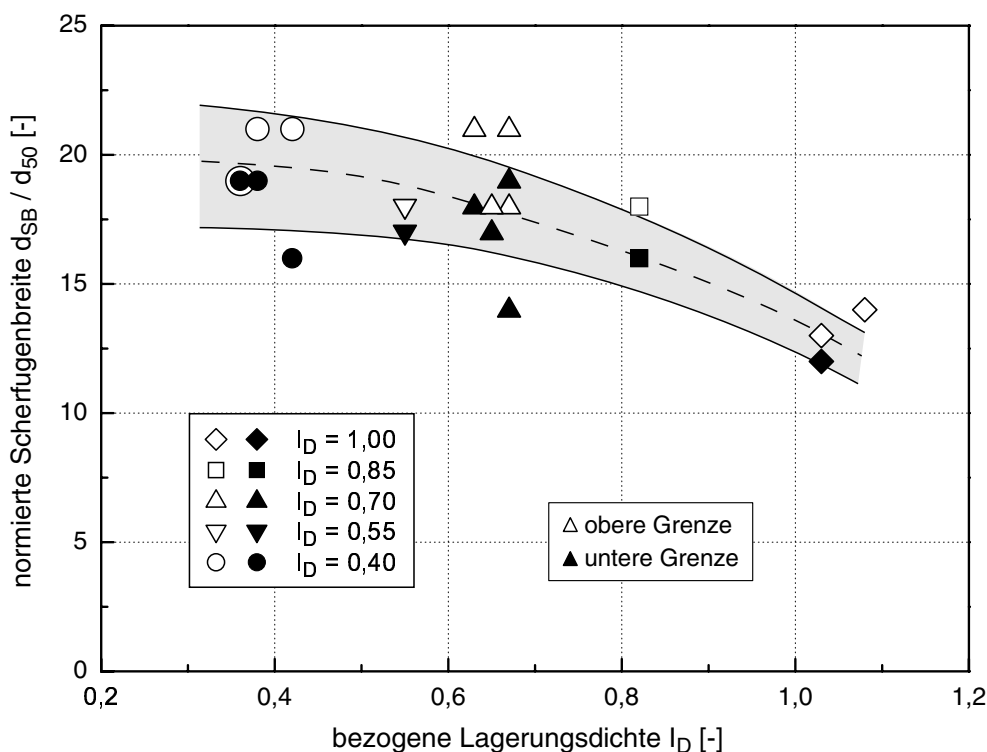


Bild 5.23: Scherfugendicke  $d_{SB}$  in Abhängigkeit der bezogenen Lagerungsdichte  $I_D$

Die mit der mittleren Korngröße normierte Scherfugendicke  $d_{SB}/d_{50}$  in Abhängigkeit der bezogenen Lagerungsdichte  $I_D$  des Versuchskörpers ist in Bild 5.23 dargestellt. Die ausgefüllten Symbole bezeichnen wiederum die kleinsten Werte der jeweils bestimmten

Scherfugendicke. Die nicht ausgefüllten Symbole stellen die obere Grenze der Dicke der Lokalisierungszonen dar. Die Messwerte der oberen und der unteren Grenze wurden jeweils mit Kurven approximiert und somit die Bandbreite der Scherfugemächtigkeit in Abhängigkeit der bezogenen Lagerungsdichte gekennzeichnet. Alle Versuche mit unterschiedlicher Lagerungsdichte wurden mit demselben Quarzsand durchgeführt ( $U = \text{konst.}$ ,  $d_{50} = \text{konst.}$ ).

Bild 5.23 lässt sich entnehmen, dass die Scherfugendicke  $d_{SB}$  und die Abweichung der Einzelergebnisse vom Mittelwert mit abnehmender Lagerungsdichte ansteigen. Während das Verhältnis  $d_{SB}/d_{50}$  für bezogene Lagerungsdichten  $I_D \geq 1,0$  Werte zwischen zwölf und vierzehn annimmt und die Einzelwerte damit nur geringfügig schwanken, kann der mittlere Betrag der Scherfugendicke für eine bezogene Lagerungsdichte von  $I_D = 0,40$  mit dem 19-fachen mittleren Korndurchmesser  $d_{50}$  abgeschätzt werden. Die Einzelwerte der Messungen schwanken zwischen  $16d_{50}$  und  $22d_{50}$ .

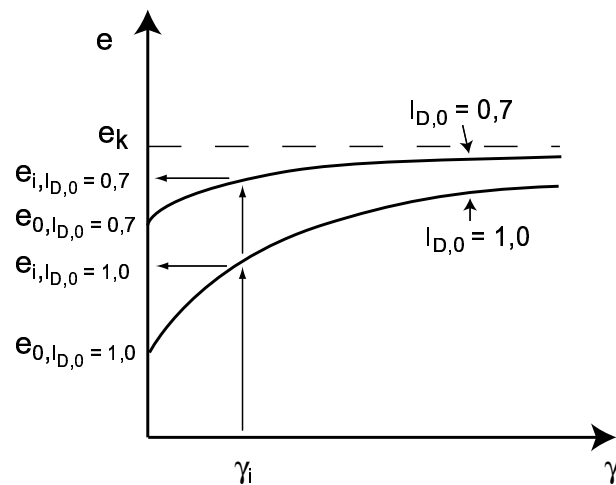


Bild 5.24: Porenzahlentwicklung bei unterschiedlicher Lagerungsdichte im Ausgangszustand

Die Vergrößerung der Scherfugendicke, welche bei einer Abnahme der bezogenen Lagerungsdichte zu beobachten ist, lässt sich auf die unterschiedliche Porenzahl im Ausgangszustand der Proben zurückführen. Wie in Bild 5.24 zu erkennen ist, weist die Probe mit höherer Porenzahl im Ausgangszustand  $e_{0,I_{D,0}=0,70}$  auch nach einer Scherung des Probekörpers um den Betrag  $\gamma_i$  eine höhere Porenzahl auf als die ursprünglich dicht gelagerte ( $e_{i,I_{D,0}=0,70} > e_{i,I_{D,0}=1,0}$ ). Dieses ist unabhängig davon, mit welchem Betrag der Dehnung  $\gamma_i$  die Probe beaufschlagt wurde. Die unterschiedliche Porosität der Proben zum Zeit-

punkt der Entstehung der Scherflächen wird von der Eigenschaft mitteldicht oder locker gelagerter Proben verstärkt, nach der bis zur Entwicklung der Scherflächen größere Scherdehnungen innerhalb der Probe aktiviert werden müssen als für dicht gelagerte Proben. Der Unterschied in der Porosität der Probekörper wird durch die stärkere Aufweitung der Scherflächen bei dicht gelagerten Proben nicht ausgeglichen. Die größere Aufweitung ist dabei durch den größeren Dilatanzwinkel von  $\psi_{I_D=1,0} = 14,5^\circ > \psi_{I_D=0,70} = 7,8^\circ$  von dicht gelagerten Proben im Gegensatz zu mitteldicht gelagerten Proben bedingt (vgl. Tab. 4.1).

Die erzielten Erkenntnisse zur Abhängigkeit der Scherfugendicke von der Lagerungsdichte der untersuchten Probekörper im Ausgangszustand werden von Mokni & Desrues [81] anhand von undrainierten Biaxialversuchen an dicht und locker gelagerten Sandproben bestätigt. Das Verhältnis von Scherfugendicke und mittlerem Korndurchmesser  $d_{SB}/d_{50}$  für die Scherflächen in den dicht gelagerten Probekörpern weist im Mittel einen Wert von 22,2 auf, für die locker gelagerten Probekörper ergibt sich ein mittlerer Verhältniswert von 27,0.

Für alle durchgeführten Modellversuche gilt, dass die gemessenen Scherfugendicken am Lokalisierungspunkt in Abhängigkeit der verschiedenen Randbedingungen zwischen den Grenzscherfugenbreiten von  $7d_{50} < d_{SB} < 21d_{50}$  liegen. Diese Grenzen sind durch zahlreiche experimentelle und theoretischen Untersuchungen bestätigt [82, 86, 106, 111, 124, 129, 142].

## 5.4 Der Einfluss der granulometrischen Materialeigenschaften

### 5.4.1 Methodik und Versuchsprogramm

In dieser Versuchsserie wird der Einfluss der granulometrischen Stoffeigenschaften auf die Geometrie und die weitere Entwicklung der Scherfugenmuster untersucht. Alle Versuche werden mit Quarzsand unterschiedlicher Kornverteilungen durchgeführt. Der Einfluss der Korngröße des Materials wird dabei durch die Variation der mittleren Korngröße  $d_{50}$  bei konstanter Ungleichförmigkeitszahl  $U = d_{60}/d_{10}$  berücksichtigt. Es werden Sande mit drei unterschiedlichen mittleren Korndurchmessern untersucht. Die nachfolgend verwendeten Bezeichnungen 'fein', 'mittel' und 'grob' beziehen sich nicht auf die Einteilung des Sandkornanteils in Feinkorn, Mittelkorn und Grobkorn bei der Bestimmung der Korngrößen-

verteilung nach DIN 18 123, sondern dienen nur der Unterscheidung der verwendeten Quarzsande.

In weiteren Modellversuchen im Extensionsgerät wird die Ungleichförmigkeitszahl  $U$  bei konstantem mittleren Korndurchmesser  $d_{50}$  variiert, um den Einfluss der Korngrößenverteilung auf die Geometrie der Scherfugensysteme zu analysieren. Hierzu werden zwei Modellversuche mit einer Ungleichförmigkeit des Bodens von  $U = 5,1$  durchgeführt, der mittlere Korndurchmesser entspricht mit  $d_{50,U=5,1} = 0,85$  mm in etwa dem Korndurchmesser von  $d_{50,U=1,5} = 0,89$  mm für den enggestuften Modellboden Nr. 2. Das Größtkorn des ungleichförmigen Bodens  $d_{max,U=5,1} = 4,0$  mm entspricht dem Größtkorn des enggestuften Quarzsandes (Material 3) mit einer mittleren Korngröße von  $d_{50} = 1,58$  mm. Die Kornverteilungen der verwendeten Quarzsande sind in Bild A.1 in Anlage A dargestellt.

Die Versuchsdaten dieser Versuchsreihe sind in Tabelle 5.3 zusammengefasst.

Tabelle 5.3: Versuchsreihe 1: Einfluss der granulometrischen Eigenschaften

Versuch	Material (vgl. Anhang A)	mittlerer Korndurchmesser $d_{50}$ [mm]	Korngrößenbereich $d$ [mm]	Ungleichförmigkeitszahl $U$ [-]
SFA02/SFA03	1	0,35	0,1 - 0,71	1,5
SFA04/SFA05	3	1,58	1,0 - 4,0	1,5
SFA06/SFA07	4	0,85	0,06 - 4,0	5,1
SFA19/SFA20	2	0,89	0,5 - 1,2	1,5

## 5.4.2 Versuchsergebnisse

In Bild 5.25 sind die Ergebnisse der Modellversuche bezüglich der Variation des mittleren Korndurchmessers  $d_{50}$  bei einer konstanten Ungleichförmigkeit des Modellmaterials von  $U = 1,5$  dargestellt. Die Werte auf der linken Ordinatenachse bezeichnen den Scherfugenabstand  $a$ , die Werte auf der rechten Ordinatenachse geben die Neigung  $\vartheta$  der Scherflächen wieder. Sowohl der Abstand als auch die Neigung der Scherfugen sind jeweils über die Größe der horizontal eingepprägten Dehnung  $\varepsilon_{xx}$  aufgetragen. Symbole mit gleichen Graustufen und Formen geben die Ergebnisse für denselben Modellversuch wieder.

Bezüglich des Verlaufs des Scherflächenabstandes und der Scherfugenneigung mit zunehmender horizontaler Dehnung werden die bereits in Kapitel 5.1.2 erläuterten Abhängig-

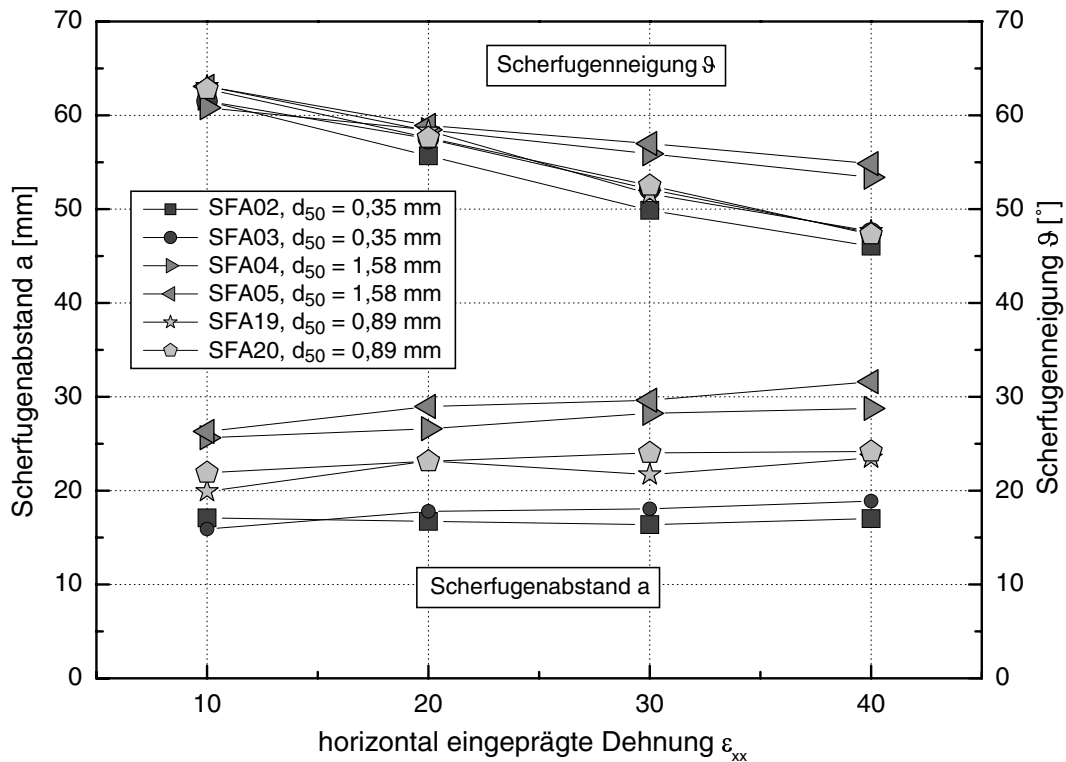


Bild 5.25: Scherfugenabstand und Scherfugeneigung in Abhängigkeit des mittleren Korndurchmessers  $d_{50}$  ( $U = 1,5 = \text{konstant}$ )

keiten bestätigt, wonach die Neigung der Scherfugen mit zunehmender Dehnung linear abnimmt und sich der Abstand der Scherflächen nicht oder nur wenig ändert. Auffällig bei der Beurteilung der Scherfugeneigung ist, dass sich unterschiedliche Gradienten im Hinblick auf die Neigungsänderung der Scherflächen in Abhängigkeit der mittleren Korngröße  $d_{50}$  ergeben. Bei allen Versuchen weichen die Neigungen der Scherflächen bei einer horizontal eingepprägten Dehnung von  $\varepsilon_{xx} = 10\%$  mit Werten zwischen  $60,08^\circ \leq \vartheta \leq 63,09^\circ$  nur geringfügig voneinander ab. Wird die Probe weiter gedehnt, verringert sich die Neigung der Scherfugen für die Sande mit den mittleren Korngrößen  $d_{50} = 0,35$  mm und  $d_{50} = 0,89$  mm bis auf einen Wert zwischen  $\vartheta = 46,05^\circ$  und  $\vartheta = 47,65^\circ$ . Der Gradient der Scherfugeneigung in den Modellversuchen mit grobkörnigem Sand (SFA04/SFA05) ist deutlich kleiner als bei den Versuchen mit feiner und mittlerer Körnung. Bei einer Dehnung von  $\varepsilon_{xx} = 40\%$  beträgt die Neigung der Scherflächen im Mittel  $\vartheta = 54,1^\circ$ .

Zurückzuführen sind die unterschiedlichen Gradienten der Scherflächenneigung auf Unterschiede im Deformationsmechanismus, der sich innerhalb der Probe einstellt. Dieser Unterschied wird anhand eines Vergleiches der in Bild 5.26 dargestellten Röntgenaufnah-

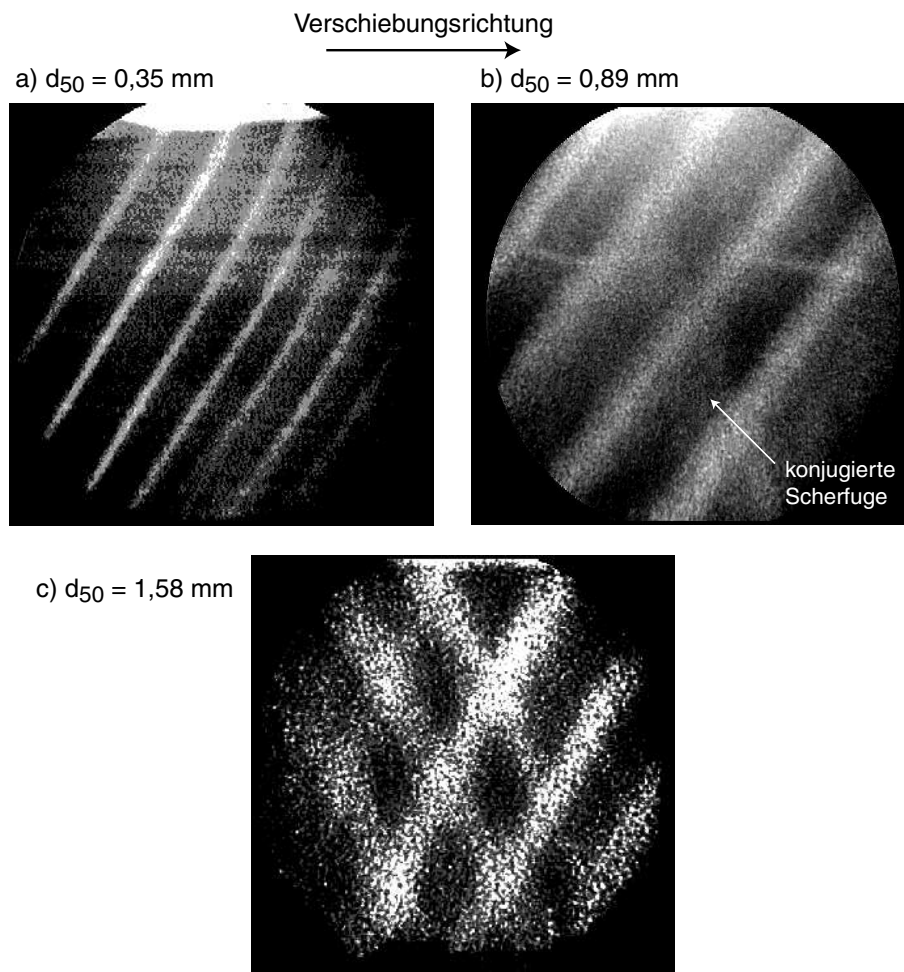


Bild 5.26: Abhängigkeit der Geometrie des Scherfugenmusters vom mittleren Korndurchmesser  $d_{50}$ : a)  $d_{50} = 0,35$  mm, b)  $d_{50} = 0,89$  mm und c)  $d_{50} = 1,58$  mm

men deutlich. Dem Bild ist zu entnehmen, dass sich bei dem Modellversuch mit dem Quarzsand der mittleren Korngröße  $d_{50} = 0,35$  mm nur einseitig geneigte Scherfugen entwickeln und sich dementsprechend der in Kapitel 5.1.2 beschriebene Deformationsmechanismus innerhalb des Probekörpers einstellt. Dieser ist durch eine Rotation der Scherfugen und der dazwischen liegenden Blöcke in Richtung der beweglichen Wand gekennzeichnet. Die Geometrie des Scherfugenmusters bei der Verwendung des Quarzsandes mit einer mittleren Korngröße von  $d_{50} = 0,89$  mm ist ebenfalls von Scherflächenscharen geprägt, die entgegen der Verschiebungsrichtung der beweglichen Wand einfallen. Vereinzelt sind konjugierte Scherfugen auf den Röntgenbildern zu identifizieren (vgl. Bild 5.26b), der 'Kippschollen'-Deformationsmechanismus bleibt aber auch für diesen Modell-sand maßgebend. Dementsprechend ergeben sich für diese beiden Sande parallele Verläufe



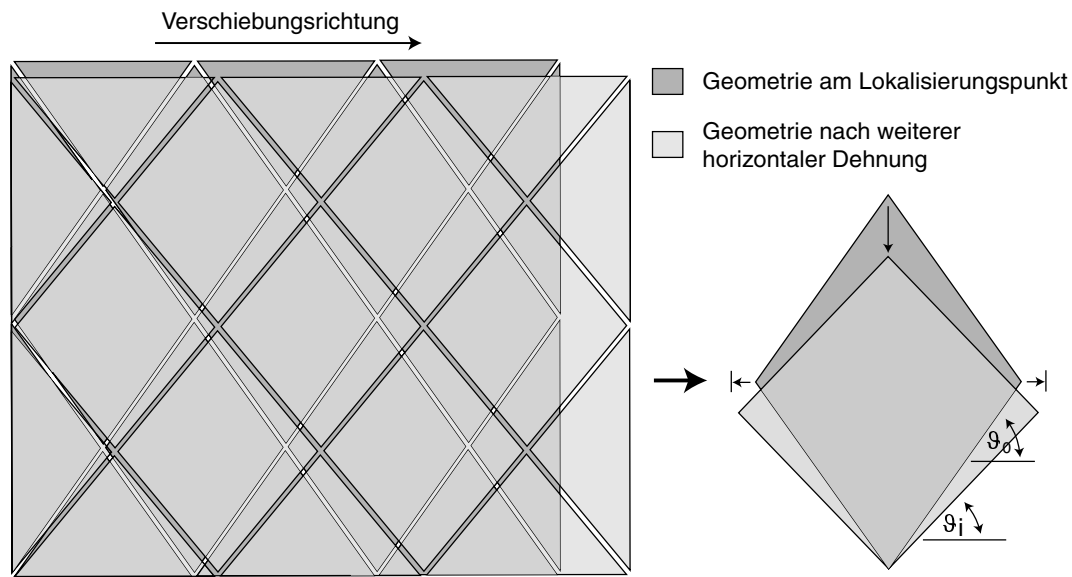


Bild 5.27: Geometrie des konjugierten Scherfugensystems bei der Verwendung von grobkörnigem Quarzsand

der Scherflächenneigung mit zunehmender horizontaler Dehnung. Bild 5.26c zeigt deutlich, dass sich bei der Verwendung des grobkörnigen Quarzsandes mit einem mittleren Korndurchmesser von  $d_{50} = 1,58$  mm ein abweichender Versagensmechanismus entwickelt. Bei der Verwendung dieses Quarzsandes entwickeln sich innerhalb des Probekörpers konjugiert geneigte Scherflächenscharen, die mit der Richtung der kleinsten Hauptspannung identische Winkel einschließen und mit der Theorie des plastischen Grenzzustandes in einem unendlichen Halbraum nach Rankine [104] beschrieben werden können. Eine reine Rotation der Blöcke zwischen den Scherflächen, wie sie in allen anderen Modellversuchen beobachtet wird, kann sich bei diesem Deformationsmechanismus aufgrund der sich schneidenden Lokalisierungszonen nicht einstellen. Wie die Auswertung der digitalen Aufnahmen der Probenseitenfläche mit Hilfe der DIC-Methode zeigt, ist die Deformation des konjugierten Scherfugensystems dadurch gekennzeichnet, dass sich die von den Scherflächen begrenzten rautenförmigen Bodenkörper symmetrisch verformen. Die Höhe der Rauten wird dabei reduziert, die Breite der Körper wird vergrößert. Dieser Verformungsmodus ist mit einer Änderung der Scherfugenneigung verbunden. Die Größe der Änderung mit zunehmender horizontaler Dehnung der Probe ist aufgrund der Kinematik des Systems jedoch kleiner als die Änderung der Scherfugenneigung im Deformationsmechanismus 'Domino-Rotation'. Das konjugierte Scherfugensystem ist schematisch in Bild 5.27 sowohl am Lokalisierungspunkt als auch nach einer weiteren horizontalen Dehnung

der Probe dargestellt.

Mandl [65] untersucht in Sandbox-Experimenten das Deformationsverhalten von Sandkörpern unter Extensionsbeanspruchung. Das bei diesen Versuchen dokumentierte Auftreten von einseitig und konjugiert geneigten Scherflächenmustern führt Mandl auf Unterschiede in den Festigkeitseigenschaften der Probekörper zurück. Ausschließlich einseitig geneigte Scherflächen beobachtet er in Modellversuchen, bei denen der Sandkörper aus geneigten Schichtpaketen aufgebaut wird. Die horizontale Dehnung dieser Körper verursacht eine Nicht-Koaxialität der Spannung und der Dehnungsinkremente und führt zur Ausprägung von einseitig geneigten Scherflächensystemen. Wird die Materialprobe horizontal in den Versuchsbehälter eingebaut und anschließend gedehnt, entsteht innerhalb des Probekörpers ein System von Scherflächen, das durch das in Kapitel 5.5 dargestellte 'Horst und Graben'-System beschrieben werden kann. Dieses System ist durch das Auftreten von Scharen paralleler Scherflächen gekennzeichnet, deren Neigungsrichtung in unregelmäßigen Abständen variiert. Die Beobachtungen von Mandl lassen sich nicht auf die im Rahmen dieser Versuchsserie durchgeführten Experimente übertragen, da trotz eines horizontalen Einbaus des Probekörpers bei feinen Sanden über die gesamte Länge der Probe ausschließlich einseitig geneigte Scherflächen zu beobachten sind.

Um beurteilen zu können, ob sich die Neigungen der Scherflächen an den theoretischen Scherfugenneigungen nach Coulomb [18] oder Roscoe [106] orientieren, muss die Neigung der Scherflächen am Lokalisierungspunkt betrachtet werden. Hierzu werden die linearen Verläufe der Scherfugenneigungen über die horizontale Dehnung durch Geraden approximiert und die Scherfugenneigung  $\vartheta_{\text{lok}}$  am Lokalisierungspunkt durch Einsetzen der Lokalisierungsdehnung  $\varepsilon_{\text{xx}}$  nach Tabelle 5.2 in die Geradengleichung bestimmt. Die Verläufe der Scherfugenneigungen der Versuche SFA02/SFA03 und SFA19/SFA20 können durch die Gleichungen

$$\vartheta_i = 66,43^\circ - 0,50 \varepsilon_{\text{xx}}, \quad \varepsilon_{\text{xx}} \geq \varepsilon_{\text{xx,lok}} \quad (5.1)$$

und

$$\vartheta_j = 68,19^\circ - 0,52 \varepsilon_{\text{xx}}, \quad \varepsilon_{\text{xx}} \geq \varepsilon_{\text{xx,lok}} \quad (5.2)$$

angeglichen werden. Mit der Lokalisierungsdehnung  $\varepsilon_{\text{xx,lok}} = 3,30\%$  ergibt sich für den feinkörnigen Sand eine Neigung am Lokalisierungspunkt von  $\vartheta_{\text{lok}} = 64,8^\circ$ . Dieser Wert entspricht dem theoretischen Neigungswinkel nach Coulomb [18], der sich mit einem Reibungswinkel von  $\varphi = 39,8^\circ$  nach Tabelle 4.1 zu  $\vartheta_C = 64,9^\circ$  ergibt. Die Scherfugenneigung am Lokalisierungspunkt für den Sand mit mittlerer Körnung berechnet sich mit Gleichung

(5.2) und einer Lokalisierungsdehnung von  $\varepsilon_{xx,lok} = 3,88\%$  zu  $\vartheta_{lok} = 66,2^\circ$ . Auch diese Neigung stimmt in sehr guter Näherung mit der Coulomb'schen Scherflächenneigung überein. Für den Quarzsand mit mittlerer Körnung ergibt sich diese mit einem Reibungswinkel am Peak von  $\varphi = 43,5^\circ$  zu  $\vartheta_C = 66,8^\circ$  (vgl. Tabelle A.1).

Nähert man den Verlauf der Neigung während der Modellversuche mit grobem Sand durch folgende Gleichung an:

$$\vartheta_i = 63,11^\circ - 0,24 \varepsilon_{xx}, \quad \varepsilon_{xx} \geq \varepsilon_{xx,lok} \quad (5.3)$$

und setzt den entsprechenden Wert der horizontal eingepprägten Dehnung von  $\varepsilon_{xx,lok} = 4,69\%$  am Lokalisierungspunkt in die Gleichung ein, ergibt sich eine Scherfugenneigung am Lokalisierungspunkt von  $\vartheta_{lok} = 62,0^\circ$ . Dieser Wert liegt zwischen dem Coulomb'schen Neigungswinkel ( $\vartheta_C = 66,7^\circ$ ) und dem Neigungswinkel nach der Theorie von Arthur et al. ( $\vartheta_A = 58,8^\circ$ ) und ist damit deutlich größer als der theoretische Reibungswinkel nach Roscoe ( $\vartheta_R = 51,0^\circ$ ).

In Kapitel 2.2 wurden Erkenntnisse zahlreicher Forscher [2, 93, 95, 128] zusammengefasst, wonach sich unter Scherbeanspruchung bei einem Material mit feiner Körnung bevorzugt Winkel zwischen der Scherfläche und der Richtung der kleinsten Hauptspannung gemäß der Definition nach Coulomb und bei der Verwendung von grobem Material bevorzugt Winkel nach der Definition nach Roscoe einstellen. Diese Erkenntnisse können mit Bezug auf die Ergebnisse der durchgeführten Modellversuche nur eingeschränkt bestätigt werden, da eine genaue Übereinstimmung der Scherfugenneigung mit der Roscoe'schen Neigung nicht festgestellt werden kann, eine Verringerung der Scherfugenneigung bei der Verwendung grobkörniger Böden aber zu beobachten ist. Es stellt sich insbesondere die Frage, ab wann ein Korn im Sinn der Einteilung in 'Coulomb-Neigung' und 'Roscoe-Neigung' als fein oder grob zu bezeichnen ist. Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Angabe konkreter Werte für die Grenzen der mittleren Korndurchmesser nicht sinnvoll ist, da neben der mittleren Korngröße  $d_{50}$  auch andere Parameter (Ungleichförmigkeit, Kornform, Beschaffenheit der Kornoberfläche) das mechanische Verhalten des verwendeten Materials und damit die Größe des Reibungs- und des Dilatanzwinkels beeinflussen [129]. Mit den Ergebnissen der durchgeführten Modellversuche werden dagegen Ergebnisse von triaxialen Extensionsversuchen von Lade et al. [60] bestätigt. Lade et al. verwenden für die Versuche verschiedene Sande, deren mittlere Korngrößen in den von Koenders et al. [51] vorgeschlagenen Grenzen liegen. Koenders et al. konnten mit den verwendeten Körnungen Scherflächenneigungen beobachten, die für groben Sand der Roscoe'schen Neigung und für

feinen Sand der Neigung nach Coulomb entsprachen. Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen messen Lade et al. trotz korrespondierender Korngrößen nur Scherfugenneigungen, die zwischen den Lösungen von Coulomb [18] und Arthur et al. [5] liegen.

Hinsichtlich des Verlaufs des Scherfugenabstandes über die Größe der eingepprägten horizontalen Dehnung kann in Bild 5.25 ein geringer Anstieg des Scherfugenabstandes während der Modellversuche SFA04 und SFA05 beobachtet werden. Die Abstände bei der Verwendung von Modellmaterialien mit mittleren Korndurchmessern von  $d_{50} = 0,35$  mm (SFA02/SFA03) und  $d_{50} = 0,89$  mm (SFA19/SFA20) weisen bei allen horizontalen Dehnungen gleiche Werte auf. Der leichte Anstieg des Abstandes bei grobem Material ist dabei auf Schwierigkeiten bei der Auswertung der Röntgenbilder zurückzuführen, da die Scherflächen hier im Gegensatz zu den Scherflächen in feinkörnigem Material nicht als klar abgegrenzte schmale Bereiche sichtbar werden. Die grobe Struktur des Materials ist auf den Röntgenbildern deutlich zu erkennen, eine eindeutige Identifikation der Scherflächen ist nur durch starke Kontrastveränderungen der Röntgenbilder zu gewährleisten (vgl. Bild 5.26).

Die Ergebnisse der Modellversuche in Bild 5.25 lassen vermuten, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem Abstand  $a$  der Scherflächen und der Größe des mittleren Korndurchmessers  $d_{50}$  besteht. Deutlich ist zu erkennen, dass sich der Scherflächenabstand mit zunehmendem Korndurchmesser vergrößert. Die Dicke der Scherflächen ist nach Kapitel 5.3 ebenfalls von der mittleren Korngröße abhängig, bei gleicher Lagerungsdichte stellt sich für die unterschiedlichen Quarzsande ein konstantes Verhältnis von Scherfugendicke und mittlerem Korndurchmesser von  $d_{SB}/d_{50} \approx 10,0$  ein. Zieht man nun die jeweilige Scherfugendicke von dem zugehörigen Scherflächenabstand ab, ergibt sich für alle untersuchten Sande eine gleich bleibende Breite der Blöcke zwischen den Lokalisierungszonen. Die mittlere Korngröße des Modellmaterials beeinflusst den resultierenden Scherflächenabstand dementsprechend nur gering. Die Variation der Korngröße spiegelt sich lediglich in der Änderung der Scherfugendicke wieder. Dieser Zusammenhang ist in Bild 5.28 dargestellt, in dem die Werte auf der linken Ordinatenachse den Scherfugenabstand  $a$  und die Werte auf der rechten Ordinatenachse die Breite der Blöcke  $b$  zwischen den Scherflächen charakterisieren.

Um einen möglichen Einfluss der Ungleichförmigkeit des Modellmaterials auf die Scherfugengeometrie zu untersuchen, werden zwei Modellversuche (SFA06/SFA07) mit einem Sand durchgeführt, dessen granulometrische Eigenschaften durch eine weitgestufte Kornverteilung ( $U = 5,1$ ) und einen mittleren Korndurchmesser von  $d_{50} = 0,85$  mm be-

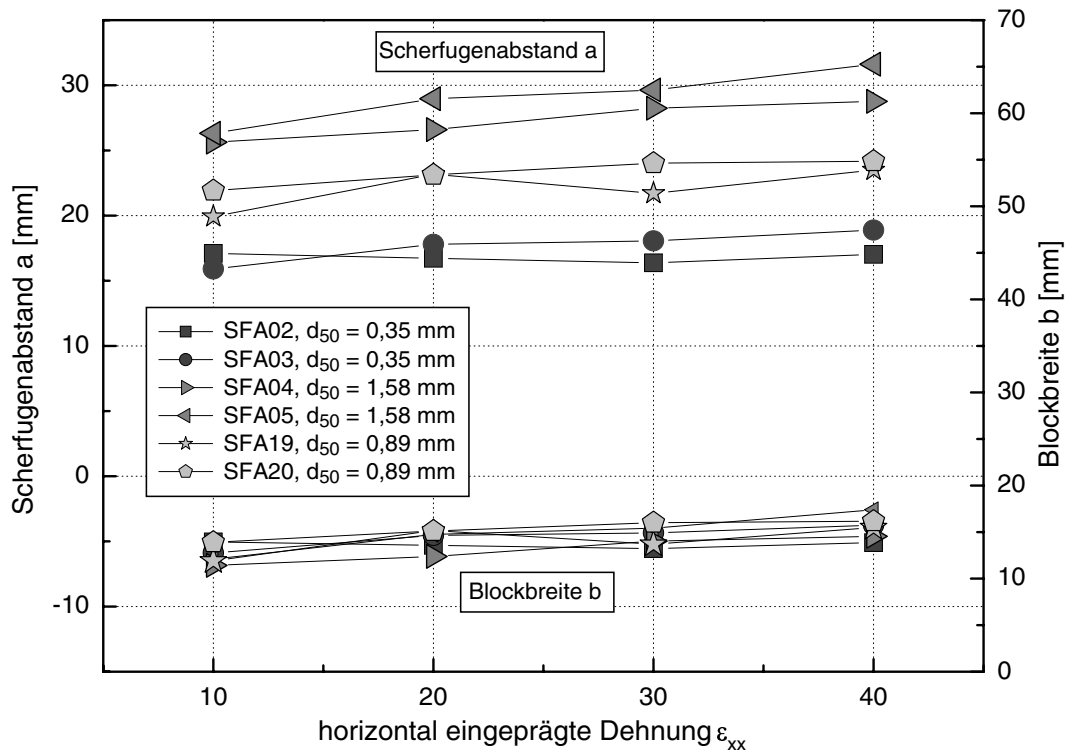


Bild 5.28: Scherfugenabstand und Breite der Blöcke zwischen den Scherflächen in Abhängigkeit des mittleren Korndurchmessers  $d_{50}$  ( $U = 1,5 = \text{konstant}$ )

schrieben werden können. Die Ergebnisse der Modellversuche sind zusammen mit den Ergebnissen der Versuche mit einer konstanten Ungleichförmigkeit von  $U = 1,5$  in Bild 5.29 zusammengefasst.

Im Hinblick auf die Versuche mit Quarzsand mit weitgestufter Kornverteilung steht zunächst die Frage im Vordergrund, welcher Deformationsmechanismus sich bei der Verwendung dieses Materials einstellt. Die Versuche in Bezug auf die Variation des mittleren Korndurchmessers  $d_{50}$  haben gezeigt, dass die Art des Verformungsmechanismus von der Korngröße beeinflusst wird. Da der verwendete weitgestufte Sand beide vorher untersuchten Korngrößenbereiche abdeckt, stellen sowohl der 'Kippschollen'-Mechanismus als auch die 'Rautenverformung' mögliche Deformationsmechanismen dar. Die Auswertung der Röntgenbilder der Modellversuche SFA06 und SFA07 macht deutlich, dass sich innerhalb des Probekörpers am Lokalisierungspunkt nur Scherflächen entwickeln, die entgegen der Verschiebungsrichtung der beweglichen Wand einfallen. Bei der weiteren Verformung der Probe ist eine Rotation der Scherflächen um eine horizontale Achse zu beobachten. Konjugiert geneigte Scherflächen bilden sich während der gesamten Rotationsphase nicht. Die Probenverformung kann somit durch die 'Domino-Rotation' beschrieben werden. Dement-

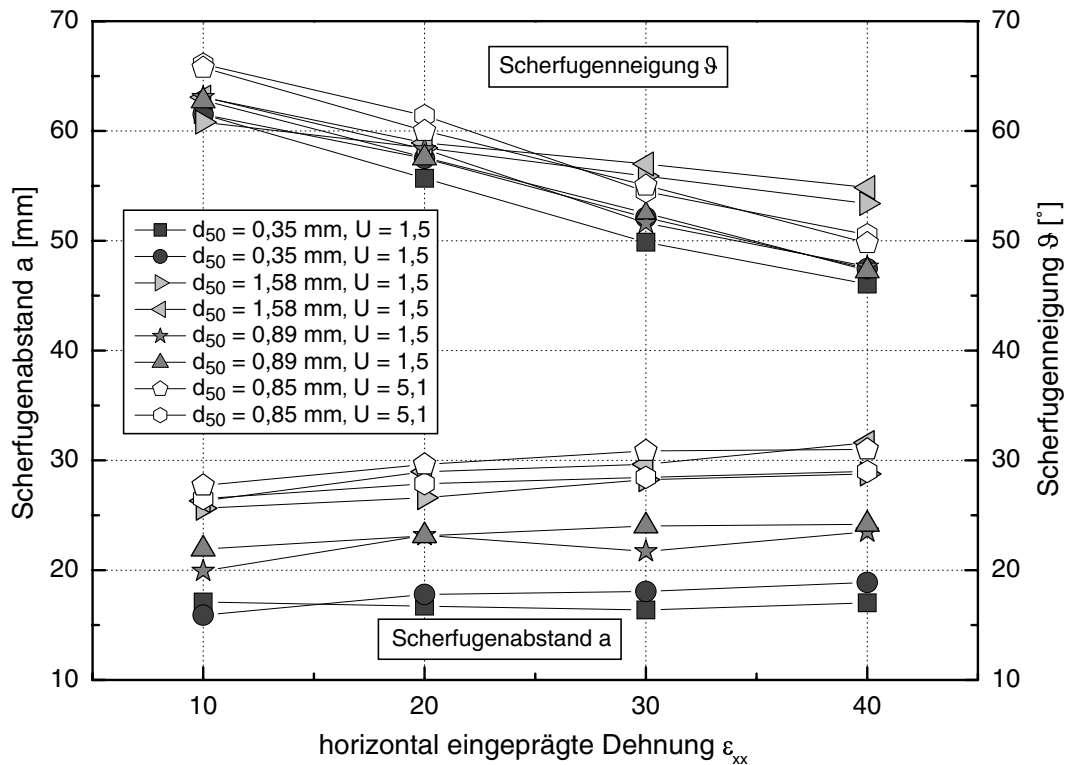


Bild 5.29: Scherfugenabstand und Scherfugenneigung in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeit  $U$

sprechend kann als maßgebender Einflussfaktor auf die Art der Deformation der mittlere Korndurchmesser  $d_{50}$  identifiziert werden.

Die Ausprägung des 'Kippschollen'-Deformationsmechanismus spiegelt sich im Verlauf der Scherfugenneigung mit zunehmender horizontaler Dehnung in Bild 5.29 wider. Es ist deutlich zu erkennen, dass sich für den weitgestuften Sand ein paralleler Verlauf zu der Änderung der Scherfugenneigung der Modellversuche einstellt, bei denen eine identische Geometrie der Scherflächenmuster zu beobachten ist. Für den weitgestuften Sand stellen sich für alle Dehnungszustände höhere Neigungen ein. Dies ist darauf zurückzuführen, dass der Reibungswinkel dieses Modellmaterials bei dichter Lagerung des Probekörpers größer ist als die Reibungswinkel des feinen und des mittleren Quarzsandes bei gleichen Randbedingungen (vgl. Anhang A.1). Die mittlere Neigung der Scherflächen in dem weitgestuften Sand berechnet sich mit der horizontalen Dehnung am Lokalisierungspunkt von  $\varepsilon_{xx,lok} = 3,68 \%$  zu  $\vartheta_{lok} = 67,0^\circ$  und entspricht damit in sehr guter Übereinstimmung dem theoretischen Neigungswinkel nach Coulomb von  $\vartheta_C = 68,2^\circ$ .

Im Hinblick auf die Entwicklung des Scherflächenabstandes mit zunehmender horizontaler Dehnung  $\varepsilon_{xx}$  bestätigen sich die Erkenntnisse aus den vorab durchgeführten Versuchen innerhalb dieser Serie, wonach sich unabhängig von der Größe der Dehnung ein konstanter Scherfugenabstand einstellt. In Bezug auf die Größe des Abstandes der Scherflächen bestätigen sich Vermutungen nicht, wonach sich bei unterschiedlicher Ungleichförmigkeit des Materials die einstellenden Abstände an der Größe des mittleren Korndurchmessers  $d_{50}$  orientieren. Bild 5.29 zeigt, dass sich trotz annähernd identischer mittlerer Korngrößen von  $d_{50} = 0,89$  mm und  $d_{50} = 0,85$  mm für den eng- und weitgestuften Quarzsand unterschiedliche Abstände einstellen. Der Abstand der Scherfugen im weitgestuften Sand stimmt vielmehr sehr gut mit dem Abstand der Scherflächen in dem enggestuften Quarzsand mit einer mittleren Korngröße von  $d_{50} = 1,58$  mm überein. Betrachtet man die Kurven der Kornverteilung dieser beiden Sande in Anhang A.2 stellt man fest, dass das Größtkorn dieser Quarzsande mit  $d_{max} = 4,0$  mm identisch ist. Der Abstand der Scherflächen wird also maßgeblich vom Größtkorn  $d_{max}$  und nicht vom mittleren Korndurchmesser  $d_{50}$  beeinflusst.

## 5.5 Der Einfluss der dynamischen Materialeigenschaften

### 5.5.1 Methodik und Versuchsprogramm

Innerhalb dieser Versuchsreihe wird der Einfluss der dynamischen Materialeigenschaften auf die Form der Scherfugenbänderung untersucht. Mit Bezug auf die von Poliakov et al. [98] durchgeführten numerischen Simulationen wird hierbei speziell die von Poliakov et al. beobachtete Abhängigkeit der Scherfugengeometrie von dem dimensionslosen Faktor  $B$  betrachtet (vgl. Kapitel 2.3). Die Versuchsserie wird in zwei Teilsereien aufgeteilt. In der ersten Teilserie wird der Faktor  $B$  variiert, in der zweiten Teilserie werden Modellversuche mit einer konstanten Größe  $B$  durchgeführt.

Zur Variation des Faktors  $B$  wird die Belastungsgeschwindigkeit  $v_{bc}$  für jeden Versuch der Reihe geändert, während die Größen der Kompressionswellengeschwindigkeit  $v_p$ , des Spannungszustandes  $\sigma$  und des dynamischen Schubmoduls  $G_{dyn}$  konstant gehalten werden. Aus diesem Grund werden alle Versuche mit feinkörnigem, dicht gelagertem Quarzsand (Material 1) durchgeführt. Zur Berechnung des Faktors  $B$  wird der dynamische Schubmo-

dul für kleine Dehnungsamplituden  $G_{dyn0}$  verwendet. Die Belastungsgeschwindigkeit wird in einer Bandbreite von  $v_{bc,min} = 0,2867$  cm/min bis  $v_{bc,max} = 2,867$  cm/min variiert. Die geringen Belastungsgeschwindigkeiten zeigen, dass die Probekörper im Rahmen dieser Versuchsserie nicht dynamisch belastet werden. Es werden lediglich die dynamischen Materialeigenschaften variiert.

Bei den Versuchen mit konstantem Faktor  $B$  werden die dynamischen Bodenkennwerte, die Spannung und die Belastungsgeschwindigkeit variiert. Hierzu werden Modellversuche mit verschiedenen Modellmaterialien durchgeführt, deren dynamische Stoffparameter maßgeblich voneinander abweichen. Durch die unterschiedliche Wichte der verwendeten Granulate stellt sich bei jeweils gleicher Höhe ein unterschiedlicher Spannungszustand ein.

Tabelle 5.4: Versuchsreihe 2: Einfluss der dynamischen Bodenparameter

Versuch	Material (vgl. Anhang A.1)	Faktor $B$ [-]	Belastungsgeschwindigkeit $v_{bc}$ [cm/min]
SFA02/SFA03	1 (Quarzsand)	90	0,28670
SFA22/SFA26	1 (Quarzsand)	9	2,86700
SFA23/SFA27	1 (Quarzsand)	900	0,02867
SFA08/SFA21	5 (Kunststoff)	90	0,49070
SFA15/SFA18	6 (Glasperlen)	90	0,28840
SFA25	7 (Hartguss)	90	0,56570

Bei der Wahl der Modellmaterialien für diese Versuchsreihe wird darauf Wert gelegt, dass die Kornverteilungen der Materialien in Bezug auf den mittleren Korndurchmesser  $d_{50}$  und die Ungleichförmigkeit  $U$  in ausreichender Näherung übereinstimmen. Eine Beeinflussung der Versuchsergebnisse durch Unterschiede in den granulometrischen Kennwerten wird dadurch ausgeschlossen. Auch in dieser Teilsreihe wurden alle Proben mit dichter Lagerung in den Modellbehälter eingebaut. Die Materialparameter und die Körnungskurven der verwendeten Materialien können Anlage A entnommen werden. Die Versuchsdaten zur zweiten Versuchsreihe sind in Tabelle 5.4 zusammengefasst.



### 5.5.2 Versuchsergebnisse

Das Verhalten der Probekörper im Hinblick auf die allgemeine Entwicklung der Scherflächensysteme entspricht den in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Beobachtungen. Bei allen Modellversuchen entwickelt sich beim Erreichen der Lokalisierungsdehnung ein regelmäßiges Muster aus Scherfugen, die nur einseitig geneigt sind. Bei zunehmender horizontaler Dehnung rotieren die Scherflächen um eine horizontale Achse senkrecht zu den Längswänden des Modellbehälters. Die Anzahl der Scherfugen bleibt bei allen untersuchten Dehnungsbeträgen konstant.

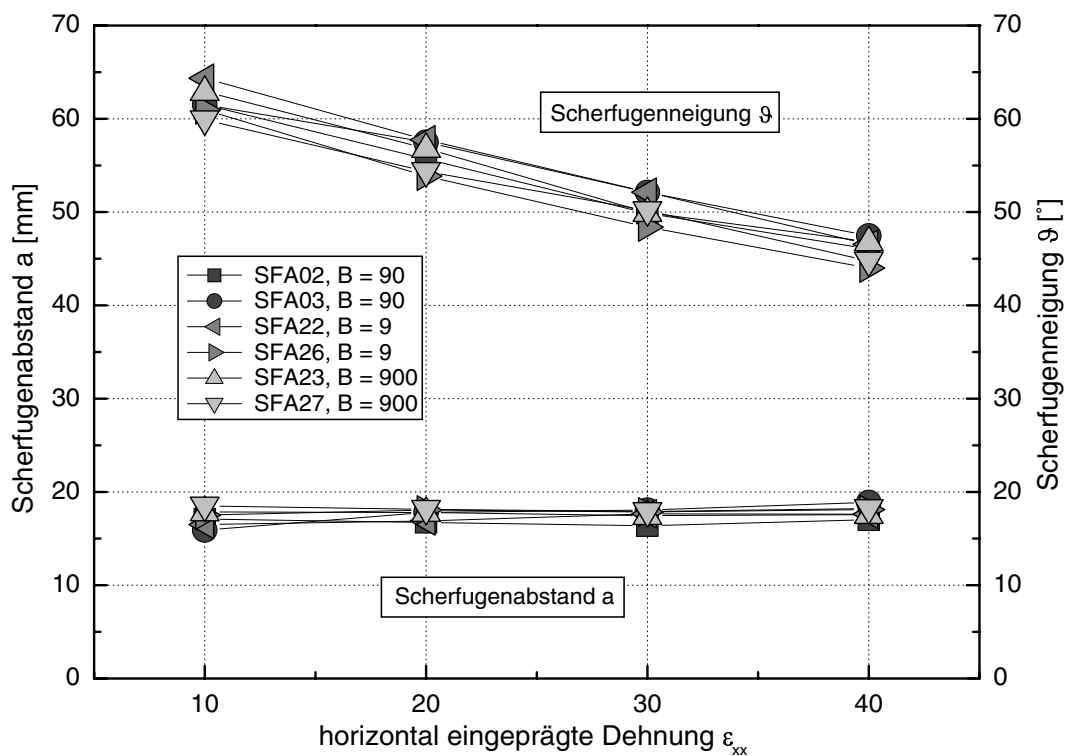


Bild 5.30: Einfluss des variablen Faktors  $B$  (Gleichung (2.12)) auf den Scherfugenabstand und die Scherfugenneigung

Bild 5.30 zeigt die Ergebnisse der Modellversuche zur Variation des dimensionslosen Parameters  $B$  in Bezug auf den Abstand und die Neigung der Scherflächen. Die Größen der Scherfugenabstände  $a$  können an der linken Ordinatenachse, die Beträge der Scherflächenneigungen an der rechten Ordinatenachse abgelesen werden.

Die Größe des Scherfugenabstandes bei einer horizontal eingepprägten Dehnung von  $\epsilon_{xx} = 10,0 \%$  variiert zwischen  $a_{min,10\%} = 15,9 \text{ mm}$  und  $a_{max,10\%} = 18,5 \text{ mm}$ . Diese Werte

ändern sich mit zunehmender horizontaler Dehnung nur geringfügig und schwanken für einen Wert von  $\varepsilon_{xx} = 40,0 \%$  zwischen  $a_{min,40\%} = 17,0 \text{ mm}$  und  $a_{max,40\%} = 18,9 \text{ mm}$ . Aus diesen Ergebnissen kann auf einen annähernd konstanten Verlauf der Scherflächenabstände mit einer leichten Zunahme über den Betrag der horizontal eingepprägten Dehnung geschlossen werden. Festzuhalten ist hierbei, dass die minimalen und maximalen Abstände der Lokalisierungszonen nicht einer bestimmten Größe des dimensionslosen Parameters  $B$  zugeordnet werden können. So wird der maximale Abstand  $a_{max,10\%} = 18,5 \text{ mm}$  für den Modellversuch SFA27 und einen Wert  $B = 900$  bestimmt, bei einer horizontalen Dehnung von  $\varepsilon_{xx} = 40,0 \%$  wird der größte Scherfugenabstand mit  $a_{max,40\%} = 18,9 \text{ mm}$  im Modellversuch SFA3, d.h. für einen Parameter  $B = 90$ , beobachtet. Der Scherflächenabstand  $a$  wird somit durch die Änderung des Parameters  $B$  nicht verändert, d.h. die von Poliakov et al. [98] beobachtete Abhängigkeit kann durch die durchgeführten Modellversuche nicht bestätigt werden.

Die Auswertung der Versuchsergebnisse im Hinblick auf die Neigung der Scherflächen bestätigt diese Aussage. Wiederum ist eine lineare Abnahme der Scherfugenneigung  $\vartheta$  mit zunehmender horizontal eingepprägter Dehnung  $\varepsilon_{xx}$  festzustellen. Die Neigungen schwanken dabei zwischen  $\vartheta_{min,10\%} = 59,9^\circ$  und  $\vartheta_{max,10\%} = 64,4^\circ$  bei einem horizontalen Dehnungsbetrag von  $\varepsilon_{xx} = 10 \%$  und zwischen  $\vartheta_{min,40\%} = 44,0^\circ$  und  $\vartheta_{max,40\%} = 47,5^\circ$  für eine horizontale Dehnung von  $\varepsilon_{xx} = 40 \%$ . Auch in Bezug auf die Neigungen ist eine Verbindung zwischen der Größe des Faktors  $B$  und der maximalen oder minimalen Neigung nicht möglich.

Zur Bestimmung der Scherflächenneigung am Lokalisierungspunkt wird der Verlauf der Neigungen für alle Versuche als Funktion der horizontal eingepprägten Dehnung mit folgender linearen Gleichung approximiert:

$$\vartheta = 66,89 - 0,53 \varepsilon_{xx}, \quad \varepsilon_{xx} \geq \varepsilon_{xx,lok}. \quad (5.4)$$

Mit der Größe der Lokalisierungsdehnung  $\varepsilon_{xx,lok} = 3,30 \%$  nach Tabelle 5.2 für dicht gelagerten, feinkörnigen Quarzsand ergibt sich eine Neigung der Scherflächen am Lokalisierungspunkt von  $\vartheta_{lok} = 65,1^\circ$ . Diese Neigung entspricht in sehr guter Näherung der theoretischen Scherfugenneigung nach Coulomb [18], die sich mit  $\varphi = 39,8^\circ$  nach Tabelle 4.1 in Anhang 4.3.2 zu einem Wert von  $\vartheta_C = 64,9^\circ$  ergibt. Erneut werden damit die theoretischen und experimentellen Erkenntnisse bestätigt, wonach sich bei der Verwendung eines feinkörnigen Bodens Scherflächen gemäß der Neigung nach Coulomb einstellen [128].

Im Hinblick auf die Variation des dimensionslosen Faktors  $B$  wurden die einzelnen Modell-

versuche im Rahmen dieser Versuchsreihe mit unterschiedlichen Belastungsgeschwindigkeiten, d.h. mit unterschiedlichen Verschiebungsgeschwindigkeiten der beweglichen Wand, durchgeführt. Die Übereinstimmung der Versuchsergebnisse in Bezug auf den Scherflächenabstand und die Neigung der Scherfugen zeigt, dass sich die Geometrie der Scherfugensysteme unabhängig von der Geschwindigkeit der aufgetragenen Belastung einstellt. Dieses Verhalten ist zu erwarten, da die Festigkeitseigenschaften und das Spannungs-Verformungsverhalten trockener nicht-bindiger Böden in der Regel nicht zeitabhängig sind [61, 68]. Einflüsse der Belastungsgeschwindigkeit auf die Ausbildung der Systeme sind erst zu erwarten, wenn die Geschwindigkeit so groß gewählt wird, dass die Gummimembran unter dem Probekörper hervorgezogen wird und das Material aufgrund von Trägheitskräften in seiner ursprünglichen Position verbleibt.

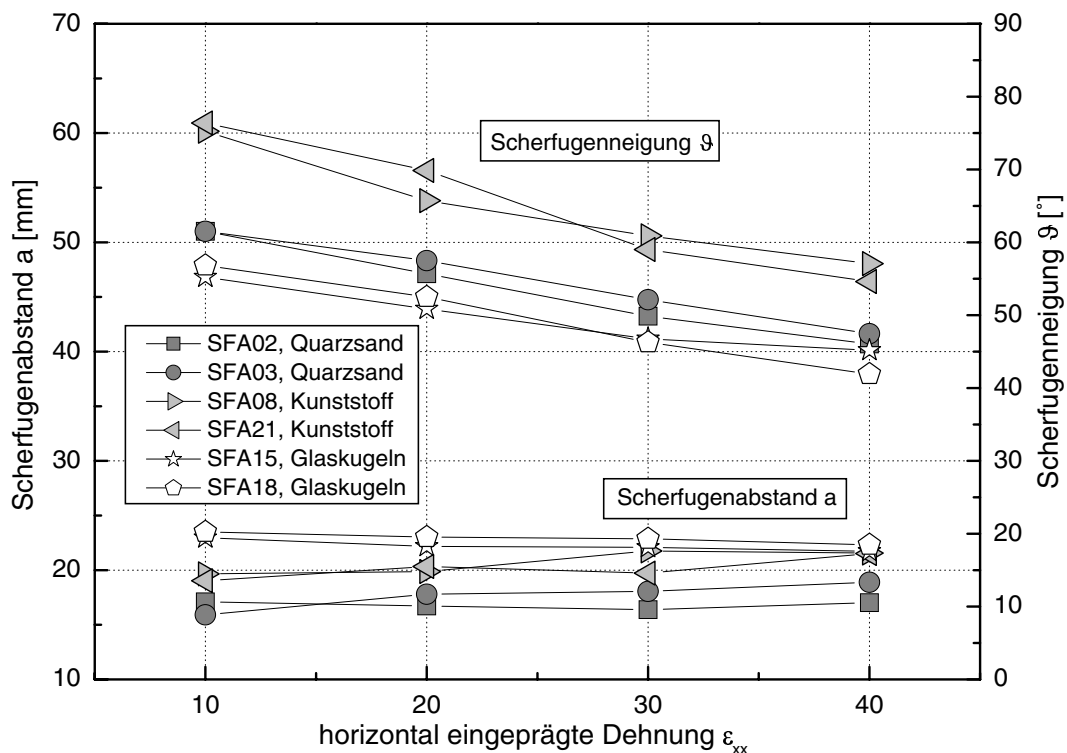


Bild 5.31: Einfluss des konstanten Faktors  $B$  (Gleichung (2.12)) bei unterschiedlichen dynamischen Materialparametern auf den Scherfugenabstand und die Scherfugeneigung

In Bild 5.31 sind die Ergebnisse der durchgeführten Modellversuche zur Überprüfung der Abhängigkeit der Scherfugengeometrie von der Variation der dynamischen Materialparameter bei konstantem dimensionslosen Faktor  $B$  nach Poliakov et al. [98] dargestellt. Die

Ergebnisse des Versuchs mit Hartgussgranulat (SFA25) sind nicht aufgeführt, da sich bei diesem Versuch ein System von Scherflächen ausbildet, dessen Geometrie grundsätzliche Unterschiede zu der in Kapitel 5.1.2 beschriebenen Struktur und dem daraus resultierenden Deformationsmechanismus aufweist. Die Struktur, die sich bei der Verwendung von Hartgussgranulat entwickelt, kann mit der aus der Geologie bekannten 'Horst und Graben'-Struktur verglichen werden. Bei diesem Deformationsmechanismus gleiten Bodenpakete unter Extensionseinfluss entlang gerader oder gekrümmter Scherflächen ab, wobei die Fallrichtung der Verwerfungen unterschiedliche Vorzeichen aufweisen können. In dem Bodenkörper bilden sich höhere (Horst) oder tiefere (Gräben) Bereiche aus, die Breite der Blöcke zwischen den Scherflächen ist in der Regel unterschiedlich stark ausgeprägt (vgl. Bild 5.32).

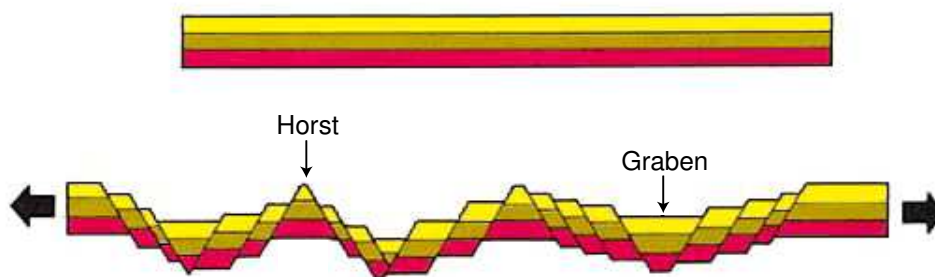


Bild 5.32: Entwicklung einer 'Horst und Graben'-Struktur in einer geologischen Formation unter Extensionseinfluss

Für die Modellversuche, die mit Quarzsand, Kunststoffgranulat und Glasperlen durchgeführt wurden, ergibt sich in Analogie zu den bisher beschriebenen Versuchsergebnissen aus der graphischen Darstellung in Bild 5.31 ein linearer Zusammenhang zwischen der Abnahme der Scherfugenneigung  $\vartheta$  und der Größe der horizontal eingepprägten Dehnung  $\varepsilon_{xx}$ . Die Abstände der Scherflächen weisen bei allen dokumentierten horizontalen Dehnungen einen konstanten Wert auf. Eine Vergrößerung der Scherflächenabstände mit zunehmender Dehnung kann nicht festgestellt werden.

Entgegen der Aussagen von Poliakov et al. [98] ist anhand der Messwerte deutlich zu erkennen, dass sich trotz der konstanten Größe  $B = 90$  für alle durchgeführten Modellversuche dieser Versuchsserie sowohl in Bezug auf die Abstände der Scherflächen als auch bezüglich der Neigungen der Scherfugen unterschiedliche Werte ergeben. Während die

Abstände der Scherflächen in Abhängigkeit der unterschiedlichen Modellmaterialien nur geringfügig voneinander abweichen, sind große Unterschiede in Bezug auf die Neigung der Scherflächen, insbesondere zwischen Quarzsand und Glaskugeln auf der einen und den Kunststoffpartikeln auf der anderen Seite, zu beobachten.

Die Neigungen der Scherflächen für die Versuche in Sand variieren zwischen  $\vartheta_{\varepsilon_{xx}=10\%} = 61,5^\circ$  und  $\vartheta_{\varepsilon_{xx}=40\%} = 46,8^\circ$ , die der Scherflächen für die Versuche mit Glasperlen nehmen von  $\vartheta_{\varepsilon_{xx}=10\%} = 56,0^\circ$  auf einen Wert von  $\vartheta_{\varepsilon_{xx}=40\%} = 43,6^\circ$  ab. Die Extrapolation der Neigungen auf den Lokalisierungspunkt bei  $\varepsilon_{xx,lok} = 3,30\%$  mit Hilfe folgender Gleichung für die Änderung der Scherfugenneigung

$$\vartheta = 66,43 - 0,50 \varepsilon_{xx}, \quad \varepsilon_{xx} \geq \varepsilon_{xx,lok}. \quad (5.5)$$

ergibt einen Wert von  $\vartheta_{lok} = 64,8^\circ$ . Dieser Wert stimmt wiederum mit der theoretischen Scherflächenneigung nach Coulomb von  $\vartheta_C = 64,9^\circ$  gemäß Tabelle 4.1 überein. Der extrapolierte Wert für die Scherflächenneigung am Lokalisierungspunkt der Glasperlen liegt mit  $\vartheta_{lok} = 59,7^\circ$  zwischen den theoretischen Neigungen nach Roscoe ( $\vartheta_R = 51,0^\circ$ ) und Coulomb ( $\vartheta_C = 61,5^\circ$ ), wobei eine eindeutige Annäherung an die Coulomb'sche Neigung festzustellen ist. Die Auswertung der Scherfugenneigung bei den Versuchen mit Kunststoffgranulat ergibt für die Neigung einen Wert bei der ersten Aufnahme der Röntgenbilder bei  $\varepsilon_{xx} = 10\%$  von  $\vartheta = 75,82^\circ$ . Dieser Wert kann weder durch die theoretische Neigung nach Roscoe ( $\vartheta_R = 52,0^\circ$ ) noch durch die Neigung nach Coulomb ( $\vartheta_C = 67,1^\circ$ ) beschrieben werden. Extrapoliert man die Neigung der Scherfugen auf den Lokalisierungspunkt ergeben sich annähernd senkrechte Scherflächen. Dieser hohe Neigungswinkel lässt sich erklären, wenn die im Triaxialversuch ermittelten Scherparameter des Materials in Betracht gezogen werden. Im Gegensatz zu allen anderen untersuchten Materialien weisen die Kunststoffpartikel eine Kohäsion von  $c = 23,5$  kPa auf, was in etwa einer Kohäsion eines halbfesten Tones entspricht. Der im Scherversuch ermittelte Kohäsionsanteil kann dabei nicht als klassische Kohäsion bindiger Böden oder durch die bei nichtbindigen Böden bekannte Kapillarkohäsion (scheinbare Kohäsion) interpretiert werden, da das Kunststoffmaterial weder bindige Bestandteile noch einen nennenswerten Wassergehalt enthält. Der normalspannungsunabhängige Scherfestigkeitsanteil wird vielmehr durch eine starke Verzahnung der Kunststoffteilchen hervorgerufen. Insbesondere bei den kleinen Spannungszuständen während der Modellversuche im natürlichen Schwerfeld wird diese Scherfestigkeit durch das geringe Gewicht der Partikel und die geringe Steifigkeit der Partikel begünstigt.

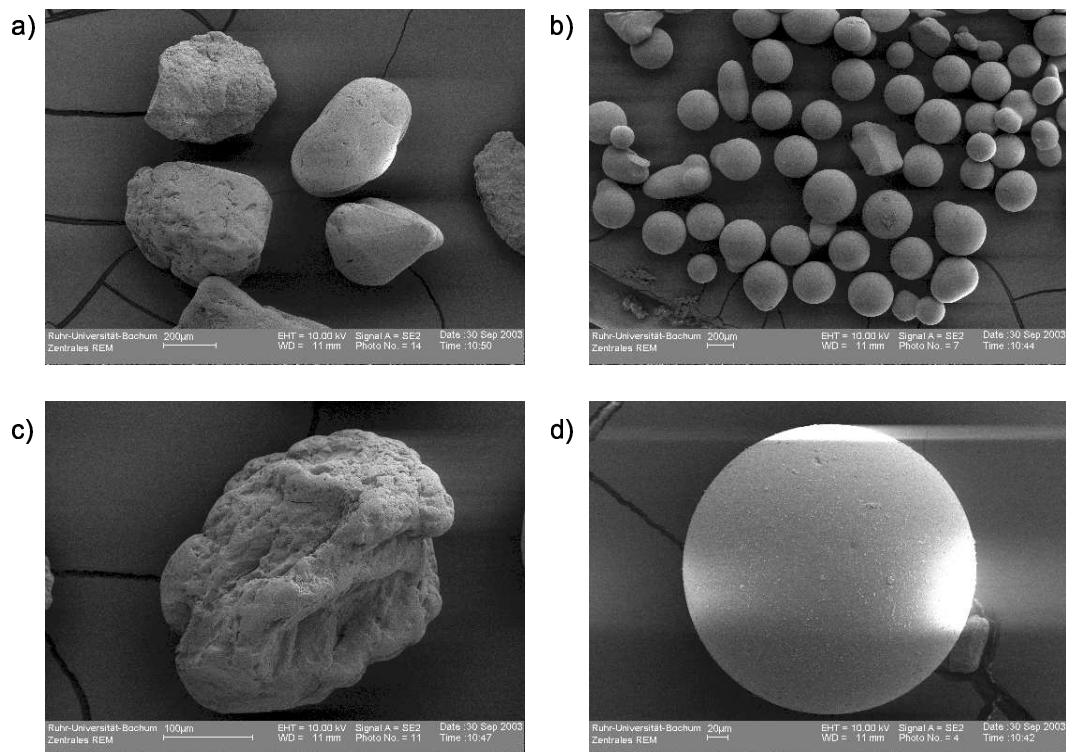


Bild 5.33: Aufnahmen der Kornform von a) Quarzsand (Material 1) und b) Glasperlen (Material 6) und Aufnahmen der Oberflächenstruktur von c) Quarzsand und d) Glasperlen im Rasterelektronenmikroskop

Die Ergebnisse der Modellversuche bezüglich der Variation der dynamischen Materialeigenschaften widerlegen eine weitere Aussage von Poliakov et al. [98], wonach die Dicke und die Regelmäßigkeit der Scherfugen einzig von der Differenz des Reibungs- und des Dilatanzwinkels des Materials bestimmt wird. Die Auswertung der Röntgenbilder zeigt, dass sich unabhängig von der Größe der Differenz bei allen Versuchen regelmäßige Scherflächen mit vergleichbaren Scherfugendicken entwickeln.

Eine mögliche weitere, im Rahmen dieser Arbeit nicht untersuchte Abhängigkeit der Scherfugengeometrie ergibt sich aus dem Vergleich der Versuchsergebnisse für Quarzsand (SFA02/SFA03) und Glas (SFA19/SFA20) in Bild 5.31. Obwohl beide Materialien sehr ähnliche Materialkennwerte aufweisen ( $\gamma$ ,  $d_{50}$ ,  $U$ ,  $G_{dyn}$ ,  $\nu_p$ ), ergeben sich bezüglich der Abstände der Scherflächen und der Scherfugenneigung deutliche Unterschiede für beide Materialien. Dieser Unterschied kann aufgrund der Ähnlichkeit der Materialparameter nur auf die unterschiedliche Kornform und die abweichende Oberflächenbeschaffenheit der Granulate zurückgeführt werden. Die in Bild 5.33 dargestellten Aufnahmen im Rasterelektronenmikroskop verdeutlichen, dass der Quarzsand eine vorwiegend gedrungene

Kornform und eine strukturierte Oberfläche und damit eine Oberflächenrauigkeit aufweist. Dagegen sind die einzelnen Körner des Glasgranulats ideal rund und besitzen eine glatte Oberflächenstruktur. Abweichungen im Scherverhalten bei direkten Scherversuchen, welche aus den Unterschieden in der Kornform resultieren, sind aus der Literatur bekannt [19].

## 5.6 Der Einfluss der Probengeometrie

### 5.6.1 Methodik und Versuchsprogramm

Im Rahmen der dritten Versuchsserie wird der Einfluss der Probengeometrie auf die Form der Scherfugenbänderung untersucht. Hierzu werden Modellversuche im Extensionsgerät mit feinkörnigem Quarzsand (Material 1) mit drei unterschiedlichen Ausgangshöhen von  $h_0 = 100$  mm,  $h_0 = 150$  mm und  $h_0 = 200$  mm durchgeführt.

Tabelle 5.5: Versuchsreihe 3: Einfluss der Probengeometrie

Versuch	Material (vgl. Anhang A)	Ausgangslänge $L$ [mm]	Ausgangsbreite $B$ [mm]	Ausgangshöhe $H$ [mm]
SFA02/SFA03	1 (Quarzsand)	500	200	150
SFA09/SFA10	1 (Quarzsand)	500	200	100
SFA16/SFA17	1 (Quarzsand)	500	200	200

Die Breite der Probe wird aus den in Kapitel 3.2 beschriebenen Gründen nicht variiert. Vorab durchgeführte Vorversuche zeigen, dass sich die Versuchsergebnisse ab einer bestimmten Länge der Probe nicht ändern. Eine Verlängerung der Probe schlägt sich in diesem Fall nur in einer Vergrößerung der Scherfugenanzahl nieder. Der Deformationsmechanismus und die Geometrie der Scherfugenmuster werden nicht beeinflusst. Auf eine Variation der Ausgangslänge der Probe wird aus diesen Gründen verzichtet. Das Versuchsprogramm ist in Tabelle 5.5 dargestellt.

## 5.6.2 Versuchsergebnisse

Bild 5.34 fasst die Ergebnisse der Modellversuche bezüglich der Variation der Ausgangsgeometrie der Probekörper zusammen. Die Werte auf der linken Ordinatenachse des Diagramms bezeichnen den Abstand  $a$  der Scherflächen, die Werte auf der rechten Ordinatenachse geben die Größe der Scherfugenneigung  $\vartheta$  wieder. In Analogie zu den bisher beschriebenen Versuchsergebnissen kann im Hinblick auf die Änderung der Scherfugenneigung mit zunehmend eingepprägter horizontaler Dehnung  $\varepsilon_{xx}$  eine gleichmäßige Verringerung der Neigung beobachtet werden. Hierbei stellen sich unabhängig von der Ausgangshöhe der Probekörper annähernd identische Scherflächenneigungen ein. Ein Einfluss der Geometrie auf den Fallwinkel der Scherflächen kann somit ausgeschlossen werden. Der Verlauf der Neigung mit zunehmender horizontaler Dehnung kann durch folgende lineare Funktion angenähert werden:

$$\vartheta = 66,20^\circ - 0,50 \varepsilon_{xx}, \quad \varepsilon_{xx} \geq \varepsilon_{xx,\text{lok}}. \quad (5.6)$$

Da die Ausgangshöhe der Proben die Größe der Lokalisierungsdehnungen nicht beeinflusst (vgl. Kapitel 5.2), kann gemäß Tabelle 5.2 zur Bestimmung der Scherflächenneigung am Lokalisierungspunkt in einem dicht gelagerten, feinkörnigen Quarzsand die horizontale Dehnung  $\varepsilon_{xx,\text{lok}} = 3,30 \%$  verwendet werden. Aus dem Einsetzen der Lokalisierungsdehnung in Gleichung (5.6) resultiert eine Scherflächenneigung am Lokalisierungspunkt von  $\vartheta_{\text{lok}} = 64,5^\circ$ . Dieser Wert entspricht wiederum in sehr guter Näherung der theoretischen Scherflächenneigung nach Coulomb [18], die sich für den verwendeten Modellsand zu  $\vartheta_C = 64,9^\circ$  ergibt. Erneut werden dabei die theoretischen und experimentellen Erkenntnisse zahlreicher Untersuchungen im Hinblick auf die Abhängigkeit der Scherflächenneigung von der mittleren Korngröße des Materials bestätigt [2, 93, 95, 128].

Im Hinblick auf den Abstand der Scherflächen zeigt Bild 5.34, dass nur bei den Probekörpern mit der geringsten Ausgangshöhe von  $h_0 = 100$  mm ein leichter Anstieg des Abstandes mit zunehmender horizontaler Dehnung zu beobachten ist. Für die Proben mit den Ausgangshöhen  $h_0 = 150$  mm und  $h_0 = 200$  mm ergeben sich konstante Abstände unabhängig von der Größe der horizontalen Dehnung.

Im Gegensatz zu den in Kapitel 5.4.2 beschriebenen Modellversuchen in Bezug auf die Variation der mittleren Korngröße  $d_{50}$  wird im Rahmen dieser Versuchsreihe nur feinkörniger, dicht gelagerter Quarzsand (Material 1) verwendet. Da nach den Bildern 5.21 und 5.23 eine Änderung der Scherfugendicke bei der Verwendung eines identischen Sandes mit



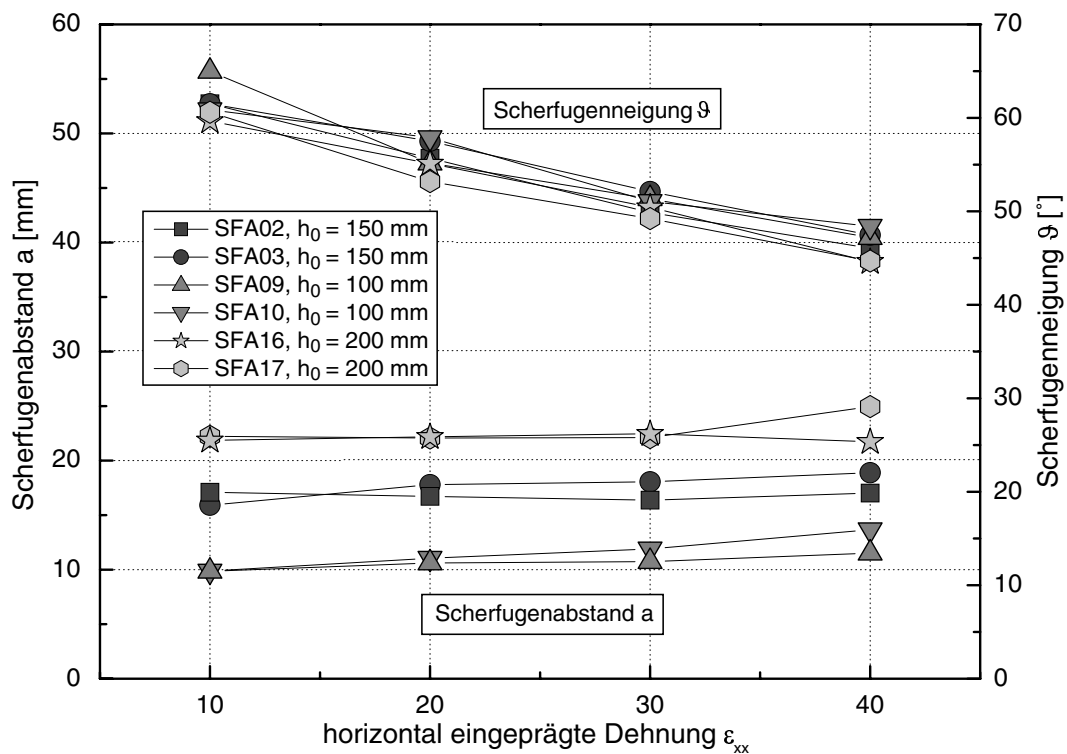


Bild 5.34: Einfluss der Probengeometrie auf die Geometrie der Scherfugenmuster

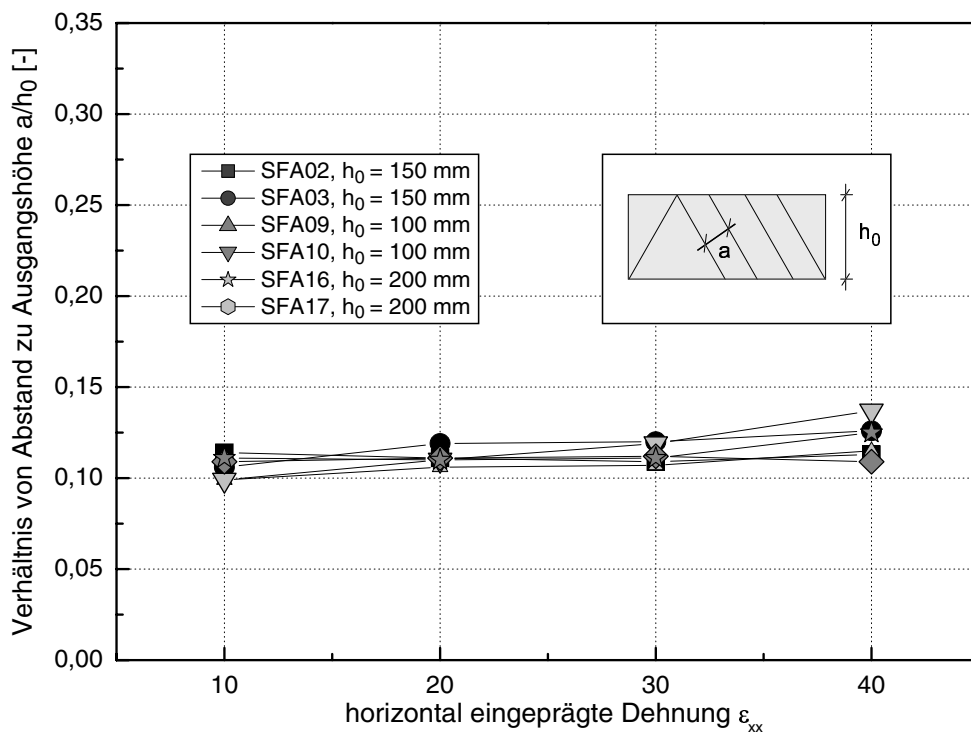


Bild 5.35: Das Verhältnis von Scherfugenabstand und Ausgangshöhe in Abhängigkeit der horizontal eingepprägten Dehnung

konstanter Lagerungsdichte nicht zu erwarten ist, spiegelt sich eine mögliche Änderung des gemessenen Scherflächenabstandes  $a$  auch in einer Änderung der Breite der Blöcke zwischen den Scherflächen wider und zeigt dementsprechend eine wirkliche Abhängigkeit des Scherflächenabstandes. Bild 5.34 ist zu entnehmen, dass sich in Abhängigkeit der Ausgangshöhe der Modellkörper deutliche Unterschiede in den Abständen der Scherfugen ergeben. Während sich in den Probekörpern mit einer Ausgangshöhe von  $h_0 = 100$  mm ein mittlerer Scherfugenabstand von  $a_{h_0=100 \text{ mm}} = 11,15$  mm einstellt, ergeben sich mit mittleren Abständen von  $a_{h_0=150 \text{ mm}} = 17,23$  mm für eine Ausgangshöhe von  $h_0 = 150$  mm und von  $a_{h_0=200 \text{ mm}} = 22,45$  mm bei einer Höhe im Ausgangszustand von  $h_0 = 200$  mm deutlich größere Werte. Bezieht man die Scherflächenabstände auf die Ausgangshöhe der Proben und stellt die normierten Abstände in einem Diagramm dar (vgl. Bild 5.35), ist deutlich zu erkennen, dass sich deckungsgleiche Kurvenverläufe ergeben. Die Größe des Scherfugenabstandes  $a$  beträgt dabei zwischen 11 % und 12 % der Ausgangshöhe der Probekörper. Bei der horizontal eingepprägten Dehnung von  $\varepsilon_{xx} = 40$  % sind geringfügige Abweichungen in den Mittelwerten der normierten Scherflächenabstände zu erkennen. Diese Unterschiede sind auf die versuchsbedingte Ungenauigkeit bei der Auswertungen der Scherfugenabstände bei großen Dehnungen zurückzuführen. Die deckungsgleichen Kurvenverläufe in Bild 5.35 zeigen, dass ein linearer Zusammenhang zwischen dem Abstand der Scherflächen in einem Körper und der Ausgangshöhe der Modellkörper besteht.

Das experimentell ermittelte konstante Verhältnis des Abstandes der Scherflächen zur Mächtigkeit der untersuchten Schicht  $a_h/h_0 = 0,12$  ermöglicht den Vergleich mit Abständen von Lokalisierungszonen, die in-situ bestimmt worden sind. Eine gute Datenbasis liefern die Ergebnisse von McIntosh et al. [79], die das Verformungsverhalten in der Lithosphäre im Bereich einer konvergenten Kontinentalplattengrenze an der Westküste Costa Ricas beschreiben. McIntosh et al. untersuchen mit Hilfe von seismischen Reflexionsmessungen die Geometrie von Lokalisierungszonen in einem Bereich dieses Kontinentalrandbogens, der Extensionsbeanspruchungen ausgesetzt ist (vgl. Kapitel 2.1). Bezieht man den aus den Messungen resultierenden durchschnittlichen Scherzonenabstand von  $a = 335$  m auf die mittlere Höhe des untersuchten Bereichs von  $H = 1900$  m ergibt sich ein Quotient von  $a/H = 0,18$ . Dieser Quotient stimmt in der Größenordnung mit dem experimentell ermittelten Verhältnis dieser Versuchsreihe von  $a/h_0 = 0,12$  überein. Die Abweichungen in den Größen der Quotienten sind auf Unterschiede in den mechanischen Eigenschaften der Materialien zurückzuführen. Die Materialeigenschaften werden in hohem Maße von der Homogenität der Lagerungsdichte und einer etwaigen Anisotropie des Materials beein-

flusst [16, 58, 113]. Während bei den Modellversuchen dieser Versuchsreihe ausschließlich homogen gelagerte Probekörper aus Quarzsand untersucht wurden, zeigen die von McIntosh et al. beschriebenen geologischen Formationen ausgeprägte Schichtungen verschiedener Materialien.

Die Ergebnisse der Modellversuche innerhalb dieser Versuchsserie bestätigen weiterhin die Ergebnisse der Modellversuche von Jeng et al. [47], die im erhöhten Schwerfeld eine Abhängigkeit der Scherflächenabstände von der Ausgangshöhe des Stratums beobachten. Ebenso können die aus den Versuchen von Ackermann et al. [1] und Vendeville et al. [127] abgeleiteten Abhängigkeiten der Geometrie der Scherflächenmuster von der Geometrie des Probekörpers nachvollzogen werden.

## 5.7 Der Einfluss des Spannungsniveaus

### 5.7.1 Methodik und Versuchsprogramm

Um den Einfluss des Spannungszustandes auf die Form der Scherfugenmuster zu untersuchen, werden in dieser Versuchsreihe Extensionsversuche im erhöhten Schwerfeld in der Geotechnischen Großzentrifuge Bochum durchgeführt. Das Funktionsprinzip der Zentrifugenmodelltechnik wurde in Kapitel 2 beschrieben. Die Geometrie der Proben wird für alle Versuche konstant gehalten. Um die Auflast auf die Gummimatte während des Versuches und damit die Reibung zwischen der Gummimatte und dem Behälterboden zu minimieren, wird als konstante Probenhöhe eine Ausgangshöhe von  $h_0 = 100$  mm gewählt. Als Versuchsmaterial wird ausschließlich feinkörniger Quarzsand verwendet (Material 1). Drei Probekörper werden bei einer erhöhten Beschleunigung von 10 g untersucht, zwei Modellversuche werden unter einer erhöhten Belastung von 15 g durchgeführt. Die Versuchsrandbedingungen zur vierten Versuchsserie sind in Tabelle 5.6 zusammengefasst.

Bei einigen zusätzlich durchgeführten Modellversuchen im Rahmen dieser Versuchsreihe verformte sich der Bodenkörper bei der Versuchsdurchführung in der Geotechnischen Großzentrifuge anders als bei den Modellversuchen der bisher beschriebenen Versuchsserien. Wurde die bewegliche Wand bis zur ersten Verschiebungsstufe von  $u_x = 5$  cm ( $\varepsilon_{xx} = 10$  %) verschoben, konnte bei diesen Versuchen eine deutlich abfallende Probenoberfläche von der festen Querwand in Richtung der beweglichen Wand beobachtet werden. Der Höhenunterschied vergrößerte sich mit zunehmender horizontaler Dehnung des Pro-

Tabelle 5.6: Versuchsreihe 4: Einfluss des Spannungsniveaus

Versuch	Material (vgl. Anhang A)	Beschleunigungsniveau $g$ [-]	bezogene Lagerungsdichte $I_D$ [g/cm <sup>3</sup> ]	Abmessungen $l/b/h$ [mm]
SFA09	1	1	0,98	500/200/100
SFA10	1	1	1,00	500/200/100
SFAZ04	1	10	0,96	500/200/100
SFAZ09	1	10	0,98	500/200/100
SFAZ11	1	10	1,07	500/200/100
SFAZ12	1	15	1,09	500/200/100
SFAZ13	1	15	1,01	500/200/100

bekörpers stetig. Zurückzuführen ist dieses Verformungsbild auf die erhöhte Reibung zwischen der Quarzsandprobe und den Längswänden des Versuchsbehälters im erhöhten Schwerfeld. Unter  $n$ -facher Beschleunigung steigen der Erdruhedruck und der aktive Erddruck nach dem Beginn der Dehnung der Probe in derselben Größenordnung an, in der auch das Schwerfeld durch die Versuchsdurchführung in der Geotechnischen Großzentrifuge erhöht wird. Durch den höheren Druck auf die Seitenwände erhöhen sich die Reibungskräfte an der Kontaktfläche Wand-Boden und es treten ungleichmäßige Verformungen des Sandkörpers auf. Dass die beobachteten Verformungsunterschiede nicht auf eine ungleichmäßige Dehnung der Gummimatte zurückzuführen sind, wurde in Kapitel 5.1.1 gezeigt. Die Ergebnisse der Modellversuche, bei denen eine unregelmäßige Verformung des Probekörpers zu beobachten war, gehen nicht in die nachfolgend beschriebenen Versuchsergebnisse ein.

### 5.7.2 Versuchsergebnisse

Das allgemeine Verformungsverhalten der untersuchten Proben unter Extensionsbeanspruchung bei erhöhtem Spannungsniveau entspricht dem in Kapitel 5.1 beschriebenen Verhalten der Proben im natürlichen Schwerfeld. Die ersten Scherflächen sind in der Nähe der beweglichen und der festen Querwand zu beobachten, bei einer weiteren Dehnung des Probekörpers entsteht zeitgleich ein System von parallelen Scherfugen, die einseitig entgegen der Verschiebungsrichtung der beweglichen Wand einfallen. Auch unter den gegebenen Randbedingungen ist keine Bildung von zusätzlichen Scherfugen bei einer weiteren Auflockerung des Modellkörpers festzustellen. Die Auswertung der angefertig-

ten Röntgenbilder und der digitalen Aufnahmen der Seitenflächen der Proben legen den Schluss nahe, dass sich auch im erhöhten Schwerfeld der Geotechnischen Großzentrifuge ein Deformationsmechanismus einstellt, der dem in der Geologie beschriebenen 'Domino'-Mechanismus entspricht. Dieser Verformungsmechanismus ist durch eine stetige Abnahme der Scherflächenneigung mit zunehmender horizontaler Dehnung der Probe und durch einen konstanten Abstand  $a$  der Lokalisierungszonen in jedem Dehnungszustand nach der Entwicklung der Scherfugen gekennzeichnet und ist in Kapitel 5.1.2 ausführlich beschrieben worden. Eine signifikante Setzung der Probenoberfläche konnte während der Steigerung des Spannungsniveaus vor Beginn der Dehnung der Proben sowohl bei einer Beschleunigung bis auf 10g als auch bei einer Beschleunigung bis auf 15g nicht beobachtet werden.

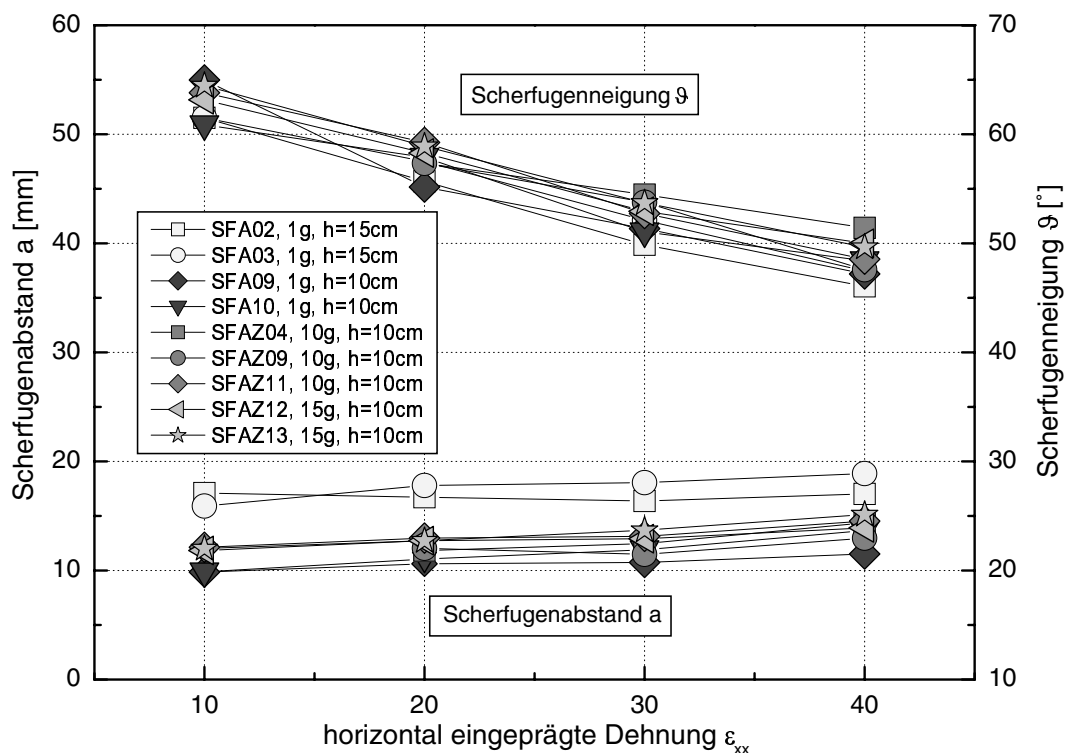


Bild 5.36: Scherfugenabstand und Scherfugenneigung in Abhängigkeit des Spannungsniveaus

Die Versuchsergebnisse hinsichtlich des Einflusses des Spannungsniveaus auf die Geometrie der Scherfugenmuster sind in Bild 5.36 zusammengefasst. Auf der linken Ordinatennachse ist der Abstand der Scherflächen, auf der rechten Ordinatennachse die Neigung der Scherfugen aufgetragen. Es werden sowohl die Versuchsergebnisse der Modellversuche

im erhöhten Schwerfeld (Symbole als Kontur), als auch ausgewählte Ergebnisse von 1g-Modellversuchen (ausgefüllte Symbole) dargestellt. Die Ergebnisse eines Modellversuchs im natürlichen Schwerfeld mit einer Ausgangshöhe von  $h_0 = 15$  cm werden ebenfalls in die Zusammenstellung der Versuchsergebnisse in Bild 5.36 aufgenommen. Für die Versuche SFAZ04 und SFAZ09 sind aufgrund von technischen Schwierigkeiten bei der Versuchsauswertung bezüglich der Neigung der Scherflächen und des Abstandes keine Daten vorhanden.

In Analogie zu den bisher beschriebenen Versuchsergebnissen ist nur ein leichter Anstieg der Abstände der Scherflächen mit zunehmender horizontal eingepprägter Dehnung zu beobachten. Die geringfügige Zunahme des Scherflächenabstandes ist auf die dilatante Volumenänderung innerhalb der Lokalisierungszonen zurückzuführen, da die DIC-Auswertung der digitalen Aufnahmen der Seitenfläche der Versuche eine konstante Breite der Blöcke zwischen den Scherflächen zeigt. Die Vergrößerung des Abstandes spiegelt sich dementsprechend nur in einer Vergrößerung der Scherfugendicke wider.

In Bild 5.36 ist deutlich zu erkennen, dass sich bei einer konstanten Geometrie der Probekörper im Ausgangszustand, unabhängig von der Größe des Beschleunigungsniveaus und damit unabhängig von der Wichte des verwendeten Materials, annähernd identische Scherflächenabstände einstellen. Die einzelnen Werte streuen in einer geringen Bandbreite zwischen 11,8 mm (SFAZ12) und 12,2 mm (SFAZ11) bei einer horizontalen Dehnung von  $\varepsilon_{xx} = 10$  % und zwischen 13,9 mm (SFAZ09) und 15,1 mm (SFAZ13) im Endzustand bei  $\varepsilon_{xx} = 40$  %. Dass auch innerhalb dieser Bandbreite kein nennenswerter Einfluss des Spannungsniveaus auf den Abstand der Scherfugen vorhanden ist, zeigt ein Vergleich der Scherflächenabstände im erhöhten Schwerfeld mit den Ergebnissen der Modellversuche SFA02 und SFA03. Beide Versuche wurden im natürlichen Schwerfeld mit einer Ausgangsprobenhöhe von  $h_0 = 150$  mm durchgeführt. Der Vergleich der Ergebnisse zeigt deutliche Unterschiede in den resultierenden Abständen, die Scherfugenabstände im natürlichen Schwerfeld sind dabei ungefähr 50 % größer als die Abstände unter 10-facher Erdbeschleunigung. Aus den Ergebnissen lässt sich ableiten, dass der in Kapitel 5.6 beschriebene proportionale Zusammenhang zwischen der Ausgangshöhe der Probe und den Abständen der Scherflächen auch im erhöhten Schwerfeld Gültigkeit besitzt.

Auch in Bezug auf die Neigung der Scherflächen kann eine Abhängigkeit von der Größe des Spannungsniveaus ausgeschlossen werden, da die einzelnen Neigungen in guter Näherung übereinstimmen. Unterschiede in der Größe der Neigungen der Scherfugen zu den Modellversuchen im natürlichen Schwerfeld mit veränderter Geometrie (Versuche SFA02

und SFA03) sind ebenfalls nicht festzustellen. Bild 5.36 legt eine lineare Abnahme der Scherflächenneigung  $\vartheta$  mit zunehmender horizontaler Dehnung  $\varepsilon_{xx}$  nahe. Die Änderung der Scherflächenneigung in den Modellversuchen im erhöhten Schwerfeld in Abhängigkeit der horizontal eingepprägten Dehnung kann mit folgender Gleichung approximiert werden:

$$\vartheta_i = 67,8^\circ - 0,48\varepsilon_{xx}, \quad \varepsilon_{xx} \geq \varepsilon_{xx,\text{lok}}. \quad (5.7)$$

Die für das verwendete Versuchsmaterial (Material 1) und die getestete Lagerungsdichte ( $I_D \approx 1,0$ ) maßgebende Lokalisierungsdehnung ergibt sich nach Tabelle 5.1 bzw. Tabelle 5.2 zu  $\varepsilon_{xx,\text{lok}} = 3,30\%$ . Setzt man die Dehnung in Gleichung (5.7) ein, erhält man die Scherfugenneigung  $\vartheta_{\text{lok}} = 66,3^\circ$  am Lokalisierungspunkt. Diese Neigung entspricht in guter Näherung der theoretischen Scherflächenneigung nach Coulomb [18], die sich für die untersuchte Lagerungsdichte und das Versuchsmaterial zu  $\vartheta_C = 64,9^\circ$  ergibt (vgl. Tabelle 4.1).

Die Ergebnisse der Modellversuche zeigen keine Abhängigkeit der Scherflächenneigung von der Größe des Spannungsniveaus. Auf den ersten Blick steht dieses Ergebnis im Widerspruch zu den Ergebnissen vergleichbarer experimenteller Untersuchungen. Bei der Durchführung von Biaxialversuchen stellen z.B. Han & Drescher [38] und Tatsuoka et al. [119] fest, dass bei einer Vergrößerung des Seitendrucks die Scherfugenneigung geringfügig abnimmt. Unter der Voraussetzung, dass identische Materialien bei der Versuchsdurchführung verwendet werden, ist dieses Verhalten darauf zurückzuführen, dass in Biaxial- oder Triaxialversuchen bei kleinen Spannungszuständen höhere Reibungswinkel gemessen werden als bei hohen Spannungszuständen [53, 107]. Die durchgeführten Modellversuche im natürlichen und erhöhten Schwerfeld haben gezeigt, dass sich unabhängig von der mittleren Spannung innerhalb der Probe ein Scherflächenwinkel gemäß der Theorie nach Coulomb einstellt. Dementsprechend müsste sich bei einer Verkleinerung des Reibungswinkels aufgrund der Vergrößerung der mittleren Spannung im erhöhten Schwerfeld die Neigung der Scherflächen bei den Zentrifugen-Versuchen im Vergleich zu den Modellversuchen im natürlichen Schwerfeld verkleinern. Han & Drescher [38] beobachteten bei der Durchführung von Biaxialversuchen eine Verringerung des Scherflächenwinkels von  $\vartheta = 59^\circ$  bei einer Seitenspannung von  $\sigma_3 = 50$  kPa über  $\vartheta = 58^\circ$  für  $\sigma_3 = 100$  kPa bis zu einem Winkel von  $\vartheta = 55^\circ$  für einen Seitendruck von  $\sigma_3 = 400$  kPa. Die Ergebnisse von Han & Drescher zeigen, dass sich bei einer Änderung des Seitendrucks um den Faktor zehn ein um  $4^\circ$  verringerter Neigungswinkel einstellt, wobei aufgrund der Versuchsergebnisse von Kolymbas & Wu [53] damit zu rechnen ist, dass die Rate der Abnahme mit zunehmendem Seitendruck kleiner wird. Aus den Versuchsergebnissen von Kolymbas & Wu

ist ebenfalls abzuleiten, dass sich bei sehr kleinen Seitendrücken starke Änderungen des Reibungswinkels ergeben. Bei den im Rahmen dieser Versuchsreihe durchgeführten Modellversuchen müsste sich demnach aufgrund der vorherrschenden kleinen Spannungen bei einer Erhöhung der Spannungen um den Faktor zehn in der Zentrifuge ein deutlich verminderter mobilisierter Reibungswinkel am Lokalisierungspunkt und damit ein deutlich verminderter Scherflächenwinkel einstellen. Dies ist bei den durchgeführten Modellversuchen in der Zentrifuge aber nicht zu beobachten.

Die Ergebnisse der Modellversuche im erhöhten Schwerfeld bestätigen den aus der Arbeit von Jeng et al. [47] ableitbaren Zusammenhang, wonach die Anzahl der Scherflächen und damit deren Abstand mit der Höhe des Stratums korreliert. Die von Jeng et al. vermutete Unabhängigkeit der Geometrie der Scherfugenmuster vom wirksamen Spannungsniveau kann anhand der Versuchsergebnisse ebenso nachvollzogen werden.

## 5.8 Der Einfluss des Spannungs-Verformungs-Verhaltens des Modellmaterials

### 5.8.1 Methodik und Versuchsprogramm

Der Einfluss des Spannungs-Verformungsverhaltens des Versuchsmaterials auf die sich einstellende Scherfugegeometrie wird in der fünften Versuchsreihe untersucht. Da die Spannungs-Verformungs-Beziehung bei der Verwendung eines identischen Materials im Wesentlichen durch die Lagerungsdichte des Materials bestimmt wird, werden innerhalb dieser Versuchsreihe Modellversuche mit unterschiedlicher Lagerungsdichte und konstanter Probengeometrie im Ausgangszustand durchgeführt. Einige Proben werden im erhöhten Schwerfeld der Geotechnischen Großzentrifuge getestet. Hiermit soll überprüft werden, ob sich die Ergebnisse der im natürlichen Schwerfeld durchgeführten Versuche auf diejenigen unter einem höheren Beschleunigungsniveau übertragen lassen. Eine Erhöhung des Spannungsniveaus ruft Setzungen innerhalb der locker gelagerten Probekörper aufgrund von Kornumlagerungen oder eventuell auch aufgrund einer elastischen Zusammendrückung der Körner hervor. Mit den Versuchen im erhöhten Schwerfeld wird untersucht, ob die hervorgerufenen Setzungen die Lagerungsdichte locker gelagerter Probekörper soweit ändern, dass sich Scherfugenabstände einstellen, die für einen Probekörper mit höherer Lagerungsdichte charakteristisch sind.



Tabelle 5.7: Versuchsreihe 5: Einfluss des Spannungs-Verformungsverhaltens des Modellbodens

Versuch	Material (vgl. Anhang A)	bezogene Lagerungsdichte $I_D$ [-]	Beschleunigungsniveau $g$ [-]
SFA02	1	1,08	1
SFA03	1	1,03	1
EVD02	1	1,08	1
EVD16	1	0,85	1
EVD05	1	0,63	1
EVD11	1	0,67	1
EVD13	1	0,65	1
EVD14	1	0,58	1
EVD15	1	0,55	1
EVD06	1	0,36	1
EVD07	1	0,38	1
EVD09	1	0,41	1
EVD10	1	0,42	1
EVDZ01	1	0,64	10
EVDZ03	1	0,62	10
EVDZ02	1	0,33	10

Für die Modellversuche innerhalb dieser Versuchsreihe wird ausschließlich feinkörniger Quarzsand (Material 1) verwendet. Das Spannungs-Verformungsverhalten des Quarzsandes bei verschiedenen Ausgangslagerungsdichten wurde in triaxialen Extensionsversuchen untersucht (vgl. Kapitel 4.3). In Tabelle 5.7 ist das Versuchsprogramm dieser Versuchsserie zusammengefasst.

## 5.8.2 Versuchsergebnisse

Die Darstellung der Lokalisierungsdehnungen  $\gamma_{lok}$  über die bezogene Lagerungsdichte in Bild 5.37 verdeutlicht, dass sowohl die in den Triaxialversuchen ermittelten Lokalisierungsdehnungen, d.h. die Dehnung der Probe am Peak der Spannungs-Dehnungskurve, als auch die bei den Modellversuchen bestimmten Dehnungen am Lokalisierungspunkt in einem linearen Zusammenhang mit der Lagerungsdichte des untersuchten Materials im Ausgangszustand stehen. Die Größe der Lokalisierungsdehnung nimmt dabei bei beiden

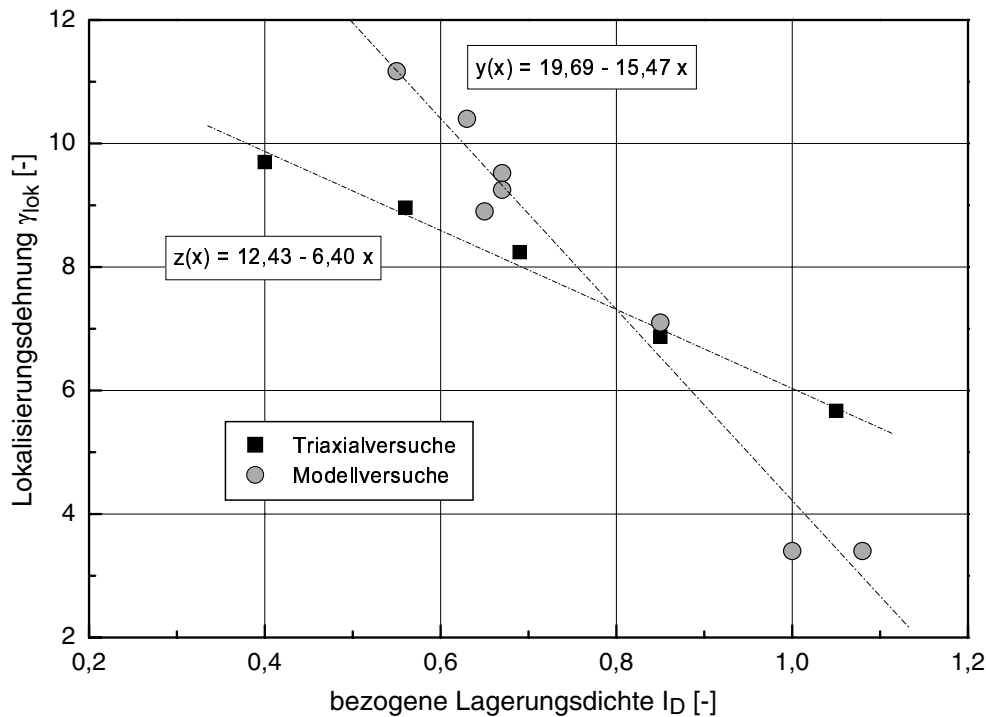


Bild 5.37: Lokalisierungsdehnung in Abhängigkeit der bezogenen Lagerungsdichte

Versuchsarten mit ansteigender Lagerungsdichte ab.

Die Geraden, mit denen die Messwerte approximiert werden können, weisen unterschiedliche Gradienten auf. Der Verlauf der Geraden in Bild 5.37 zeigt, dass bei hohen Lagerungsdichten im Triaxialversuch größere Scherdehnungen im Probekörper zum Erreichen des Peaks der Spannungs-Dehnungs-Beziehung aktiviert werden müssen als in den durchgeführten Modellversuchen. Für geringe Lagerungsdichten im Ausgangszustand sind bei gleichen Lagerungsdichten von Triaxialprobe und Modellkörper deutlich geringere Lokalisierungsdehnungen im Triaxialversuch als in den Modellversuchen festzustellen. Die Abweichungen in der Steigung der Geraden sind auf die unterschiedlichen Randbedingungen der Modellversuche im Extensionsgerät und der triaxialen Extensionsversuche zurückzuführen. Die Lokalisierungsdehnungen der durchgeführten Element- und Modellversuche können demnach nicht direkt miteinander verglichen werden, eine übereinstimmende Tendenz der Abhängigkeit der Größe der Lokalisierungsdehnung von der bezogenen Lagerungsdichte des Materials ist aber festzustellen.

In Bild 5.38 sind die Ergebnisse der Modellversuche im natürlichen Schwerfeld zusammengefasst. Unterschiedliche Symbole kennzeichnen die verschiedenen Lagerungsdichten, mit denen der Quarzsand in den Modellbehälter eingebaut wurde. Auf der linken Or-

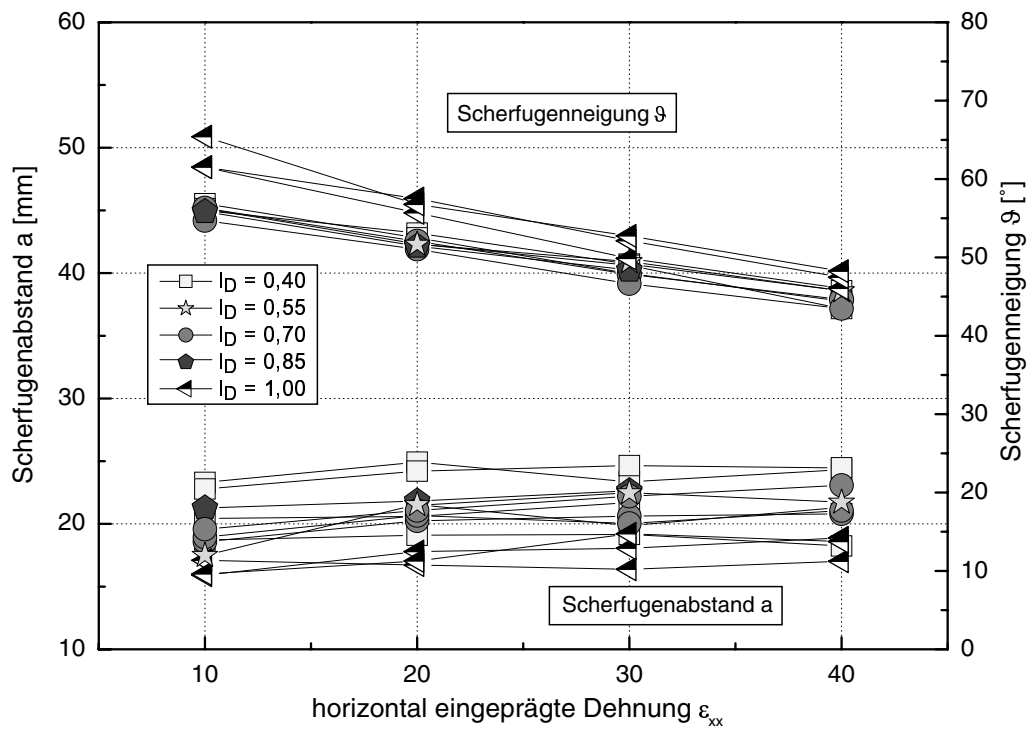


Bild 5.38: Abstand und Neigung der Scherflächen in Abhängigkeit der Lagerungsdichte im natürlichen Schwerfeld

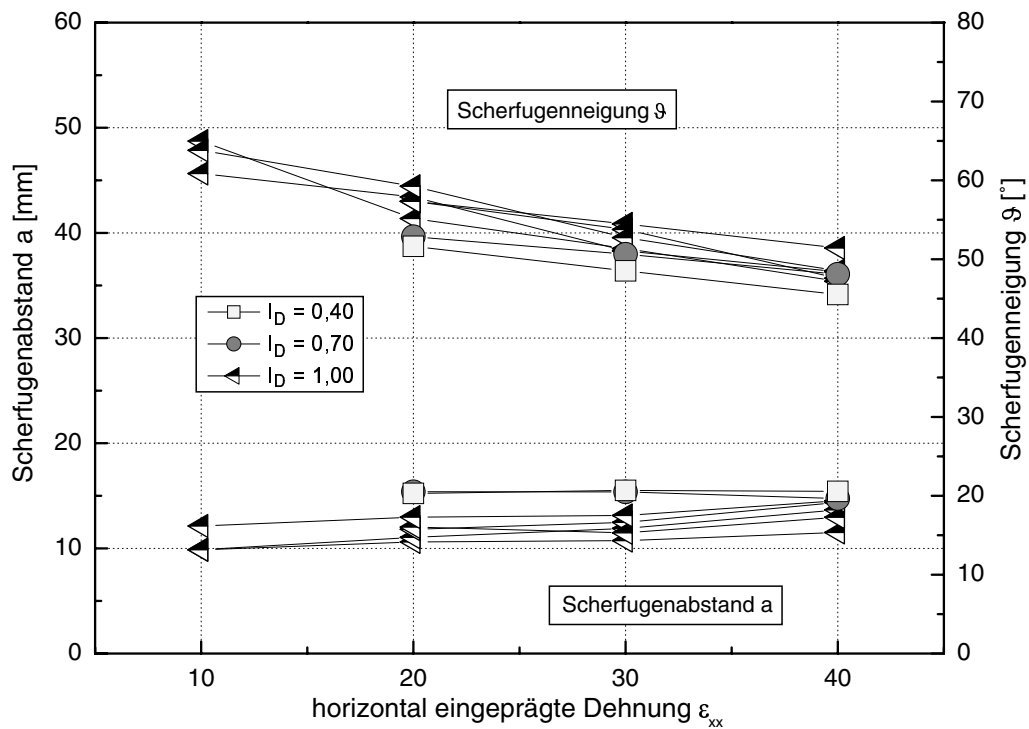


Bild 5.39: Abstand und Neigung der Scherflächen in Abhängigkeit der Lagerungsdichte im erhöhten Schwerfeld

ordinatenachse ist der Abstand  $a$  der Scherflächen aufgetragen, die Werte auf der rechten Ordinatenachse geben die Neigung der Scherflächen an.

Aus Bild 5.38 lässt sich entnehmen, dass sich auch innerhalb dieser Versuchsreihe annähernd konstante Abstände der Scherflächen einstellen. Die Größe der eingepprägten horizontalen Dehnung hat dabei keinen Einfluss auf das Ergebnis. Bei allen Versuchen ist nur eine minimale Vergrößerung des Abstandes mit zunehmender horizontaler Dehnung der Probe zu beobachten. Auf den ersten Blick ist ein eindeutiger Unterschied der Scherflächenabstände in Abhängigkeit der Lagerungsdichte des Quarzsandes nicht festzustellen. Allerdings kann eine allgemeine Tendenz aus den Versuchsergebnissen abgeleitet werden, nach welcher der Scherflächenabstand mit abnehmender Lagerungsdichte des Materials größer wird. Unter der Annahme, dass der Scherflächenabstand mit zunehmender horizontaler Dehnung des Probekörpers konstant bleibt, ergeben sich Mittelwerte des Scherfugenabstandes für die Gruppen der Modellversuche mit gleicher Lagerungsdichte. Diese Mittelwerte sind in Tabelle 5.8 zusammengefasst.

Tabelle 5.8: Mittelwerte des Scherfugenabstandes  $a_{\emptyset}$  in Abhängigkeit der bezogenen Lagerungsdichte  $I_D$

bezogene Lagerungsdichte $I_D$ [-]	Mittelwert der Scherfugenabstände $a_{\emptyset}$ [mm]
1,00	17,39
0,85	21,91
0,70	20,12
0,55	20,98
0,40	21,93

Trägt man den Abstand  $a$  über die bezogene Lagerungsdichte  $I_D$  des Modellmaterials auf, ergibt sich in guter Näherung ein linearer Zusammenhang zwischen den beiden Größen (vgl. Bild 5.40). Der mittlere Abstand für den Versuch mit einer bezogenen Lagerungsdichte von  $I_D = 0,85$  wurde dabei nicht berücksichtigt. Bei diesem Versuch handelt es sich um einen Einzelversuch, dessen Ergebnis nicht verifiziert wurde.

Um die mittleren Abstände der Scherflächen in Abhängigkeit der bezogenen Lagerungsdichte mit den Größen der Materialparameter wie z.B. Reibungs- und Dilatanzwinkel oder mit den aus den Modellversuchen oder den Triaxialversuchen bestimmten Lokalisierungsdehnungen zu korrelieren, kann die Änderung der verschiedenen Materialparameter in Bezug auf deren Größe bei einer bezogenen Lagerungsdichte von  $I_D = 1,0$  über die

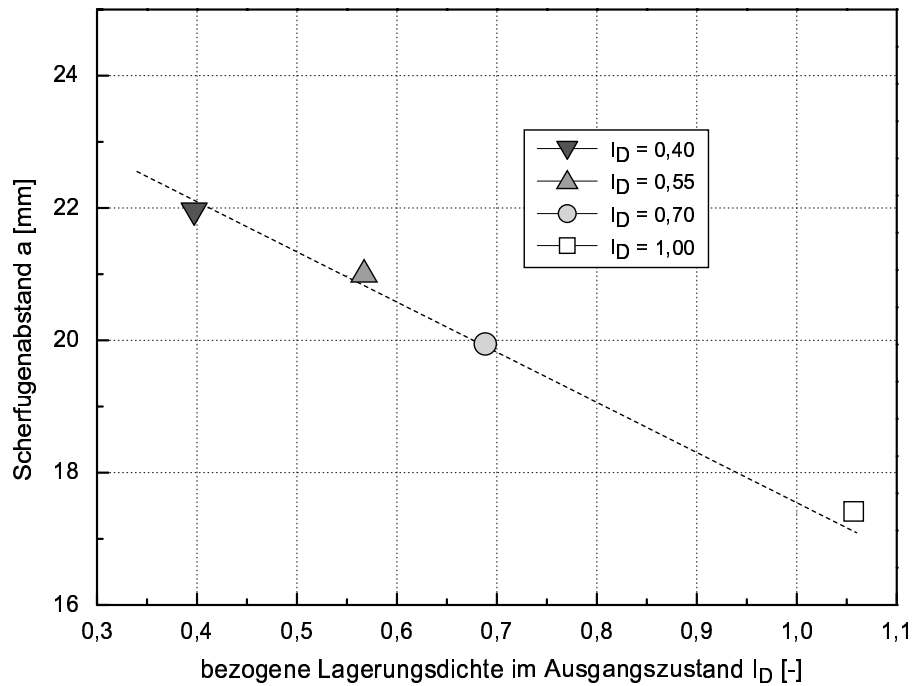


Bild 5.40: Mittlerer Scherfugenabstand in Abhängigkeit der bezogenen Lagerungsdichte

bezogene Lagerungsdichte aufgetragen werden. Dieser Zusammenhang ist in Bild 5.41 dargestellt. Positive Werte zeigen dabei eine Erhöhung der Größe um den entsprechenden Prozentsatz an. Negative Werte bedeuten dementsprechend eine Reduzierung der Größe um den angegebenen Prozentsatz. Deutlich ist in Bild 5.41 zu erkennen, dass zwischen den Änderungen aller dargestellten Größen und der bezogenen Lagerungsdichte in guter Näherung ein linearer Zusammenhang besteht. Der lineare Verlauf aller Kurven deutet darauf hin, dass die Änderung des Abstandes der Scherflächen durch den Ansatz eines konstanten Faktors direkt aus der Änderung des jeweilig betrachteten Parameters hergeleitet werden kann. Diese konstanten Faktoren ergeben sich durch die Normierung der Änderung der jeweiligen Parameter. Die von der Lagerungsdichte unabhängigen Umrechnungsfaktoren zwischen der Änderung des Scherflächenabstandes und der Änderung der verschiedenen Parameter sind Bild 5.42 zu entnehmen.

Die Auswertung der Scherfugenabstände in Bild 5.38 macht deutlich, dass die Abweichungen der Scherflächenabstände von dem zugehörigen Mittelwert um so größer sind je lockerer die Quarzsandproben in den Modellbehälter eingebaut wurden. Dies hat zur Folge, dass einzelne Versuche mit geringer Lagerungsdichte kleinere Abstände aufweisen als Probekörper mit einer vergleichsweise höheren Lagerungsdichte im Ausgangszustand. Die

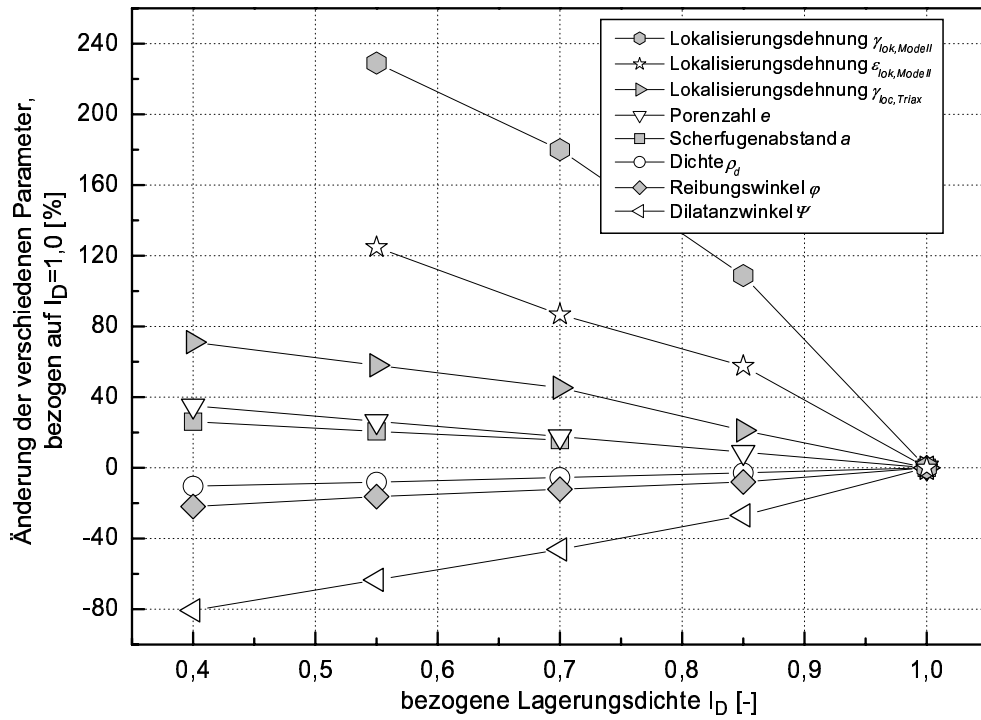


Bild 5.41: Änderung verschiedener Parameter in Bezug auf eine bezogene Lagerungsdichte von  $I_D = 1,0$

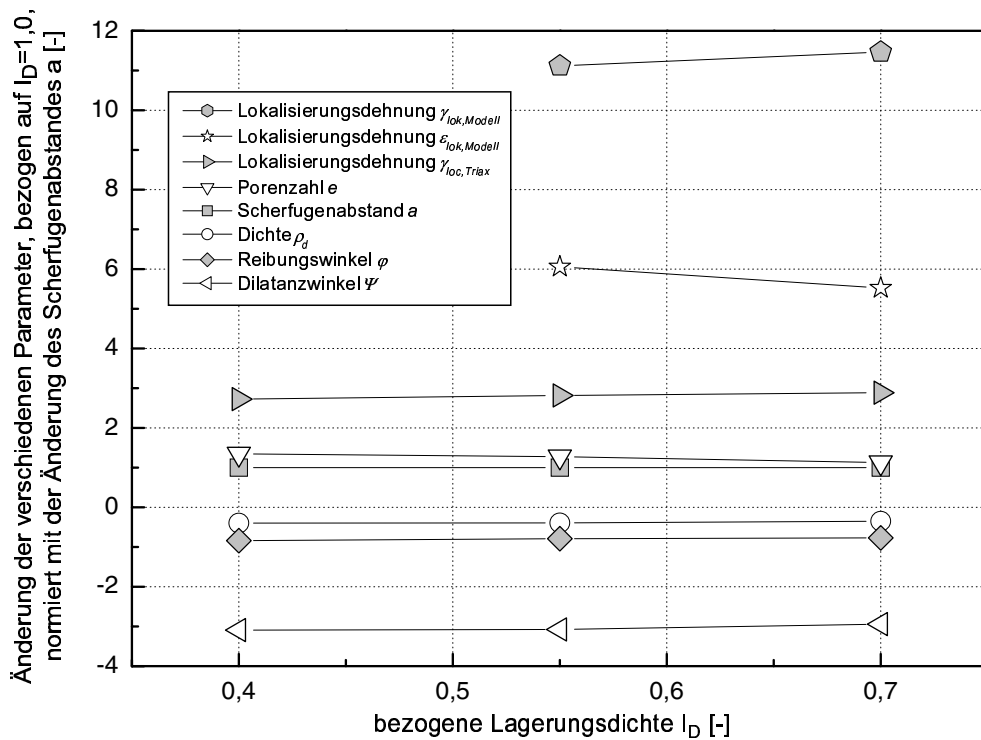


Bild 5.42: Änderung verschiedener Parameter in Bezug auf eine bezogene Lagerungsdichte von  $I_D = 1,0$ , normiert mit der Änderung des Scherfugenabstandes

stärkeren Abweichungen der Abstände vom Mittelwert in lockeren Proben sind größtenteils darauf zurückzuführen, dass sich bei diesen Proben eine deutlich unregelmäßigere Struktur der Scherfugenmuster einstellt als bei dichter gelagerten Sanden. Dies äußert sich zum einen in einer unregelmäßigen Neigung der Scherflächen und zum anderen durch große Unterschiede der Abstände der über die Länge der Proben verteilten Lokalisierungszonen. Verschiedene Autoren [21, 31, 81, 109] weisen auf die Schwierigkeiten in Bezug auf die Identifizierung und die Visualisierung von Scherflächen im Allgemeinen und speziell bei der Untersuchung von locker gelagerten Probekörpern bei der Durchführung von Scherexperimenten hin.

Im Hinblick auf die Neigungen der Scherflächen ist die bezüglich der Scherflächenabstände erkennbare Abhängigkeit der Werte von der Größe der Lagerungsdichte nicht festzustellen. Die Darstellung der Scherflächenneigungen über die horizontal eingeprägte Dehnung in Bild 5.38 zeigt einen deutlichen Unterschied in den Neigungen der dicht gelagerten Versuchskörper ( $I_D \geq 1,0$ ) und den Neigungen der weniger dicht gelagerten Materialien ( $I_D \leq 0,85$ ). Eine Abstufung innerhalb der Neigungen für die Probekörper mit einer Lagerungsdichte von  $I_D \leq 0,85$  ist aber nicht zu erkennen, vielmehr ergeben sich unabhängig von der Dichte in etwa dieselben Neigungsbeträge.

Der beschriebene Unterschied zeigt sich ebenfalls bei der Betrachtung der Scherfugenneigung am Lokalisierungspunkt. Für die dicht gelagerten Versuchskörper mit einer bezogenen Lagerungsdichte von  $I_D \geq 1,0$  ergibt sich durch die Approximation des Verlaufs der Neigung mit einer Geraden und durch Einsetzen der Lokalisierungsdehnung  $\varepsilon_{xx,lok}$  in die Geradengleichung ein Neigungswinkel zum Zeitpunkt der Lokalisierung von  $\vartheta_{lok} = 65,8^\circ$ . Dieser Winkel ist geringfügig größer als der theoretische Gleitflächenwinkel nach Coulomb, der sich für den ermittelten Reibungswinkel des Modellbodens von  $\varphi = 39,8^\circ$  zu  $\vartheta_{lok, I_D=1,0} = 64,9^\circ$  berechnet. Die Abweichungen des Lokalisierungswinkels von der theoretischen Neigung sind durch Messungenauigkeiten zu erklären. Die Neigungswinkel der Scherflächen bei den Versuchen mit einer bezogenen Lagerungsdichte von  $I_D \leq 0,85$  zeigen trotz der Unterschiede in der Größe der Lokalisierungsdehnungen (vgl. Tabelle 5.1) mit Neigungen am Lokalisierungspunkt zwischen  $\vartheta_{lok} = 56,4^\circ (I_D = 0,70)$  und  $\vartheta_{lok} = 57,4^\circ (I_D = 0,85)$  sehr ähnliche Werte. Für alle Lagerungsdichten von  $I_D \leq 0,85$  liegen die Neigungswinkel am Lokalisierungspunkt zwischen den theoretischen Scherflächenneigungen nach Coulomb [18] und Roscoe [106] und stimmen in guter Näherung mit der Neigung nach Arthur et al. [5] überein. Exemplarisch liegt die Scherflächenneigung von  $\vartheta_{lok} = 56,4^\circ$  für eine bezogene Lagerungsdichte von  $I_D = 0,70$  vom Reibungs- und Dila-

tanzwinkel abhängigen theoretischen Scherflächenneigungen nach Coulomb ( $\vartheta_C = 62,5^\circ$ ) und Roscoe ( $\vartheta_R = 48,9^\circ$ ) (vgl. Tabelle 4.1). Die beste Übereinstimmung wird mit der theoretischen Neigung nach Arthur et al. ( $\vartheta_A = 55,7^\circ$ ) erzielt.

Vergleicht man die Scherflächenneigungen am Lokalisierungspunkt für dichten Sand und für die Probekörper mit einer bezogenen Lagerungsdichte  $D \leq 0,85$ , stellt man fest, dass sich unterschiedliche Scherflächenneigungen in Bezug auf die theoretischen Neigungen nach Coulomb, Roscoe und Arthur einstellen. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu experimentellen und theoretischen Ergebnissen, wonach die Scherflächenneigung von der Größe des mittleren Korndurchmessers beeinflusst wird [5, 22, 128] und bei konstanter mittlerer Korngröße dementsprechend ähnliche Scherflächenneigungen zu erwarten gewesen wären. Die Ergebnisse der durchgeführten Modellversuche zeigen, dass die Neigung der Scherfugen zusätzlich von der Dichte der untersuchten Probe bestimmt wird. Dieser Aspekt ist bei der Beschreibung der Abhängigkeit der Scherflächenneigung von der mittleren Korngröße  $d_{50}$  zu berücksichtigen.

Die in Bild 5.39 dargestellten Ergebnisse in Bezug auf den Einfluss der Lagerungsdichte auf die Geometrie der Scherfugenmuster unter erhöhter Erdbeschleunigung bestätigen die Versuchsergebnisse im natürlichen Schwerfeld. Wiederum ist ein deutlicher Unterschied in den Abständen der Scherflächen für dicht gelagerte Materialien ( $I_D = 1,0$ ) und mitteldicht und locker gelagerten Quarzsanden ( $I_D \leq 0,70$ ) zu beobachten. Unterschiedliche Abstände in den Versuchen mit den bezogenen Lagerungsdichten  $I_D = 0,70$  und  $I_D = 0,40$  sind im Gegensatz zu den Versuchen im natürlichen Schwerfeld nicht festzustellen. Die annähernde Übereinstimmung der Abstände im erhöhten Schwerfeld kann darauf zurückgeführt werden, dass insbesondere bei nicht dicht gelagerten Probekörpern durch die Erhöhung des Spannungsniveaus Setzungen auftreten. Diese sind durch begrenzte Umlagerungen einzelner Körner innerhalb der Kornstruktur gekennzeichnet, die Probe verdichtet sich und die Porenzahl nimmt ab. Da die Setzung der Probenoberfläche während der Versuchsdurchführung nicht gemessen wurde, werden zur Bestimmung der Größe der Zusammendrückung der Proben Kompressionsversuche im Ödometer durchgeführt. Die Einbaudichte wurde dabei entsprechend der Dichten der Proben im Modellversuch zu Beginn des Beschleunigungsvorgangs gewählt. Die Ergebnisse der Kompressionsversuche können Anlage A.3 entnommen werden. Bis zu einer Auflastspannung von 25 kPa sind die Setzungen für beide Lagerungsdichten annähernd identisch. Deutliche Unterschiede weisen die Kurven erst ab einer Spannung von  $\sigma = 25$  kPa auf. Bei einer Erhöhung der Auflast um den Faktor zehn ergibt sich nach Bild A.2 in Anlage A.3 eine Zusam-



mendrückung um 0,7 %. Überträgt man die Zusammendrückung auf die Modellversuche im erhöhten Schwerfeld und berechnet man über die Reduzierung des Probenvolumens eine neue Lagerungsdichte, ergibt sich für die Materialprobe mit einer Ausgangslagerungsdichte  $I_D = 0,70$  vor der Erhöhung des Spannungsniveaus eine Erhöhung der Dichte auf einen Wert von  $I_D = 0,73$ . Dieser Wert ist immer noch deutlich kleiner als die Lagerungsdichte der dicht gelagerten Probe. Dementsprechend ergeben sich auch im erhöhten Schwerfeld unterschiedliche Abstände der Scherflächen.

Die Zusammendrückung einer Probe mit einer bezogenen Lagerungsdichte von  $I_D = 0,40$  bei einer Erhöhung der Spannung um den Faktor zehn fällt nach Bild A.2 in Anlage A.3 nur geringfügig größer aus (0,8 %). Die Berücksichtigung dieser Zusammendrückung bei der Berechnung der bezogenen Lagerungsdichte nach dem Erreichen des erhöhten Spannungsniveaus von 10g resultiert in einem Wert von  $I_D = 0,49$ . Dieser Wert ist nur wenig größer als der Ausgangswert der Lagerungsdichte vor der Erhöhung des Spannungsniveaus. Eine grundsätzliche Erhöhung der Lagerungsdichte und eine damit verbundene Annäherung des Scherfugenabstandes an die Größe für eine Lagerungsdichte von  $I_D = 0,70$  ist aber festzustellen. Bei der Durchführung des Modellversuchs tritt möglicherweise eine größere Verdichtung auf, als diejenige, die durch eine reine Kompression des Probekörpers aufgrund der Erhöhung des Spannungsniveaus zu erklären ist. Eine bekannte Eigenschaft nicht-bindiger Böden besteht darin, dass die Böden sich durch eine reine Kompressionsbelastung nur schwer verdichten lassen [35]. Erst bei einer Scherung der Probe ist eine merkliche Verdichtung der Probe zu beobachten. Die Kombination der Belastung aus erhöhtem Spannungsniveau und aus einer Scherung unmittelbar nach dem Beginn der Verschiebung der beweglichen Wand führt bei den Modellversuchen im Extensionsgerät demnach zu einer verstärkten Verdichtung des Probekörpers. Diese Belastungsart kann durch Elementversuche im Oedometer nicht erfasst werden.

Die Größe der Neigung der Scherflächen im erhöhten Schwerfeld verringert sich mit abnehmender Lagerungsdichte bei gleicher horizontaler Dehnung, wobei ein linearer Zusammenhang zwischen der Lagerungsdichte und der Scherflächenneigung aus Bild 5.39 abgelesen werden kann. Die Scherfugenneigung nimmt wie bei den Versuchen im natürlichen Schwerfeld mit zunehmender horizontaler Dehnung ab. Dieser Verlauf kann wiederum mit einer Geraden approximiert werden. In Analogie zu den Ergebnissen im natürlichen Schwerfeld ergibt sich für die dicht gelagerten Quarzsandproben mit der Lokalisierungsdehnung nach Tabelle 5.1 eine Neigung der Scherflächen am Lokalisierungspunkt von  $\vartheta_{\text{lok}} = 65,8^\circ$ . Diese Neigung entspricht der theoretischen Neigung nach Coulomb. Für

die beiden Probekörper mit den Lagerungsdichten von  $I_D = 0,70$  und  $I_D = 0,40$  ergibt sich jeweils eine Scherflächenneigung zum Zeitpunkt der Lokalisierung, die zwischen den Grenzreibungswinkeln nach Coulomb [18] und Roscoe [106] liegt und in sehr guter Näherung mit dem Scherflächenwinkel nach Arthur et al. [5] übereinstimmt. Demnach wird auch durch die Versuche im erhöhten Schwerfeld bestätigt, dass die Übereinstimmung der Scherflächenneigung mit den theoretischen Neigungen nach Coulomb, Roscoe und Arthur nicht nur von der mittleren Korngröße  $d_{50}$ , sondern auch maßgeblich von der Dichte des Materials beim Beginn des Belastungsvorgangs beeinflusst wird.

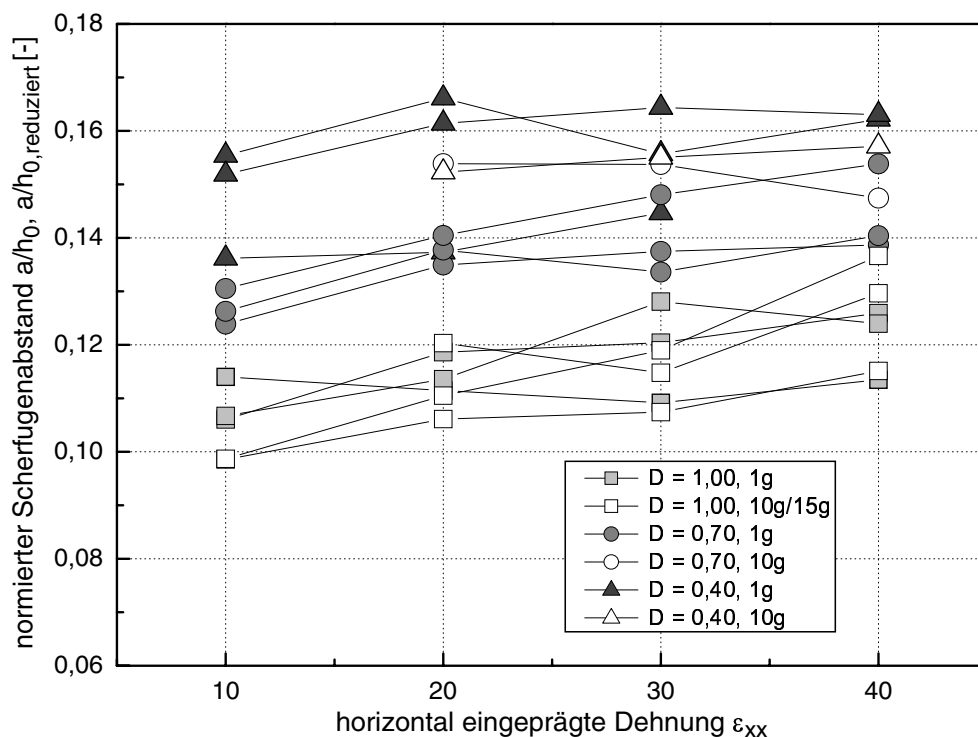


Bild 5.43: Mit der Ausgangshöhe normierter Scherfugenabstand für die Modellversuche im natürlichen und im erhöhten Schwerfeld

In Bild 5.43 sind die mit der Höhe bei Belastungsbeginn normierten Abstände  $a/h_0$  und  $a/h_{0,reduziert}$  in den Modellversuchen sowohl im natürlichen als auch im erhöhten Schwerfeld der Geotechnischen Großzentrifuge zusammengefasst. Bei den Versuchen im natürlichen Schwerfeld wird der Abstand der Scherflächen jeweils durch die Höhe  $h_0$  der Probe nach der Beendigung des Einrieselvorgangs geteilt, bei den Versuchen im erhöhten Schwerfeld wird die Setzung des Probekörpers durch den Ansatz der reduzierten Ausgangshöhe  $h_{0,reduziert}$  berücksichtigt. Aus der Zusammenstellung der Kurven wird deutlich, dass auch

in Bezug auf eine veränderliche Lagerungsdichte keine Abhängigkeit der Scherfugengeometrie vom Spannungszustand innerhalb der Probe festzustellen ist. Obwohl die Kurven für die verschiedenen Lagerungsdichten nicht absolut deckungsgleich sind, ist eine eindeutige Häufung der Messwerte mit einer akzeptablen Streubreite für die Versuche mit gleicher Lagerungsdichte bei unterschiedlichem Spannungszustand zu erkennen. Die Versuche mit variabler Lagerungsdichte bestätigen somit die Ergebnisse der Versuche in Kapitel 5.7, die ebenfalls keine Abhängigkeit des Scherflächenabstandes von der Größe des Spannungsniveaus zeigen.

# Kapitel 6

## Beschreibung des Deformationsmechanismus

### 6.1 Allgemeines

Die durchgeführten Modellversuche im Extensionsgerät haben gezeigt, dass sich nach einer homogenen Probenverformung beim Erreichen des plastischen Grenzzustandes spontan ein System von parallelen Scherfugen über die gesamte Probenlänge entwickelt. In Abhängigkeit der mittleren Korngröße des Materials fallen die Scherflächen in eine Richtung ein oder es bilden sich konjugiert geneigte Scherfugen aus. Die Festigkeit des Materials innerhalb der Scherflächen nimmt nach dem Peak der Spannungs-Dehnungskurve aufgrund der Entfestigung des Materials ab. Der sich einstellende Deformationsmechanismus bleibt aus diesem Grund auch bei der Einprägung von zusätzlicher Dehnung erhalten. Neue Scherfugen bilden sich nicht aus.

Im Folgenden wird zunächst die Kinematik des sich entwickelnden Deformationsmechanismus beschrieben. Die Ausführungen beschränken sich hierbei auf die Beschreibung des einseitig geneigten Scherfugensystems, das sich bei der Verwendung von feinkörnigen Böden einstellt. Auf der Basis der Kinematik des Systems wird durch die Anwendung eines Energiekriteriums die günstigste Geometrie des Scherfugensystems ermittelt. Die Ausgangsgeometrie des Probekörpers und die Materialeigenschaften werden bei den Überlegungen berücksichtigt.

## 6.2 Beschreibung der Kinematik

Die Einprägung der horizontalen Dehnung über die Gummimatte in den Probekörper ruft eine Verformung des Materials hervor. Diese Verformung lässt sich gemäß ihrer Beschreibung in Kapitel 5.1.2 in drei Phasen einteilen. Wird mit der Dehnung der Probe durch die Verschiebung der beweglichen Wand und der damit verbundenen Dehnung der Gummimatte begonnen, verformt sich der Probekörper zunächst homogen. Diese Phase ist von einer gleichmäßigen Auflockerung des Materials geprägt. Die Höhe des Sandkörpers ändert sich nur geringfügig. Ist der plastische Grenzzustand (Peak) innerhalb der Probe erreicht, kommt es zu einer Lokalisierung der Verformung in schmalen Scherbändern. In Abhängigkeit der mittleren Korngröße  $d_{50}$  des Modellmaterials bildet sich ein System von parallelen oder von konjugiert angeordneten Scherflächen aus (vgl. Kapitel 5.4). Die dritte Phase der Verformung ist in Abhängigkeit des Deformationsmechanismus durch die Rotation der entstandenen Blöcke in Richtung der beweglichen Wand oder durch eine symmetrische Verformung der Rautengeometrie gekennzeichnet. Nachfolgend wird ausschließlich der auf der Rotation der Blöcke basierende Verformungsmechanismus beschrieben. Charakteristisch für diesen 'Domino'-Mechanismus ist, dass sich nach der Lokalisierung der Verformung am Lokalisierungspunkt auch bei großen Beträgen der horizontal eingepprägten Dehnung  $\varepsilon_{xx}$  keine neuen Scherflächen bilden und dass sich der Abstand der Scherfugen während der Rotation nicht ändert. Dieses Verhalten konnte mit Hilfe der Röntgentechnik und der DIC-Methode nachgewiesen werden.

Bild 6.1a zeigt ein System von zwei benachbarten Blöcken bei einer Rotation um den hinteren Fußpunkt ' $0_i$ '. Die Blöcke zum Zeitpunkt des Entstehens der Scherflächen sind dunkelgrau dargestellt. Die hellgrau unterlegten Körper zeigen die Blöcke nach einer Drehung um den Winkel  $\Delta\vartheta$  bzw.  $\Delta v$ . Für die nachfolgenden Betrachtungen werden für unterschiedliche Teilbereiche der Blöcke voneinander abweichende Verformungseigenschaften vorausgesetzt. Den ersten Teilbereich bildet der Bereich der Blöcke, der nach Bild 6.1a um den jeweils hinteren Fußpunkt rotiert. Die Auswertung der Röntgenbilder und der digitalen Aufnahmen der Seitenflächenstruktur mit Hilfe der DIC-Methode haben gezeigt, dass sich die Blöcke während der Drehbewegung nur wenig verformen. Aus diesem Grund wird von einer Starrkörper-Rotation ausgegangen. Das Material in den Scherfugen zwischen den Blöcken ist einer einfachen Scherung unterworfen. Dilatantes Materialverhalten innerhalb der Scherfuge wird vorausgesetzt, da nur dicht gelagerte Böden betrachtet werden. Den zweiten Teilbereich bilden die Keile im Bereich der vorderen Fußpunkte. Die Keile

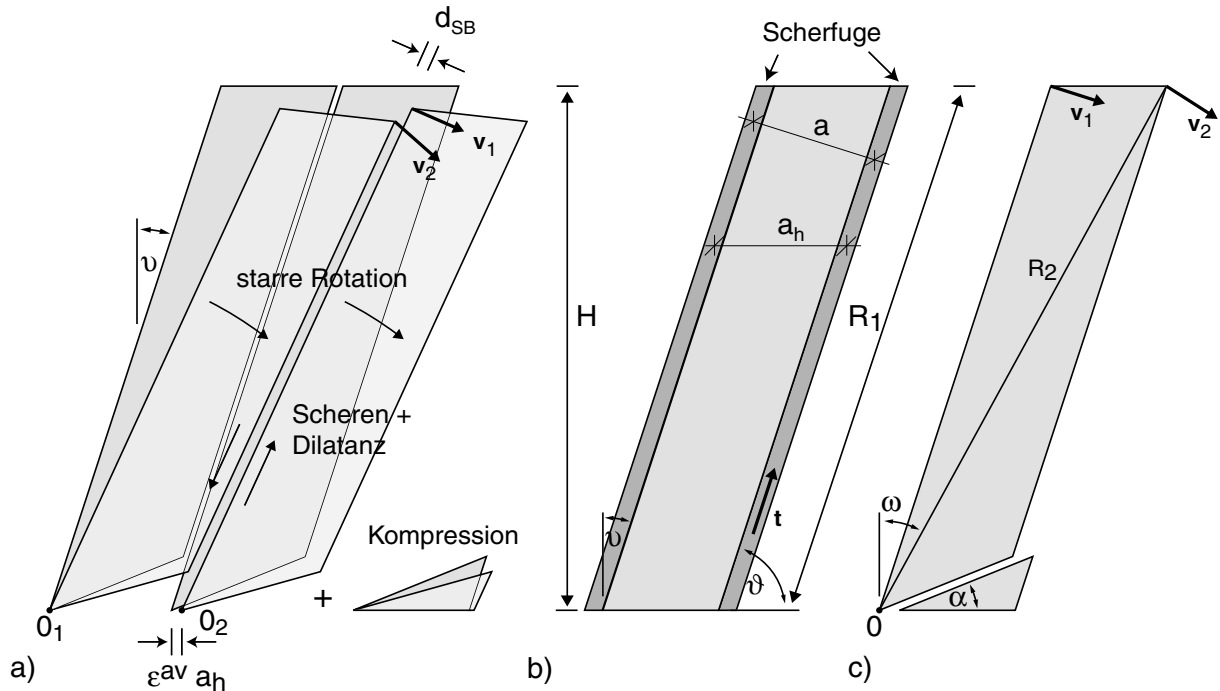


Bild 6.1: Geometrie der Scherfugensysteme

verformen sich mit zunehmender Drehung der starren Teilbereiche. Die Größe des Winkels  $\alpha$  bleibt unbestimmt. Die Auswertung der Röntgenaufnahmen und der DIC-Plots zeigt aber, dass dieser Winkel in der Regel klein ist. Für die folgende Beschreibung der Probenbewegung bzw. der Probenverformung werden neben den in Abschnitt 4.1 aufgeführten Definitionen die Bezeichnungen gemäß der Bilder 6.1a und 6.1b verwendet. Hierbei ist insbesondere darauf hinzuweisen, dass im Folgenden die Neigung der Scherflächen mit dem Winkel  $v$  beschrieben wird. Dieser Winkel schließt die Richtung der Scherfuge und die vertikale Richtung ein. Es gilt die mechanische Vorzeichenkonvention (Druck/Stauchung: negativ, Zug/Dehnung: positiv).

### 6.2.1 Kinematik der Blöcke

Vernachlässigt man zunächst die Dilatanz innerhalb der Scherflächen und geht man von einer starren Rotation der Blöcke aus, ist die zeitliche Änderung des Neigungswinkels  $\dot{v}$  durch folgende Beziehung mit der zeitlichen Änderung der durch die Gummimatte eingepprägten horizontalen Dehnung  $\dot{\epsilon}^{av}$  verknüpft:

$$\dot{v} = \dot{\epsilon}^{av} \cot v. \quad (6.1)$$

Diese Beziehung folgt aus der Kombination der Zeitableitung der trigonometrischen Verknüpfung der Abstände  $a$  und  $a_h$

$$a_h = \frac{a}{\cos v} \Rightarrow \dot{a}_h = \dot{v} a_h \tan v \quad (6.2)$$

und der Zeitableitung der logarithmischen Dehnung

$$\varepsilon^{av} = \ln \frac{a_h}{a_{h0}} \Rightarrow \dot{\varepsilon}^{av} = \frac{\dot{a}_h}{a_h}. \quad (6.3)$$

Zur Überprüfung von Gleichung (6.1) werden für die Änderung der horizontalen Dehnung  $\dot{\varepsilon}^{av}$  und für die Neigung  $\dot{v}$  der Scherflächen Werte gemäß der Ergebnisse des Einflusses der dynamischen Materialeigenschaften in Kapitel 5.5 eingesetzt. Die horizontale Dehnung zum Zeitpunkt der Lokalisierung beträgt nach Tabelle 5.2  $\varepsilon_{lok}^{av} = 3,30\%$ . Die Scherflächenneigung lässt sich aus Gleichung (5.5) berechnen und hat eine Größe von  $v_{lok} = 25,22^\circ$ . Nach Gleichung (5.5) beträgt die Neigung der Scherflächen nach einer Erhöhung der horizontalen Dehnung um den Betrag  $\Delta\varepsilon^{av} = 1,70\%$   $v_{5\%} = 26,06^\circ$ . Dies entspricht einer Änderung des Neigungswinkels der Scherflächen von  $\Delta v_{exp.} = 0,84^\circ$ . Setzt man die experimentell ermittelten Werte in Gleichung (6.1) ein, ergibt sich eine theoretische Vergrößerung des Winkels  $v$  um  $\Delta v_{theo.} = 2,03^\circ$ . Die theoretische Änderung der Rotationsrate  $\Delta v_{theo.}$  ist demnach größer als die experimentell gemessene Rotationsrate  $\Delta v_{exp.}$ . Dieser Unterschied ist auf Eigenschaften des untersuchten Deformationssystems zurückzuführen, die bis jetzt noch nicht betrachtet wurden und dementsprechend nicht in Gleichung (6.1) berücksichtigt werden.

Innerhalb der Scherfugen wird eine einfache Scherung des Materials vorausgesetzt. Da nur dicht gelagerte Böden betrachtet werden, ist diese Scherung mit einer Volumenvergrößerung verbunden. Die Dilatanz des Materials verringert die Rotation der Blöcke, da durch die Aufweitung der Scherfuge die Blöcke in ihrer Drehbewegung behindert werden. Die fortschreitende Scherung des Materials innerhalb der Scherfugen bewirkt eine Entfestigung des Materials im Post-Peak-Bereich der Spannungs-Dehnungs-Beziehung. Bild 6.2a macht deutlich, dass unter der Annahme einer konstanten Vertikalspannung die Entfestigung durch eine Erhöhung der horizontalen Spannung geprägt ist. Gleichzeitig verringert sich die Größe des Reibungswinkels. Die Erhöhung des horizontalen Drucks führt zu einer horizontalen Kompression der Blöcke und wirkt günstig auf deren Rotationsfähigkeit. Die Zusammendrückung der Blöcke wird mit Hilfe der DIC-Methode nachgewiesen. Bild 6.2b zeigt eine Detailaufnahme der horizontalen Dehnung an der Seitenfläche der Probe EVD02

als Inkrement zwischen zwei nachfolgenden digitalen Bildern. Die Zusammendrückung der Blöcke aufgrund der Erhöhung der horizontalen Spannung ist durch negative Werte gekennzeichnet.

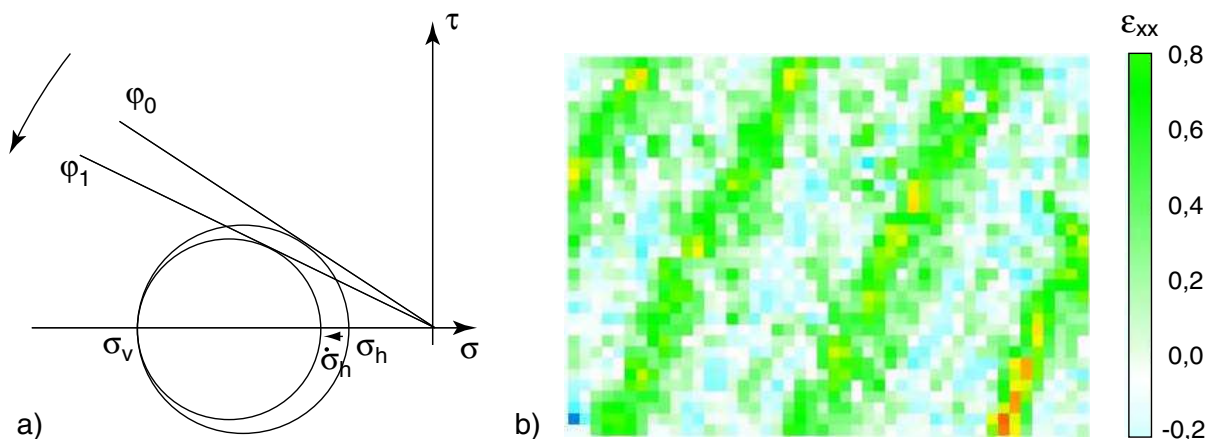


Bild 6.2: Dehnungsinkrement der horizontalen Dehnung an der Seitenfläche von Versuch EVD02

Aus der Beschreibung der beiden Eigenschaften lässt sich folgern, dass sich die Dilatanz innerhalb der Scherfugen und die Zusammendrückung der Blöcke aufgrund der Erhöhung der horizontalen Spannung durch die Entfestigung des Materials unterschiedlich auf die Rotation der Blöcke auswirken. Unter Berücksichtigung dieser beiden Effekte lässt sich Gleichung (6.1) wie folgt darstellen:

$$\dot{v} = \left( \dot{\varepsilon}^{av} - \dot{\varepsilon}^{dil} - \dot{\sigma}_h/E \right) \cot v \quad (6.4)$$

mit

$$\dot{\varepsilon}^{dil} > 0 \quad \text{und} \quad \dot{\sigma}_h/E < 0.$$

$\dot{\varepsilon}^{dil}$  bezeichnet dabei den horizontalen Anteil der Dehnungsrate, der aus der Dilatanz in den Scherflächen resultiert,  $\dot{\sigma}_h$  stellt die zeitliche Änderung der horizontalen Spannung und  $E$  die Steifigkeit des Rotationskörpers dar.

Für die Verformung innerhalb der Scherfuge wird angenommen, dass das Material einfach geschert wird. Aufgrund der dichten Lagerung der Probe im Ausgangszustand ist diese Scherdeformation mit einer Volumenvergrößerung verbunden (vgl. Bild 6.3). Die aus der Dilatanz resultierende horizontale Dehnung  $\dot{\varepsilon}^{dil}$  kann mit Hilfe des Aufgleitwinkels  $\psi$  als



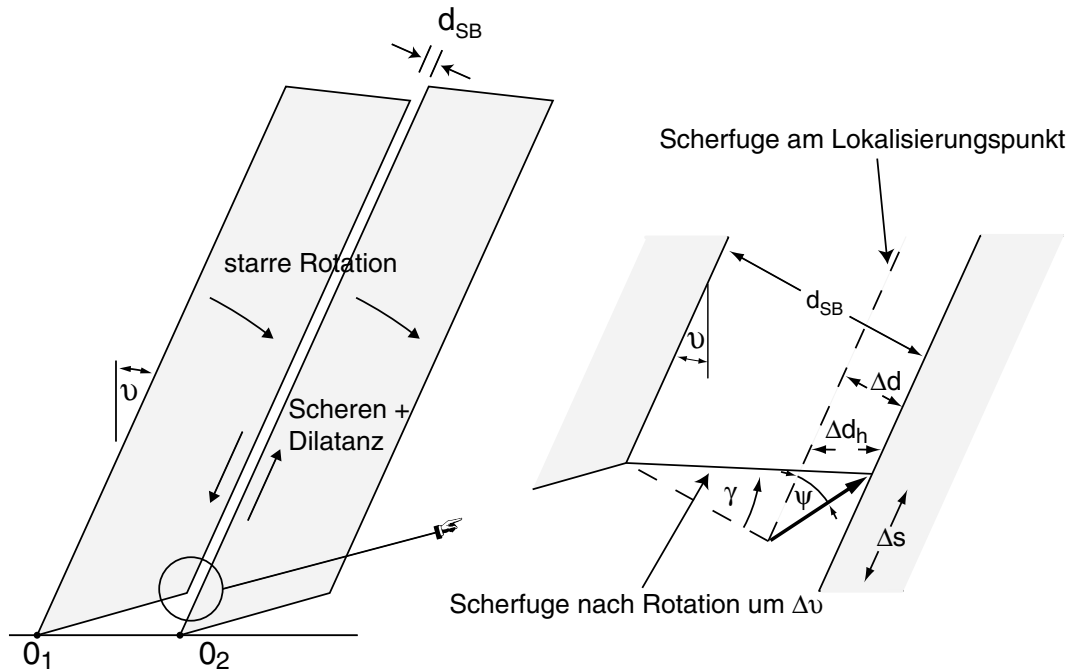


Bild 6.3: Geometrie der Scherfuge

Kombination der Gleichungen

$$\cos v = \frac{\Delta d}{\Delta d_h} = \frac{\Delta d}{a_h \varepsilon^{dil}}, \quad (6.5)$$

$$\gamma \approx \tan \gamma = \frac{\Delta s}{d_{SB}} \quad (6.6)$$

und

$$\tan \psi = \frac{\Delta d}{\Delta s} \quad (6.7)$$

bestimmt werden. Es ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\dot{\varepsilon}^{dil} = \dot{\gamma} \frac{\tan \psi}{\cos v} \frac{d_{SB}}{a_h}, \quad (6.8)$$

wobei mit  $\dot{\gamma}$  die Schergeschwindigkeit bezeichnet wird. Die Scherfugendicke  $d_{SB}$  wird aus den Versuchsergebnissen in Kapitel 5.3 abgeschätzt. Auf der Basis der Abbildungen 5.21 und 5.23 ergibt sich für eine dichte Lagerung des verwendeten feinen Quarzsandes eine Scherfugenmächtigkeit von  $d_{SB} \approx 13d_{50}$ . Der Faktor  $d_{SB}/a_h$  in Gleichung (6.8) bewirkt, dass die Dehnung  $\dot{\gamma} \frac{\tan \psi}{\cos v}$  innerhalb der Scherfuge über das Teilsystem 'Block und Scherfuge' verteilt wird.

In Bezug auf die Bestimmung der Scherrate  $\dot{\gamma}$  zeigt Bild 6.1a, dass bei einer reinen Rotation der Blöcke um die hinteren Fußpunkte  $O_1$  und  $O_2$  die Begrenzungskanten zweier

benachbarter Blöcke nach der Drehung nicht mehr parallel verlaufen würden. Um die Parallelität der Kanten zu gewährleisten, muss sich deshalb bei einer Rotation der Blöcke der Fußpunkt  $0_2$  zusätzlich horizontal um den Betrag  $\varepsilon^{av}a_h$  verschieben. Um die Scherrate  $\dot{\gamma}$  zu berechnen, wird die Differenz der Geschwindigkeiten der zusammengehörigen Ecken zweier benachbarter Blöcke  $\mathbf{v}_1$  und  $\mathbf{v}_2$  in Richtung der Kanten bestimmt (vgl. Bild 6.1c). Die Scherrate in Bezug auf die Scherfugendicke ergibt sich als Skalarprodukt der Differenz der Geschwindigkeitsvektoren  $\mathbf{v}_1$  und  $\mathbf{v}_2$  mit dem Einheitsvektor  $\mathbf{t}$  in Richtung der Kanten wie folgt:

$$\dot{\gamma} = \frac{1}{d_{SB}}(\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2) \cdot \mathbf{t}. \quad (6.9)$$

Der Einheitsvektor  $\mathbf{t}$  und die Geschwindigkeiten lassen sich mit der Geometrie und den Bezeichnungen nach den Bildern 6.1a-c bestimmen:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} \sin v \\ \cos v \end{Bmatrix}, \quad \mathbf{v}_1 = \dot{v}R_1 \begin{Bmatrix} \cos v \\ -\sin v \end{Bmatrix} + \begin{Bmatrix} \dot{\varepsilon}^{av}a_h \\ 0 \end{Bmatrix} \quad \text{und} \quad \mathbf{v}_2 = \dot{v}R_2 \begin{Bmatrix} \cos \omega \\ -\sin \omega \end{Bmatrix} \quad (6.10)$$

mit

$$\tan \omega = \frac{H \tan v + a_h}{H} \quad \text{und} \quad R_2 = \frac{H}{\cos \omega}. \quad (6.11)$$

Durch Einsetzen der Vektoren für  $\mathbf{v}_1$ ,  $\mathbf{v}_2$  und  $\mathbf{t}$  und der Gleichungen (6.11) in Gleichung (6.9) erhält man die Scherrate  $\dot{\gamma}$ :

$$\dot{\gamma} = \frac{a_h}{d_{SB}} (\dot{v} \cos v + \dot{\varepsilon}^{av} \sin v). \quad (6.12)$$

Vernachlässigt man die Dilatanz innerhalb der Scherfuge und die Erhöhung der horizontalen Spannung aufgrund der Entfestigung des Materials innerhalb der Scherfuge, vereinfacht sich Gleichung (6.12) unter Verwendung von Gleichung (6.1) zu

$$\dot{\gamma} = \frac{a_h}{d_{SB}} \frac{\dot{\varepsilon}^{av}}{\sin v} = \frac{a_h}{d_{SB}} \frac{\dot{v}}{\cos v}. \quad (6.13)$$

Unter Berücksichtigung der Scherrate  $\dot{\gamma}$  nach Gleichung (6.12) ergibt sich der horizontale Anteil der aus der Dilatanz des Materials resultierenden Dehnung nach Gleichung (6.8) zu:

$$\dot{\varepsilon}^{dil} = \dot{\gamma} \frac{\tan \psi}{\cos v} \frac{d_{SB}}{a_h} = \frac{\tan \psi}{\cos v} (\dot{v} \cos v + \dot{\varepsilon}^{av} \sin v) = \tan \psi (\dot{v} + \dot{\varepsilon}^{av} \tan v). \quad (6.14)$$

Setzt man Gleichung (6.14) in Gleichung (6.4) ein, erhält man den Dehnungsanteil, der durch die Änderung der horizontalen Spannung nach der Entstehung der Scherflächen hervorgerufen wird:

$$\frac{\dot{\sigma}_h}{E} = \dot{\varepsilon}^{av} (1 - \tan v \tan \psi) - \dot{v} (\tan v + \tan \psi) \quad (6.15)$$

wobei  $E$  den Elastizitätsmodul des Materials bezeichnet. Alternativ ergibt sich die zeitliche Änderung der Scherfugenneigung zu:

$$\dot{v} = \frac{\dot{\varepsilon}^{av}(1 - \tan v \tan \psi) - \dot{\sigma}_h/E}{(\tan v + \tan \psi)}. \quad (6.16)$$

Zur Überprüfung der aufgeführten Zusammenhänge werden wiederum die experimentell ermittelten Werte in Bezug auf den Einfluss der dynamischen Materialeigenschaften aus Kapitel 5.5 verwendet. Hierzu werden die Änderung der horizontal eingepprägten Dehnung von  $\Delta\varepsilon = 1,7\%$  und die daraus resultierende Änderung des Winkels der Scherflächenneigung  $\Delta v = 0,84^\circ$  in Gleichung (6.15) eingesetzt. Ebenso wird der Dilatanzwinkel für dicht gelagerten Sand (Material 1) am Peak der Spannungs-Verformungskurve nach Tabelle 4.1 von  $\psi = 14,5^\circ$  berücksichtigt und anschließend die zeitliche Änderung der horizontalen Spannung  $\dot{\sigma}_h$  berechnet.

Mit den genannten Werten ergibt sich eine horizontale Spannungsrate  $\dot{\sigma}_h > 0$ , die aufgrund der resultierenden Verminderung der horizontalen Spannung  $\sigma_h$  zu einer Aufweitung der Blöcke führen würde. Dieses Ergebnis steht im Widerspruch zu den experimentellen Ergebnissen, nach denen sich eine Zusammendrückung der Blöcke durch eine Erhöhung des horizontalen Drucks d.h.  $\dot{\sigma}_h < 0$  ergibt (vgl. Bild 6.2). Zurückzuführen ist dieser Widerspruch auf die Unterschätzung des Dilatanzwinkels innerhalb der Scherfuge durch den Ansatz des im Triaxialversuch ermittelten globalen Dilatanzwinkels von  $\psi = 14,5^\circ$ . Wie Untersuchungen von Desrues et al. [21] zeigen, ist die Änderung der Porenzahl bei der Scherung einer Triaxialprobe innerhalb der Scherfugen deutlich größer als die Änderung der über das gesamte Probenvolumen gemittelten Porenzahl. Aus diesen Ergebnissen kann geschlossen werden, dass auch die lokale Dilatanz innerhalb der Scherflächen deutlich größer ist als die globale Dilatanz, die mit der radialen und der axialen Dehnung der Probe nach Gleichung (4.26) berechnet wird. Ermittelt man mit Gleichung (6.15) die Größe der lokalen Dilatanz die nötig ist, um eine Erhöhung der horizontalen Spannung hervorzurufen, ergibt sich ein Wert von  $\psi = 23,7^\circ$ .

### 6.2.2 Kinematik der Keile

Um eine Rotation eines Blocks um den hinteren Fußpunkt zu ermöglichen, muss sich der Keil ABC im Bereich des vorderen Fußpunktes unter dem Block plastisch verformen. Die Geometrie des Keils ist in Bild 6.4 zum Zeitpunkt der Lokalisierung (Dreieck ABC) und nach einer Drehung des Blocks um den Winkel  $\Delta v$  dargestellt (Dreieck A'B'C').

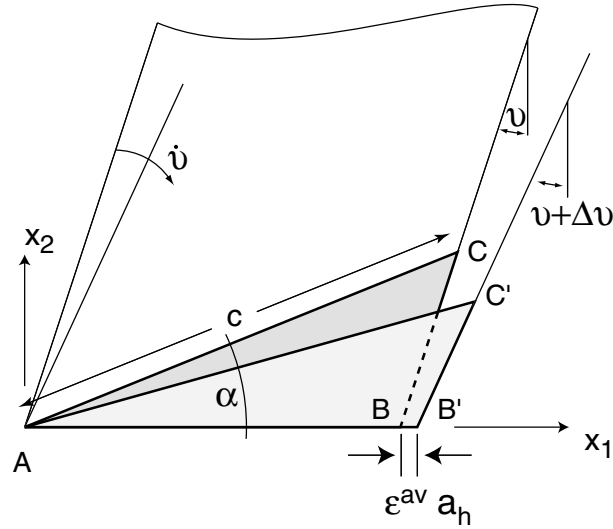


Bild 6.4: Geometrie eines Keils zum Zeitpunkt der Lokalisierung und nach einer Drehung um den Winkel  $\Delta v$

Die Koordinaten der drei Eckpunkte  $A$ ,  $B$  und  $C$  betragen zum Zeitpunkt der Lokalisierung mit Bezug auf das in Bild 6.4 dargestellte Koordinatensystem

$$A : (0; 0), B : (a_h; 0) \text{ und } C : (c \cos \alpha; c \sin \alpha) \quad (6.17)$$

mit

$$c = \frac{a}{\cos(v + \alpha)} = \frac{a_h \cos v}{\cos(v + \alpha)}. \quad (6.18)$$

Aus der Geometrie im unverformten Zustand (Ecken  $A$ ,  $B$  und  $C$ ) und aus den Koordinaten der Ecken nach einer Rotation der Blöcke um den Winkel  $v$  (Ecken  $A$ ,  $B'$  und  $C'$ ) lassen sich die Geschwindigkeitsvektoren der Ecken des Keils bestimmen:

$$\mathbf{v}_A = \begin{Bmatrix} 0 \\ 0 \end{Bmatrix}, \mathbf{v}_B = \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}^{av} a_h \\ 0 \end{Bmatrix} \text{ und } \mathbf{v}_C = \begin{Bmatrix} \dot{\epsilon}^{av} a_h + c \dot{v} \sin \alpha \\ -c \dot{v} \cos \alpha \end{Bmatrix}. \quad (6.19)$$

Die Koeffizienten  $\epsilon_{ij}$  des allgemeinen Geschwindigkeitsfeldes

$$\mathbf{v}(\mathbf{x}) = \begin{Bmatrix} \epsilon_{11} x_1 + \epsilon_{12} x_2 \\ \epsilon_{21} x_1 + \epsilon_{22} x_2 \end{Bmatrix} \quad (6.20)$$

lassen sich mit Hilfe der bekannten Geschwindigkeiten (6.19) mit den Gleichungen

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{Bx1} &= \dot{\epsilon}^{av} a_h = \epsilon_{11} \cdot a_h + \epsilon_{12} \cdot 0 \\ \mathbf{v}_{Bx2} &= 0 = \epsilon_{21} \cdot a_h + \epsilon_{22} \cdot 0 \\ \mathbf{v}_{Cx1} &= \dot{\epsilon}^{av} a_h + c \dot{v} \sin \alpha = \epsilon_{11} \cdot c \cos \alpha + \epsilon_{12} \cdot c \sin \alpha \\ \mathbf{v}_{Cx2} &= -c \dot{v} \cos \alpha = \epsilon_{21} \cdot c \cos \alpha + \epsilon_{22} \cdot c \sin \alpha \end{aligned} \quad (6.21)$$

bestimmen. Als Ergebnis erhält man

$$\begin{aligned}\epsilon_{11} &= \dot{\epsilon}^{av} \\ \epsilon_{12} &= \frac{\dot{\epsilon}^{av} a_h + c \dot{v} \sin \alpha - \dot{\epsilon}^{av} c \cos \alpha}{c \sin \alpha} \\ \epsilon_{21} &= 0 \\ \epsilon_{22} &= -\dot{v} \cot \alpha.\end{aligned}\tag{6.22}$$

Die Koeffizienten  $\dot{\epsilon}_{ij}$  der Dehnungsrate  $\mathbf{D}$  ergeben sich als symmetrischer Anteil des Geschwindigkeitsgradienten  $\mathbf{L}$  zu

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \dot{\epsilon}^{av} & \frac{\dot{\epsilon}^{av} a_h + c \dot{v} \sin \alpha - \dot{\epsilon}^{av} c \cos \alpha}{c \sin \alpha} \\ \frac{\dot{\epsilon}^{av} a_h + c \dot{v} \sin \alpha - \dot{\epsilon}^{av} c \cos \alpha}{c \sin \alpha} & -\dot{v} \cot \alpha \end{bmatrix}\tag{6.23}$$

### 6.2.3 Änderung der Probenhöhe

Die vertikale Spannung  $\sigma_v = \rho g z$  innerhalb des Probekörpers steigt linear mit der Tiefe  $z$  von der spannungsfreien Oberfläche zum Boden des Behälters an. Die Ordinate der vertikalen Spannung beträgt hier:

$$\sigma_{v,Boden} = H \rho g.\tag{6.24}$$

Die zeitliche Änderung der vertikalen Spannung berechnet sich zu

$$\dot{\sigma}_v = \dot{H} \rho g\tag{6.25}$$

Hierbei wird angenommen, dass sich die Dichte des Probekörpers nicht oder nur geringfügig ändert, d.h.  $\dot{\rho} = 0$ .

Bei einer isochorischen d.h. volumenkonstanten Verformung der Probe lässt sich die Änderung der Probenhöhe  $\Delta H$  aus dem Produkt der Ausgangshöhe und der horizontalen Dehnung des Probekörpers bestimmen:

$$\Delta H = -H \Delta \epsilon^{av} \quad \text{bzw.} \quad \dot{H} = -H \dot{\epsilon}^{av}\tag{6.26}$$

Berücksichtigt man zusätzlich die Volumenänderungen, die aus dem dilatanten Materialverhalten innerhalb der Scherfugen (Gleichung (6.14)) und aus der elastischen Zusammendrückung der Blöcke zwischen den Scherflächen resultieren, ergibt sich das Verhältnis der zeitlichen Änderung der Probenhöhe und der Ausgangshöhe wie folgt:

$$\frac{\dot{H}}{H} = - \left[ \dot{\epsilon}^{av} - \dot{\gamma} \frac{\tan \psi}{\cos \nu} \frac{d_{SB}}{a_h} - \frac{\dot{\sigma}_h}{E} \right] = -\dot{\chi}.\tag{6.27}$$

Der Zusammenhang in Gleichung (6.27) beschreibt ebenfalls das Verhältnis der vertikalen Spannungsrate (vgl. Gleichung (6.25)) zur Größe der vertikalen Spannung im Ausgangszustand:

$$\frac{\dot{\sigma}_v}{\sigma_v} = \frac{\dot{H}\rho g}{H\rho g} = \frac{\dot{H}}{H} = -\dot{\chi}. \quad (6.28)$$

### 6.3 Vergrößerung der horizontalen Spannungen aufgrund von isotroper Entfestigung des Materials

Die Entfestigung des Modellmaterials ist durch eine gleichmäßige Abnahme des Reibungswinkels  $\varphi$  mit zunehmender Scherung  $\gamma$  innerhalb der Scherfläche nach der Lokalisierung gekennzeichnet. Unter der Annahme eines linearen Zusammenhangs ergibt sich das folgende Verhältnis zwischen der zeitlichen Änderung des Reibungswinkels und der zeitlichen Änderung der Scherung innerhalb der Scherflächen:

$$\frac{d\varphi}{d|\gamma|} = -k = \text{konst.} \quad \text{bzw.} \quad \frac{\dot{\varphi}}{\dot{\gamma}} = -k. \quad (6.29)$$

Da das Material nur innerhalb der Scherfläche im plastischen Grenzzustand verbleibt, ist Gleichung (6.29) nur lokal in der Scherfuge gültig.

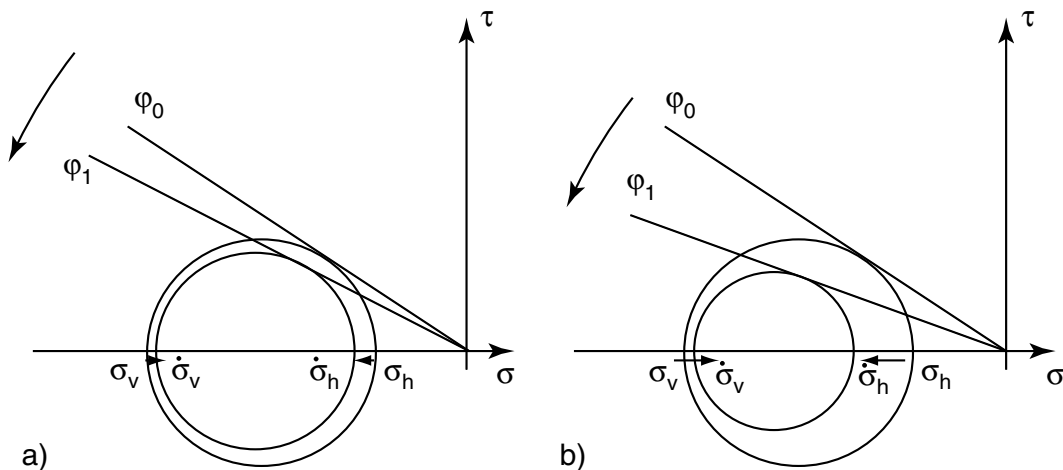


Bild 6.5: a) geringe und b) hohe Entfestigung des Modellmaterials

Wie die numerischen Simulationen in Kapitel 4 gezeigt haben, stellt die vertikale Spannung zu jedem Versuchszeitpunkt die größte Spannung dar. Die horizontale Spannung in

in Längsrichtung des Modellbehälters fällt nach dem Beginn der Verschiebung der beweglichen Wand ab, die horizontale Spannung senkrecht zur Verschiebungsrichtung bleibt während der Versuche annähernd konstant und liegt zu jedem Zeitpunkt zwischen den beiden Extremalspannungen. Die Entfestigung des Materials innerhalb der Scherflächen führt zu einer Erhöhung der horizontalen Spannung, die Reduktion der Höhe mit zunehmender horizontaler Dehnung führt zu einer Abnahme der vertikalen Spannung (vgl. Gleichung (6.28)). Dieser Zusammenhang ist in Bild 6.5 dargestellt.

Das Verhältnis der horizontalen und der vertikalen Spannung lässt sich aus dem Mohr'schen Spannungskreis ableiten und ergibt sich wie folgt:

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = K = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}. \quad (6.30)$$

Hierbei wird angenommen, dass der Boden keine kohäsiven Eigenschaften besitzt ( $c = 0$ ). Diese Annahme wird durch die Ergebnisse der durchgeführten triaxialen Extensionsversuche gestützt. Die zeitliche Änderung der horizontalen Spannung lautet

$$\dot{\sigma}_h = \sigma_v \dot{K} + \dot{\sigma}_v K. \quad (6.31)$$

Hierbei ist zu beachten, dass die horizontale Spannungsrates nach Gleichung (6.31) nicht mit der zeitlichen Änderung der horizontalen Spannung nach Gleichung (6.15) gleichzusetzen ist. Der Unterschied ergibt sich aus der Tatsache, dass Gleichung (6.31) aus dem Mohr'schen Spannungskreis abgeleitet wird und Gleichung (6.15) allein aus der Kinematik des Scherfugensystems resultiert.

Mit

$$\dot{K} = \frac{-2 \cos \varphi}{(1 + \sin \varphi)^2} \dot{\varphi} \quad (6.32)$$

und unter Verwendung von Gleichung (6.29) lässt sich Gleichung (6.31) wie folgt schreiben:

$$\dot{\sigma}_h = \sigma_v \frac{2 \cos \varphi}{(1 + \sin \varphi)^2} \dot{\gamma} k + \dot{\sigma}_v K. \quad (6.33)$$

Berücksichtigt man mit Gleichung (6.28) noch die Änderung der Probenhöhe und damit die Änderung der vertikalen Spannung  $\dot{\sigma}_v$ , ergibt sich für die zeitliche Änderung der horizontalen Spannung:

$$\begin{aligned} \dot{\sigma}_h &= \sigma_v \frac{2 \cos \varphi}{(1 + \sin \varphi)^2} \dot{\gamma} k - \sigma_v \dot{\chi} K \\ &= \sigma_v \left[ \frac{2 \cos \varphi}{(1 + \sin \varphi)^2} \dot{\gamma} k - \dot{\chi} K \right]. \end{aligned} \quad (6.34)$$

Wird das Verhältnis der zeitlichen Änderung der Probenhöhe zur Ausgangsprobenhöhe nach Gleichung (6.27) in Gleichung (6.34) eingesetzt, ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\begin{aligned}\dot{\sigma}_h &= \sigma_v \left[ \frac{2 \cos \varphi}{(1 + \sin \varphi)^2} \dot{\gamma} k + \frac{\dot{H}}{H} K \right] \\ &= \sigma_v \left[ \frac{2 \cos \varphi}{(1 + \sin \varphi)^2} \dot{\gamma} k - K \left[ \dot{\varepsilon}^{av} - \dot{\gamma} \frac{\tan \psi}{\cos \nu} \frac{d_{SB}}{a_h} - \frac{\dot{\sigma}_h}{E} \right] \right].\end{aligned}\quad (6.35)$$

Formt man Gleichung (6.35) nach  $\dot{\sigma}_h$  um, erhält man:

$$\dot{\sigma}_h = \frac{\sigma_v}{1 - \sigma_v K/E} \left[ \frac{2 \cos \varphi}{(1 + \sin \varphi)^2} \dot{\gamma} k - K \left[ \dot{\varepsilon}^{av} - \dot{\gamma} \frac{d_{SB} \tan \psi}{a_h \cos \nu} \right] \right].\quad (6.36)$$

Die Rate der Scherverformung innerhalb der Scherflächen  $\dot{\gamma}$  ist nach Gleichung (6.12) über die Änderung des Scherfugenwinkels  $\dot{\nu}$  (Gleichung 6.16) ebenfalls von der Rate der horizontalen Spannung  $\dot{\sigma}_h$  abhängig. Setzt man die Gleichungen (6.12) und (6.16) in Gleichung (6.36) ein und löst diese nach  $\dot{\sigma}_h$  auf, ergibt sich der in Bild 6.6 dargestellte Zusammenhang zwischen der zeitlichen Änderung der horizontalen Spannung und des horizontalen Abstandes der Scherfugen. Folgende experimentell ermittelten Werte wurden zur Berechnung von  $\dot{\sigma}_h$  verwendet:

- $\varphi = 38,7^\circ$
- $\psi = 23,7^\circ$
- $\kappa = -\frac{\sigma_v}{E} = 0,024$
- $d_{SB} = 10d_{50} = 0,0035m$
- $\dot{\varepsilon}^{av} = 0,017$ .

Der Dilatanzwinkel von  $\psi = 23,7^\circ$  entspricht dem lokalen Winkel innerhalb der Scherfuge, der nach Kapitel 6.2.1 nötig ist, um eine Erhöhung der horizontalen Spannung hervorzurufen. Der Quotient  $\kappa$  der vertikalen Spannung und der Steifigkeit des Bodens wurde aus den Ergebnissen von Kompressionsversuchen an dicht gelagerten Proben abgeleitet (vgl. Anhang A.3).

Bild 6.6a zeigt den Verlauf der aus der Änderung des horizontalen Drucks bestimmten horizontalen Dehnungsrate über den horizontalen Scherfugenabstand für den Entfestigungsgradienten  $k = 0,262$ . Die Größe von  $k$  wurde mit Hilfe von Gleichung (6.29) auf



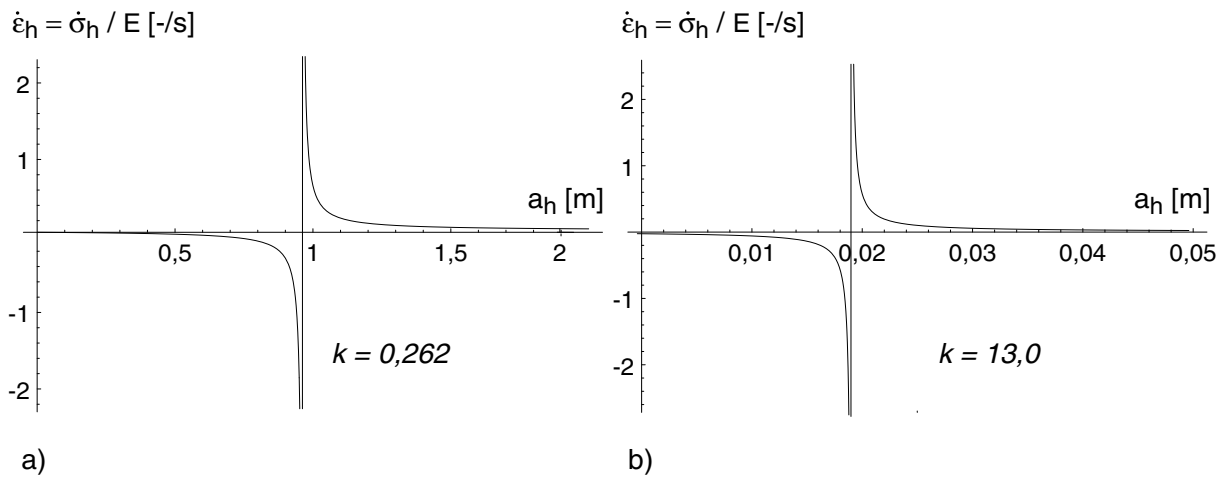


Bild 6.6: Rate der horizontalen Spannung in Abhängigkeit des horizontalen Abstandes der Scherfugen

der Basis der durchgeführten Modellversuche an dicht gelagertem Quarzsand bestimmt. Hierbei wurde eine Lokalisierungsdehnung von  $\epsilon_{xx,lok} = 3,3 \%$  vorausgesetzt. Der Entfestigungsgradient  $k = 0,262$  gibt die Änderung des Reibungswinkels  $\varphi$  bei einer Erhöhung der horizontalen Dehnung auf einen Wert von  $\epsilon_{xx} = 5,0 \%$  wieder. In Bild 6.6a ist deutlich zu erkennen, dass die maximale Änderung der horizontalen Dehnungsrate des Probenmaterials bei einem horizontalen Scherfugenabstand von  $a_h \approx 0,96$  m erreicht wird. Dieser Wert entspricht einem Vielfachen des experimentell ermittelten Scherflächenabstandes von  $a_h = 18,8$  mm. Ein den experimentellen Ergebnissen entsprechender Scherfugenabstand resultiert aus Gleichung (6.36), wenn bei ansonsten gleichen Parametern der Wert für den Entfestigungsgradienten auf  $k = 13,0$  geändert wird (vgl. Bild 6.6b).

Auf den ersten Blick lässt sich in dem Größenunterschied zwischen dem mit Hilfe von Gleichung (6.29) auf der Basis der durchgeführten Modellversuche bestimmten Entfestigungsgradienten und dem aus Gleichung (6.36) abgeleiteten Wert ein Widerspruch erkennen. Hierbei ist zu beachten, dass der Entfestigungsgradient von  $k = 0,262$  einen relativ großen Bereich der horizontal eingepprägten Dehnung von  $\Delta\epsilon_{xx} = 1,7 \%$  nach dem Peak der Spannungs-Dehnungs-Kurve beschreibt. Für Entfestigungsgradienten, die unmittelbar nach dem Erreichen des Peaks gemessen werden, sind aus Modellversuchen und aus numerischen Simulationen deutlich höhere Werte bekannt. Diese entsprechen in der Größenordnung den Werten, die sich aus dem Kriterium der maximalen horizontalen Spannungsänderung ergeben. Beispielhaft sind hierfür in Bild 6.7 die Ergebnisse aus Finite-Element Berechnungen von Maier [71] und aus Modellversuchen von Hammad [37]

dargestellt. Maier wendet in seiner Arbeit verschiedene Regularisierungsmethoden auf das hypoplastische Stoffgesetz an (Nichtlokale Methode, Cosserat-Kontinuum, Gradienten-Kontinuum) und vergleicht die Ergebnisse der mit diesen Modellen simulierten Biaxialversuche mit den Ergebnisse der Modellversuche im Biaxialgerät von Hammad [37].

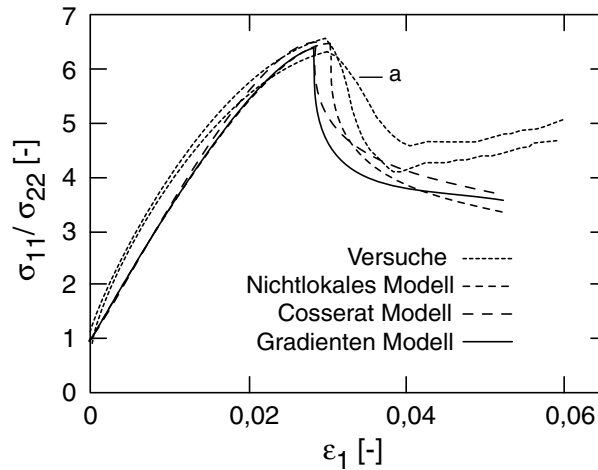


Bild 6.7: Spannungs-Dehnungs-Kurven im Biaxialversuch nach Maier [71]

Die Darstellung der Ergebnisse in Bild 6.7 macht deutlich, dass die Kurven, welche die Ergebnisse der numerischen Simulationen wiedergeben, nach dem Erreichen des Peaks der Spannungs-Dehnungskurve stark abfallen. Dieses Verhalten ist dadurch gekennzeichnet, dass der Reibungswinkel, der für kohäsionsloses Material durch folgende Gleichung mit dem Verhältnis der maximalen und minimalen Hauptspannung verknüpft ist

$$\varphi = \arcsin \left[ \frac{\sigma_{11}/\sigma_{22} - 1}{\sigma_{11}/\sigma_{22} + 1} \right], \quad (6.37)$$

bei einer geringfügigen Änderung der vertikalen Dehnung  $\epsilon_1$  nach der Lokalisierung der Verformung deutlich reduziert wird. Das gleiche Verhalten ist bei den Ergebnissen der Modellversuche von Hammad [37] zu beobachten. Der Abfall des Hauptspannungsverhältnisses ist bei den experimentellen Ergebnissen allerdings nicht so stark ausgeprägt wie bei den berechneten Kurvenverläufen. Unter der Annahme, dass die Scherdehnung innerhalb des Probekörpers unmittelbar nach dem Peak der Spannungs-Verformungs-Kurve in etwa der axialen Dehnung des Körpers entspricht, ergibt sich für die mit 'a' bezeichnete Kurve in Bild 6.7 ein Entfestigungsgradient von  $k = 7,9$ . Dieser Wert stimmt in der Größenordnung mit der Größe des Entfestigungsgradienten überein, der aus der analytischen Beschreibung des Deformationsmechanismus resultiert ( $k = 13,0$ ). Ein Vergleich dieser

beiden Werte ist zulässig, da bei den durchgeführten Modellversuchen im Extensionsgerät biaxiale Randbedingungen vorliegen und diese Randbedingung auch bei der analytischen Beschreibung des Deformationsmechanismus zu Grunde gelegt wurde.

Ein Vergleich der Verläufe der Spannungs-Verformungs-Kurven in Bild 6.7 mit denen der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten triaxialen Extensionsversuche (vgl. Bild 4.9) zeigt, dass der Kurvenverlauf mit der ausgeprägten Abnahme des Reibungswinkels nach dem Peak nur für Biaxialversuche charakteristisch ist. Diese Aussage wird durch weitere experimentelle Ergebnisse gestützt [23, 34]. Demnach ist bei triaxialen Kompressions- und Extensionsversuchen der Bereich um den Peak der Spannungs-Verformungs-Kurve durch einen gleichmäßigen Kurvenverlauf gekennzeichnet. Im Verfestigungsbereich ist dieser Verlauf auch bei Biaxialversuchen zu beobachten, nach dem Peak nimmt die Größe des Reibungswinkels bzw. des Hauptspannungsverhältnisses jedoch rasch ab. In diesem Zusammenhang ist insbesondere die Arbeit von Green [34] zu nennen. Green führt sowohl Kompressions- und Extensionsversuche an zylindrischen Proben unter triaxialen Randbedingungen als auch Modellversuche an quadratischen Probekörpern unter echten triaxialen Bedingungen für verschiedene Werte des Faktors

$$b = \frac{\sigma_2 - \sigma_3}{\sigma_1 - \sigma_3}, \quad \sigma_1 > \sigma_2 > \sigma_3 \quad (6.38)$$

durch. Der Wert  $b = 0$  kennzeichnet dabei die triaxiale Kompression, der Wert  $b = 1$  die triaxiale Extension. Auch Green beobachtet in seinen Versuchen die bereits beschriebenen Unterschiede im Verlauf des Spannungs-Verformungsverhaltens des untersuchten Sandes.

Zurückzuführen sind diese Unterschiede auf die besonderen Randbedingungen beider Versuchsarten. Bei triaxialen Versuchen an zylindrischen Proben bildet sich nach dem Peak der Spannungs-Verformungs-Kurve in der Regel eine Schar von einzelnen Scherflächen aus, deren Orientierungen durch die Versuchsrandbedingungen im voraus nicht festgelegt sind. Aufgrund der sich kreuzenden Scherflächen ist eine Verformung des Probekörpers zu beobachten, die durch ein allgemeines Ausbauchen des Zylinders gekennzeichnet ist. Mit diesem Deformationsmechanismus ist eine gleichmäßige Abnahme der vertikalen Spannung und damit des Hauptspannungsverhältnisses und des Reibungswinkels verbunden. Beim Scherversuch im Biaxialgerät wird die Verformung der Probe in eine Richtung während des Versuches verhindert. Diese Richtung ist gleichzeitig die Richtung der mittleren Hauptspannung, wodurch die Orientierung der Scherflächenebene festgelegt ist. Beim Biaxialversuch kommt es in der Regel nicht zu einer Entwicklung mehrerer Scherfugen, die Verformung des Probekörpers lokalisiert sich vielmehr in einer einzelnen Scherfuge.

Nach der Lokalisierung gleiten die beiden Teilkörper entlang dieser Scherfläche ab. Aus diesem Grund ist nach dem Peak der Spannungs-Verformungs-Kurve ein starker Abfall der vertikalen Spannung und damit des Reibungswinkels zu beobachten.

Zusammenfassend zeigt der Vergleich der Verläufe der aus Biaxialversuchen resultierenden Spannungs-Verformungs-Kurven in Bild 6.7 mit denen der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten triaxialen Extensionsversuche in Bild 4.9, dass der Kurvenverlauf nach dem Peak der Spannungs-Verformungs-Kurven und damit die Größe des Entfestigungsgradienten maßgeblich von den Spannungszuständen innerhalb des Systems beeinflusst wird.

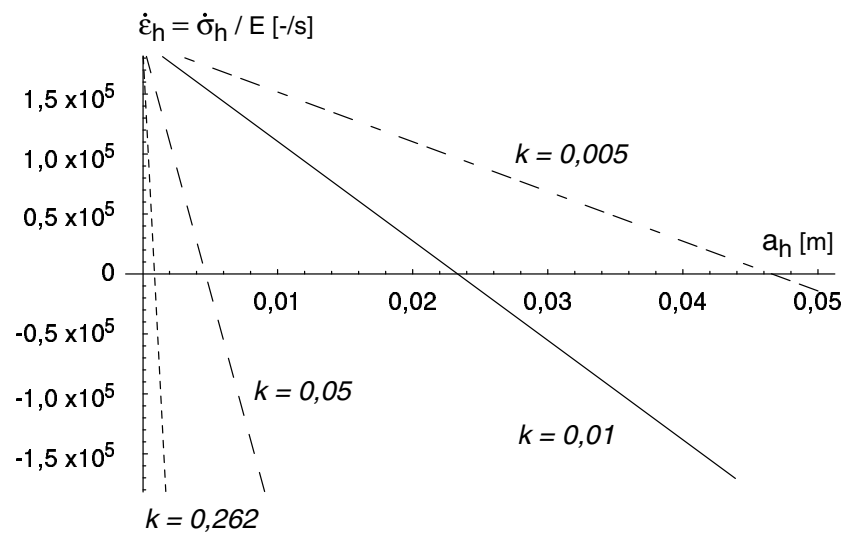


Bild 6.8: Rate der horizontalen Dehnung in Abhängigkeit des horizontalen Abstandes der Scherfugen für verschiedene Werte von  $k$

In Bild 6.8 ist der aus der Änderung der horizontalen Spannung abgeleitete Verlauf der horizontalen Dehnungsrate in Abhängigkeit des horizontalen Scherfugenabstandes  $a_h$  für verschiedene Größen des Entfestigungsgradienten  $k$  dargestellt. Da die experimentell beobachtete Kompression der Blöcke zwischen den Scherflächen aus der Erhöhung der horizontalen Spannung resultiert, kommen als mögliche Scherfugenabstände nur solche Werte in Betracht, bei denen die Rate der horizontalen Spannung negativ wird. Die Schnittpunkte der Kurven mit der Abszissenachse in Bild 6.8 beschreiben deshalb untere Grenzwerte des Scherfugenabstandes. Für die aus den experimentellen Ergebnissen hergeleitete Größe des Entfestigungsgradienten von  $k = 0,262$  schneidet die Kurve die Abszissenachse bei  $a_h = 1,0$  mm, für größere Werte von  $k$  wird diese Größe noch kleiner. Der experimen-

tell gemessene horizontale Scherfugenabstand  $a_h = 18,8$  mm liegt daher im zulässigen Bereich.

Eine Variation der Parameter in Gleichung (6.36) zeigt, dass der Nulldurchgang der Rate der horizontalen Spannung von einer Änderung des Verhältnisses  $\kappa$  der vertikalen Spannung und der Steifigkeit des Bodens nur geringfügig beeinflusst wird. Ändert man den Reibungs- und den Dilatanzwinkel gemäß Tabelle 4.1, d.h. simuliert man eine Änderung der Lagerungsdichte des Materials, zeigt sich, dass mit abnehmendem Reibungs- und Dilatanzwinkel und damit mit abnehmender Lagerungsdichte größere Scherfugenabstände nach dem Kriterium  $\dot{\sigma}_h < 0$  zu erwarten sind. Dieses Ergebnis bestätigt die experimentellen Ergebnisse in Bezug auf den Einfluss der Lagerungsdichte auf die Geometrie der Scherfugenmuster in Kapitel 5.8, wonach mit abnehmender Lagerungsdichte größere Scherflächenabstände zu beobachten sind (vgl. Tabelle 5.8).

Eine Variation der vertikalen Spannung ändert lediglich die Steigung der jeweiligen Geraden in Bild 6.8, der Nulldurchgang der Kurve und damit die minimale Scherfugendicke ändert sich nicht. Hieraus kann geschlossen werden, dass eine Änderung des Spannungsniveaus die Geometrie der Scherflächenmuster nicht beeinflusst. Dieses Ergebnis bestätigt die experimentellen Ergebnisse der Modellversuche im Extensionsgerät bezüglich des Einflusses einer Änderung des Spannungsniveaus auf die Geometrie der resultierenden Scherfugensysteme. Unabhängig davon, ob die Modellversuche im natürlichen oder im erhöhten Spannungsniveau durchgeführt wurden, ergaben sich jeweils gleiche Scherfugenabstände und Scherfugeneigungen.

Die Variation des Entfestigungsgradienten  $k$ , der die Änderung des Reibungswinkels in Abhängigkeit der Scherdehnungsrate beschreibt, beeinflusst erheblich den Ort, an dem der Kurvenverlauf eine Unstetigkeit aufweist (vgl. Bild 6.6). Weiterhin ist auch der untere Grenzwert des Scherfugenabstandes, stark davon abhängig, welcher Entfestigungsgradient in Gleichung (6.36) eingesetzt wird. Dieser Unterschied wird aus den unterschiedlichen Schnittpunkten der einzelnen Kurve mit der Abszissenachse in Bild 6.8 deutlich. Bild 6.9 stellt qualitativ den Unterschied in der Größe von  $k$  dar. Der Reibungswinkel ist hierbei über den Verschiebungsweg der beweglichen Wand aufgezeichnet. Die Differenz zwischen dem Reibungswinkel am Peak der Spannungs-Dehnungskurve  $\varphi_{peak}$  und dem Restreibungswinkel  $\varphi_{res}$  wird bei der Variation von  $k$  in Gleichung (6.36) konstant gehalten. Die Änderung von  $k$  zeigt sich demnach in einer unterschiedlichen Größe des Weges, bei dem der Peakreibungswinkel auf den Restreibungswinkel abfällt. Die Ergebnisse widerlegen die Ergebnisse einer analytischen Betrachtung der Scherfugengeometrie hinter um

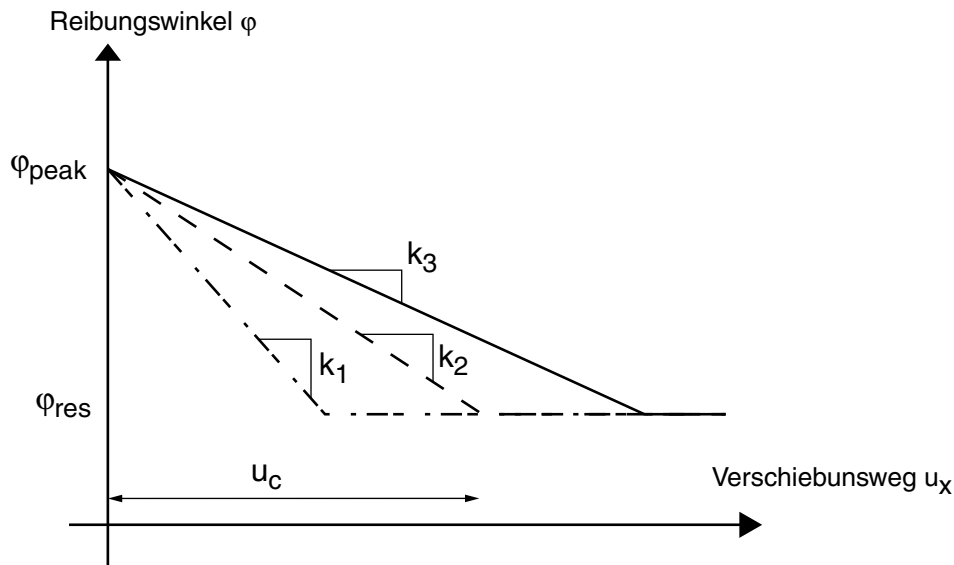


Bild 6.9: Änderung des Reibungswinkels mit zunehmender Verschiebung  $u_x$  der beweglichen Wand

den Fußpunkt rotierenden Verbauwänden nach Leśniewska & Mróz [63, 64] (vgl. Kapitel 2). Leśniewska & Mróz stellen fest, dass der Abstand der Scherflächen allein von der Größe der Differenz zwischen Peak- und Restreibungswinkel abhängt und von dem Weg  $u_c$  nicht beeinflusst wird. Die Ergebnisse der analytischen Betrachtung von Leśniewska & Mróz stehen weiterhin im Widerspruch zu den experimentellen Ergebnissen in Bezug auf den Einfluss der Lagerungsdichte auf die Geometrie der Scherfugenmuster. Die Differenz zwischen Peak- und Restreibungswinkel wird von Leśniewska & Mróz dahingehend interpretiert, dass bei einer kleinen Differenz lockerer Boden und bei einer großen Differenz dichter Boden ansteht. Ihre Ergebnisse zeigen, dass der Abstand der Scherflächen mit abnehmender Differenz der Winkel kleiner wird und bei einem locker gelagerten Boden ganz verschwindet. Die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Modellversuche zeigen hingegen, dass der Scherfugenabstand mit abnehmender Lagerungsdichte größer wird.

## 6.4 Berücksichtigung der anisotropen Entfestigung des Materials

Die isotrope Entfestigung des Modellmaterials ist dadurch gekennzeichnet, dass die Größe des Reibungswinkels des Bodens, ausgehend vom Reibungswinkel  $\varphi_0$  am Peak der Spannungs-Dehnung-Kurve, mit zunehmender Scherung  $\dot{\gamma}$  abnimmt (vgl. Gleichung (6.29)). Ist an Stelle einer homogenen Verformung der Probe eine Lokalisierung der Verformung in Scherfugen zu beobachten, kann man annehmen, dass die Entfestigung nur entlang der Scherfugen wirkt. Auf anderen Querschnittsflächen behält dagegen der Boden seine Scherfestigkeit  $\tau$ . Dieser Zusammenhang ist in Bild 6.10 dargestellt. Nach einer Entfestigung des Materials innerhalb der Scherfuge und der damit verbundenen Abnahme des Reibungswinkels schneidet der Mohr'sche Spannungskreis die Fließfläche nach dem Kriterium von Coulomb.

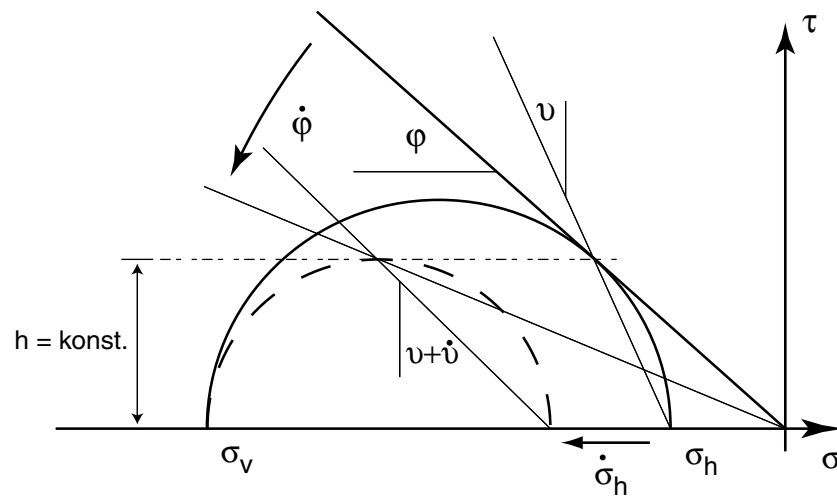


Bild 6.10: Anisotrope Entfestigung des Modellmaterials

Über einfache trigonometrische Beziehungen bezüglich der konstanten Festigkeit  $h = \tau$  des Materials lässt sich aus der Kombination der Gleichungen

$$\sin v = \frac{h / \cos v}{\sigma_h - \sigma_v} \quad \text{und} \quad \tan \varphi = \frac{h}{h \tan v - \sigma_h} \quad (6.39)$$

folgender Zusammenhang zwischen der horizontalen und der vertikalen Spannung aufstellen:

$$\sigma_h = \sigma_v \cot(\varphi + v) \tan v. \quad (6.40)$$

Aus dieser Gleichung ergibt sich durch die Ableitung nach der Zeit die horizontale Spannungsrate bei anisotroper Entfestigung des Bodens zu:

$$\dot{\sigma}_h = \dot{\sigma}_v \cot(\varphi + \nu) \tan \nu - \sigma_v \frac{\tan \nu}{\sin^2(\varphi + \nu)} \dot{\varphi} + \sigma_v \frac{\sin \varphi \cos(\varphi + 2\nu)}{\sin^2(\varphi + \nu) \cos^2 \nu} \dot{\nu}. \quad (6.41)$$

Um die zeitliche Änderung der horizontalen Spannung in Abhängigkeit des horizontalen Scherfugenabstandes darzustellen, werden zunächst die zeitliche Änderung der Scherfugenneigung  $\dot{\nu}$  mit Gleichung (6.16) und  $\dot{\varphi}$  mit Gleichung (6.29) ersetzt. Die Änderung der Probenhöhe mit zunehmender Dehnung des Modellkörpers wird durch die Verwendung von Gleichung (6.28) berücksichtigt. Hieraus ergibt sich folgender Zusammenhang:

$$\dot{\sigma}_h = \sigma_v \left[ -\dot{\chi} \cot(\varphi + \nu) \tan \nu + \frac{\tan \nu}{\sin^2(\varphi + \nu)} \dot{\gamma} k + \frac{\sin \varphi \cos(\varphi + 2\nu)}{\sin^2(\varphi + \nu) \cos^2 \nu} \dot{\nu} \right]. \quad (6.42)$$

Setzt man nun die Kapitel 6.3 zusammengefassten Parameter in Gleichung (6.42) ein und löst nach  $\dot{\sigma}_h$  auf, zeigt sich, dass sich für die horizontale Spannungsrate und den horizontalen Scherfugenabstand derselbe Zusammenhang ergibt wie für die isotrope Entfestigung des Materials in Kapitel 6.3. Beide Kurven sind deckungsgleich, der Einfluss der anisotropen Entfestigung auf die horizontale Spannungsrate wird aus diesem Grund vernachlässigt.

## 6.5 Energiedissipation ohne Berücksichtigung der Entfestigung des Materials

Mit den in Abschnitt 6.2.1 beschriebenen Kinematiken der rotierenden Blöcke und der Keile im Bereich des vorderen Fußpunktes (Kapitel 6.2.2) lässt sich die Energiedissipation innerhalb des beschriebenen Systems bestimmen. Die durchschnittliche Energiedissipation, d.h. die mit dem horizontalen Scherfugenabstand normierte Dissipationsrate ergibt sich aus der Multiplikation der Spannung mit der korrespondierenden Dehnungsrate und lässt sich für das Scherfugensystem allgemein wie folgt beschreiben:

$$D = \frac{1}{a_h} \left[ (\bar{\tau} \dot{\gamma} + \bar{\sigma}_h \dot{\epsilon}^{dil}) A_{Scherfuge} + \sigma_v (\dot{\epsilon}_{22} + K \dot{\epsilon}_{11}) A_{Keil} \right]. \quad (6.43)$$

Der Faktor  $K$  bezeichnet dabei den aktiven Erddruckbeiwert:

$$K = \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi}, \quad (6.44)$$



die Variablen  $\dot{\varepsilon}_{11}$  und  $\dot{\varepsilon}_{22}$  repräsentieren die Dehnungsrate in Richtung der Hauptspannungen (vgl. Gleichung (6.23)).

Die Flächen der Scherfuge und des Keils berechnen sich zu:

$$\begin{aligned} A_{Scherfuge} &= \frac{H}{\cos \nu} d_{SB} \\ A_{Keil} &= \frac{1}{2} a_h c \sin \alpha. \end{aligned} \quad (6.45)$$

Die Ergebnisse der numerischen Simulation des Versuches zeigen, dass die Hauptspannungen den vertikalen und horizontalen Spannungen entsprechen. Damit ergibt sich die mittlere Schubspannung entlang der Scherfuge unter dem Neigungswinkel  $\nu = 90^\circ - \vartheta$  zur Vertikalen, d.h. in einer Höhe von  $0,5H$  zu:

$$\bar{\tau} = \frac{1}{2} \sin 2\vartheta \frac{1}{2} (\sigma_v - \sigma_h) = \frac{1}{2} \sin 2\vartheta \frac{1}{2} (\sigma_2 - \sigma_1) = \frac{1}{4} \sin 2\nu H \rho g (1 - K). \quad (6.46)$$

Die vertikale und die horizontale Spannung berechnen sich in der Mitte der Probe zu

$$\bar{\sigma}_v = \frac{1}{2} \rho g H \quad \text{und} \quad \bar{\sigma}_h = \frac{1}{2} \rho g H K. \quad (6.47)$$

Die Kombination der Gleichungen (6.43) bis (6.47) ergibt:

$$D = \frac{1}{a_h} \left[ \left( \frac{1}{4} \sin 2\nu H \rho g (1 - K) \dot{\gamma} + \frac{1}{2} \rho g H K \dot{\varepsilon}^{dil} \right) \frac{H}{\cos \nu} d_{SB} + H \rho g (\dot{\varepsilon}_{22} + K \dot{\varepsilon}_{11}) \frac{1}{2} a_h c \sin \alpha \right]. \quad (6.48)$$

Wird die Entfestigung des Materials nicht berücksichtigt, ändern sich die horizontale und die vertikale Spannung nach der Entwicklung der Scherflächen am Peak der Spannungs-Dehnung-Kurve und damit der Reibungswinkel  $\varphi$  nicht, d.h.  $\dot{\sigma}_h = \dot{\sigma}_v = 0$  (vgl. Bild 6.5). Die vertikale Spannung ist demnach konstant und kann entsprechend Gleichung (6.24) bestimmt werden. Mit der Annahme, dass sich die horizontale Spannung nach dem Peak nicht ändert, lässt sich die horizontal eingeprägte Dehnung  $\dot{\varepsilon}^{av}$  nach Gleichung (6.15) darstellen. Aus der Bedingung

$$\frac{\dot{\sigma}_h}{E} = 0 \quad (6.49)$$

folgt nach Umstellung

$$\dot{\varepsilon}^{av} = \frac{\tan \nu + \tan \psi}{1 - \tan \nu \tan \psi} \dot{\nu} = S \dot{\nu}. \quad (6.50)$$

Die Substitution von Gleichung (6.50) in Gleichung (6.12) liefert:

$$\dot{\gamma} = \frac{a_h \dot{\nu}}{d_{SB}} T \quad \text{mit} \quad T = (\cos \nu + S \sin \nu) \quad (6.51)$$

Mit den vorstehenden Gleichungen und unter Verwendung von Gleichung (6.14) und Gleichung (6.22) ergibt sich die dissipierte Arbeit zu

$$D = \frac{\sigma_v \dot{v}}{2a_h} \left[ \left( \frac{1}{2} \sin 2\nu (1 - K) \frac{a_h}{d_{SB}} + K \frac{\tan \psi}{\cos \nu} \right) \frac{TH}{\cos \nu} d_{SB} + (-\cot \alpha + KS) a_h c \sin \alpha \right] \quad (6.52)$$

Die Auswertung der Probendeformation gemäß Bild 5.11 hat gezeigt, dass die Fläche des plastisch verformten Teils des Rotationskörpers im Bereich des Blockauflagers klein ist im Vergleich zu der Fläche des restlichen Blocks. Aus diesem Grund kann die Arbeit, die innerhalb dieses Bereiches dissipiert wird, vernachlässigt werden. Aus Gleichung (6.52) folgt mit dieser Annahme:

$$D = \frac{\sigma_v \dot{v}}{2a_h} \left[ \left( \frac{1}{2} \sin 2\nu (1 - K) \frac{a_h}{d_{SB}} + K \frac{\tan \psi}{\cos \nu} \right) \frac{TH}{\cos \nu} d_{SB} \right] \quad (6.53)$$

Die Ableitung der dissipierten Arbeit nach dem horizontalen Scherfugenabstand  $a_h$  zeigt, dass nur noch Terme in die Gleichung eingehen, die vom Quadrat des Scherfugenabstandes abhängen. Mit der Ableitung lässt sich aus diesem Grund keine Nullstelle und damit keine Extremalstelle bestimmen. Dieses Ergebnis ist dahingehend zu interpretieren, dass bei einer Nichtberücksichtigung der Entfestigung des Materials keine Scherfugenbildung zu beobachten ist. Die Nichtberücksichtigung der Entfestigung, d.h. die Annahme ideal plastischen Materialverhaltens, ist in Bezug auf die Untersuchung von Böden mit der Untersuchung von locker gelagerten Böden zu vergleichen. Aus diesem Grund werden mit dem Ergebnis zum einen die Versuchsergebnisse zum Einfluss des Spannungs-Verformungsverhaltens auf die Scherfugenbänderung in Kapitel 5.8 bestätigt. Hier konnte beobachtet werden, dass sich der Scherfugenabstand mit abnehmender Lagerungsdichte vergrößert. Zum anderen bestätigt das Ergebnis Modellversuche [39], bei denen bei lockerer Lagerung der Probekörper ebenfalls keine Scherfugenbildung beobachtet werden konnte.

## 6.6 Energiedissipation unter Berücksichtigung der Entfestigung des Materials

Die Dissipation der Energie unter Berücksichtigung der Änderung der horizontalen Spannung aufgrund der Entfestigung des Materials innerhalb der Scherfugen kann als Summe der Dissipationsanteile innerhalb der Scherflächen und innerhalb der Keile beschrieben werden. Der Anteil der Dissipation innerhalb der Scherfugen ergibt sich wie folgt:

$$D_{Scherfuge} = \frac{1}{a_h} \left[ \bar{\tau} \dot{\gamma} + \bar{\sigma}_h \dot{\varepsilon}^{dil} \right] A_{Scherfuge}. \quad (6.54)$$

Die Scherfestigkeit  $\bar{\tau}$ , die Scherdehnungsrate  $\dot{\gamma}$ , die horizontale Spannung  $\bar{\sigma}_h$ , der horizontale Dehnungsanteil  $\dot{\varepsilon}^{dil}$  aus der Dilatanz und die Fläche der Scherfuge  $A_{Scherfuge}$  werden mit folgenden Gleichungen berechnet:

$$\begin{aligned} \bar{\tau} &= \frac{1}{4} \sin 2\nu H \rho g (1 - K_a) \\ \dot{\gamma} &= \frac{a_h}{d_{SB}} T \quad \text{mit } T = (\cos \nu + S \sin \nu) \\ \bar{\sigma}_h &= \frac{1}{2} K \rho g H \\ \dot{\varepsilon}^{dil} &= \frac{\tan \psi}{\cos \nu} (\dot{v} \cos \nu + \dot{\varepsilon}^{av} \sin \nu) \\ A_{Scherfuge} &= \frac{H}{\cos \nu} d_{SB} \end{aligned}$$

Der Anteil der Energie, der durch die Deformation der Keile im Bereich der vorderen Fußpunkte der Rotationskörper verbraucht wird, lässt sich mit folgender Gleichung berechnen:

$$D_{Keil} = \frac{1}{a_h} \sigma_v (\dot{\varepsilon}_{22} + K \dot{\varepsilon}_{11}) A_{Keil}, \quad (6.55)$$

mit:

$$\begin{aligned} \sigma_v &= \rho g H \\ \dot{\varepsilon}_{11} &= \dot{\varepsilon}^{av} \\ \dot{\varepsilon}_{22} &= -\dot{v} \cot \alpha \\ K &= \frac{1 - \sin \varphi}{1 + \sin \varphi} \\ A_{Keil} &= \frac{1}{2} a_h c \sin \alpha = \frac{a_h^2 \cos \nu}{2 \cos(\nu + \alpha)} \sin \alpha \end{aligned}$$

Die Kombination der Gleichungen (6.54) und (6.55) ergibt die gesamte im System dissipierte Arbeit  $D$ :

$$D = D_{Scherfuge} + D_{Keil} = \frac{1}{a_h} [\bar{\tau}\dot{\gamma} + \bar{\sigma}_h \dot{\varepsilon}^{dil}] A_{Scherfuge} + \frac{1}{a_h} \sigma_v (\dot{\varepsilon}_{22} + K\dot{\varepsilon}_{11}) A_{Keil}. \quad (6.56)$$

Da die Entfestigung und damit die horizontale Spannungsrate berücksichtigt werden soll, kann die zeitliche Änderung des Scherfugenneigungswinkels  $\dot{v}$  nicht mit Gleichung (6.50) bestimmt werden. Vielmehr muss in Gleichung (6.15) die horizontale Spannungsrate nach Gleichung (6.34) eingesetzt werden. Kombiniert man beide Gleichungen ergibt sich mit  $\kappa = \frac{\sigma_v}{E}$  folgender Zusammenhang:

$$\dot{\varepsilon}^{av} (1 - \tan v \tan \psi) - \dot{v} (\tan v + \tan \psi) = \kappa \left[ \frac{2 \cos \varphi}{(1 + \sin \varphi)^2} \dot{\gamma} k - \dot{\chi} K \right]. \quad (6.57)$$

Vernachlässigt man zunächst die Änderung der Höhe der Probe mit zunehmender Dehnung lässt sich Gleichung (6.57) wie folgt vereinfachen:

$$\dot{\varepsilon}^{av} (1 - \tan v \tan \psi) - \dot{v} (\tan v + \tan \psi) = \kappa \frac{2 \cos \varphi}{(1 + \sin \varphi)^2} \dot{\gamma} k. \quad (6.58)$$

Hieraus folgt nach der Substitution von  $\dot{\gamma}$  nach Gleichung (6.12):

$$\dot{\varepsilon}^{av} (1 - \tan v \tan \psi) - \dot{v} (\tan v + \tan \psi) = \kappa \frac{2 \cos \varphi}{(1 + \sin \varphi)^2} k \frac{a_h}{d_{SB}} (\dot{v} \cos v + \dot{\varepsilon}^{av} \sin v). \quad (6.59)$$

Definiert man  $U = \kappa \frac{2 \cos \varphi}{(1 + \sin \varphi)^2} k$  und  $x = \frac{a_h}{d_{SB}}$  folgt:

$$\dot{\varepsilon}^{av} (1 - \tan v \tan \psi) - \dot{v} (\tan v + \tan \psi) = Ux (\dot{v} \cos v + \dot{\varepsilon}^{av} \sin v). \quad (6.60)$$

Hieraus ergibt sich das Verhältnis der zeitlichen Änderung des Neigungswinkels der Scherfugen zur allgemeinen horizontalen Dehnungsrate:

$$\frac{\dot{v}}{\dot{\varepsilon}^{av}} = \frac{(1 - \tan v \tan \psi) - Ux \sin v}{(\tan v + \tan \psi) + Ux \cos v}. \quad (6.61)$$

Setzt man dieses Verhältnis in Gleichung (6.56) ein, lässt sich die dissipierte Arbeit je Zeiteinheit in Abhängigkeit des horizontalen Scherfugenabstandes auftragen. Die Bilder 6.11a-c zeigen diesen Zusammenhang in Abhängigkeit des Entfestigungsgradienten  $k$ . Die Größen der verwendeten Variablen entsprechen denen in Kapitel 6.3.

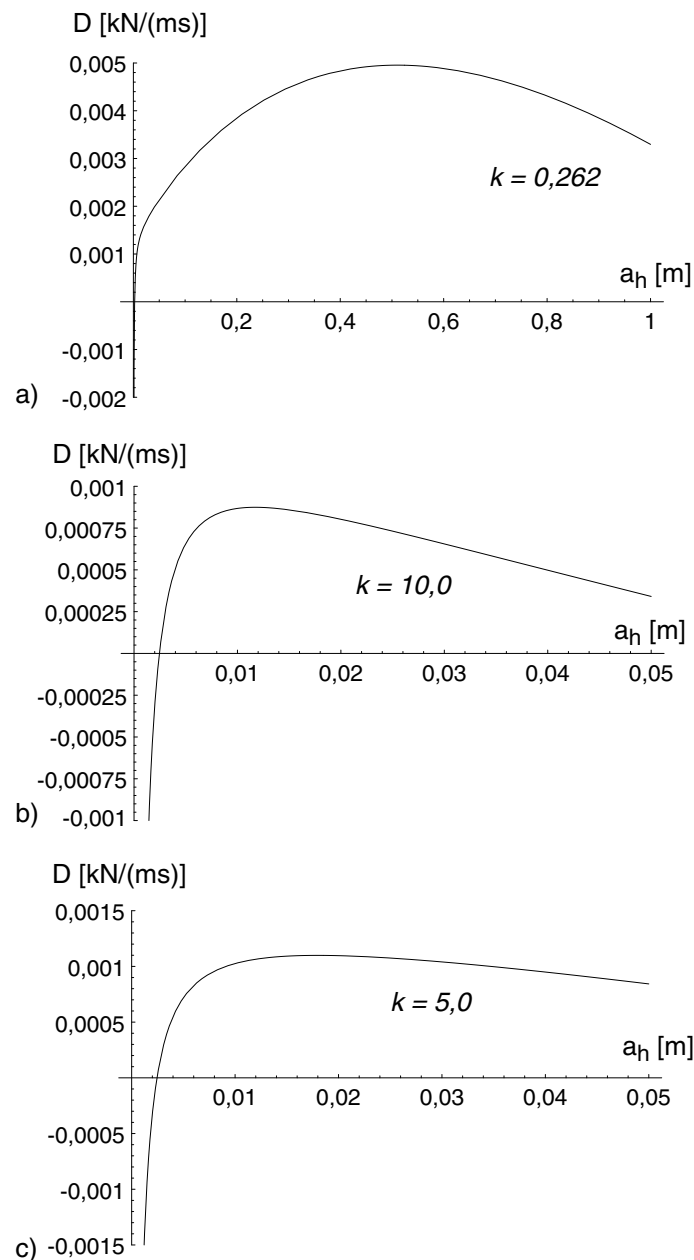


Bild 6.11: Dissipierte Arbeit in Abhängigkeit des horizontalen Scherfugenabstandes ohne Berücksichtigung der Höhenänderung des Probekörpers

In Analogie zur Betrachtung der Änderung der horizontalen Spannung aufgrund der isotropen Entfestigung des Probenmaterials in Kapitel 6.3 ist Bild 6.11a zu entnehmen, dass aus dem Ansatz des experimentell ermittelten Entfestigungsgradienten  $k = 0,262$  ein Scherfugenabstand am Maximum der dissipierten Arbeit resultiert, der mit  $a_{h,theo} = 510,4$  mm um ein Vielfaches größer ist als der experimentell ermittelte Abstand von  $a_{h,exp} = 18,8$  mm. Setzt man bei ansonsten gleichen Werten einen größeren Entfesti-

gungsgradienten von  $k = 10$  an, ergibt sich ein horizontaler Scherfugenabstand am Dissipationsmaximum von  $a_h = 11,7$  mm. Der experimentell ermittelte Abstand wird beim Ansatz dieses Betrages für die Größe der Entfestigung unterschätzt. Ein zu den experimentellen Ergebnissen vergleichbarer Scherfugenabstand ergibt sich durch die Wahl eines Entfestigungsgradienten von  $k = 5,0$ . Hierbei stellt sich das Maximum der dissipierten Energie bei einem horizontalen Abstand von 18,0 mm ein. Dieser Wert entspricht wiederum in sehr guter Näherung dem Entfestigungsgradienten von  $k = 7,9$ , dessen Größe aus den Ergebnissen der Biaxialversuche von Hammad [37] abgeleitet wurde (vgl. Kapitel 6.3).

Die in Bild 6.11 zusammengefassten Ergebnisse zeigen somit, dass der Scherfugenabstand maßgeblich von der Größe des Entfestigungsgradienten beeinflusst wird. Dieser hängt wiederum stark von dem Spannungszustand innerhalb des Systems ab. Hieraus kann geschlossen werden, dass auch eine ausgeprägte Abhängigkeit zwischen dem Scherfugenabstand und dem vorherrschenden Spannungszustand besteht.

Diese Abhängigkeit ist nicht mit einem Einfluss des Spannungsniveaus auf den Scherfugenabstand gleichzusetzen. In Kapitel 5.7 konnte experimentell gezeigt werden, dass sich die Geometrie der Scherfugenmuster unabhängig von der Größe des Spannungsniveaus entwickelt. Dies kann durch eine Variation der vertikalen Spannung bei ansonsten konstanten Parametern in Gleichung (6.56) bestätigt werden, da sich bei einer Änderung der vertikalen Spannung keine Veränderung des Scherfugenabstandes einstellt.

Wird neben der Änderung der horizontalen Spannung aufgrund der Entfestigung des Materials zusätzlich die Änderung der Höhe der Probe mit zunehmender Dehnung berücksichtigt, ergibt sich gemäß den Gleichungen (6.57) und (6.60) folgender Zusammenhang:

$$\dot{\varepsilon}^{av} (1 - \tan v \tan \psi) - \dot{v} (\tan v + \tan \psi) = Ux (\dot{v} \cos v + \dot{\varepsilon}^{av} \sin v) - \kappa \dot{\chi} K. \quad (6.62)$$

Formt man Gleichung (6.62) um, so ergibt sich die zeitliche Änderung des Scherflächenwinkels  $\dot{v}$  in Abhängigkeit der allgemeinen horizontalen Dehnungsrate  $\dot{\varepsilon}^{av}$ :

$$\dot{v} = \frac{(1 - \tan v \tan \psi - Ux \sin v) \dot{\varepsilon}^{av} + \kappa \dot{\chi} K}{\tan v + \tan \psi + Ux \cos v}. \quad (6.63)$$

Die anschließende Bestimmung der dissipativen Arbeit nach Gleichung (6.56) unter Ansatz von Gleichung (6.63) zeigt, dass sich im Vergleich zu der Berechnung ohne Ansatz der Änderung der Probenhöhe nur geringfügige Abweichungen für den horizontalen Abstand am Maximum der dissipierten Energie ergeben. Der Einfluss der Höhenänderung kann

aus diesem Grund vernachlässigt werden. Die Abhängigkeit der Größe des horizontalen Abstandes am Dissipationsmaximum von der Größe des Entfestigungsgradienten  $k$  nach Gleichung (6.29) lässt sich auch hier feststellen.

# Kapitel 7

## Zusammenfassung und Ausblick

Der Boden ist aufgrund seiner Scherfestigkeit in der Lage, bis zu einem gewissen Maß Beanspruchungen aus anisotropen Druckzuständen zu widerstehen. Dabei treten in Abhängigkeit der Größe der Druckunterschiede, der Bodenart und dessen Zustand unterschiedlich große Verformungen auf. Werden die Druckunterschiede sehr groß, tritt ein plastischer Grenzzustand und die Verformung nimmt zu. Konzentriert sich die Verformung in einem begrenzten Bereich, spricht man von einer Lokalisierung der Verformung in einer Scherfuge. Neben der Bildung von einzelnen Scherfugen werden in Modellversuchen, in der Nähe von geotechnischen Bauwerken und in geologischen Formationen auch Ansammlungen von mehreren Scherfugen beobachtet. Im Bereich homogener Randbedingungen können diese Scherflächenscharen regelmäßige Muster bilden. In diesem Fall spricht man von Scherfugenbänderung. Die Geometrie der Scherfugenbänderung wird durch die Neigung der einzelnen Scherflächen und durch den Abstand der Scherfugen untereinander festgelegt.

Die Forschung auf dem Gebiet der Lokalisierung von Deformationen beschränkte sich bislang überwiegend auf die Untersuchung von einzelnen Scherfugen. Hierbei wurden insbesondere untersucht, durch welche Parameter sich die Neigung der Scherflächen beschreiben lässt. Welche Faktoren den Abstand der Scherfugen beeinflussen, blieb bisher weitgehend unbekannt. So blieb unklar, nach welchen Gesetzmäßigkeiten sich die Scherfugenabstände ausbilden oder ob bestimmte Abstände, welche im Modellversuch ermittelt werden oder in der Natur vorliegen, charakteristisch für bestimmte Randbedingungen oder Materialeigenschaften sind.

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war aus diesem Grund, die Entwicklung der Scherfugenmuster in nicht-bindigen Böden experimentell nachzuvollziehen und die Abhängigkeit der



Geometrie der Scherfugenmuster von verschiedenen Einflussparametern zu untersuchen. Auf der Grundlage von vorhandenen theoretischen und experimentellen Untersuchungen auf dem Gebiet der Scherfugenbildung wurden verschiedene mögliche Einflussparameter auf die Geometrie der Scherfugenmuster ausgewählt. Hierzu zählen die granulometrischen Eigenschaften der Materialien, die durch den mittleren Korndurchmesser und die Ungleichförmigkeit des Bodens beschrieben werden können. Neuere theoretische Forschungsergebnisse lassen einen Einfluss der dynamischen Materialeigenschaften auf die Form der Scherfugenbänderung vermuten. Des Weiteren wurde der Einfluss der Geometrie eines Bodenkörpers, des vorherrschenden Spannungsniveaus und des Spannungs-Verformungsverhaltens des Materials untersucht.

Das Grundprinzip der durchgeführten Modellversuche besteht darin, dass eine auf einer Gummimatte gelagerte quaderförmige Probe aus nicht-bindigen Lockergesteinen durch die Dehnung der Gummimatte gleichmäßig aufgelockert wird. Die Experimente wurden in einem Extensionsgerät durchgeführt. Ein an den Seiten des Behälters angebrachter Scherenmechanismus gewährleistet eine homogene Verformungsrandbedingung. Das Extensionsgerät wurde für die Verwendung in einem erhöhten Schwerfeld in der Geotechnischen Großzentrifuge Bochum bemessen. Zur Bestimmung der Scherfugenabstände und der Neigung der Scherflächen wurde ein mobiles C-Arm Röntgengerät verwendet. Die Probenverformung während der Versuchsdurchführung und der hieraus resultierende Deformationsmechanismus wurde mit Hilfe einer optischen Bildauswertung, der Digital Image Correlation (DIC), dokumentiert und ausgewertet.

Hinsichtlich des allgemeinen Verhaltens der Materialproben unter einer Extensionsbeanspruchung zeigt sich, dass sich in Abhängigkeit der mittleren Korngröße des Materials einseitig geneigte Scherfugensysteme (feines Material) oder konjugiert geneigte Scherfugenscharen entwickeln. Die Größe des mittleren Korndurchmessers beeinflusst aus diesem Grund auch die Form des sich einstellenden Deformationsmechanismus. Treten nur einseitig geneigte Scherfugen auf, ist die Verformung des Probekörpers nach der Lokalisierung durch eine fortschreitende Rotation der Scherflächen und der dazwischen liegenden Blöcke gekennzeichnet. Die Scherfugenneigung nimmt linear mit der horizontal eingepprägten Dehnung ab. Die Scherfugen bleiben während ihrer Drehung gerade, die Abstände der Lokalisierungszone ändern sich nicht. Dieser Deformationsmechanismus wird in der Regel als 'Kippschollen'-Verformung oder 'Book-Shelf'-Mechanismus bezeichnet. Die Verformung des Probekörpers nach der Entwicklung von konjugiert geneigten Scherfugen ist durch eine symmetrische Deformation der rautenförmigen Elemente zwischen den Scherflächen

geprägt. Mit diesem Deformationsmechanismus ist eine Änderung der Scherfugenneigung verbunden, die im Vergleich zum 'Kippschollen'-Mechanismus deutlich geringer ausfällt. Eine Änderung des Scherfugenabstandes mit zunehmender Dehnung des Probekörpers kann auch bei der Rautendeformation nicht beobachtet werden.

In Bezug auf den Einfluss der granulometrischen Materialeigenschaften auf die Geometrie der Scherfugenmuster kann gezeigt werden, dass die Größe des mittleren Korndurchmessers sowohl den sich entwickelnden Deformationsmechanismus als auch die Größe der Scherfugenneigung zum Zeitpunkt der Lokalisierung beeinflusst. In Bezug auf die Neigung der Scherflächen werden Ergebnisse theoretischer und experimenteller Untersuchungen bestätigt, wonach sich bei der Verwendung feinkörniger Materialien bevorzugt Neigungswinkel der Scherfugen gemäß der Theorie nach Coulomb einstellen. Werden Modellversuche im Extensionsgerät mit grobkörnigeren Sanden durchgeführt, verringert sich die Scherfugenneigung am Lokalisierungspunkt und entspricht in guter Näherung der von Arthur et al. [5] vorgeschlagenen Scherfugenorientierung. Die Scherfugenabstände werden von der Größe des mittleren Korndurchmessers nur wenig beeinflusst. Wird die mittlere Korngröße konstant gehalten und die Ungleichförmigkeit des Versuchsmaterials geändert, ergeben sich Scherfugenabstände, die den Abständen der Scherflächen in dem Material entsprechen, das ein vergleichbares Größtkorn aufweist.

Die von Poliakov et al. [98] theoretisch hergeleitete Abhängigkeit der Geometrie der Scherfugenmuster von den dynamischen Stoffparametern der verwendeten Versuchsmaterialien kann experimentell nicht verifiziert werden. Ein Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit und damit horizontalen Dehnungsrate wird ebenfalls nicht festgestellt. Die Größen der Neigungen und der Abstände der Scherflächen bei den Modellversuchen mit Glaskugeln und Quarzsand weisen trotz der naturgemäßen grundsätzlichen Übereinstimmung der Materialparameter deutliche Unterschiede auf. Hieraus kann geschlossen werden, dass auch die Kornform und die Oberflächenbeschaffenheit der Granulate einen deutlichen Einfluss auf die Geometrie der Scherfugenbänderung ausüben. Diese Faktoren wurden im Rahmen dieser Arbeit nicht untersucht.

Auch die Variation des Spannungsniveaus in der Geotechnischen Großzentrifuge beeinflusst die Geometrie der Scherfugenbänderung nicht. Weder der Scherfugenabstand noch die Neigung der Scherflächen werden durch eine Erhöhung des Spannungszustandes beeinflusst. Es stellen sich in diesen Modellversuchen die gleichen Abstände und Neigungen ein wie bei den vergleichbaren Versuchen im natürlichen Schwerfeld. Bestätigt werden kann die Unabhängigkeit der Geometrie der Scherfugenbänderung von einer Änderung

des Spannungsniveaus durch die Anwendung des Kriteriums der maximalen Energiedissipation auf den beobachteten Deformationsmechanismus. Auch hierbei zeigt sich, dass sich bei einer Variation der vertikalen Spannung der Scherfugenabstand nicht ändert.

Eine eindeutige Abhängigkeit der Geometrie der Scherfugenmuster zeigt sich im Rahmen der Untersuchung unterschiedlicher Ausgangsgeometrien des Probekörpers. Während sich die Variation der Probenlänge nur in einer Änderung der Scherfugenanzahl widerspiegelt, lässt sich aus den Ergebnissen der Modellversuche auf eine lineare Abhängigkeit der Scherflächenabstände von der Ausgangshöhe des untersuchten Probekörpers schließen. Dieser Zusammenhang gilt sowohl für die Versuche im natürlichen Schwerfeld als auch für die Probekörper, die im erhöhten Schwerfeld der Geotechnischen Großzentrifuge untersucht wurden. Vergleiche des mit der Ausgangshöhe normierten Scherfugenabstandes mit entsprechenden Werten aus Aufzeichnungen von Scherflächenmustern im Bereich kontinentaler Plattengrenzen weisen gute Übereinstimmungen auf. Die Neigung der Scherfugen wird von der Geometrie der Probekörper nicht beeinflusst. Für alle untersuchten Geometrien stellen sich Neigungen ein, die mit der theoretischen Neigung nach Coulomb übereinstimmen.

Eine Änderung der Lagerungsdichte der Modellkörper spiegelt sich in einer Änderung des Spannungs-Verformungsverhaltens des Modellmaterials wider. Dieses Verhalten lässt sich durch die Größe der Entfestigung nach dem Peak der Spannungs-Dehnungs-Kurve beschreiben. Der Entfestigungsgradient ist dabei definiert als das Verhältnis der Änderung des Reibungswinkels zur Änderung des Scherwegs nach dem Peak der Spannungs-Verformungs-Kurve. Die Ergebnisse der Modellversuche zeigen, dass innerhalb des untersuchten Variationsbereichs der Lagerungsdichte ( $0,40 \leq I_D \leq 1,0$ ) ein linearer Zusammenhang zwischen der Lagerungsdichte des Quarzsandes und den Abständen der Scherflächen besteht. Mit abnehmender Lagerungsdichte und damit mit abnehmendem Entfestigungsgradienten werden die Scherfugenabstände größer. Aus dieser Abhängigkeit kann geschlossen werden, dass in einem Material mit lockerster Lagerung die Scherflächenabstände unendlich groß werden. Diese Folgerung ist gleichbedeutend mit der Formulierung, dass unter einem gegen Null strebenden Entfestigungsgradienten keine Lokalisierung zu beobachten ist.

Dieses Ergebnis wird durch die analytische Beschreibung des Deformationsmechanismus unter Anwendung des Kriteriums der maximalen Energiedissipation bestätigt. Die Ergebnisse dieser Betrachtung zeigen, dass eine energetisch günstige Geometrie der Scherfugenmuster nur ermittelt werden kann, wenn das Versuchsmaterial eine Entfestigung im

Spannungs-Verformungsverhalten aufweist. Der Scherflächenabstand verringert sich dabei mit zunehmendem Entfestigungsgradienten. Aus dem Vergleich von Entfestigungsgradienten, die zum einen aus dem Kriterium der maximalen Energiedissipation resultieren und zum anderen aus experimentellen Ergebnissen von biaxialen Elementversuchen abgeleitet werden können, ergeben sich annähernd identische Werte. Die Übereinstimmung kann nur für Kompressionsversuche unter biaxialen Randbedingungen beobachtet werden, unter triaxialen Spannungsverhältnissen ergeben sich deutlich geringere Entfestigungsgradienten. Die vorherrschenden Spannungsverhältnisse beeinflussen demnach die Größe des Entfestigungsgradienten, dieser bestimmt wiederum maßgeblich den Scherfugenabstand. Hieraus kann geschlossen werden, dass auch eine ausgeprägte Abhängigkeit zwischen dem Scherfugenabstand und dem vorherrschenden Spannungszustand besteht.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass sich aus den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen zahlreiche neue Erkenntnisse bezüglich der Abhängigkeit der Geometrie von Scherfugenmustern von verschiedenen Randbedingungen ableiten lassen. Neben den verifizierten Abhängigkeiten der Scherfugenbänderung von der Mächtigkeit der Schichtdicken und der Lagerungsdichte des Materials, konnten verschiedene mögliche Faktoren als Einflussparameter auf die Geometrie ausgeschlossen werden. Hierzu gehören der Einfluss der dynamischen Materialparameter und der Einfluss des Spannungsniveaus. Bei der Untersuchung der granulometrischen Materialparameter wurde eine Abhängigkeit des entstehenden Deformationsmechanismus von der mittleren Korngröße des Materials beobachtet. Andere granulometrische Parameter wie die Kornform und die Oberflächenbeschaffenheit erfordern weitergehende Betrachtungen und Experimente.

Während der Untersuchung eines wenig erforschten Themengebietes ergeben sich bei der Bearbeitung einer Fragestellung naturgemäß neue interessante Forschungsansätze. Hierzu gehört insbesondere die Untersuchung des Einflusses verschiedener Faktoren auf die Scherfugenbänderung in bindigen Materialien. Es ist bekannt, dass die Neigung der Scherfugen auch in bindigen Böden nur vom Reibungswinkel und/oder vom Dilatanzwinkel des Materials abhängt. Inwiefern die Abstände der Scherflächen in bindigen Böden von der Kohäsion des Materials beeinflusst werden, ist noch nicht geklärt. Einige Untersuchungen an bindigen Materialproben legen den Schluss nahe, dass der Abstand der Scherfugen in bindigen Materialien bei gleichen geometrischen Randbedingungen größer ist als der Abstand der Scherflächen in nicht-bindigen Lockergesteinen [1]. Diese Tatsache führt zu der Vermutung, dass sich in bindigen Böden möglicherweise ein grundsätzlich anderer Deformationsmechanismus entwickelt als in nicht-bindigen Böden.

Eine logische Fortführung der Erforschung der Scherfugenbänderung in bindigen Materialien stellt die Untersuchung von Probekörpern dar, die aus verschiedenen Schichten kohäsiver und nicht kohäsiver Materialien aufgebaut sind. In Bezug auf die Übertragung der Ergebnisse dieser Untersuchungen auf die Verhältnisse in-situ, wie z.B. in geologischen Formationen, können mit geschichteten Probekörper realistischere Verhältnisse simuliert werden als das bei der Untersuchung von Proben mit homogenen Eigenschaften möglich ist. Die Verwendung von bindigen Materialien ermöglicht darüber hinaus eine verbesserte Beschreibung der Festigkeitseigenschaften der Materialien in der Natur. Dies ist insbesondere dann der Fall, wenn die Versuche mit kohäsiven Materialien in einer geotechnischen Zentrifuge durchgeführt werden. Hierbei ist die Skalierung der Eigenschaften der Materialien auch in Schichten großer Mächtigkeit möglich.

Weiterer Forschungsbedarf besteht auf dem Gebiet der Modellierung der Scherfugenbänderung. Mit dem im Rahmen dieser Arbeit verwendeten klassischen Kontinuum unter der Verwendung des hypoplastischen Stoffgesetzes ist es möglich, die Scherfugenbänderung qualitativ zu simulieren. Die Bestimmung der Scherfugenabstände oder der Scherfugendicken ist aufgrund der ausgeprägten Netzabhängigkeit bei der Simulation von Lokalisierungsvorgängen mit Hilfe der klassischen Kontinuumstheorie nicht möglich. Neueste Forschungsergebnisse [71, 89] zeigen, dass unter der Anwendung von Regularisierungsmethoden die Bestimmung der Scherfugendicke bei der numerischen Simulation von Schervorgängen möglich ist. Als Regularisierungsmethoden wurden die nichtlokale Theorie, das Cosserat(polare)-Kontinuum und das Gradientenkontinuum erfolgreich angewendet [71].

# Literaturverzeichnis

- [1] R. V. Ackermann, R. W. Schlische und M. O. Withjack. The geometric and statistical evolution of normal fault systems: an experimental study of the effects of mechanical layer thickness on scaling laws. *Journal of Structural Geology*, 23(11):1803–1819, 2001.
- [2] K. A. Alshibli und S. Sture. Shear band formation in plane strain experiments of sand. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 126(6):495–503, 2000.
- [3] K. A. Alshibli, S. Sture, N. C. Costes, M. L. Frank, M. R. Lamkton, S. N. Batiste und R. A. Swanson. Assessment of localized deformations in sand using X-ray computed tomography. *Geotechnical Testing Journal*, 23(3):274–299, 2000.
- [4] J. R. F. Arthur und T. Dunstan. Rupture layers in granular media. In *IUTAM Conference on Deformation and Failure of Granular Media*, S. 453–459. IUTAM, 1982.
- [5] J. R. F. Arthur, T. Dunstan, Q. A. J. L. Al-Ani und A. Assadi. Plastic deformation and failure in granular media. *Géotechnique*, 27(1):53–74, 1977.
- [6] E. Bauer. Calibration of a comprehensive hypoplastic model for granular materials. *Soils and Foundations*, 36(1):13–26, 1996.
- [7] K. Baxter. The role of small-scale extensional faulting in the evolution of basin geometries. An example from the late Palaeozoic Petrel Sub-basin, northwest Australia. *Tectonophysics*, 287(1-4):21–41, 1998.
- [8] G. Bertotti, Y. Podladchikov und A. Daehler. Dynamic link between the level of ductile crustal flow and style of normal faulting of brittle crust. *Tectonophysics*, 320(3-4):195–218, 2000.

- [9] L. Bjerrum, S. Kringstad und O. Kummeneje. The Shear Strength of a Fine Sand. In *Proc. of the 5th ICSMFE*, Vol. 1, S. 29–37, 1961.
- [10] M. D. Bolton, D. I. Stewart und W. Powrie. The design of deep in-situ walls. In *Centrifuge 88* (F.-J. Corte, Herausgeber), S. 405–414. Balkema, Rotterdam, 1988.
- [11] P. L. Bransby und G. W. E. Milligan. Soil deformations near cantilever sheet pile walls. *Géotechnique*, 25(2):175–195, 1975.
- [12] J.-P. Brun. *Deformation of the continental lithosphere: Insights from brittle-ductile models*, S. 355–370. Geological Society, London, Special Publications 200, 2002.
- [13] R. Butterfield, R. M. Harkness und K. Z. Andrawes. A stereo-photogrammetric method for measuring displacement fields. *Géotechnique*, 20(3):308–314, 1970.
- [14] A. Caquot und J. Kerisel. *Traite de Mécanique des Sols*, Vol. 4. Gauthier-Villars, 1966.
- [15] W. J. Carr. *Styles of extension in the Nevada Test Site region, southern Walker Lane Belt; An integration of volcano-tectonic and detachment fault models*, Kap. 13, S. 283–303. Geological Society of America, Memoir 176, 1990.
- [16] P. R. Cobbold, S. Durand und R. Mourges. Sandbox modelling of thrust wedges with fluid-assisted detachments. *Tectonophysics*, 334(3-4):245–258, 2001.
- [17] B. Colletta, J. Letouzey, R. Pinedo, J.F. Ballard und P. Balé. Computerized X-ray tomography analysis of sandbox models: Examples of thin-skinned thrust systems. *Geology*, 19(11):1063–1067, 1991.
- [18] C. A. Coulomb. Sur l'application des règles des maximis et minimis à quelques problèmes de statique relatifs à l'architecture. *Mémoires de Mathématique et de Physique, Académie Royale des Sciences*, 7:343–382, 1773.
- [19] C. Dano. Étude expérimentale des lois d'interface. Technischer Bericht, LCPC, Nantes, 1996.
- [20] J. Desrues. Tracking Strain Localization In Geomaterials Using Computerized Tomography. In *X-ray CT for Geomaterials - Soils, Concrete, Rocks: Proc. of the Int. Workshop on X-ray CT for Geomaterials, GeoX 2003* (J. Otani und Y. Obara, Herausgeber). Balkema, Rotterdam, 2003.

- [21] J. Desrues, R. Chambon, M. Mokni und F. Mazerolli. Void ratio evolution inside shear bands in triaxial sand specimens studied by computed tomography. *Géotechnique*, 46(3):529–546, 1996.
- [22] J. Desrues, J. Lanier und P. Stutz. Localization of the deformation in tests on sand sample. *Engineering Fracture Mechanics*, 21(4):909–921, 1985.
- [23] J. Desrues und W. Hammad. Shear banding dependency on mean stress level in sand. In *Numerical Methods for Localization and Bifurcation of Granular Bodies*, Danzig, S. 57–67, 1989.
- [24] DIN 18137, Teil 1: Bestimmung der Scherfestigkeit. August 1990.
- [25] J. M. Dixon. Centrifuge Modeling of fold-thrust mountain belts: Thrust-ramp nucleation. In *Proc. of Int. Conf. Centrifuge 88* (J.-F. Corte, Herausgeber), S. 553–562, Rotterdam, 1988. Balkema.
- [26] J. M. Dixon und J. M. Summers. Recent developments in centrifuge modelling of tectonic processes: equipment, model construction techniques and rheology of model materials. *Journal of Structural Geology*, 7(1):83–102, 1985.
- [27] B. Duthilleul. *Rupture progressive: simulation physique et numerique*. Dissertation, Institut National Polytechnique de Grenoble, 1983.
- [28] C. J. Ebinger, G. D. Karner und J. K. Weissel. Mechanical strength of extended continental lithosphere: constraints from the western rift system, east africa. *Tectonics*, 10(6):1239–1256, 1991.
- [29] B. D. Evamy, L. Haremboure, P. Kamerling, W. A. Knaap, F. A. Molloy und P. H. Rowlands. Hydrocarbon Habitat of Tertiary Niger Delta. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 62(1):1–39, 1978.
- [30] G. E. Exadaktylos, I. Vardoulakis, M. C. Stavropoulou und P. Tsombos. Analogue and numerical modeling of normal fault patterns produced due to slip along a detachment zone. *Tectonophysics*, 376(1-2):117–134, 2003.
- [31] R. J. Finno, W. W. Harris, M. A. Mooney und G. Viggiani. Shear bands in plane strain compression of loose sand. *Géotechnique*, 47(1):149–165, 1997.
- [32] R. Freund. Kinematics of transform and transcurrent faults. *Tectonophysics*, 21(1-2):93–134, 1974.



- [33] A. Gibbs. Development of extension and mixed-mode sedimentary basins. In *Continental Extensional Tectonics* (M. P. Coward, J. F. Dewey, and P. L. Hancock, Herausgeber), S. 19–33. Geological Society Special Publication, 1987.
- [34] G. E. Green. Strength and deformation sand measured in an independent stress control cell. In *Stress-strain behaviour of soils* (R. H. G. Parry, Herausgeber), S. 285–323 1971.
- [35] G. Gudehus. *Bodenmechanik*. Ferdinand Enke Verlag, Stuttgart, 1981.
- [36] G. Gudehus. A comprehensive constitutive equation for granular materials. *Soils and Foundations*, 36(1):1–12, 1996.
- [37] W. I. Hammad. *Modélisation non-linéaire et étude expérimentale des bandes de cisaillement dans les sables*. Institut für Mechanik, Université Joseph Fourier, Grenoble, Dissertation, 1991.
- [38] C. Han und A. Drescher. Shear bands in biaxial tests on dry course sand. *Soils and Foundations*, 33(1):118–132, 1993.
- [39] C. Han und I. Vardoulakis. Plane-strain compression experiments on water-saturated fine-grained sand. *Géotechnique*, 41(1):49–78, 1991.
- [40] T. Harper, H. Fossen und J. Nesthammer. Influence of uniform basement extension on faulting in cover sediments. *Journal of Structural Geology*, 23(4):593–600, 2001.
- [41] W. W. Harris, G. Viggiani, M. A. Mooney und R. J. Finno. Use of Stereophotogrammetry to Analyze the Development of Shear Bands in Sand. *Geotechnical Testing Journal*, 18(4):405–420, 1995.
- [42] C. Hauser und B. Walz. Bildbasierte Verformungsmessung mit der PIV-Methode. *Geotechnik*, 27(4):339–343, 2004.
- [43] I. Herle. *Hypoplastizität und Granulometrie einfacher Korngerüste*. Dissertation, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana Karlsruhe, Heft 141, 1997.
- [44] I. Herle und G. Gudehus. Determination of parameters of a hypoplastic constitutive model from properties of grain assemblies. *Mechanics of Cohesive Frictional Materials*, 4(5):461–486, 1999.

- [45] B. E. Hobbs und A. Ord. Numerical simulation of shear band formation in a frictional-dilatational material. *Ingenieur-Archiv*, 59:209–220, 1989.
- [46] M. Ishikawa und K. Otsuki. Effects of strain gradients on asymmetry of experimental normal fault systems. *Journal of Structural Geology*, 17(7):1047–1053, 1995.
- [47] F. S. Jeng, C. Y. Lu und C. L. Lee. Major scale effects influencing model simulation of neotectonics. In *Centrifuge 98* (T. Kimura, O. Kusakabe, and J. Takemura, Herausgeber), S. 911–916, Rotterdam, 1998. Balkema.
- [48] H. L. Jessberger und U. Güttler. Geotechnische Großzentrifuge Bochum - Modellversuche im erhöhten Schwerfeld. *Geotechnik*, 11(2):85–97, 1988.
- [49] A. Kézdi. *Handbuch der Bodenmechanik, Band 1*. VEB Verlag für Bauwesen Berlin, 1969.
- [50] R. Kligfield und J. Crespi. Displacement and strain patterns of extensional orogens. *Tectonics*, 3(5):557–609, 1984.
- [51] M. A. Koenders, J. R. F. Arthur und T. Dunstan. The behaviour of soil at peak stress. In *Yielding, Damage and Failure of Anisotropic Solids* (J. P. Boehler, Herausgeber), S. 805–818. Mechanical Engineering Publications, 1990.
- [52] D. Kolymbas. A generalized hypoelastic constitutive law. *Proceedings XI International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, S. 2626, 1985.
- [53] D. Kolymbas und W. Wu. Recent Results of Triaxial Tests with Frabular Materials. *Powder Technology*, 60:99–119, 1990.
- [54] D. Kolymbas. *Introduction to Hypoplasticity. Bd. 1: Advances in Geotechnical Engineering and Tunneling*. A. A. Balkema, Rotterdam, 2000.
- [55] H. Koyi. Experimental Modeling of Role of Gravity and Lateral Shortening in Zagros Mountain Belt. *The American Association of Petroleum Geologists Bulletin*, 72(11):1381–1394, 1988.
- [56] H. Koyi. Gravity overturns, extension, and basement fault activation. *Journal of Petroleum Geology*, 14(2):117–142, 1991.

- [57] H. A. Koyi und A. Skelton. Centrifuge modelling of the evolution of low-angle detachment faults from high-angle normal faults. *Journal of Structural Geology*, 23(8):1179–1185, 2001.
- [58] R. W. Krantz. Measurements of friction coefficients and cohesion for faulting and fault reactivation in laboratory models using sand and sand mixtures. *Tectonophysics*, 188(1-2):203–207, 1991.
- [59] H. Kratzsch. Erdstufenbildung im Lockergestein bei ungestörter Lagerung. *Das Markscheidewesen*, 100(4):463–467, 1993.
- [60] P. V. Lade, J. A. Yamamuro und B. D. Skyers. Effects of Shear Band Formation in Triaxial Extension Tests. *Geotechnical Testing Journal*, 19(4):398–410, 1996.
- [61] H.-J. Lang und J. Huder. *Bodenmechanik und Grundbau*. Springer-Verlag, 1994.
- [62] M. R. Leeder und R. L. Gawthorpe. Sedimentary models for extensional tilt-block/half-graben basins. In *Continental Extensional Tectonics* (M. P. Coward, J. F. Dewey, and P. L. Hancock, Herausgeber), S. 139–152. Geological Society of London, Special Publications 28, 1987.
- [63] D. Leśniewska und Z. Mróz. Limit equilibrium approach to study the evolution of shear band systems in soils. *Géotechnique*, 50(5):521–536, 2000.
- [64] D. Leśniewska und Z. Mróz. Study of evolution of shear band systems in sand retained by flexible wall. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 25(9):909–932, 2001.
- [65] G. Mandl. Tectonic deformation by rotating parallel faults: the 'bookshelf' mechanism. *Tectonophysics*, 141(4):277–316, 1987.
- [66] G. Mandl. *Mechanics of tectonic faulting*. Developments in Structural Geology. Elsevier, Amsterdam, 1988.
- [67] G. Mandl. Modelling incipient tectonic faulting in the brittle crust of the earth. In *Mechanics of jointed and faulted rock* (H.-P. Rossmanith, Herausgeber), S. 29–40. Balkema, Rotterdam, 1990.
- [68] G. Mandl. *Faulting in brittle rocks*. Springer-Verlag, Berlin Heidelberg, 2000.

- [69] G. Mandl, L. N. J. de Jong, and A. Maltha. Shear zones in granular material. *Rock Mechanics*, 9:95–144, 1977.
- [70] C. Martin, M. Eiblmaier, L. Kreutzwald, I. Drews, H. Pretsch, und N. Bischof. *Lexikon der Geowissenschaften*. Spektrum Akademischer Verlag GmbH, Heidelberg, 2002.
- [71] Th. Maier. Numerische Modellierung der Entfestigung im Rahmen der Hypoplastizität. *Schriftenreihe des Lehrstuhls Baugrund-Grundbau der Universität Dortmund*, Heft 24, 2002.
- [72] H. Matsuoka und T. Nakai. Stress-strain relationship of soil based on the 'SMP'. *Constitutive equations of Soils. Proceedings of Specialty Session 9, 9th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, S. 153–162, 1977.
- [73] P.-M. Mayer. *Verformungen und Spannungsfänderungen im Boden durch Schlitzwandherstellung und Baugrubenaushub*. Dissertation, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana Karlsruhe, Heft 151, 2000.
- [74] K. R. McClay. Analogue models of inversion tectonics. In *Inversion Tectonics* (M. A. Cooper and G. D. Williams, Herausgeber), S. 41–59. Geological Society of London, Special Publications 44, 1989.
- [75] K. R. McClay. Deformation mechanics in analogue models of extensional fault systems. In *Deformation Mechanisms, Rheology and Tectonics* (R. J. Knipe and E. H. Rutter, Herausgeber), S. 445–453. Geological Society of London, Special Publications 54, 1990.
- [76] K. R. McClay. The geometries of inverted fault systems: a review of analogue model studies. In *Basin Inversion* (J. G. Buchanan and P. G. Buchanan, Herausgeber), S. 97–118. Geological Society of London, Special Publications 88, 1995.
- [77] K. R. McClay und P. G. Ellis. Analogue models of extensional fault geometries. In *Continental Extensional Tectonics* (M. P. Coward, J. F. Dewey, and P. L. Hancock, Herausgeber), S. 109–125. Geological Society of London, Special Publications 28, 1987.
- [78] K. R. McClay und P. G. Ellis. Geometries of extensional fault systems developed in model experiments. *Geology*, 15(4):341–344, 1987.

- [79] K. McIntosh, E. Silver und T. Shipley. Evidence and mechanisms for forearc extension at the accretionary Costa Rica convergent margin. *Tectonics*, 12(6):1380–1392, 1993.
- [80] D. McKenzie und J. Jackson. A block model of distributed deformation by faulting. *Journal of the Geological Society*, 143(2):349–353, 1986.
- [81] M. Mokni und J. Desrues. Strain localization measurements in undrained plane-strain biaxial tests on Hostun RF Sand. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 4(4):419–441, 1999.
- [82] H.-B. Mühlhaus und I. Vardoulakis. The thickness of shear bands in granular materials. *Géotechnique*, 37(3):271–283, 1987.
- [83] G. Mulugeta. Modelling the geometry of Coulomb thrust wedges. *Journal of Structural Geology*, 10(8):847–859, 1988.
- [84] G. Mulugeta. Squeeze box in a centrifuge. *Tectonophysics*, 148(3-4):323–335, 1988.
- [85] G. Mulugeta. Scale effects and rheologic constraints in ramp-flat thrust models. *Journal of the Virtual Explorer*, 7:51–59, 2002.
- [86] S. Nemat-Nasser und N. Okada. Radiographic and microscopic observation of shear bands in granular materials. *Géotechnique*, 51(9):753–765, 2001.
- [87] A. Niemunis und I. Herle. Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 2(4):279–299, 1997.
- [88] A. Niemunis, T. Wichtmann und Th. Triantafyllidis. Explicit accumulation model for cyclic loading. In *Cyclic Behaviour of Soils and Liquefaction Phenomena* (Th. Triantafyllidis, Herausgeber), S. 65–76. A.A. Balkema Publishers, 2004.
- [89] K. Nübel. *Experimental and Numerical Investigation of Shear Localization in Granular Material*. Dissertation, Fakultät für Bauingenieur- und Vermessungswesen, Universität Fridericiana zu Karlsruhe, Heft 159, 2003.
- [90] K. Nübel und G. Gudehus. Evolution of localized shearing: Dilation and polarization in grain skeletons. In *Proceedings: Powder & Grains* (Kishino, Herausgeber). Balkema, 2001.

- [91] K. Nübel und C. Karcher. FE simulations of granular material with a given frequency distribution of voids as initial condition. *Granular Matter*, 1(3):105–112, 1998.
- [92] A. Nur, H. Ron und O. Scotti. Mechanics of distributed fault and block rotation. In *Paleomagnetic Rotations and Continental Deformation* (C. Kissel and C. Laj, Herausgeber), S. 109–125. Kluwer Academic Publishers, 1989.
- [93] M. Oda und H. Kazama. Microstructure of shear bands and its relation to the mechanisms of dilatancy and failure of dense granular soils. *Géotechnique*, 48(4):465–481, 1998.
- [94] J. Otani und T. Mukunoki. Development of new triaxial compression test apparatus for geomaterials on industrial X-ray CT scanner. In *15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, S. 231–234, 2001.
- [95] E. Papamichos und I. Vardoulakis. Shear band formation in sand according to non-coaxial plasticity model. *Géotechnique*, 45(4):649–661, 1995.
- [96] G. Peltzer und J. Garnier. Experimental approach in a centrifuge of large scale continental tectonics in Asia. In *Centrifuge 88* (F.-J. Corte, Herausgeber), S. 563–574. Balkema, Rotterdam, 1988.
- [97] A. N. B. Poliakov und H. J. Herrmann. Self-organized criticality in plastic shear bands. *Geophysical Research Letters*, 21(19):2143–2146, 1994.
- [98] A. N. B. Poliakov, H. J. Herrmann, Y. Y. Poladchikov und S. Roux. Fractal Plastic Shear Bands. *Fractals*, 2(4):567–581, 1994.
- [99] W. H. Press, S. A. Teukolsky, W. T. Vetterling und B. P. Flannery. *Numerical Recipes in Fortran 90*. Cambridge University Press, 1996.
- [100] A. Preusse und Ch. Herzog. Prognosis and control of mining induced surface subsidence and ground movements in the german hardcoal sector, case studies. In *19th International Conference on Ground Controlling in Mining* (S. S. Peng and Ch. Mark, Herausgeber), S. 158–162, 2000.
- [101] N. S. Rad und M. T. Tumay. Factors affecting sand specimen preparation by raining. *Geotechnical Testing Journal*, 10(1):31–37, 1985.

- [102] H. Ramberg. *Gravity, Deformation and the Earth's Crust as studied by centrifuged models*. Academic Press, London/New York, 1967.
- [103] H. Ramberg. Model Studies of Gravity-Controlled Tectonics by the Centrifuge Technique. *Gravity and Tectonics*, S. 49–66, 1973.
- [104] W. J. M. Rankine. On the stability of loose earth. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London*, 147(1):9–27, 1856.
- [105] A. L. Rechenmacher und R. J. Finno. Digital image correlation to evaluate shear banding in dilative sands. *Geotechnical Testing Journal*, 27(1):1–10, 2004.
- [106] K. H. Roscoe. The influence of strains in soil mechanics. *Géotechnique*, 20(2):129–170, 1970.
- [107] P. W. Rowe. Theoretical meaning and observed values of deformation parameters for soil. In *Stress-strain behaviour of soils* (R. H. G. Parry, Herausgeber), S. 143–194, 1972.
- [108] A. S. Saada, G. F. Bianchini und L. Liang. Cracks, bifurcation and shear bands propagation in saturated clays. *Géotechnique*, 44(1):35–64, 1994.
- [109] A. S. Saada, L. Liang, J. L. Figueroa und C. T. Cope. Bifurcation and shear band propagation in sands. *Géotechnique*, 49(3):367–385, 1999.
- [110] L. Sachs. *Angewandte Statistik : Anwendung statistischer Methoden*. Springer-Verlag, 2002.
- [111] G. Scarpelli und D. M. Wood. Experimental observations of shear band patterns in direct shear tests. *IUTAM Conference on Deformation and Failure of Granular Materials*, S. 473–484, 1982.
- [112] R. Schäfer und Th. Triantafyllidis. Influence of the construction method on the deformation of diaphragm walls in clayey ground. In *Tunneling and Underground Space Technology*, Vol. 19, S. 475, 2004.
- [113] W. P. Schellart. Shear test results for cohesion and friction coefficients for different granular materials: scaling implications for their usage in analogue modelling. *Tectonophysics*, 324(1-2):1–16, 2000.

- [114] A. N. Schofield. Cambridge Geotechnical Centrifuge Operations. *Géotechnique*, 30(3):227–268, 1980.
- [115] G. Schreurs, R. Hänni und P. Vock. The influence of brittle-viscous multilayers on faulting during rifting: An analogue modelling approach. *Journal of the Virtual Explorer*, 6:89–97, 2002.
- [116] M. Shahinpoor. Statistical mechanical considerations on storing bulk solids. *Bulk Solids Handling*, 1(1):31–36, 1981.
- [117] G. Spadini und Y. Podladchikov. Spacing of consecutive normal faulting in the lithosphere: A dynamic model for rift axis jumping (Tyrrhenian Sea). *Earth and Planetary Science Letters*, 144(1-2):21–34, 1996.
- [118] K. J. L. Stone und D. Muir Wood. Effects of dilatancy and particle size observed in model tests on sand. *Soils and Foundations*, 32(4):43–57, 1992.
- [119] F. Tatsuoka, S. Nakamura, C.-C. Huang und K. Tani. Strength anisotropy and shear band direction in plane strain tests of sand. *Soils and Foundations*, 30(1):35–54, 1990.
- [120] J. Tejchman und W. Wu. Numerical study on patterning of shear bands in a Cosserat Continuum. *Acta Mechanica*, 99:61–74, 1993.
- [121] I. Vardoulakis. Shear band inclination and shear modulus of sand in biaxial tests. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 4:103–119, 1980.
- [122] I. Vardoulakis und M. Goldscheider. Biaxialgefäß zur Untersuchung der Festigkeit und Dilatanz von Scherfugen in Böden. *Geotechnik*, 3(1):19–31, 1980.
- [123] I. Vardoulakis, M. Goldscheider und G. Gudehus. Formation of shear bands in sand bodies as a bifurcation problem. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics*, 2:99–128, 1978.
- [124] I. Vardoulakis und B. Graf. Calibration of constitutive models for granular materials using data from biaxial experiments. *Géotechnique*, 35(3):229–317, 1985.
- [125] I. Vardoulakis und J. Sulem. *Bifurcation Analysis in Geomechanics*. Blackie Academic and Professional, 1995.



- [126] B. Vendeville und P. R. Cobbold. How normal faulting and sedimentation interact to produce listric fault profiles and stratigraphic wedges. *Journal of Structural Geology*, 10(7):649–659, 1988.
- [127] B. Vendeville, P. R. Cobbold, P. Davy, J. P. Brun und P. Choukroune. Physical models of extensional tectonics at various scales. In *Continental Extensional Tectonics* (M. P. Coward, J. F. Dewey, and P. L. Hancock, Herausgeber), S. 95–107. Geological Society of London, Special Publications 28, 1987.
- [128] P. A. Vermeer. The orientation of shear bands in biaxial tests. *Géotechnique*, 40(2):223–236, 1990.
- [129] G. Viggiani, M. Küntz und J. Desrues. An experimental investigation of the relationships between grain size distribution and shear banding in sands. In *Continuous and discontinuous modelling of cohesive-frictional materials* (P.A. Vermeer, Herausgeber), Lecture notes in physics, S. 111–127. Springer, 2001.
- [130] P. A. von Wolffersdorff. *Verformungsprognosen für Stützkonstruktionen*. Dissertation, Institut für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana Karlsruhe, Heft 141, 1997.
- [131] P. A. von Wolffersdorff. Schleuse Uelzen I - Hypoplastische Finite-Elemente-Analyse von zyklischen Vorgängen. *Bautechnik*, 78(11):771–782, 2001.
- [132] B. Wernicke. Low-angle normal faults in the Basin and Range Province: nappe tectonics in an extending orogen. *Nature*, 291(25):645–648, 1981.
- [133] B. Wernicke. Uniform-sense normal simple shear of the continental lithosphere. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 22:108–125, 1984.
- [134] B. Wernicke und B. C. Burchfiel. Modes of extensional tectonics. *Journal of Structural Geology*, 4(2):105–115, 1982.
- [135] R. Westaway. The Quaternary evolution of the Gulf of Corinth, central Greece: coupling between surface processes and flow in the lower continental crust. *Tectonophysics*, 348(4):269–318, 2002.
- [136] D. J. White, W. A. Take und M. D. Bolton. Measuring soil deformation in geotechnical models using digital images and PIV analysis. In *10th International Con-*

- ference on Computer Methods and Advances in Geomechanics*, Tucson, Arizona, S. 997–1002, 2001.
- [137] D. J. White, W. A. Take und M. D. Bolton. Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. *Géotechnique*, 53(7):619–631, 2003.
- [138] D. J. White, W. A. Take, M. D. Bolton und S. E. Munachen. A deformation measurement system for geotechnical testing based on digital imaging, close-range photogrammetry and PIV image analysis. In *15th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, S. 539–542, 2001.
- [139] T. Wichtmann, T. Sonntag und Th. Triantafyllidis. Über das Erinnerungsvermögen von Sand unter zyklischer Belastung. *Bautechnik*, 78(12):852–865, 2001.
- [140] D. Muir Wood. Some observations of volumetric instabilities in soils. *International Journal of Solids and Structures*, 39(13-14):3429–3449, 2002.
- [141] T. Yoshida und F. Tatsuoka. Deformation property of shear band in sand subjected to plane strain compression and its relation to particle characteristics. In *Proceedings of the Fourteenth International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 1, S. 237–240, 1997.
- [142] T. Yoshida, F. Tatsuoka, M. S. A. Siddiquee, Y. Kamegai und C.-S. Park. Shear banding in sands observed in plane strain compression. In *Localisation and Bifurcation Theory for Soils and Rocks* (R. Chambon, J. Desrues, and I. Vardoulakis, Herausgeber), S. 165–179. Balkema, Rotterdam, 1994.

# Anhang A

## Materialeigenschaften der verwendeten Granulate

## A.1 Materialkennwerte

Tabelle A.1: Materialdaten

Nr.	Material	d	$d_{50}$	U	$\rho_s$	$\rho_{d,min}$	$\rho_{d,max}$
[-]	[-]	[mm]	[mm]	[-]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[g/cm <sup>3</sup> ]
1	Quarzsand	0,1-0,71	0,35	1,5	2,64	1,475	1,762
2	Quarzsand	0,5-1,2	0,89	1,5	2,64	1,424	1,670
3	Quarzsand	1,0-4,0	1,58	1,5	2,64	1,410	1,634
4	Quarzsand	0,06-4,0	0,85	5,1	2,64	1,508	1,867
5	Kunststoff	0,1-0,4	0,35	1,5	1,55	0,650	0,810
6	Glasperlen	0,06-1,0	0,38	1,7	2,50	1,460	1,619
7	Hartguss	0,06-0,5	0,24	1,5	7,27	2,915	3,799

Tabelle A.1: Materialdaten (Fortsetzung)

Nr.	Material	$e_{max}$	$e_{min}$	$\varphi_{peak}$ ( $I_D = 1, 0$ )	$\psi_{peak}$ ( $I_D = 1, 0$ )	c	$G_{dyn_0}$	$v_p$
[-]	[-]	[-]	[-]	[°]	[°]	[kPa]	[N/mm <sup>2</sup> ]	[m/s]
1	Quarzsand	0,79	0,50	39,8	14,5	-	178,0	590
2	Quarzsand	0,85	0,58	43,5	14,4	-	-	-
3	Quarzsand	0,87	0,62	40,3	11,7	-	-	-
4	Quarzsand	0,75	0,41	46,3	15,2	-	-	-
5	Kunststoff	1,39	0,91	44,2	14,0	25,3	32,0	395
6	Glasperlen	0,71	0,54	33,0	11,9	-	170,0	618
7	Hartguss	1,49	0,91	47,0	13,5	-	95,0	588

mit

$d$	Korngröße	$e_{min}$	minimale Porenzahl
$d_{50}$	mittlere Korngröße	$\varphi_{peak}$	innerer Reibungswinkel am peak
U	Ungleichförmigkeit	$\psi_{peak}$	Dilatanzwinkel am peak
$\rho_s$	Kornrohddichte	c	Kohäsion
$\rho_{d,min}$	lockerste Lagerungsdichte	$G_{dyn_0}$	dynamischer Schubmodul
$\rho_{d,max}$	dichteste Lagerungsdichte	$v_p$	Kompressionswellengeschwindigkeit
$e_{max}$	maximale Porenzahl		

## A.2 Kornverteilungen

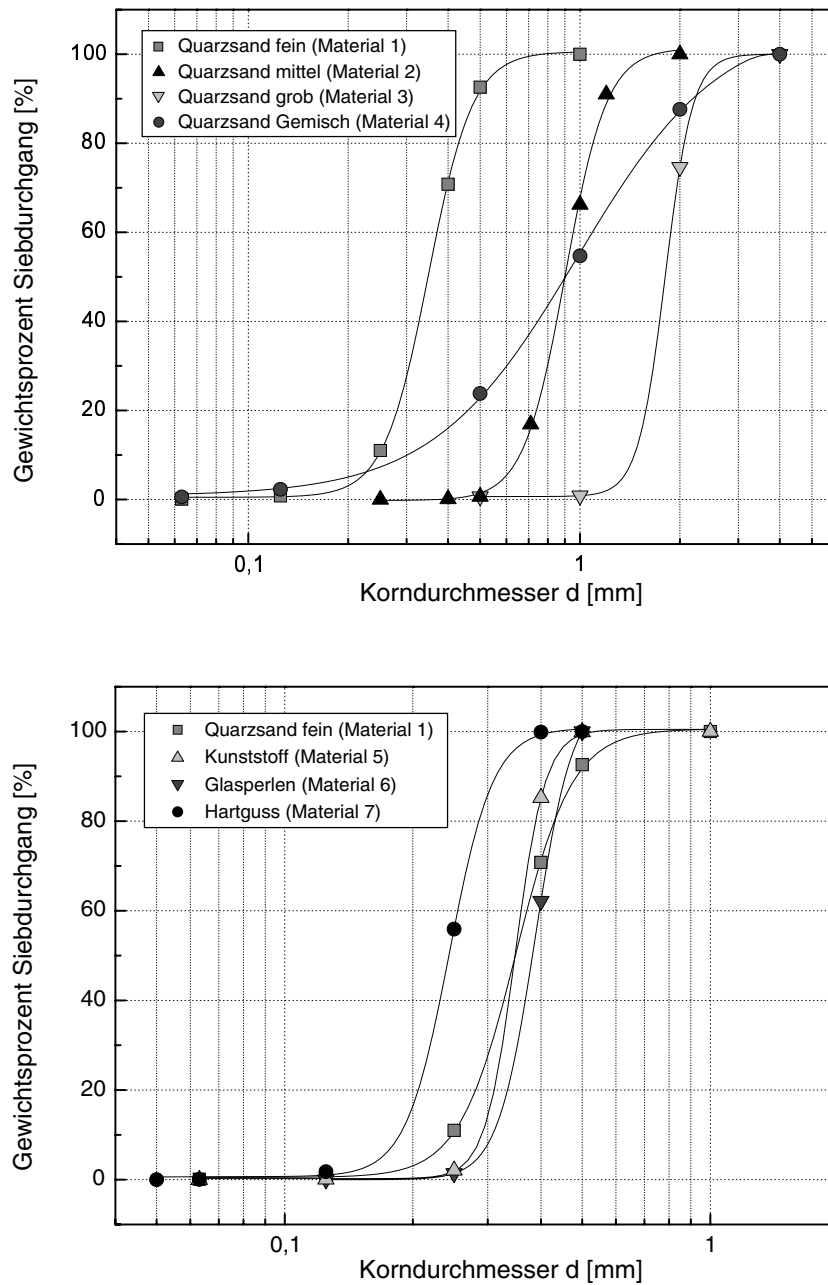


Bild A.1: Kornverteilungen von (a) der verwendeten Quarzsande und (b) von feinem Quarzsand, Hartguss, Glasperlen und Kunststoffgranulat

### A.3 Ergebnisse der Kompressionsversuche an feinem Quarzsand (Material 1)

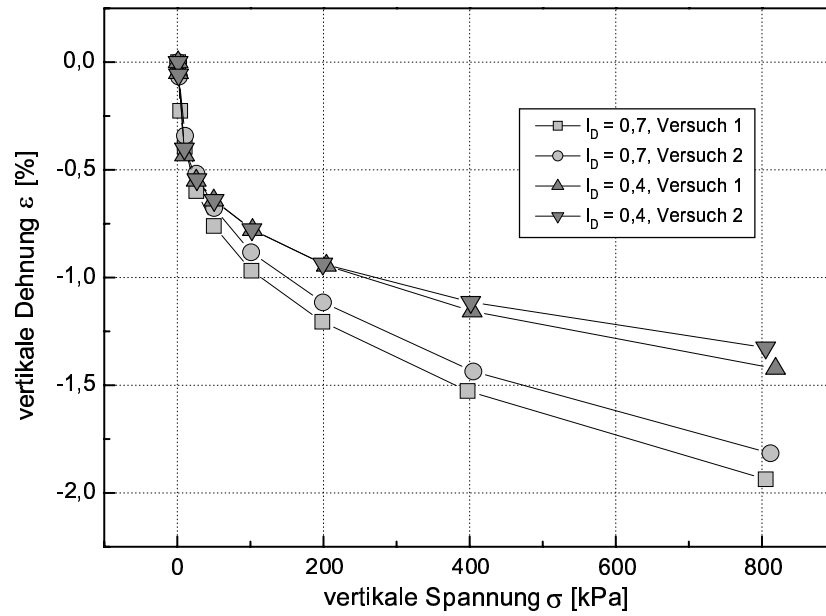


Bild A.2: Ergebnisse der Kompressionsversuche im Mittelödometer an feinem Quarzsand (Material 1) für unterschiedliche Lagerungsdichten

### A.4 Hypoplastische Materialparameter für feinkörnigen Quarzsand (Material 1)

hypoplastischer Materialparameter	Größe
$\varphi_c$ [°]	31,9
$e_{d0}$	0,50
$e_{c0}$	0,79
$e_{i0}$	0,95
$h_s$ [MPa]	22.500
$n$	0,28
$\alpha$	0,23
$\beta$	1,05

## Anhang B

# Skalierungsfaktoren für geotechnische und geologische Modellversuche im natürlichen und im erhöhten Schwerfeld

Kenngröße	Verhältnis
lineare Abmessungen	$\frac{l_m}{l_p} = l_r$
Beschleunigung	$\frac{a_m}{a_p} = \frac{g_m}{g_p} = a_r$
Dichte	$\frac{\rho_m}{\rho_p} = \rho_r$
Dehnung	$\frac{\Delta l_m / l_m}{\Delta l_p / l_p} = \varepsilon_r = 1$
Spannung	$\frac{\sigma_m}{\sigma_p} = \sigma_r = \rho_r l_r a_r$
Viskosität	$\frac{\eta_m}{\eta_p} = \eta_r = \frac{\sigma_r t_r}{\varepsilon_r} = \sigma_r t_r$
Zeit	$\frac{t_m}{t_p} = t_r = \frac{\eta_r}{\sigma_r} = \frac{\eta_r}{\rho_r l_r a_r}$





**SCHRIFTENREIHE DES LEHRSTUHLS FÜR GRUNDBAU UND  
BODENMECHANIK  
DER RUHR-UNIVERSITÄT BOCHUM**

*Herausgeber: H.L. Jessberger*

Heft Nr.

- |    |        |                                                                                                                                                                                |
|----|--------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 1  | (1979) | <b>Hans Ludwig Jessberger</b><br>Grundbau und Bodenmechanik an der Ruhr-Universität Bochum                                                                                     |
| 2  | (1978) | <b>Joachim Klein</b><br>Nichtlineares Kriechen von künstlich gefrorenem Emschermergel                                                                                          |
| 3  | (1979) | <b>Heinz-Joachim Gödecke</b><br>Die Dynamische Intensivverdichtung wenig wasserdurchlässiger Böden                                                                             |
| 4  | (1979) | <b>Poul V. Lade</b><br>Three Dimensional Stress-Strain Behaviour and Modeling of Soils                                                                                         |
| 5  | (1979) | <b>Roland Pusch</b><br>Creep of soils                                                                                                                                          |
| 6  | (1979) | <b>Norbert Diekmann</b><br>Zeitabhängiges, nichtlineares Spannungs-Verformungsverhalten von gefrorenem Schluff unter triaxialer Belastung                                      |
| 7  | (1979) | <b>Rudolf Dörr</b><br>Zeitabhängiges Setzungsverhalten von Gründungen in Schnee, Firn und Eis der Antarktis am Beispiel der deutschen Georg-von-Neumayer- und Filchner-Station |
| 8  | (1984) | <b>Ulrich Güttler</b><br>Beurteilung des Steifigkeits- und Nachverdichtungsverhaltens von ungebundenen Mineralstoffen                                                          |
| 9  | (1986) | <b>Peter Jordan</b><br>Einfluß der Belastungsfrequenz und der partiellen Entwässerungsmöglichkeiten auf die Verflüssigung von Feinsand                                         |
| 10 | (1986) | <b>Eugen Makowski</b><br>Modellierung der künstlichen Bodenvereisung im grundwasserdurchströmten Untergrund mit der Methode der finiten Elemente                               |
| 11 | (1986) | <b>Reinhard A. Beine</b><br>Verdichtungswirkung der Fallmasse auf Lastausbreitung in nichtbindigem Boden bei der Dynamischen Intensivverdichtung                               |
| 12 | (1986) | <b>Wolfgang Ebel</b><br>Einfluß des Spannungspfades auf das Spannungs-Verformungsverhalten von gefrorenem Schluff im Hinblick auf die Berechnung von Gefrierschächten          |

- 13 (1987) **Uwe Stoffers**  
Berechnungen und Zentrifugen-Modellversuche zur Verformungsabhängigkeit der Ausbaubeanspruchung von Tunnelausbauten in Lockergestein
- 14 (1988) **Gerhard Thiel**  
Steifigkeit und Dämpfung von wassergesättigtem Feinsand unter Erdbebenbelastung
- 15 (1991) **Mahmud Taher**  
Tragverhalten von Pfahl-Platten-Gründungen im bindigen Baugrund, Berechnungsmodelle und Zentrifugen-Modellversuche
- 16 (1992) **Rainer Scherbeck**  
Geotechnisches Verhalten mineralischer Deponieabdichtungsschichten bei ungleichförmiger Verformungswirkung
- 17 (1992) **Martin M. Bizialiele**  
Torsional Cyclic Loading Response of a Single Pile in Sand
- 18 (1993) **Michael Kotthaus**  
Zum Tragverhalten von horizontal belasteten Pfahlreihen aus langen Pfählen in Sand
- 19 (1993) **Ulrich Mann**  
Stofftransport durch mineralische Deponieabdichtungen: Versuchsmethodik und Berechnungsverfahren
- 20 (1992) **Festschrift anlässlich des 60. Geburtstages von Prof. Dr.-Ing. H. L. Jessberger**  
20 Jahre Grundbau und Bodenmechanik an der Ruhr-Universität Bochum
- 21 (1993) **Stephan Demmert**  
Analyse des Emissionsverhaltens einer Kombinationsabdichtung im Rahmen der Risikobetrachtung von Abfalldeponien
- 22 (1994) **Diethard König**  
Beanspruchung von Tunnel- und Schachtausbauten in kohäsionslosem Lockergestein unter Berücksichtigung der Verformung im Boden
- 23 (1995) **Thomas Neteler**  
Bewertungsmodell für die nutzungsbezogene Auswahl von Verfahren zur Altlastensanierung
- 24 (1995) **Ralph Kockel**  
Scherfestigkeit von Mischabfall im Hinblick auf die Standsicherheit von Deponien
- 25 (1996) **Jan Laue**  
Zur Setzung von Flachfundamenten auf Sand unter wiederholten Lastereignissen

- 26 (1996) **Gunnar Heibroek**  
Zur Rißbildung durch Austrocknung in mineralischen Abdichtungsschichten an der Basis von Deponien
- 27 (1996) **Thomas Siemer**  
Zentrifugen-Modellversuche zur dynamischen Wechselwirkung zwischen Bauwerken und Baugrund infolge stoßartiger Belastung
- 28 (1996) **Viswanadham V. S. Bhamidipati**  
Geosynthetic Reinforced Mineral Sealing Layers of Landfills
- 29 (1997) **Frank Trappmann**  
Abschätzung von technischem Risiko und Energiebedarf bei Sanierungsmaßnahmen für Altlasten
- 30 (1997) **André Schürmann**  
Zum Erddruck auf unverankerte flexible Verbauwände
- 31 (1997) **Jessberger, H. L. (Herausgeber)**  
Environment Geotechnics, Report of ISSMGE Technical Committee TC 5 on Environmental Geotechnics ([www.gub.ruhr-uni-bochum.de/tc5](http://www.gub.ruhr-uni-bochum.de/tc5))

*Herausgeber: Th. Triantafyllidis*

Heft Nr.

- 32 (2000) **Triantafyllidis, Th. (Herausgeber)**  
Workshop "Boden unter fast zyklischer Belastung: Erfahrung und Forschungsergebnisse. Bochum April 2000
- 33 (2002) **Christof Gehle**  
Bruch- und Scherverhalten von Gesteinstrennflächen mit dazwischenliegenden Materialbrücken
- 34 (2003) **Andrzej Niemunis**  
Extended hypoplastic models for soils
- 35 (2004) **Christiane Hof**  
Über das Verpressankertragverhalten unter kalklösendem Kohlensäureangriff
- 36 (2004) **René Schäfer**  
Einfluss der Herstellungsmethode auf das Verformungsverhalten von Schlitzwänden in weichen bindigen Böden
- 37 (2005) **Henning Wolf**  
Zur Scherfugenbänderung granularer Materialien unter Extensionsbeanspruchung