



**TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DRESDEN**

Institut für Geotechnik

---

MITTEILUNGEN  
HEFT 25

**Beitrag zur  
Fallgewichtsverdichtung in  
sandigem Boden**

**Contribution to heavy  
tamping in sandy soils**

von  
Holger Pankrath

DRESDEN 2019

Mitteilungen – Institut für Geotechnik, Technische Universität Dresden  
ISSN 1434-3053

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. I. Herle

© Institut für Geotechnik – TU Dresden – 2019

Bei Vervielfältigungen und Übersetzungen wird um Quellenangabe gebeten.

Briefanschrift:  
Institut für Geotechnik  
TU Dresden  
01062 Dresden

Besucheradresse:  
Neuffer-Bau  
George-Bähr-Straße 1a  
01069 Dresden

Telefon: 03 51/46 33 42 48  
Fax: 03 51/46 33 41 31  
E-Mail: [geotechnik@mailbox.tu-dresden.de](mailto:geotechnik@mailbox.tu-dresden.de)

# Vorwort des Herausgebers

Die Baugrundverbesserung gehört zu einem am schnellsten sich entwickelnden Bereich der Geotechnik. Viele Verfahren entstehen jedoch durch empirische Erfahrungen und vermissen eine ausreichende wissenschaftliche Basis. Die Übertragbarkeit der Erfahrung von einem Bodentyp zu einem anderen ist dadurch problematisch und die Planung ziemlich unzuverlässig.

Der Einsatz der Fallplattenverdichtung kann insbesondere außerhalb von bewohnten Gebieten eine sehr wirkungsvolle und wirtschaftliche Methode der Baugrundverbesserung sein. Dabei sind die Zusammenhänge zwischen einzelnen Einflussfaktoren noch nicht ausreichend geklärt. Eine numerische Betrachtung erfordert fortgeschrittene Stoffmodelle und für dynamische Prozesse geeignete numerische Verfahren. Um solche Simulationen zu validieren, werden dringend Modellversuche gebraucht, welche die wesentlichen Aspekte des Verfahrens abbilden und detaillierte Messdaten liefern. Und genau hierfür leistet die Dissertation von Herrn Pankrath einen wertvollen Beitrag.

Diese Dissertation ist im Rahmen eines kooperativen Promotionsverfahrens zwischen der TU Dresden und HTWK Leipzig entstanden. Das Forschungsprojekt unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Ralf Thiele wurde vom BMBF finanziert und an der HTWK Leipzig bearbeitet.

Ivo Herle



# Vorwort des Verfassers

Die Verdichtung von Böden begleitet mich intensiv seit der Aufnahme meiner Tätigkeiten als wissenschaftlicher Mitarbeiter im September 2012 an der HTWK Leipzig in der G<sup>2</sup> Gruppe Geotechnik unter der Leitung von Prof. Dr. Ralf Thiele. Wesentliche Eckpunkte dieser Arbeit wurden dann im Rahmen des kooperativen Promotionsverfahrens mit der TU Dresden seit November 2014 mit Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle und Prof. Dr.-Ing. habil. Peter-Andreas von Wolffersdorff regelmäßig abgestimmt und bis zur Fertigstellung der Dissertation im Sommer 2018 durch mich bearbeitet.

Für die Beantwortung der Fragestellungen zur Wirkweise von dynamischen Verdichtungsverfahren wie der Fallgewichtsverdichtung waren geeignete Versuchsstände vor allem für die Messmethode der Digitalen Bildkorrelation in der G<sup>2</sup> Gruppe Geotechnik neu zu entwickeln. Damit verbunden mussten auch Fragestellungen zu geeigneten numerischen Berechnungsmethoden mit fortgeschrittenen Stoffmodellen gelöst werden. Ohne das große Vertrauen meines Arbeitgebers in die gewählte Methodik wäre diese Arbeit nicht in dieser Weise möglich gewesen.

Mein herzlicher Dank gilt ausdrücklich Prof. Dr. Ivo Herle, Prof. Dr.-Ing. Ralf Thiele und Prof. Dr. Peter-Andreas von Wolffersdorff, die mich regelmäßig in fachlichen Diskussionen immer konstruktiv und mit wichtigen Hinweisen geleitet haben.

Ich möchte mich zudem sehr bei meinen ehemaligen Kollegen und Mitstreitern in Leipzig und Dresden, aber auch bei allen anderen Wegbegleitern und Fachkollegen bedanken, die mich jeder auf seine Weise bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Besonders nennen möchte ich dabei Friedemann Sandig, Alexander Knut, Rosa Elena Ocaña Atencio und Erik Schwiteilo.

Ein herzlicher Dank gilt auch meiner Familie und meinen Freunden, die mich in allen Phasen der Promotion immer begleitet und angespornt haben.

Holger Pankrath



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zur praktischen Bedeutung der Fallgewichtsverdichtung</b>	<b>6</b>
2.1	Geschichte der Verdichtung mit Fallgewichten.....	6
2.2	Anwendungsbereiche.....	6
2.3	Bodenmechanische Vorgänge während der Verdichtung.....	8
2.4	Wellenausbreitung bei impulsförmigem Energieeintrag.....	8
2.5	Bewertung des Verdichtungserfolges.....	9
<b>3</b>	<b>Überblick zu experimentellen und rechnerischen Untersuchungen zur Fallgewichtsverdichtung</b>	<b>11</b>
3.1	Feldversuche.....	11
3.2	Modellversuche.....	12
3.3	Berechnungsverfahren.....	29
<b>4</b>	<b>Versuchstechnische Grundlagen</b>	<b>34</b>
4.1	Geotechnische Experimente und deren Anforderung.....	34
4.2	Konzeption von Modellversuchen.....	35
4.3	Wahl und Realisierung von Randbedingungen.....	38
4.4	Erfassung und Auswertung von Messgrößen.....	38
4.5	Digital Image Correlation (DIC).....	40
<b>5</b>	<b>Versuchssand, Versuchsstände und Einbaumethoden</b>	<b>52</b>
5.1	Versuchssand.....	52
5.2	Versuchsstand-C.....	54
5.3	Versuchsstand-S.....	57
5.4	Versuchsstand-M.....	61
5.5	Einbaumethoden.....	68
5.6	Kontrolle der Probenhomogenität.....	73

<b>6</b>	<b>Versuche mit statischer Auflast</b>	<b>79</b>
6.1	Versuchsprogramm und Ziele.....	79
6.2	Kompressionsversuche .....	81
6.3	Streifen- und Kreisfundamentversuche.....	93
6.4	Ergänzende Messungen .....	103
6.5	Zusammenfassung .....	106
<b>7</b>	<b>Versuche mit skalierten Fallgewichten</b>	<b>108</b>
7.1	Versuchsprogramm und Ziele.....	108
7.2	Fallgewichtsversuche im ebenen Verformungszustand.....	109
7.3	Fallgewichtsversuche als Halbmodell.....	115
7.4	Ergebnisse zusätzlicher Sondierungen.....	122
7.5	Ergänzende Messungen .....	125
7.6	Kinematik .....	130
7.7	Versuchsstudie zur Fallgewichtsverdichtung .....	133
7.8	Zusammenfassung .....	150
<b>8</b>	<b>Vergleich zwischen statischen und dynamischen Versuchen</b>	<b>153</b>
<b>9</b>	<b>Numerische Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode</b>	<b>157</b>
9.1	Grundlagen der verwendeten Finite-Elemente-Methode.....	157
9.2	Bestimmung der Stoffmodellparameter.....	160
9.3	Simulation der Kompressionsversuche.....	161
9.4	Simulation der Streifenfundamentversuche.....	170
9.5	Simulation der Fallgewichtsversuche .....	176
9.6	Kinematik .....	182
9.7	Zusammenfassung .....	186
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>188</b>
<b>11</b>	<b>Ausblick</b>	<b>194</b>

<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>196</b>
<b>Anhang A Versuchsstudie zur Fallgewichtsverdichtung</b>	<b>204</b>
A.1 Einzelversuche am Versuchsstand-S .....	204
A.2 Einzelversuche am Versuchsstand-M .....	208
<b>Anhang B DIC-Studien an idealisiertem Versuchsaufbau</b>	<b>213</b>
<b>Anhang C Studie zu Zwischenbezugsschritten in ISTR4D</b>	<b>220</b>
<b>Anhang D Studie zur Ermittlung von Dehnungen in ISTR4D</b>	<b>223</b>
<b>Anhang E Kalibrierung der Stoffmodellparameter in Abaqus</b>	<b>227</b>
<b>Anhang F Hypoplastisches Stoffmodell ohne intergranulare Dehnung</b>	<b>229</b>
<b>Anhang G Hypoplastisches Stoffmodell mit intergranularer Dehnung</b>	<b>232</b>



# 1 Einleitung

Ziel der eigenen Arbeit ist es, geeignete Experimente zur Fallgewichtsverdichtung zu entwickeln und durchzuführen. Die Ergebnisse sollen dazu dienen, bisher kaum dokumentierte Aspekte der dynamischen Verdichtung von sandigem Boden intensiver zu untersuchen und den Kenntnisstand zum Verformungsverhalten bei Verdichtungsprozessen zu erweitern. Über Vergleiche sollen zudem die Bedeutung von Steuergrößen von Verdichterverfahren mit impulsförmigen Energieeintrag hinterfragt werden. Die Versuche sollen als Randwertprobleme zur qualitativen und quantitativen Validierung von numerischen Modellen dienen und somit eine Alternative für kostenintensive Feldversuche darstellen. Untersuchungsschwerpunkte sind das Verformungsverhalten sowie die Verdichtungswirkung bei Fallgewichtsvorgängen. Es besteht nicht der Anspruch alle Aspekte der Fallgewichtsverdichtung als Realverfahren abzubilden. Vielmehr sollen und können nur bestimmte Merkmale betrachtet werden. Zudem sollen ausgewählte numerische Methoden für die Simulation von Bodenverdichtung überprüft werden.

## Hintergrund

Teile der vorgestellten Arbeiten wurden im Rahmen des vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) finanzierten Forschungs- und Entwicklungsprojektes ECompact in der G<sup>2</sup> Gruppe Geotechnik an der HTWK Leipzig realisiert (FKZ: 03FH027I2). Die in der G<sup>2</sup> Gruppe Geotechnik verfolgte Strategie sieht eine iterative Bearbeitung des Themas mit Entwicklung bzw. Nutzung von drei wesentlichen Entwicklungs- bzw. Prüfwerkzeugen vor:

- Modellversuche im Erdschwerefeld (1g) für Verdichter mit transientem Energieeintrag
- numerische Modelle in *Abaqus* für ergänzende Untersuchungen und Entwicklungsschritte
- Feldversuche zur Prüfung und Validierung theoretischer Modelle

In der eigenen Arbeit sollen geeignete 1g Modellversuche entwickelt und durchgeführt werden, die eine Validierung von numerischen Modellen ermög-

lichen. Zu erfassen war dabei vor allem die Verdichtungswirkung von Fallgewichtsmodellen. Auf dieser Grundlage waren Zusammenhänge zwischen ausgewählten Steuergrößen des Verdichterverfahrens und der Verdichtungswirkung zu erfassen und zu bewerten. Mit Hilfe der Modellergebnisse sollten dann theoretische Modelle validiert werden. Die Erkenntnisse der Untersuchungen am Modell sollen perspektivisch an Feldversuchen bewertet werden. Mögliche vorteilhafte Eigenschaften sind abzuleiten und sollen als Vorgabekatalog für Verfahrensanpassungen bzw. Neuentwicklungen aufbereitet werden.

### Herangehensweise

Die Anforderungen an Modellversuche orientieren sich in erster Linie an den Merkmalen der realen Fallgewichtsverdichtung. Neben Möglichkeiten der Variation wesentlicher Steuergrößen des Verfahrens wie Fallhöhe, Masse und Geometrie eines Fallgewichtes, soll auch ein horizontales Umsetzen der Verdichtereinheit ermöglicht werden. Bewertungsgegenstand ist in der eigenen Arbeit vor allem die Verdichtungswirkung einer Fallgewichtskonfiguration. Die Anforderungen an ein Messverfahren für die Bodenverformungen sind eine hohe räumliche und zeitliche Messauflösung. Zudem sind Störungen der Wirkweise etwa durch unnötige Einbauten im Boden zu minimieren bzw. auszuschließen.

Als wichtigstes Versuchsprinzip wurde daher die Methode der direkten Beobachtung mit Integration eines Sichtfensters in den Versuchsständen vorgesehen. Dies bietet die Möglichkeit einer flächenhaften Auswertung des Bodenverhaltens mit der DIC-Methode (*Digital Image Velocimetry*). Gleichzeitig kann auf den Einbau von Sensoren im Boden verzichtet werden. Neben einer vordergründigen Erfassung von bleibenden Bodenverformungen können durch die Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera auch temporäre Zustände erfasst werden. Für eine Überprüfung und Ergänzung der DIC-Ergebnisse werden in Einzelversuchen auch punktuelle Messungen mit Beschleunigungssensoren am Verdichter und im Boden vorgesehen.

Bei Verwendung der DIC-Methode als zentrales Messverfahren, waren eine Reihe von Eignungs- bzw. Qualitätsnachweisen in der Erfassung von Verdichtungsprozessen an den eigenen Modellständen zu erbringen. In der vorliegenden Arbeit wird im Hauptteil auf diese experimentelle Herausforderung eingegangen. Als Vorstufe zur Fallgewichtsverdichtung werden Versuche mit

statischer Lasteinleitung vorgesehen (nachfolgend auch bezeichnet als „statische Versuche“). Die prinzipiellen Fragestellungen werden nachfolgend kurz genannt:

1. Ist die DIC-Methode für eine qualitative und quantitative Erfassung von Verschiebungen und Dehnungen bei Verdichtungsprozessen geeignet und wie wirken sich DIC-Konfigurationen, Kameraauflösung und ggf. die Sichtebeine auf die Messergebnisse aus?

Zur Beantwortung dieser Fragestellungen wird der Versuchsstand-C (*Calibration*) für statische Versuche im Labor entwickelt. Die Lasteinleitung erfolgt über die gesamte Tiefe des Probenkörpers und erlaubt somit näherungsweise nur Verformungen entlang der Sichtebeine (ebener Verformungszustand):

- a. In einer ersten Konfiguration sind Versuche in eindimensionaler Kompression vorgesehen. Bewertungsgrößen sind die Verschiebung der Lasteinheit bzw. Gesamtsetzung der Probe sowie Verschiebungen, richtungsbezogene Dehnungen und volumetrische Dehnungen der Bodenprobe.
  - b. Eine zweite Konfiguration am Versuchsstand-C erfolgt an einer schmalen Lasteinheit analog zu typischen Grundbruchversuchen ebenfalls im ebenen Verformungszustand. Bewertungsgrößen sind für diese Konfiguration Verschiebungen, richtungsbezogene Dehnungen sowie Scherdehnungen der Bodenprobe.
2. Weitere Fragestellungen ergeben sich für die Untersuchungen am deutlich größeren Versuchsstand-M. An diesem Versuchsstand ist zu prüfen, inwieweit sich die größere Sichtebeine bzw. größere *ROI* (ausgewählter DIC-Messbereich, engl.: *region of interest*) bei gleicher Kameraauflösung auf die Messungen auswirkt. Sind Unterschiede zwischen Versuchen im ebenen Verformungszustand und am Halbmodell zu erwarten und welche Merkmale der Bodenverformungen werden tatsächlich durch die Dynamik einer Fallgewichtsverdichtung verursacht?

Zur Beantwortung dieser Fragen werden zunächst statische Versuche am Versuchsstand-M (*middle*) vorgesehen. Untersucht wird das Verformungsverhalten bei statischer Lasteinleitung im ebenen Verformungszustand sowie an vergleichbaren Experimenten als Halbmodell-Versuch.

Auf Grundlage der Versuche mit statischer Lasteinleitung wurden Fallgewichtsversuche an 2 Versuchsständen konzipiert. Folgende grundsätzlichen Fragestellungen wurden verfolgt:

3. Kann eine Einflusstiefe bei der Fallgewichtsverdichtung mit der DIC-Methode erfasst werden?  
Hierzu werden DIC-Messungen für richtungsbezogene Verschiebungen und Dehnungen sowie die volumetrische Dehnung betrachtet.
4. Welcher Einfluss zeigt sich durch die dynamische Komponente der Fallgewichtsverdichtung auf das Verformungsverhalten?  
Hierzu werden Fallgewichtsversuche durchgeführt, bei denen die Geometrie und Randbedingungen der Versuche den statischen Versuchen nach Fragestellung 2 nachempfunden werden und einen Vergleich für den ebenen Verformungszustand sowie für den Halbmodell-Versuch ermöglichen.
5. Lassen sich kinematische Merkmale der Fallgewichtsverdichtung erfassen?  
Hierzu wird der Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera und Hochleistungs-LED vorgesehen. Für eine Prüfung der DIC-Messungen werden in Einzelversuchen Beschleunigungssensoren an definierten Positionen im Boden eingebaut.

In Ergänzung dieser grundsätzlichen Untersuchungen zum Mess- und Versuchsprinzip wird eine umfangreiche Studie zur Fallgewichtsverdichtung vorgesehen. Dabei werden an den Versuchsständen-S (*small*) und -M (*middle*) unter vergleichbaren Randbedingungen unterschiedliche Konfigurationen der Fallgewichtsverdichtung untersucht:

6. In der Versuchsstudie soll geprüft werden, welche Änderungen der Steuergrößen, der Geometrie und der Abfolge der Impulse einen positiven Einfluss auf die Einflusstiefe haben.

Es ist zu prüfen, ob sich die gewonnenen Messdaten mit der Finite-Elemente-Methode (FEM) nachrechnen lassen. Hierzu erfolgen Berechnungen mit dem Programm *Abaqus* und Anwendung eines hypoplastischen Stoffmodells für einzelne Versuche.

### Strukturierung der Arbeit

In Kapitel 2 wird die praktische Bedeutung der Fallgewichtsverdichtung thematisiert. Dabei wird kurz auf die Geschichte, auf Anwendungsbereiche sowie auf bodenmechanische und bodendynamische Aspekte eingegangen.

Kapitel 3 gibt einen Überblick über bisherige Forschungsarbeiten zur Fallgewichtsverdichtung. Neben Feldversuchen wird vor allem auf Modellversuche eingegangen. Darüber hinaus werden Möglichkeiten und Grenzen von Berechnungsverfahren zur Fallgewichtsverdichtung betrachtet.

In Kapitel 4 werden die grundlegenden experimentellen und numerischen Methoden beschrieben. Hauptaugenmerk liegt auf dem Aufzeigen der Herangehensweise bei den Modellversuchen. Ein weiterer Schwerpunkt liegt auf der Erläuterung einer Anwendung der DIC-Methode.

Kapitel 5 gibt Informationen zu dem in den Versuchen verwendeten Versuchssand. Der Hauptfokus in diesem Kapitel liegt auf einer Beschreibung der Modellversuchsstände sowie der experimentellen Aspekte wie Sandeinbau und Kontrolle der Probenhomogenität.

In den Kapiteln 6, 7 und 8 werden die experimentellen Versuchsergebnisse vorgestellt und interpretiert. Dabei nähert man sich schrittweise der Fallgewichtsverdichtung in Halbmodell-Versuchen, die die größten Ähnlichkeiten mit dem Realverfahren aufweisen. Eine grundsätzliche Überprüfung der DIC-Methode und der Versuchsaufbauten erfolgt an Versuchen unter statischer Auflast in Kapitel 6. Kapitel 7 befasst sich mit der Fallgewichtsverdichtung in der Konfiguration ebener Verformungszustand sowie in einem Halbmodell-Versuch. In diesem Zusammenhang werden auch Aspekte zur Ausbreitung von Wellenfronten thematisiert. Darüber hinaus werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Studie zur Fallgewichtsverdichtung präsentiert und bewertet. Das anschließende Kapitel 8 stellt Ergebnisse statischer Versuche mit Fallgewichtsversuchen gegenüber.

In Kapitel 9 wird auf die Bestimmung der Stoffparameter für das hypoplastische Stoffmodell eingegangen. Anschließend werden eigene Simulationen ausgewählter Modellversuche vorgestellt. Die Reihenfolge orientiert sich an der Vorstellung der Experimente in den vorangegangenen Kapiteln.

## **2 Zur praktischen Bedeutung der Fallgewichtsverdichtung**

### **2.1 Geschichte der Verdichtung mit Fallgewichten**

Die Verdichtung von Boden durch Fallgewichte ist wahrscheinlich die älteste Form einer gezielten Verbesserung der Trageigenschaften eines Baugrundes und lässt sich nach Kérisel [KÉR93] bei Arbeiten in China vor über 4000 Jahren sowie in vielen späteren Kulturen im zivilen und im militärischen Bauen wiederfinden.

Gemäß Slocombe [SLO93] wurde die moderne Form der Fallgewichtsverdichtung durch Louis Menard seit 1970 in Frankreich entwickelt und wurde dann auch 1972 in Großbritannien, 1975 in den USA sowie schnell in großen Teilen der Welt eingesetzt. Bei dieser Methode wird ein Fallgewicht mit einem Kran aus mehreren Metern Höhe wiederholt in einem festgelegten Raster kabelgeführt fallengelassen. Häufig verbreitet sind dabei Massen der Fallgewichte um 20 t bis 25 t bei maximalen Fallhöhen von 25 m. Inzwischen sind in Einzelprojekten auch Systeme mit bis zu 200 t bei einer Fallhöhe von maximal 40 m sowie echte Freifallssysteme ohne Kabelführung beim Fallvorgang im Einsatz.

Ähnliche Wirkprinzipien kommen seit einigen Jahren auch bei Verfahren wie der *Rapid Impact Compaction* zum Einsatz. Dabei wird eine Fallmasse zwischen 7 t und 12 t aus einer Fallhöhe von 1,2 m auf einen Verdichtungsfuß fallengelassen. Bei deutlich geringerer Wirtiefe liegt ein Vorteil dieses Verfahrens in der erhöhten Schlaganzahl von bis zu 60 Impulsen pro Minute gegenüber den 1 bis 2 Impulsen bei der Fallgewichtsverdichtung mit einem Kran.

### **2.2 Anwendungsbereiche**

Die Anwendungsbereiche der Fallgewichtsverdichtung liegen in der Tiefenverdichtung von anstehenden Böden mit unzureichender Tragfähigkeit sowie

in der Verdichtung von geschütteten Erdkörpern meist in außerstädtischen Großprojekten. Darüber hinaus wird das Verfahren auch für Sonderaufgaben genutzt, in denen durch einen hohen Energieeintrag bspw. mögliche ungewollte Setzungen oder Versagensformen des Untergrundes vorweggenommen werden.

Nach Lukas [LUK86] wird die Eignung der Fallgewichtsverdichtung nach 3 Bodenkategorien (Zonen) unterschieden. Demnach wird das Verfahren zur Verbesserung nicht bindiger Böden ohne und mit Grundwasserbeeinflussung empfohlen (Zone 1). Bindige Böden mit einem Durchlässigkeitsbeiwert  $k_F > 10^{-8}$  m/s und einem Plastizitätsindex  $I_P < 8$  können oberhalb des Grundwasserspiegels im Sinne einer beschleunigten Konsolidierung verbessert werden. Hierzu sind jedoch Maßnahmen zur begleitenden Senkung entstehender hoher Porenwasserdrücke z.B. über Dränagen und Wasserförderung über Vakuumpumpen notwendig (Zone 2). Nicht empfohlen wird das Verfahren für Böden mit einem Durchlässigkeitsbeiwert  $k_F < 10^{-8}$  m/s bzw. einem Plastizitätsindex  $I_P > 8$  (Zone 3). Abbildung 2.1 beschreibt nach Lukas [LUK86] das Wirkprinzip der Fallgewichtsverdichtung.

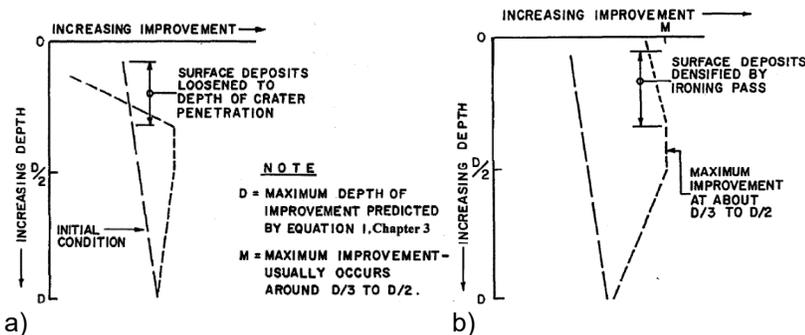


Abbildung 2.1 Verbesserungswirkung der Fallgewichtsverdichtung über die Tiefe nach Lukas [LUK86]: a) nach dem ersten Übergang und b) nach mehreren Übergängen und einem glättenden Arbeitsgang

## 2.3 Bodenmechanische Vorgänge während der Verdichtung

Sande bestehen aus lose aneinander gereihten, ungleich großen Einzelkörnern mit großem Porenraum bzw. großer Porenzahl bei lockerer Lagerung und kleiner Porenzahl bei dichter Lagerung. Der Porenraum bzw. die Porenzahl  $e$  ist dabei als Verhältnis zwischen dem Porenvolumen  $V_p$  und dem Volumen der Einzelkörner  $V_s$  definiert. Die Porenzahl  $e$  eines Bodens kann zwischen den Größen  $e_{\min}$  und  $e_{\max}$  variieren. Beide Größen können für Sande im Labor bestimmt werden.

Durch Kornumlagerung kann ein Boden sowohl eine lockere als auch eine dichtere Lagerung annehmen. Als Verdichtung wird dabei eine Kornumlagerung in eine dichtere Lagerung mit Reduzierung des Porenraumes bezeichnet.

Die mechanischen Widerstände von einem granularen Boden wie Sand basieren vor allem auf einem Reibungs- und Verzahnungswiderstand der Einzelkörner. Der Widerstand gegen eine Beanspruchung sowie die Eigensteifigkeit eines Bodens wachsen mit abnehmender Porenzahl.

Eine Verdichtung bei granularen Böden wird häufig durch die Kombination aus vertikaler Belastung bzw. Ausnutzung des geostatischen Spannungszustandes und Scherung aus einem dynamischen Energieeintrag erreicht. An der freien Oberfläche bei fehlender Auflast führt besonders bei trockenem Sand ein dynamischer Energieeintrag durch Schubbeanspruchungen daher häufig zu einer Auflockerung.

Baupraktisch sind bei der Verdichtungsarbeit zwingend weitere Aspekte wie die Abhängigkeit vom Wassergehalt, der Einfluss von Kornverfeinerungen durch Kornbrüche und Abrasion sowie auch eine mögliche Entmischung in Vorbereitung einer Verdichtungsmaßnahme zu beachten.

## 2.4 Wellenausbreitung bei impulsförmigem Energieeintrag

Ein durch Aufprall eines Fallgewichtes eingetragener Impuls führt im Boden zur Ausbreitung von Raumwellen (Kompressions- und Scherwellen) und

Oberflächenwellen. Je nach Art der Energieeinleitung bilden sich diese Wellenarten unterschiedlich stark aus. Die erzeugten Schwingungen nehmen mit zunehmender Entfernung von der Quelle des Energieeintrages ab. Gründe hierfür sind die geometrische Abnahme der Amplituden infolge Verringerung der Energiedichte und die Materialdämpfung infolge der frequenzabhängigen Absorption der Schwingungsenergie.

An der Oberfläche verlaufende Wellenformen können in der Baupraxis an ausgewählten Punkten an der Oberfläche erfasst und bewertet werden. Auf diesem Weg kann die Intensität und die Geschwindigkeit der Welle erfasst und an Grenzwerten nach [DIN18124] für Einwirkungen auf den Menschen sowie für Einwirkungen auf bauliche Anlagen überprüft werden. Zum Einsatz kommen dabei meist Geophone, die eine Schwinggeschwindigkeit ermitteln. Durch diese Methode lässt sich die Gefahr von ungewollten Setzungen und Schäden während einer Baumaßnahme erkennen und begrenzen. Bekannt ist, dass kritische Schwingungen durch Systeme mit schweren Fallgewichten ausgelöst werden können. Ein Einsatz der Fallgewichtsverdichtung oder vergleichbarer Verfahren ist innerstädtisch aber auch in der Nähe rutschungsgefährdeter Bereiche daher nur eingeschränkt möglich bzw. muss intensiv überwacht werden. In der Geophysik erfolgt eine deutlich differenzierte Messung der Wellenausbreitung zur indirekten klein- und großräumigen Erkundung und Bewertung des Untergrundes. Es wird davon ausgegangen, dass Kompressions- und Scherwellen über eine Umlagerung des Korngerüsts zu einer Verdichtung führen. Insbesondere in bindigen Böden kann diese kurzzeitige Umlagerung durch Porenwasser, das nicht schnell genug entweichen kann, begrenzt oder vollständig verhindert werden.

## **2.5 Bewertung des Verdichtungserfolges**

Haupteinsatzziel der Fallgewichtsverdichtung ist häufig die Verbesserung der Trageigenschaften eines Bodens bzw. die Verbesserung des Setzungsverhaltens. An Setzungs-Hebungs-Tests können die bei der Fallgewichtsverdichtung auftretenden großen Verformungen über die Kratertiefe sowie über die vertikalen Hebungen seitlich des Kraters auch an der Oberfläche erfasst werden. Unter repräsentativen Baugrundbedingungen lassen sich so im Vorfeld einer Maßnahme wesentliche Kenngrößen für die Fallgewichtsverdichtung festlegen.

Für eine Bewertung des Verdichtungserfolges sind nach Slocombe [SLO93], Lukas [LUK95] und Nazhat [NAZ13] die Kratertiefe bzw. das Kratervolumen sowie die vertikalen Hebungen seitlich des Kraters zu überwachen. Für typische Anwendungen des Verfahrens kann der Verdichtungserfolg häufig mit Hilfe von Sondierungen vor und nach einer Verdichtungsmaßnahme bewertet werden. Verwendete Sondierverfahren sind meist die Pressiometrie, aber auch Drucksondierungen und Rammsondierungen. Eine Erhöhung des Spitzenwiderstandes bei Drucksondierungen  $q_c$  konnte dabei nach Schmertmann [SCH86] oder nach Dumas [DUM88] einer zunehmenden Anzahl der Fallvorgänge bzw. einer Steigerung der eingesetzten Fallenergie in Beziehung gesetzt werden.

Bei der Anwendung in bindigen Böden ist eine starke Abhängigkeit des Sondierwiderstandes vom Messzeitpunkt nach Durchführung einer Fallgewichtsverdichtung zu beachten. So wird häufig ein Anstieg der Sondierwiderstände über mehrere Wochen beobachtet. Dieser Vorgang wurde nach [MIC03] unter dem Begriff „static fatigue“ beschrieben. In der Ausführung mit mehreren Durchgängen sind daher Ruhezeiten einzuhalten. Man geht davon aus, dass in diesen Ruhephasen ein beträchtlicher Teil der Verdichtung stattfindet [LMB98].

# 3 Überblick zu experimentellen und rechnerischen Untersuchungen zur Fallgewichtsverdichtung

## 3.1 Feldversuche

Messungen an realen Verdichterverfahren bieten besondere Möglichkeiten um bspw. theoretische Modelle für gezielte Fragestellungen zu entwickeln oder zu prüfen. Dabei müssen im Gegensatz zur Arbeit mit Modellversuchen keine Skalierungseffekte berücksichtigt werden. Die Durchführung eines instrumentierten Feldversuches ist dabei immer mit einem hohen Aufwand und somit meist auch mit hohen Kosten verbunden. Wesentlicher Nachteile an Feldversuchen ist die fehlende Erfassung von Bodenverformungen während der Verdichtungsmaßnahme und unterhalb des Verdichters. Zudem besteht eine große Unsicherheit zu Aufbau, Eigenschaften und Zustand des zu verdichtenden Baugrundes. Es werden Messungen vor und nach einer Verdichtungsmaßnahme über Sondierungen in Einzelfällen auch mit Aufgrabungen und direkten oder indirekten Messungen der Dichte durchgeführt. Begleitend zur Maßnahme können nur bedingt Spannungen und Verformungen im Umfeld der Verdichtungsmaßnahme, aber nicht unterhalb eines Verdichters gemessen werden.

In [KIR16] wurden für die Validierung eines numerischen Modells umfangreiche Messungen während einer Fallgewichtsverdichtung durchgeführt. Besonders im Fokus waren dabei die großen Verformungen an der Oberfläche sowie die Ausbreitung oberflächennaher Wellenfronten. Der Versuch wurde analog einem Setzungs-Hebungs-Test angelegt. Im Ergebnis eines Setzungs-Hebungs-Tests werden nach Kirstein [KIR16] u.a. Abmessungen und Masse eines Fallgewichtes, Fallhöhe, Anzahl der Schläge je Punkt, Start und Endrasstermaß und damit Anzahl der Verdichtungsphasen sowie ggf. Materialbedarf zur Herstellung granularer Säulen in den Verdichtungskratern festgelegt.

Im Beitrag wird gezeigt, wie durch zeitlich hochauflösende Messungen das Bewegungsverhalten des Fallgewichtes beim Aufprall sowie die Ausbreitung

oberflächennaher Wellenfronten über verschiedene Messsysteme erfasst wurde.

Dennoch bleiben die Kenntnisse zu Aufbau, Eigenschaften und Zustand des Untergrundes vor und nach den Versuchen immer begrenzt. Entscheidender Nachteil bleibt das Fehlen von Informationen zu den Bodenverformungen in der Tiefe, insbesondere während des Verdichtungsvorganges. So sind Studien zu Einflussgrößen des Verdichtungsverfahrens limitiert. Eine quantitative und systematische Überprüfung einzelner Aspekte und Effekte von numerischen Simulationen ist mit dieser Art von Feldmessungen nur begrenzt möglich. Darüber hinaus ist eine Reproduzierbarkeit der Ergebnisse aufgrund von Bodeninhomogenitäten schwer zu realisieren. Aus den genannten Gründen wird auf die Verwendung von Feldversuchen an Bestandsböden im Rahmen der eigenen Arbeit verzichtet.

## 3.2 Modellversuche

### 3.2.1 Modellversuchsarten und Modellgesetze

1g-Modellversuche sind für viele geotechnische Fragestellungen wie auch zur Fallgewichtsverdichtung weit verbreitet. In Abhängigkeit der Fragestellung kann es sich anbieten, die Versuche unter Bodeneigengewicht durchzuführen oder zusätzliche Druckrandbedingungen über Kalibrierungszellen (*calibration chambers*) zu nutzen. Kritikpunkt an Modellversuchen ohne zusätzliche Auflast ist häufig das geringe Spannungsniveau besonders im Hinblick auf numerische Nachrechnungen.

Mit Kalibrierungszellen kann hingegen ein Druckniveau in Anlehnung an eine bestimmte Tiefenlage gezielt eingestellt werden. Dabei bleibt der Druckgradient infolge des Eigengewichtes gegenüber dem isotropen Anteil aus den Randbedingungen relativ gering.

Zentrifugenversuche bieten die Möglichkeit, in sehr kleinen Versuchsmodellen zu arbeiten und dabei ein realistisches Spannungsniveau zu erzeugen. Dabei wird der gesamte Versuchsaufbau einem Vielfachen der Erdbeschleunigung ausgesetzt. Aufgrund der Besonderheit der teilweise sehr geringen Versuchsabmessungen wird häufig eine Abstimmung der Korngröße auf bspw. das Fallgewicht angestrebt. Der Vorteil der Zentrifugenversuche gegenüber

1g-Modellversuchen liegt in der Erhöhung des Spannungsniveaus und des Druckgradienten. Somit ist es eher möglich, Aussagen über ein Systemverhalten im Prototypenmaßstab abzuleiten. Beispiele für Fallgewichtsmodelle in Zentrifugenversuchen liefern z.B. Oshima [OSH94], [OSH97], [OSH98]. Allgemeine Abhandlungen zu Zentrifugenversuchen sind in [WHI08] und in [ROS70] zu finden.

Für diese Arbeit stand keine Zentrifuge zur Verfügung. Eine Skalierung der eigenen Modellergebnisse auf Fragestellungen realer Fallgewichtsverdichtung ist nicht vordergründiges Ziel dieser Arbeit. Ziel dieser Arbeit ist es, eine Ähnlichkeit zu realen Verfahren der Verdichtung zu gewährleisten. Eine numerische Nachrechnung soll entsprechend der Abmessungen in den Versuchen erfolgen. Somit ist die Anwendung von Modellgesetzen nicht erforderlich. Dennoch sollen nach einem verbreiteten Ansatz von Poran [POR92] versucht werden, eigene Ergebnisse mit Ergebnissen anderer Modellversuche sowie ausgewählten existierenden Varianten zur Vorbemessung der Wirtktiefe zu vergleichen.

### 3.2.2 Überblick über Messmethoden

Für Modellversuche zur Fallgewichtsverdichtung werden verschiedene Konzepte beim Modellaufbau verfolgt.

Ein vermeintlich einfacher Versuchsaufbau verwendet ein Fallgewicht, das mittig in einem Versuchsbehälter eingesetzt wird. Messungen beschränken sich jedoch häufig auf die Veränderung des Verdichtungskraters sowie Hebungen des Bodens im Umfeld. Durch den Einbau von Sensoren können punktuelle Messungen im Boden erfolgen. Jedoch muss auch von einer Beeinflussung der Bodenverformungen unbekannter Intensität ausgegangen werden (s. hierzu auch Kap. 0). Betrachtet werden meist bekannte Einflussgrößen der Fallgewichtsverdichtung wie Masse, Geometrie und Fallhöhe des Fallgewichtes. Ziele liegen in der Bewertung von Zusammenhängen zwischen gemessenen Verformungen am Boden (wie z. B. der Tiefe des Verdichtungskraters) zu den genannten Einflussgrößen. Punktuelle Messungen an Modellen mit komplettem Fallgewicht wurden u. a. durch Jessberger [JES81], Poran [POR92] sowie Jafarzadeh [JAF06] durchgeführt.

Eine umfassendere Bewertung des Bodenverhaltens erlauben Modellversuche mit der Möglichkeit der direkten Beobachtung des Bodens hinter einer Sichte ebene. Durch optische Messmethoden wie *Digital Image Correlation* (DIC) oder die Methode der *Particle Image Velocimetry* (PIV) ist eine flächenhafte Erfassung und Bewertung von Bodenverformungen in der Sichte ebene möglich. Aufgrund von Reibung zwischen Boden und Sichte ebene sowie einer möglichen Durchbiegung der Sichte ebene sind die erfassten Bodenverschiebungen jedoch nicht immer repräsentativ für das Innere des Bodenkörpers. Durch die Interaktion zwischen Boden und Sichte ebene ist eine Beeinflussung der Messergebnisse wahrscheinlich. Ein möglicher Einfluss kann in numerischen Modellen jedoch grundsätzlich berücksichtigt werden.

Häufig werden Versuche mit relativ schmalen Versuchsbehältern als 2D Betrachtung bzw. näherungsweise in ebenem Verformungszustand angewandt. Eine Seite einer Lasteinheit oder eines Fallgewichtes reicht dabei über die gesamte schmale Breite des Versuchsstandes. Diese Experimente untersuchen meist qualitative Effekte der Bodenverformungen bei der Fallgewichtsverdichtung wie z. B. nach Nazhat [NAZ13] bzw. [NAZ15]. In diesen schmalen Versuchsbehältern liegen durch Siloeffekte jedoch besondere Spannungszustände vor, die in der Realität meist nicht auftreten.

Andere Arbeiten versuchen die geotechnische Anwendung daher als Halbmodell mit einem halbiertem Fallgewicht mit halbrunder Grundfläche zu beschreiben. Siloeffekte sind bei ausreichender Dimensionierung nicht zu erwarten. Gegenüber den Versuchen mit relativ schmalen Versuchsbehältern können Betrachtungen bspw. zu Steuergrößen ähnlich wie bei Versuchen mit komplettem Fallgewicht wie durch Hajjalilue-Bonab [HAJ11] durchgeführt werden.

### 3.2.3 Versuche mit statischer Lasteinleitung

Es zeigt sich, dass das Bodenverhalten unter Fallgewichten von Versagensmechanismen bestimmt wird, die auch aus Theorien zum Grundbruch bekannt. Um an Versuchen mit Fallgewichten die Effekte aus der dynamischen Belastung deutlich zu machen, sind somit Kenntnisse zum Verformungsverhalten unter statischen Lasten notwendig.

Die Deutsche Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo) hat in großmaßstäblichen Grundbruchversuchen Bruchkörper untersucht. Dabei

konnten nach Muhs [MUH71] die Versuchsergebnisse die theoretischen Überlegungen zur Ausbildung des Bruchkörpers nach Prandtl [PRA20] für ausgewählte Randbedingungen bestätigen (s. Abbildung 3.1).

Am Institut und der Versuchsanstalt für Geotechnik der TU Darmstadt wurden an Grundbruchversuchen die Entwicklung der Scherbänder mit der PIV-Methode untersucht. Dabei konnten die bekannten Grundbruchfiguren in dicht gelagerten Sanden bestätigt werden.

In Nazhat [NAZ13] bzw. [NAZ15] wird auf Modellversuche mit statischer Auflast und Anwendung der DIC-Methode in einer 2-dimensionalen (2D) Betrachtung in Anlehnung an einen ebenen Verformungszustand eingegangen.

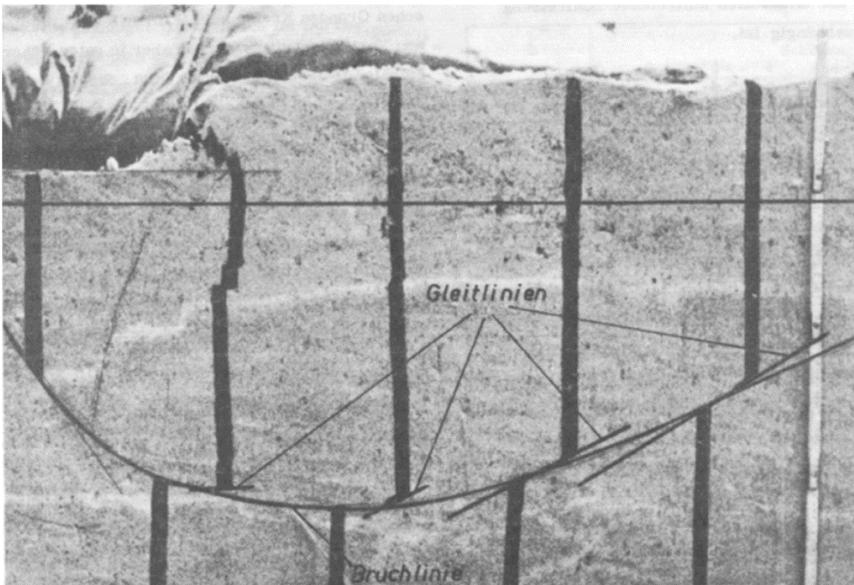


Abbildung 3.1 Bruchkörper im großmaßstäblichen Grundbruchversuch der Deutschen Forschungsgesellschaft für Bodenmechanik (Degebo) in Berlin, nach Muhs [MUH71]

### 3.2.4 Versuche zur Fallgewichtsverdichtung

Das Verformungsverhalten des Bodens unter Fallgewichten lässt sich ähnlich wie bei statischen Versuchen prinzipiell in Modellversuchen bewerten. Modellversuche werden daher in vielen Fallbetrachtungen als Alternative zu aufwendigen und kostenintensiven 1:1 Versuchen im Feld genutzt. Nachfolgend werden Einzelheiten ausgewählter Modellversuche genannt, in denen Kenngrößen der Verdichtungswirkung analysiert wurden. Als Wirktiefe wird dabei die Distanz von der Oberfläche bis in eine Tiefe unterhalb des Aufprallortes bezeichnet, in der eine Verbesserung bzw. Verdichtung des Bodens nach bestimmten Bewertungskriterien nachgewiesen werden konnte. Häufig werden Modellversuche zur Fallgewichtsverdichtung als 1g-Versuche durchgeführt. Eine Ausnahme stellen die Zentrifugenversuche von Oshima [OSH94], [OSH97], [OSH98] dar. Folgende Messprinzipien kommen vordergründig zum Einsatz:

- Jessberger [JES81], Poran [POR92] sowie Jafarzadeh [JAF06] verwenden klassische Sensorkonzepte mit zeitlich hochaufgelösten Erddruck- oder Beschleunigungssensoren, die in der Bodenprobe und z.T. am Fallgewicht positioniert werden.
- Oshima [OSH94], [OSH97], [OSH98], Hajialilue-Bonab [HAJ11] sowie Nazhat [NAZ13] [NAZ15] verwenden Schnittmodelle, z.T. mit Anwendung der DIC / PIV-Methode und Einsatz einer Hochgeschwindigkeitskamera.

Jessberger [JES81] untersuchten Beziehungen von vertikalen Spannungen an der Oberfläche einer Bodenprobe zur Verdichtungstiefe. Dabei wurden ein Beschleunigungssensor am Fallgewicht und kleine Drucksensoren im Boden in 3 Tiefenlagen positioniert. An den gemessenen Vertikalspannungen wurden die Einflüsse der Steuergrößen Fallmasse  $m$ , Fallhöhe  $h$  und Grundfläche des Fallgewichtes  $A$  untersucht. Abbildung 3.2 zeigt ein Bemessungsschema mit qualitativem Zusammenhang der genannten Steuergrößen bei Annahme einer konstanten Wirktiefe.

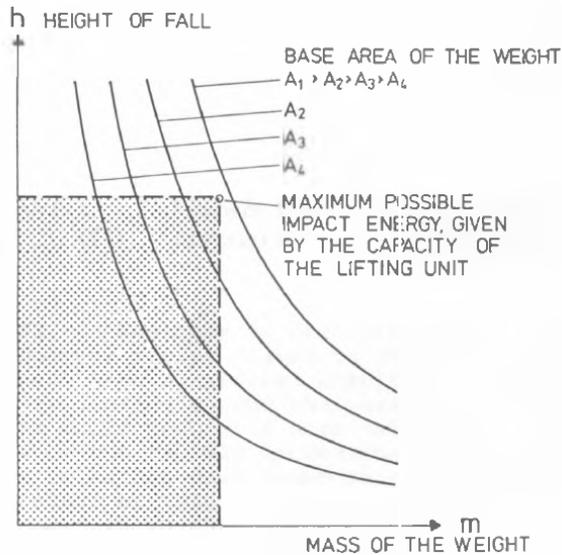


Abbildung 3.2 Bemessungsschema bei konstanter Wirktiefe nach Jessberger [JES81]

Poran [POR92] zeigen 1g-Versuche mit trockenem Sand in einem Behälter mit den Abmessungen 1,22 m x 1,22 m x 1,22 m. Dabei wurden u. a. die Auswirkungen der Steuergrößen Fallmasse, Fallhöhe und Grundfläche des Fallgewichtes auf die Verdichtungswirkung untersucht und Beziehungen für eine Bemessung von Realverfahren abgeleitet. Poran [POR92] normalisieren Wirktiefe und Wirkradius durch eine Division mit dem Durchmesser des Fallgewichtes. In den abgeleiteten Gl. 3.1 und Gl. 3.2 werden neben den genannten Steuergrößen auch die Anzahl der Fallvorgänge berücksichtigt. Die durch Poran [POR92] verwendeten Abkürzungen werden nachfolgend erläutert.

$$\frac{b}{D} = j + k \log\left(\frac{NWH}{Ab}\right) \quad (3.1)$$

$$\frac{a}{D} = l + m \log\left(\frac{NWH}{Ab}\right) \quad (3.2)$$

mit

- |                                     |                                      |
|-------------------------------------|--------------------------------------|
| $a$ : Radius des Einflussbereiches  | $W$ : Masse des Fallgewichtes        |
| $b$ : Höhe des Einflussbereiches    | $H$ : Fallhöhe                       |
| $D$ : Durchmesser des Fallgewichtes | $A$ : Grundfläche des Fallgewichtes  |
| $N$ : Anzahl der Fallvorgänge       | $J, k, l, m$ : Regressionskonstanten |

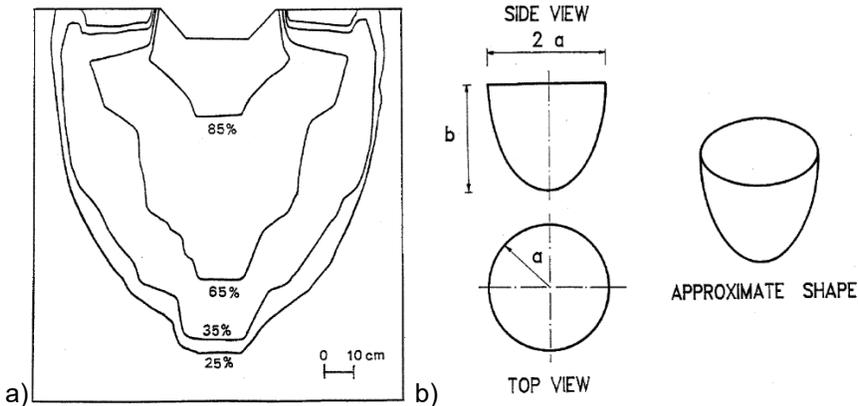


Abbildung 3.3 a) Contourplot für die Dichteverteilung nach einem Fallvorgang und b) Vereinfachte Formschemata zur Beschreibung des Wirkbereiches nach Poran [POR92]

Oshima [OSH94], [OSH97], [OSH98] haben an Zentrifugenversuchen bei 100-facher Erdbeschleunigung die Kratertiefe und eine Einwirktiefe der Fallgewichtsverdichtung untersucht. In einem halbzyklindrischen Modellbehälter wurden mehrere Fallvorgänge bei einem Wassergehalt von 4 % und einem Verdichtungsgrad von  $I_{D,0} = 0,35$  durchgeführt. An der transparenten Vorderseite des Versuchsbehälters wurden die Bodenverformungen erfasst. Im Ergebnis der Untersuchungen leiten [OSH94] Gl. 3.3 und Gl. 3.4 als Beziehung zwischen Kratertiefe und Steuergrößen der Fallgewichtsverdichtung ab.

Darüber hinaus leiten [OSH94] Gl. 3.5 und Gl. 3.6 ab, mit denen aus den Steuergrößen der Fallgewichtsverdichtung auch eine Wirktiefe sowie ein Wirkradius bei Fallgewichtsmaßnahmen abgeschätzt werden sollen. Der Modellaufbau sowie die Form des Wirkbereiches nach [OSH94] und ein exemplarisches Ergebnis sind in Abbildung 3.4 veranschaulicht.

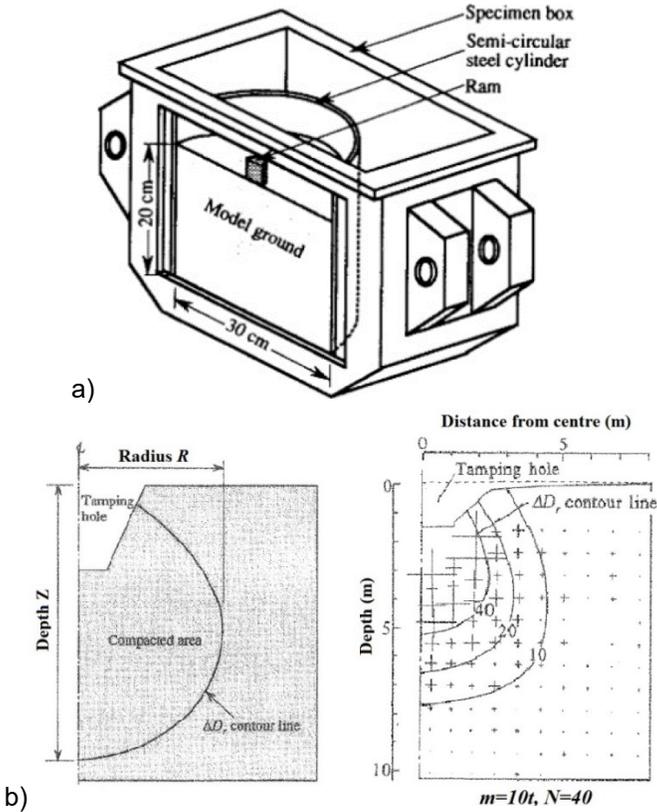


Abbildung 3.4 a) Schematischer Aufbau des Modells für Zentrifugenversuche, b) Skizze zur Beschreibung des Wirkungsbereiches und skalierte Ergebnisse aus einem Modellversuch mit Angabe von Verbesserungsgraden relativ zur Ausgangsdichte von  $I_D = 0,35$ , aus [OSH94], [OSH97], [OSH98]

Die in den Veröffentlichungen verwendeten Abkürzungen werden nachfolgend erläutert.

$$P = c \frac{mv_0}{A} \tag{3.3}$$

$$P_n = c \frac{mv_0}{A} \sqrt{N} \tag{3.4}$$

mit

$P$ : Kratertiefe nach einem Fallvorgang	$A$ : Kontaktfläche des Fallgewichtes
$P_n$ : Kratertiefe nach $n$ Fallvorgängen	$v_0$ : Fallgewichtsgeschwindigkeit beim Aufprall
$m$ : Masse des Fallgewichtes	$c$ : Koeffizient ( $\text{m}^2\text{s/t}$ )

$$Z = a_z + b_z \log(mvN) \quad (3.5)$$

$$R = a_R + b_R \log(mvN) \quad (3.6)$$

mit

$Z$ : Vertikale Wirktiefe	$N$ : Anzahl der Fallvorgänge
$R$ : Radius des Wirkbereiches	$a, b$ : empirische Konstanten aus den Versuchen
	$mvN$ : Moment des Fallgewichtes

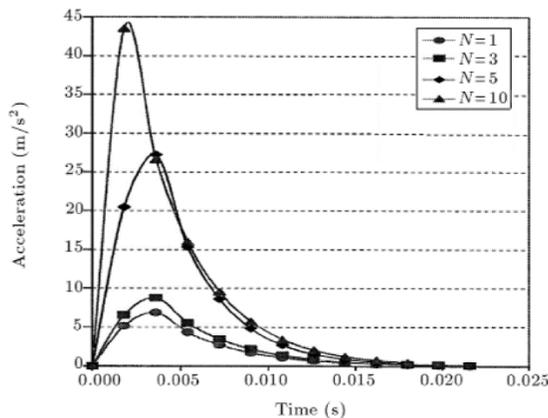


Abbildung 3.5 Typische Ergebnisse der Beschleunigungsmessungen nach dem Aufprallvorgang an einem Messpunkt 8 cm neben dem Verdichtungskra-  
ter leicht unter der Geländeoberfläche, aus [OSH94] [OSH94], [OSH97],  
[OSH98]

Jafarzadeh [JAF06] führen Experimente zur Fallgewichtsverdichtung an trockenem Sand ( $I_{D,0} = 0,35$  bis  $0,40$ ) durch. Dabei verwenden sie einen Holzbehälter in den Abmessungen 45 cm x 35 cm x 40 cm, der an den Innenwänden mit einem 5 mm starken Schaumstoff gedämmt wurde. Untersucht wurden

Fallgewichte mit kreisförmiger Grundfläche bei Variation von Massen der Fallgewichte, Durchmessern und Fallhöhen. Der Fallvorgang wurde kontrolliert durch eine Führung des Fallgewichts im Fallvorgang an vertikalen Stangen, die oberhalb der Bodenprobe endeten. Die Messungen wurden an einzelnen Positionen im Boden mit klassischen Sensoren für Erddruck und Beschleunigung mit zeitlicher Auflösung von 0,7 kHz durchgeführt. Zudem wurden Kratertiefe und Durchmesser des Kraters nach jedem Aufprallvorgang gemessen. Abbildung 3.5 zeigt exemplarisch Ergebnisse der Messungen mit einem Beschleunigungssensor während mehrerer Aufprallvorgänge. Abbildung 3.6 veranschaulicht die genutzte Methodik zur Bewertung der Tiefenwirkung. Dabei wurden Erddrucksensoren in unterschiedlichen Bodentiefen angeordnet und die Erhöhung der vertikalen Spannungen durch den Aufprallvorgang bewertet.

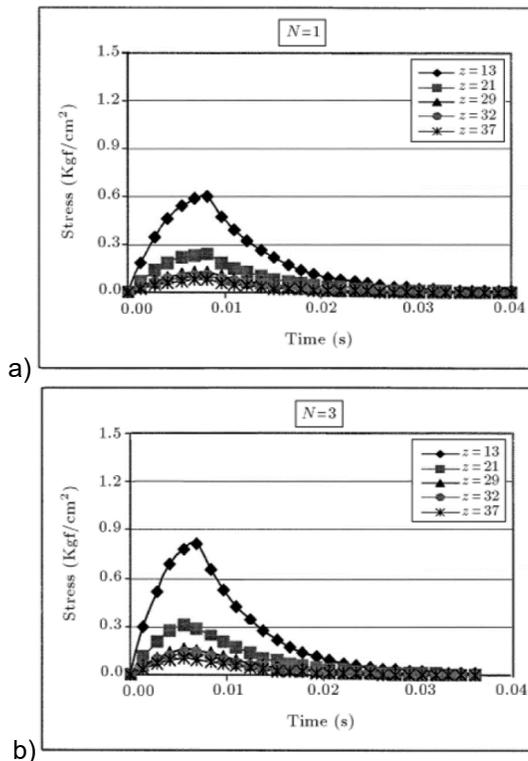


Abbildung 3.6 Typische Ergebnisse der vertikalen Spannungen unterhalb des Kraters für ein 1 kg Fallgewicht aus einer Fallhöhe von 1 m: a) nach einem Impuls und b) nach 3 Impulsen, aus Oshima [OSH94], [OSH97], [OSH98]

Jafarzadeh [JAF06] leitet an den Versuchsergebnissen eine Beziehung zwischen Wirtktiefe und ausgewählten Steuergrößen ab. Wie durch [POR92] [POR92] werden durch Jafarzadeh [JAF06] in Abbildung 3.7 Modellergebnisse zur Wirtktiefe durch eine Division mit dem Durchmesser des Fallgewichtes normalisiert.

Hajjalilue-Bonab [HAJ11] präsentieren Modellversuche zur Fallgewichtsverdichtung auf trockenem Sand in lockerer Lagerung. Für die Anwendung der PIV-Methode wurden halbzyllindrische Fallgewichte und ein Versuchsbehälter mit den Abmessungen 0,7 m x 0,47 m x 0,83 m mit einer transparenten Schnittebene vorgesehen. Bemerkenswert ist dabei, dass lediglich Aufnahmen vor und nach dem Fallvorgang mit einer üblichen Digital-Kamera durchgeführt wurden. Bei den Untersuchungen wurden Durchmesser, Masse und Fallhöhen der Fallgewichte variiert. Um eine Aufprallpositionen direkt vor der transparenten Schnittebene sicherzustellen, wurden am Behälterboden befestigte vertikale Führungsschienen verwendet. Es muss daher davon ausgegangen werden, dass das Verformungsverhalten des Bodens durch diese Führungsschienen beeinträchtigt wurde.

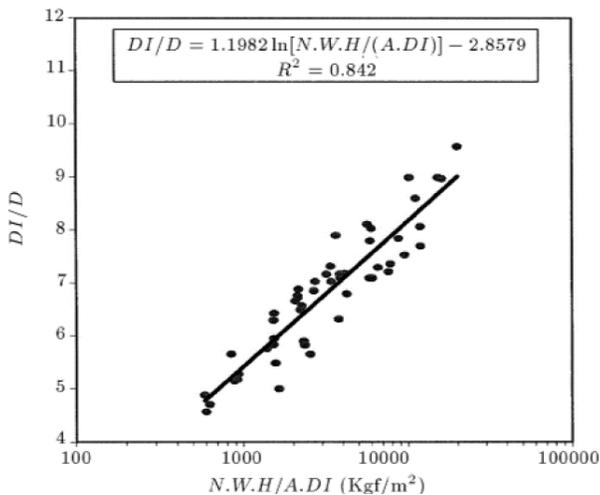


Abbildung 3.7 Gegenüberstellung von normalisierten Werten für Wirtktiefe und Fallenergie, aus Jafarzadeh [JAF06]

Aus den PIV-Messungen der Bodenverschiebungen wurde eine Änderung der Dichte über eine Beziehung der volumetrischen Dehnung bewertet. Darüber

hinaus wurden Messungen zur Geometrie des Verdichtungskraters durchgeführt. Zur Bewertung der maximalen Verdichtungswirkung wurde ein Kriterium bei Änderung von 1,5 % der volumetrischen Dehnung definiert. In Anlehnung an Poran [POR92] wurden für allgemeingültige Ergebnisinterpretation die Ergebnisse aus den Modellversuchen durch eine Division mit dem Fallgewichtsdurchmesser  $D$  normalisiert (s. Abbildung 3.8).

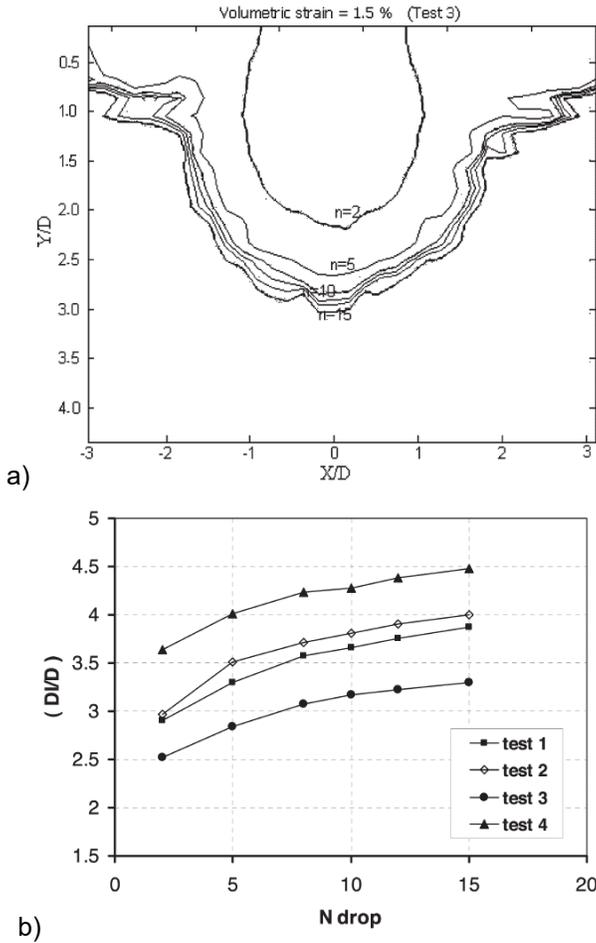


Abbildung 3.8 a) Contourplot 1,5 % zur volumetrische Dehnung nach ausgewählten Fallvorgängen, b) Normalisierte Ergebnisse der Wirktiefe im Vergleich zur Anzahl der Fallgewichtsvorgänge in 4 Testreihen, aus Hajjalilue-Bonab [HAJ11]

$$DI = 3,1D_c + 1,75D \quad (3.7)$$

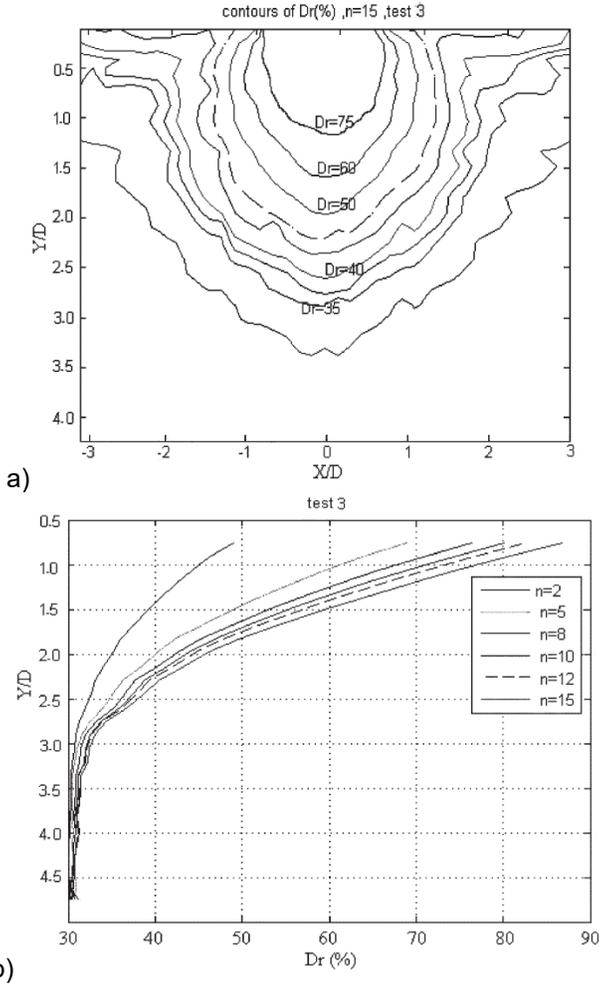


Abbildung 3.9 a) normalisierte Dichteverteilung in der Schnittebene und b) Änderung der Dichte über die Tiefe unterhalb des Fallgewichtes nach (n) Fallvorgänge, aus Hajjalilue-Bonab [HAJ11]

Hajjalilue-Bonab [HAJ11] leiten über die Ergebnisgröße volumetrische Dehnungen auch eine Dichteverteilung aus den PIV-Ergebnissen ab. Abbildung 3.9 zeigt eine exemplarische Darstellung zur Dichteverteilung. An den Ergebnissen der Modellversuche zeigen Hajjalilue-Bonab [HAJ11], dass eine

Reduzierung des Fallgewichtsdurchmessers mit erhöhten Spannungen beim Aufprallvorgang einhergeht und daher in Größenordnungen von bis zu 40 % größere Wirtkiefen erzielt werden können. Darüber hinaus wird eine Prognose zur Wirtkiefentiefe  $DI$  aus den Messungen der Kratertiefentiefe  $D_c$  und dem Durchmesser des Fallgewichtes  $D$  gemäß Gl. 3.7 abgeleitet.

Besonders eingegangen werden, soll an dieser Stelle auf die Arbeiten von Nazhat [NAZ13] sowie [NAZ15]. Im Rahmen dieser Arbeiten wurde an Modellbehältern im ebenen Verformungszustand das Verformungsverhalten von Boden unter quasistatischen Vertikallasten (s. Kap. 3.2.2) sowie unter Fallgewichten untersucht. Variiert wurden die Masse der Fallgewichte bzw. Gewichtskraft zwischen 58 N und 160 N sowie die Fallhöhe. Darüber hinaus wurden Sonderuntersuchungen zur Form der Fallgewichtsunterseite durchgeführt.

Die Erfassung der Bodenverformungen erfolgte mit der DIC-Methode. Für eine Bewertung von Bodenverformungen während bzw. unmittelbar nach dem Aufprallvorgang kam eine Hochgeschwindigkeitskamera zum Einsatz, die bis zu 1.000 fps (Bilder pro Sekunde, engl.: *frames per second*) bei einer Auflösung von 1.024 x 1.024 Pixel ermöglicht. Mit der DIC-Methode wurde meist ein Bereich von 403 mm x 403 mm (ROI) betrachtet. Unter Berücksichtigung der Kameraauflösung entspricht dies einer Genauigkeit von 0,39 mm pro Pixel (2,6 Pixel pro mm). Gewählt wurde Patchgrößen 24 x 24 oder 30 x 30 Pixel (9,4 x 9,4 mm oder 11,7 x 11,7 mm). Dies entspricht ca. 30 – 40 x  $d_{50}$  des verwendeten trockenen Versuchssandes.

Darüber hinaus wurde die Bewegung des Fallgewichtes über einen Beschleunigungssensor erfasst. Über diese Messungen konnte eine Aufprallgeschwindigkeit von bis zu 3,0 m/s ermittelt werden. Der Versuchssand wurde getrocknet und in lockerer Lagerung ( $I_D = 0,25$ ) mit einem Rieselfverfahren definiert eingebaut.

Nachfolgend werden ausgewählte Darstellungen und Ergebnisse der DIC-Messungen zu Fallgewichtsversuchen nach Nazhat [NAZ13] sowie [NAZ15] dargestellt und kurz erläutert.

Bodenverschiebungen werden summiert nach einem Aufprallvorgang in Abbildung 3.10 veranschaulicht. Darüber hinaus werden in Nazhat [NAZ13] sowie in [NAZ15] Ergebnisplots zur Scherdehnung und zur volumetrischen Dehnung zu ausgewählten Zeitpunkten während eines Fallvorganges gemäß

Abbildung 3.13 (nur Scherdehnungen) sowie summiert nach einem Fallvorgang gemäß Abbildung 3.11 präsentiert.

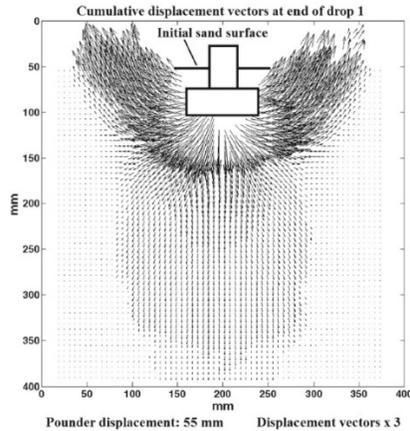
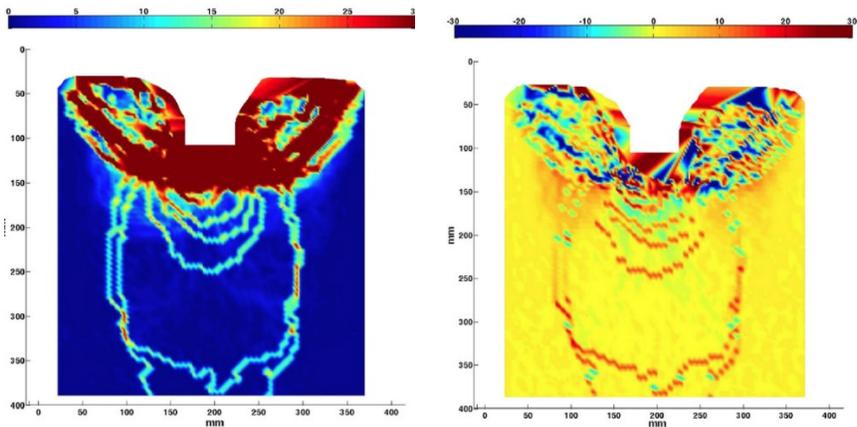


Abbildung 3.10 Vektoren der Gesamtverschiebungen nach einem Fallvorgang in Sand ( $I_D = 0,25$ ), aus Nazhat [NAZ13]



a) Cumulative shear strain at 0.065 sec - End of drop no.1      b) Cumulative volumetric strain at 0.065 sec - End of drop 1

Abbildung 3.11 a) Scherdehnungen und b) volumetrische Dehnungen nach dem 1. Fallvorgang in Sand ( $I_D = 0,25$ ), aus Nazhat [NAZ13]

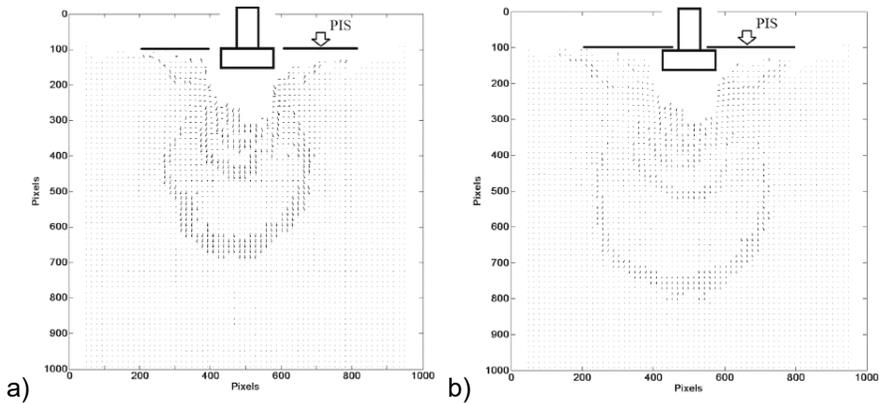


Abbildung 3.12 Inkrementelle Verschiebungsvektoren eines Fallgewichtsvorganges in Sand ( $I_D = 0,25$ ): a) zwischen 0,007 s und 0,008 s sowie b) nach 0,009 s und 0,010 s, aus Nazhat [NAZ13]

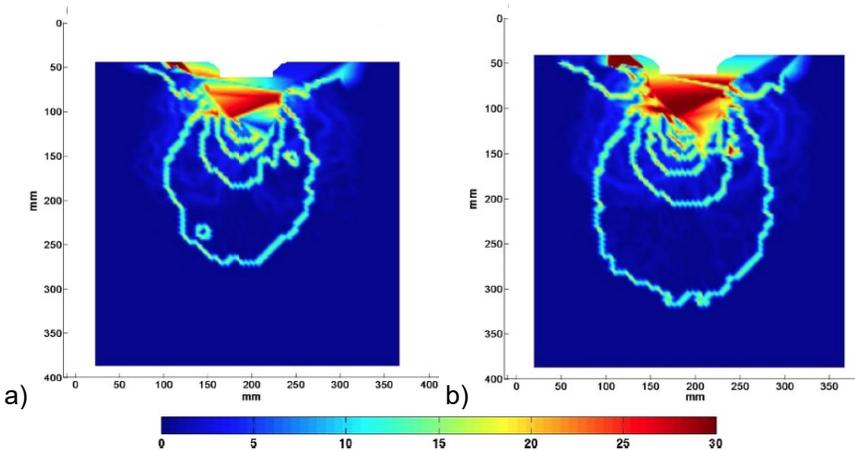


Abbildung 3.13 Summe der Scherdehnungen nach 0,008, 0,010, 0,015 und 0,025 s während des 1. Aufprallvorganges in Sand ( $I_D = 0,25$ ), aus Nazhat [NAZ13]

Wesentliche Ergebnisse nach Nazhat [NAZ13] lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Anhand der Verschiebungsvektoren gemäß Abbildung 3.10 lassen sich 2 wesentliche Verformungsbereiche unterscheiden. Im oberen Bereich ist ein Verdrängen seitlich des Fallgewichtes zur Seite und

nach oben bis zur Sandoberfläche analog statischen Versuchen erkennbar. Im Bereich unterhalb des Fallgewichtes ist hingegen eine in die Tiefe gerichtete Verschiebung erkennbar, die als räumlich begrenzte Bodenverdichtung beschrieben wird.

- Abbildung 3.11 stellt Ergebnisse von Scherdehnungen und volumetrischen Dehnungen gegenüber. Gezeigt werden die bleibenden Verformungen nach dem 1. Fallvorgang. Die Darstellungen deuten darauf hin, dass sich lokale Scher- bzw. Verdichtungsbänder ausbilden. Diese Bereiche befinden sich deutlich unterhalb des Fallgewichtes. Unmittelbar unterhalb sowie seitlich des Fallgewichtes wird hingegen eine Auflockerung des Bodens ausgewiesen.
- Darüber hinaus wurde beobachtet, dass sich scheinbar ein weiterer Typ von Scherbändern ausbildet, der sich mehr oder weniger im rechten Winkel zu den genannten Scherbändern anordnet. Die Ausbreitungsrichtung ist dabei weg vom Fallgewicht orientiert. Diese 2. Kategorie von Scherbändern ist weniger stark ausgeprägt und sie kann nur zu frühen Zeitpunkten während des Aufprallvorganges beobachtet werden (s. Abbildung 3.13). Zu späteren Zeitpunkten erfolgt eine Überlagerung durch stärker Verformungen im Nahbereich.
- In Abbildung 3.12 werden inkrementelle Verschiebungen zu unterschiedlichen Zeitpunkten nach Aufprall des Fallgewichtes gezeigt. Die Darstellungen deuten darauf hin, dass bis ca. 0,01 s nach dem Aufprall Verformungen unterhalb des Fallgewichtes in Bändern oder Wellen ausgebreitet werden. Zwischen diesen Bereichen treten zu diesen Zeitpunkten keine signifikanten Verschiebungen auf. Anschließend treten Verformungen nahe dem Fallgewicht auf, die sich analog zu Verformungsmechanismen bei statischen Versuchen zur Seite bzw. zur Oberfläche orientieren.
- Abbildung 3.13 veranschaulicht inkrementelle Scherdehnungen, die große Ähnlichkeit mit den inkrementellen Verschiebungsvektoren gemäß Abbildung 3.12 besitzen. An diesen Ergebnissen werden Ausbreitungsgeschwindigkeiten der erfassten Bänder bzw. Wellen von zunächst ca. 60 bis 85 m/s genannt, die sich mit zunehmender Ausbreitung auf bis auf bis zu 10 m/s verlangsamten und anschließend nicht weiter ausbreiten.

Nazhat [NAZ13] sowie [NAZ15] kommen insgesamt zu dem Schluss, dass die weitverbreitete Annahme einer halbraumartig Verdichtung mit

zweibelartiger Abnahme der Verdichtungswirkung weg vom Verdichtungskrater für seine Untersuchungen nicht gilt. Vielmehr wird davon ausgegangen, dass zwei Typen von Scher-/Verdichtungsbändern ursächlich und maßgebend für Verdichtungsvorgänge infolge Fallgewichtsverdichtung sind. Diese Bewertungen werden durch Interpretationen über Dehnungsfelder sowie durch Verschiebungsfelder gestützt.

## 3.3 Berechnungsverfahren

### 3.3.1 Analytische und empirische Verfahren

Seit Nutzung der modernen Form der Fallgewichtsverdichtung wurden fortlaufend Ansätze zur näherungsweisen Beschreibung und Prognose der Auswirkungen der Fallgewichtsverdichtung entwickelt. Tabelle 3.1 gibt eine Übersicht zu ausgewählten analytischen Modellen und Ansätzen unterschieden nach Kenngrößen der Fallgewichtsverdichtung.

Regelmäßig Untersuchungsgegenstand sind dabei Ansätze zur Prognose der Wirtiefe bzw. Einflusstiefe. Für eine näherungsweise Ermittlung der Einflusstiefe existieren für typische Kennzahlen der Fallgewichtsverdichtung unterschiedliche Ansätze. Weit verbreitet sind Varianten nach Ménard [MÉN75] mit einer Berücksichtigung von Masse des Fallgewichtes  $m$  (hier bezeichnet als  $W$ ) und Fallhöhe  $h$  (hier bezeichnet als  $H$ ). Erweiterungen dieser Gleichung sehen die Ergänzung von empirischen Faktoren zur Berücksichtigung der Kabelführung beim Fallvorgang sowie der Bodenarten vor. Lukas [LUK86] und Slocombe [SLO93] publizierten Gl. 3.8 mit Berücksichtigung des empirischen  $n$ . Kirstein [KIR12] empfiehlt zudem, auch das Rastermaß in die Abschätzung der Tiefenwirkung einzubeziehen.

Tabelle 3.1 Übersicht zu ausgewählten analytischen Modellen und Ansätzen nach Kenngrößen der Fallgewichtsverdichtung

<b>Kenngröße der Verdichtung</b>	<b>Ausgewählte Veröffentlichungen</b>
Form bzw. Abmessungen des Verdichtungsgebietes	[POR92], [OSH94], [OSH97], [OSH98]
Abmessungen des Verdichtungs-kraters	[SLO93], [OSH94], [OSH97], [OSH98]
Eingebrachte Spannungen im Boden	[JES81], [MAY84]
Eingebrachte Porenwasserdruck	[GUN96], [NAS06]
Schwingungsanregung durch Fallgewichtsverdichtung	[RIC70], [MAY84], [MÉN75], [LUK86], [ADA07], [KOP10]

$$D_{max} = n\sqrt{WH} \quad (3.8)$$

mit

$W$ : Masse des Fallgewichtes (t)       $n$ : empirischer Faktor nach Tabelle 3.2

$H$ : Fallhöhe (m)

Eine Zusammenstellung der aus Baustellenmessungen aber auch aus experimentellen Modellen entwickelten Wertebereiche für den Faktor  $n$  wurde durch [YEE99], [BER01] und [NAZ13] veröffentlicht (s. Tabelle 3.2).

Gl. 3.8 wird weltweit als Bemessungshilfe zur Prognose der Wirkweise einer Fallgewichtsverdichtung verwendet. Rechnerisch führt eine Erhöhung der eingesetzten Fallenergie aus  $\sqrt{WH}$  zu einer linearen Erhöhung der Wirtiefe. Slocombe [SLO93] weist mit Verweis auf Feldmessungen darauf hin, dass die Einflusstiefe nicht linear mit Erhöhung der Fallenergie steigerbar ist. Auf Basis von Feldmessungen weist Slocombe [SLO93] für 2 Hauptgruppen von Bodenarten jeweils eine Kurvenschar gemäß Abbildung 3.14 aus.

Tabelle 3.2 Empfehlungen für den Faktor n nach Gl. 3.8, nach [YEE99]

Quelle	n Werte	Bodentyp
[MÉN75]	1,0	alle Böden
[LEO80]	0,5	-
[SMO83]	0,5	Böden mit schlechter Bodenstruktur
	0,67	Schluffe und Sande
	1,0	rein granulare Böden
[LUK80]	0,65 – 0,8	-
[MAY84]	0,3 – 0,8	-
[GAM85]	0,5 – 1,0	-
[QIA87]	0,65	Feinsande
	0,66	weiche Tone
	0,55	Löß
[VAN89]	0,65	schluffige Sande
	0,35	Siedlungsabfälle
	0,5	toniger Sand
[YEE99]	0,5	kalkhaltiger Sand / Korallensand
[FAI97]	0,33 – 0,39	Siedlungsabfälle

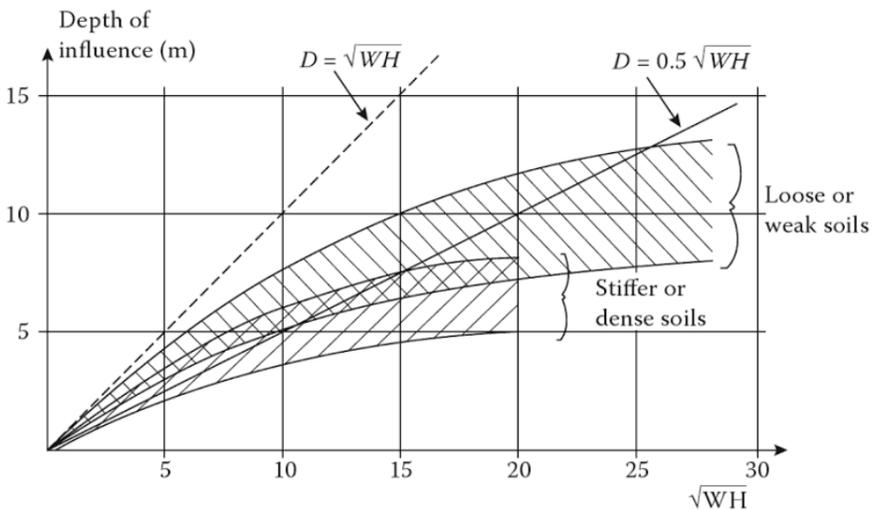


Abbildung 3.14 Typische Wirktiefen in Abhängigkeit der eingesetzten Verdichtungsenergie nach Slocombe [SLO93]

Es wird deutlich, dass die vor allem aus Baustellenerfahrungen abgeleiteten Gleichungen nur für typische Kennzahlen der Fallgewichtsverdichtung angewendet werden können. Einflüsse bspw. aus der Anzahl der Fallvorgänge, Abstände der Rasterpunkte oder auch Form des Fallgewichtes werden nicht berücksichtigt. In der Praxis werden aus diesen Gründen häufig Vorversuche an einem Kalibrierfeld z. B. mit Setzungs-Hebungstests auf repräsentativem Baugrundbedingungen durchgeführt (s. Kap. 3.1).

### 3.3.2 Numerische Verfahren

Mostafa [MOS10] sowie Nazhat [NAZ13] geben eine umfangreiche Zusammenfassung zu Simulationen der Fallgewichtsverdichtung mit der FEM und ergänzen diese um die eigenen Beiträge. Bei den vorgestellten Beiträgen kommen vorwiegend 2D-Modelle sowie einzelne 3D-Modelle zum Einsatz. Der Boden wird über verschiedene elastoplastische Materialgesetze beschrieben. Neben nichtkommerziellen FE-Codes wurden die kommerziellen Programme *Abaqus*, *LS-Dyna*, *CTH*, *ALEGRA*, *ALE-3D* sowie *RADIOSS* genutzt.

Eine Simulation der Fallgewichtsverdichtung ist durch unterschiedliche Nichtlinearitäten, wie große Deformationen und Verzerrungen, stark nicht lineares Materialverhalten des Bodens, Kontakt mit Reibung sowie Ausbreitung von Spannungswellen gekennzeichnet. Sehr große Verformungen führen jedoch bei der klassischen *Lagrange*-FEM meist zu Abbrüchen der Berechnungen.

Möglichkeiten der Vermeidung zu starker Netzverformungen bieten z.B. die *Arbitrary Lagrangian Eulerian* (ALE) Methode. Dabei wird eine Folge von Lagrange- und Euler-Schritten berechnet. Je Inkrement wird im Lagrange-Schritt das Netz entsprechend der Materialdeformation verformt und anschließend im Euler-Schritt wieder geglättet. So kann auch bei sehr großen Materialdeformationen ein qualitativ hochwertiges Netz aufrechterhalten werden. In *Abaqus/Explicit* ist eine grundlegende ALE-Prozedur seit einigen Jahren implementiert. Von Aubram [AUB14], [AUB15] wurde eine statische ALE-Version in *Ansys* integriert und an Modellversuchen zur Pfahlrammung qualitativ validiert.

Neben der ALE-Methode bietet die *Coupled Eulerian Lagrangian* (CEL) Methode die Möglichkeit, Probleme mit großen Verformungen zu lösen. Bei der CEL-Methode werden Bereiche eines FE-Netzes in Lagrange- und andere in

Euler-Darstellung berechnet. Dabei werden bspw. der Boden in Euler-Darstellung und der Verdichter bzw. das Fallgewicht in Lagrange-Darstellung behandelt. Die CEL-Methode ist mit expliziter Zeitintegration u. A. in *Abaqus/Explicit* implementiert. Die Methode wurde mehrfach für geotechnische Problemstellungen mit großen Verformungen wie in Qiu [QIU11] oder Hamann [HAM11] zur Simulation des Impulsverdichters verwendet. Der in Kap. 3.1 vorgestellte Feldversuch zur Fallgewichtsverdichtung wurde in Kirstein [KIR16] ebenfalls mit der CEL-Methode und Formulierungen der Hypoplastizität mit Erweiterung intergranularer Dehnungen simuliert. Abbildung 3.15 zeigt die Geometrie der Simulationen und veranschaulicht, dass die Messergebnisse zum Bewegungsverhalten des Fallgewichtes beim Aufprall sowie das Ausbreitverhalten oberflächennaher Schwingungen mit der Simulation gut abgebildet werden konnte.

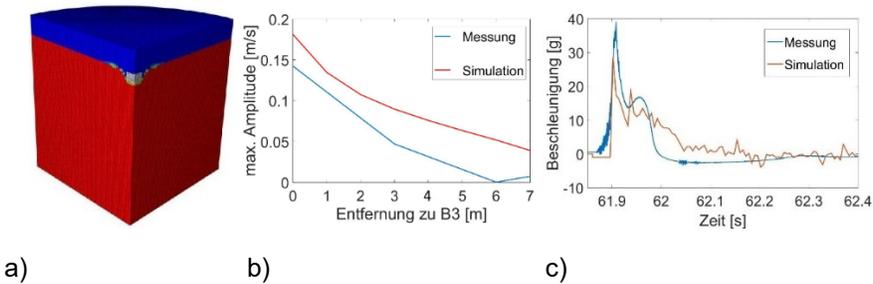


Abbildung 3.15 Ergebnisse numerischer Berechnungen und messtechnischer Begleitung zur Fallgewichtsverdichtung, entnommen aus Kirstein [KIR16]: a) Geometrie der Simulation mit der CEL-Methode, b) Abklingverhalten der maximalen Schwingungsamplituden und c) Beschleunigung an der Fallmasse beim Aufprall

Zur Beschreibung von Randwertproblem mit sehr großen Verformungen werden zunehmend Methoden eingesetzt, die nahezu ohne Elemente bzw. Netze auskommen. Vertreter sind die *Material Point Method* (MPM), *Discrete Element Modeling* (DEM), die *Smoothed Particle Hydrodynamics Method* (SPH) sowie bspw. auch Simulationen mit einer gekoppelten *Computational Fluid Dynamics-Discrete Element Method* (CFD-DEM). Aktuelle Entwicklungen zu diesen Methoden wurden in [GRA17] veröffentlicht.

# 4 Versuchstechnische Grundlagen

## 4.1 Geotechnische Experimente und deren Anforderung

Geotechnische Experimente werden genutzt, um Fragestellungen unter bekannten Randbedingungen zu untersuchen. Die Ergebnisse der Experimente können dann genutzt werden, um bestehende mathematische Beziehungen zu prüfen oder neue Beziehungen abzuleiten. Der Begriff Benchmark-Versuch wird in diesem Zusammenhang oft genutzt, wenn die Qualität einer Simulation über Ergebnisvergleiche beurteilt wird. In Abhängigkeit des Kenntnisstands über die experimentellen Ergebnisse definiert Lambe [LAM73] unterschiedliche Klassen von Prognosen. Unterschieden wird zwischen Prognosen vor dem Versuch (Klasse A), während des Versuches (B bzw. B1 bei bekanntem Versuchsergebnis) und nach dem Versuch (C bzw. C1 bei bekanntem Versuchsergebnis).

In der vorliegenden Arbeit wurden alle Simulationen nach den Experimenten durchgeführt und die Ergebnisse der Versuche waren bekannt (Klasse C1). Auf diese Weise soll gezeigt werden, inwieweit die gewählten Simulationsverfahren die Bodenverformungen abbilden können. Bei erfolgreichem Abschluss dieser Validierungsstufe können A-Prognosen für Modellversuche oder reale Probleme erfolgen.

Für eine Eignung als Benchmark-Versuche müssen folgende Anforderungen durch die Experimente erfüllt werden (s. auch Vogelsang [VOG17]):

- Es muss Ähnlichkeit zur realen Anwendung nachgewiesen werden können.
- Es darf keine offensichtliche Beeinträchtigung durch Randbedingungen und Effekte im Modell vorliegen und den Annahmen der Simulationen widersprechen. Dies gilt für grundlegende Annahmen zur Symmetrie bzw. zum Verformungs-/Spannungszustand sowie bspw. zu Effekten wie statischer Aufladung, die nur in Modellen relevant werden können.

- Der Aufbau der Versuche und eine gegebenenfalls vorhandene Instrumentierung muss quantitative und reproduzierbare Messergebnisse ermöglichen. Zudem muss eine Erfassung von Bodenverformungen in relevanten Bereichen möglich sein.
- Es muss mindestens in relevanten Betrachtungsbereichen ein ausreichendes Spannungsniveau für Simulationen mit druckabhängigen bodenmechanischen Stoffmodellen wie der Hypoplastizität oder dem Hardening-Soil-Modell vorliegen.
- Die Anfangs- und Randbedingungen müssen bekannt und klar definiert sein.
- Es muss eine ausreichend genaue Charakterisierung des Versuchsmaterials erfolgen. Relevante Bauteile des Versuchstandes müssen beschrieben oder ggf. messtechnisch erfasst werden.

## 4.2 Konzeption von Modellversuchen

Bei der Konzeption und Konstruktion der verwendeten Modellversuche werden die in Kap. 4.1 genannten Anforderungen an Benchmark-Versuche beachtet. Die Verdichtung mit transientem Energieeintrag wie bei Fallgewichtsversuchen umfasst einen komplexen mechanischen Prozess, bei dem häufig nur bleibende Veränderungen bzw. punktuell auch temporäre Effekte erfasst werden können. Die Bodendeformationen werden dabei durch eine Reihe von dynamischen Prozessen aus Komprimierung und Scherung geprägt, die unter bestimmten Randbedingungen einige Gemeinsamkeiten zu Bodendeformationen unter statischer Auflast aufweisen.

Die verwendeten Versuchstände tragen die Abkürzungen C für *calibration*, S für *small* und M für *middle*. Versuche zur Fallgewichtsverdichtung werden in den Versuchständen-S und -M durchgeführt. Der Versuchstand-C ist ausschließlich für statische Vorversuche vorgesehen. Eine umfangreiche Beschreibung der Versuchstände erfolgt in Kap. 5. Abbildung 4.1 zeigt schematische Darstellungen der verwendeten Versuchstände. Es wurden die in Tabelle 4.1 genannten Versuchsarten und Lastmodelle an den drei sich ergänzenden Versuchständen konzipiert:

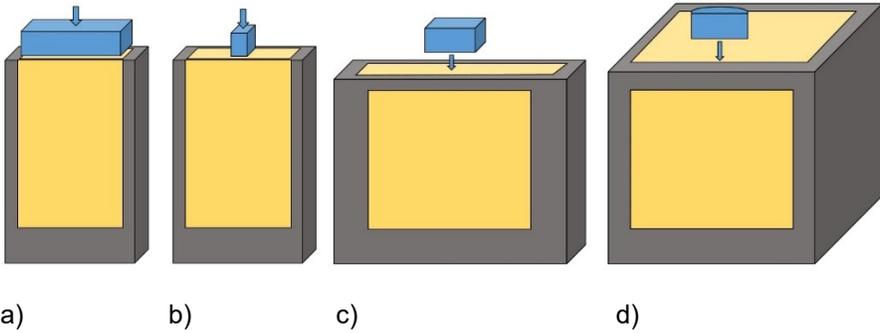
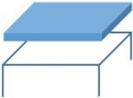
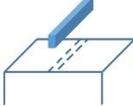


Abbildung 4.1 Schema der verwendeten Versuchsstände: a) Versuchsstand-C (Versuchsart eindimensionale Kompression), b) Versuchsstand-C (Versuchsart ebener Verformungszustand), c) Versuchsstand-M (Versuchsart: ebener Verformungszustand) und d) Versuchsstand-S und -M (Versuchsart Halbmodell)

Tabelle 4.1 Gesamtüberblick zu den Versuchsarten und untersuchten Lastmodellen der Versuchsstände-C/-S und -M

Versuchsart/ Lastmodell	 eindimensionale Kompression	 ebener Verformungszustand	 Halbmodell
statisch	Versuchsstand-C	Versuchsstand-C / -M	Versuchsstand-M
dynamisch	-	Versuchsstand-M	Versuchsstand-S / -M

In den Modellversuchen wird versucht, bestimmte Effekte getrennt zu untersuchen bzw. Einflussgrößen zunächst zu reduzieren und schrittweise zu einem komplexeren Randwertproblem zu erweitern. Möglichkeiten und Grenzen der DIC-Methode sollen an den Modellaufbauten schrittweise geprüft und besser verstanden werden. Zudem sollen numerische Modelle analog der Versuchsarten und Lastmodelle entwickelt werden.

- Durch Porenwasser verursachte Effekte werden durch die Verwendung von trockenem Versuchssand ausgeschaltet.
- Zur Eliminierung bzw. Trennung von dynamischen Effekten werden zunächst statische Versuche in jeder Versuchsart vorgesehen.
- Zum Fokus auf eine Bewertung mit der DIC-Methode werden Versuche im Versuchsstand-C als eindimensionale Kompression bzw. mit einem rechteckigen Laststempel vorgesehen.
- Am Versuchsstand-M werden ebenfalls Versuche in ebenem Verformungszustand mit einer rechteckigen Lasteinheit in Anlehnung an Untersuchungen zu Streifenfundamenten durchgeführt. Dieser Versuch wird anschließend als Halbmodell-Versuch mit einer Lasteinheit mit halbkreisförmiger Grundfläche an einem Probenträger mit deutlich größerer Grundfläche und Volumen nachgebildet.
- Fallgewichtsversuche werden im Versuchsstand-M im ebenen Verformungszustand und als Halbmodell-Versuche durchgeführt. Somit kann ein Ergebnisvergleich zwischen einzelnen statischen und dynamischen Versuchen im ebenen Verformungszustand und als Halbmodell erfolgen.
- Eine umfangreiche Versuchsstudie zur Fallgewichtsverdichtung am Versuchsstand-S und -M soll ergänzende Vergleiche zwischen unterschiedlichen Konfigurationen der Fallgewichtsverdichtung ermöglichen.

Beim Aufbau der Experimente werden möglichst einfache Symmetriebedingungen umgesetzt. So sollen in ausreichender Näherung ebene oder axial-symmetrische Verformungszustände angenommen werden können. Alle Versuche ermöglichen durch Nutzung von Symmetriebedingungen einen effizienten Modellaufbau.

Für Simulationen mit barotropen bodenmechanischen Stoffmodellen ist ein Mindestspannungsniveau erforderlich. Nach Vogelsang [VOG17] wird dies in 1g-Modellversuchen über ausreichend große Modellabmessungen mit Sandhöhen in der Größenordnung von einem Meter und mehr erreicht. In einzelnen Fällen werden auch zusätzliche Druckrandbedingungen aufgebracht, um die Spannungen zu erhöhen. Im Fall von quasistatischen Auflastmodellen sowie auch unterhalb von Fallgewichten ist die Frage des Spannungsniveaus weniger problematisch, da die Spannungen unter den Belastungskörpern schnell in hohem Spannungsniveau liegen.

### 4.3 Wahl und Realisierung von Randbedingungen

Grundsätzlich gilt, dass die Art der Randbedingung für die Eignung eines Experimentes als Benchmark-Versuch weniger relevant ist. Vielmehr muss die Randbedingung klar definiert sein und sich im numerischen Modell entsprechend klar bzw. einfach abbilden lassen. Somit sollten sich auch vergleichbare Einflüsse der Randbedingung im numerischen Modell einstellen.

Die Verhältnisse bei Modellversuchen weichen immer von den Verhältnissen bei 1:1 Versuchen im Freifeld ab. Hauptgrund hierfür sind die begrenzten Abmessungen bei Modellversuchen. Somit liegen die Ränder immer relativ nah an den relevanten Betrachtungsbereichen, die auch als *region of interest* (ROI) bezeichnet werden.

Es wird davon ausgegangen, dass bei ausreichend großem Abstand von Lasteinheit oder Fallgewicht zum seitlichen Rand die Einflüsse aus der Randbedingung auf ein kaum oder nicht messbares Maß minimiert werden können. Bei Versuchen im ebenen Verformungszustand wird häufig ein Versuchsstand mit geringer Tiefe eingesetzt, da bspw. die Lasteinheit über die gesamte kürzere Seite eines Versuchsstandes reichen. Dabei ist zu beachten, dass Siloeffekte die Ergebnisse im Versuch beeinflussen können und in der Numerik entsprechend berücksichtigt werden müssen.

Die Randbedingung für Ränder kann dabei auch variieren. So kann bspw. an der Sandoberseite eine freie Oberfläche belassen werden oder über Druckrandbedingungen zusätzlichen Spannungen eingestellt werden. Bei inneren Flächen wird häufig versucht, möglichst glatte Oberflächen auszubilden, um Reibeinflüsse zu minimieren.

### 4.4 Erfassung und Auswertung von Messgrößen

#### Kräfte

Die Messungen von Kräften erfolgen zur Erfassung von Schnittgrößen in der Interaktion zwischen beweglichen Elementen und dem Boden. In den eigenen Versuchen wird bei statischer Auflast die Intensität der Lasteinleitung dokumentiert bzw. zur Steuerung direkt genutzt. In den eigenen Versuchen wurden

ausschließlich kommerzielle Kraftmeseinheiten verwendet. Am Versuchsstand-C wurde die Lasteinleitung direkt an der Prüfpresse über eine Kraftfeder erfasst und dokumentiert. Bei den händisch gesteuerten statischen Versuchen am Versuchsstand-M kam eine Kraftmessdose zum Einsatz, wie sie auch bei statischen Plattendruckversuchen verwendet wird. Weitere Erläuterungen zu diesen Versuchsdetails finden sich in Kap. 5. Im Rahmen der Dokumentation erfolgte in Abhängigkeit der Grundfläche der Lasteinheit eine Umrechnung in Spannungen.

#### Setzungen und Verschiebungen

Bei den statischen Versuchen wird der Setzungsweg der Lasteinheit über digitale Setzungsmessuhren erfasst. Zudem werden in einzelnen Versuchen an ausgewählten Stellen der Materialbehälter auch Messungen von Verformungen senkrecht zur Behälteroberfläche durchgeführt. Am Versuchsstand-M mit relativ großen Abmessungen werden in einzelnen Versuchen mit Laserdistanzmessgeräten das Verbundsicherheitsglas sowie die rückseitige Behälterwand aus Holzbohlen erfasst.

In den Fallgewichtsversuchen werden in ausgewählten Versuchen Verschiebungen bzw. eine Durchbiegung ausgewählter Behälterpunkte gemessen. Zur Erfassung der Durchbiegung des Verbundsicherheitsglases wird in einem Testversuch ein zeitlich hochauflösender Lasertriangulations-Wegsensor Typ ILD1800 eingesetzt. Darüber hinaus werden Verschiebungen einzelner Behälterpunkte über Beschleunigungssensoren erfasst.

Mit der DIC-Methode werden zudem Verschiebungen von Bereichen des Materialbehälters erfasst, die sich im direkten Umfeld der Sichtfelder befinden. So können bspw. auch die Verschiebung bzw. Setzung einer Lasteinheit gemessen werden. Voraussetzung ist hierbei eine optische Eignung des Messobjektes (s. hierzu auch Kapitel 4.5). Die DIC-Methode wird zur Erfassung und Bewertung von Verschiebungen im Boden direkt hinter der Sichte Ebene eingesetzt.

#### Beschleunigungen

Messungen von Beschleunigungen erfolgen in einzelnen Messungen direkt an den Fallgewichten. Die Messdaten werden mit kalibrierten kapazitiven Beschleunigungssensoren vom Typ AIS-50g erfasst und können beispielsweise zur Überprüfung der Geschwindigkeit des Fallgewichtes unmittelbar vor dem Aufprall eingesetzt werden.

In einzelnen Untersuchungen werden darüber hinaus auch Beschleunigungen im Boden erfasst. Dabei werden bis zu fünf triaxiale Beschleunigungssensoren an definierten Stellen im Boden positioniert. Aus den Messdaten können auch Geschwindigkeiten sowie Verschiebungen ermittelt werden. Der Einbau von Sensoren im Boden beschränkt sich auf nur einen Versuch, um in den anderen Versuchen die Verformungen im Boden nicht zu behindern.

#### Gewicht und Fallhöhe (Steuergrößen)

In der Studie zur Fallgewichtsverdichtung werden gezielt einzelne Steuergrößen des Verfahrens variiert. Die Fallgewichte bestehen an den Versuchsständen-S und -M aus einzelnen Elementen wie Lasteinheit, Fallschlitten und Verbindungsmitteln. Vor den Versuchen ist daher eine Erfassung des tatsächlichen Gewichtes über Wiegen notwendig. Auch in den statischen Versuchen am Versuchsstand-M wird eine Variante des Fallgewichtes mit Fallschlitten als Lasteinheit eingesetzt. Auch hier ist ein Wiegen des gesamten Lastmoduls vor Versuchsbeginn notwendig.

Eine weitere maßgebende Steuergröße bei der Fallgewichtsverdichtung ist die Fallhöhe. Die Fallhöhe wird im Rahmen dieser Versuche als Distanz zwischen der Unterseite des Fallgewichtes zur Sandoberfläche vor den Versuchen gemessen. Streng genommen erhöht sich durch das Entstehen eines Verdichtungskraters die Fallhöhe und somit Aufprallgeschwindigkeit beim Folgeversuch minimal. In Anlehnung an das Realverfahren erfolgt jedoch keine Anpassung der Fallhöhe bei der Wiederholung von Fallvorgängen.

## **4.5 Digital Image Correlation (DIC)**

### Methode der digitalen Bildkorrelation

Digital Image Correlation (DIC) bezeichnet eine Gruppe von Verfahren, die Messwerte aus einem Vergleich von digitalen Bildaufnahmen erhalten. Particle Image Velocimetry (PIV) steht dabei für eine häufige Variante der DIC, die zuerst in der Fluidmechanik zur Auswertung des Verschiebungsfelds in Strömungsprozessen genutzt wurde. Auch in der Geotechnik kommt PIV in der Auswertung von Modellversuchen zum Einsatz. Anders als in der Fluidmechanik werden dabei nicht einzelne Partikel sondern Gruppen von mehreren Körnern verfolgt. Grundlagen zu PIV in der Geotechnik erläutern White [WHI03]. Als gelungene Arbeiten sind in diesem Zusammenhang White

[WHI04], Paniagua [PAN13], Nazhat [NAZ13] oder auch Vogelsang [VOG17] zu nennen. Die DIC-Methode kann bei Verwendung von zwei oder mehr Kameras prinzipiell auch für räumliche Messungen eingesetzt werden. Für die eigenen Versuche ist jedoch die 2D-Variante der DIC-Methode ausreichend.

In den folgenden Abschnitten wird ein kurzer Überblick zu Besonderheiten bei Anwendung der DIC-Methode im Allgemeinen und im Speziellen an den eigenen Versuchen gegeben.

#### Integration eines Sichtfensters

DIC-Versuche in der Geotechnik benötigen in der Regel ein oder mehrere Sichtfenster, welche die Bereiche zeigt, in denen relevante Verformungen erwartet werden (ROI). Für eine Bewertung von Verdichtungsprozessen an Fallgewichten werden die freie Geländeoberkante sowie ein ausreichend großer Bereich unterhalb bzw. ggf. auch seitlich des Fallgewichtes einbezogen.

Im Hinblick auf einfache Annahmen zur Symmetrie werden ebene Scheiben aus Verbundsicherheitsglas oder aus Acrylglas (PMMA) genutzt. Bei Betrachtungen zu Verdichtungsverfahren wie den Fallgewichten ergibt sich ähnlich wie bei Untersuchungen zu Pfahlmodellen die Besonderheit, dass die Einleitung der Lasten direkt am Sichtfenster erfolgen muss. Dies führt zu teilweise großen Bodenverschiebungen mit Reibung zwischen Sichtfenster und Boden. Darüber hinaus ergeben sich Kräfte, die zu einer Verformung des Sichtfensters führen können. Beide Effekte können die Versuchsergebnisse beeinflussen, sind aber nicht auszuschließen. Zur Berücksichtigung der Effekte in Nachrechnungen ist es hilfreich, den Kontaktreibungswinkel Bodenscheibe zu bestimmen. Die Verformungen der Scheibe sind sofern möglich durch ausreichende Dimensionierung und Aussteifungen zu minimieren. Zudem sollten in einzelnen Versuchen auch Messungen der Durchbiegung vorgesehen werden.

#### Bildaufzeichnung und Preprocessing

Die Aufzeichnung der Bilddaten erfolgt während eines gesamten Versuches. Bei langsamen Versuchen kann eine handelsübliche Digitalkamera eingesetzt werden. Diese bietet meist eine hohe Auflösung mit stark begrenzter Bildrate. Für schnell ablaufende Versuche sind Videoaufnahmen bzw. Aufnahmen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera notwendig. Diese besitzen eine höhere Bildrate bei vergleichsweise geringer Bildauflösung.

Für die eigenen Arbeiten wird bei den statischen Versuchen eine Systemkamera *Olympus E-M10* mit *Nikon* Objektiv eingesetzt. Diese wird entweder mit festen Intervallen oder händisch über die freie Software *Camera Control* (Vs. 1.0.10.92) über WLAN (*Wireless Local Area Network*) ausgelöst. Ein Auslösen per Hand führt erfahrungsgemäß zu ungewollten Bewegungen an der Kamera bzw. in der Aufnahme. Dies wird dann in der DIC-Auswertung fehlerhaft als Verschiebung des gesamten ROI ausgegeben und ist nur mit hohem Aufwand in Nachgang zu korrigieren. Eine sichere und feste Kameraposition während der gesamten Versuchsdurchführung ist daher dringend anzuraten. Darüber hinaus empfiehlt sich der Einsatz einer festen Stromversorgung anstatt einer Nutzung von Akkus. Für die Systemkamera *Olympus E-M10* wurde hierzu eigens ein Akkuadapter in der G<sup>2</sup> Gruppe Geotechnik entwickelt.

Für die Versuche mit Fallgewichten wird eine Hochgeschwindigkeitskamera vom Typ *HSVISION SpeedCam MegaVis HD+* verwendet. Die Kamera besitzt eine maximale Auflösung von 1.920 x 1.440 Bildpunkten (HD+) bei 1.604 fps (Bilder pro Sekunde, engl.: *frames per second*). Die maximale Aufnahmezeit beträgt in dieser Konfiguration 4,3 s.

Die Bilddaten werden mit der *HSVISION* Kamera per Fernsteuerung über die Software des Kameraherstellers *Camware64* auf der Kamera erfasst und zwischengespeichert. Anschließend müssen die Bilddaten im *b16*-Format der Software oder direkt z.B. in den Bildkompressionsformaten *TIF* oder *JPG* auf einen PC übertragen werden.

In den eigenen Arbeiten wird die kommerzielle Software *ISTRA4D* für die primäre DIC-Auswertung verwendet. Die Bilddaten sind hierfür in monochrome *TIF* umzuwandeln. Analog sind auch die Aufnahmen der Systemkamera in monochrome *TIF* umzuwandeln. Dies erfolgt über ein geeignetes Programm zur Stapelverarbeitung von Bildern wie z.B. *Irfan View*.

#### Mögliche Messungenauigkeiten

Bei einer Bildanalyse ist es wichtig, auftretende Messunsicherheiten zu analysieren. Dazu zählen die Verzeichnung und das Rauschen eines Bildes, sowie auftretende systematische Fehler über die Auswertung einer Bilderfolge.

Bei einer Verzeichnung werden eigentlich gerade Linien als gekrümmte Linien wiedergegeben. Dieser Effekt tritt durch die Brechungsänderung des einfallenden Lichtes auf. Das bedeutet, dass der Einfallswinkel des Lichts nicht

gleich dem Ausfallswinkel ist. Die radial-symmetrische und radial-asymmetrische/tangentiale Verzeichnung wird in Abbildung 4.2 veranschaulicht.

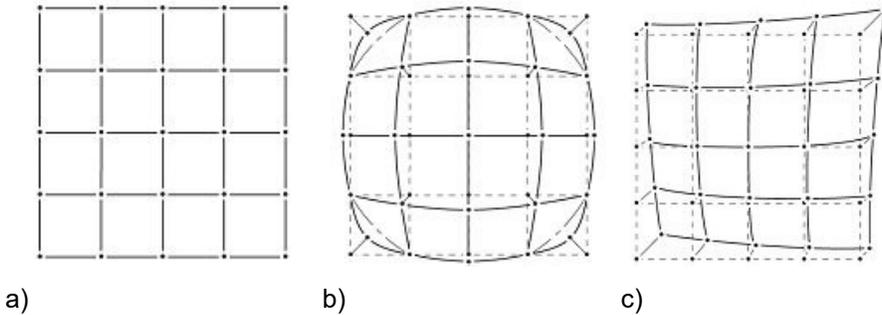


Abbildung 4.2 a) Fehlerfreie Abbildung, b) Radial – symmetrische Verzeichnung und c) Radial – asymmetrische Verzeichnung, aus [GRA09]

Eine andere Messunsicherheit ergibt sich aus der Größe der kleinsten Bewertungseinheit innerhalb einer DIC-Auswertung. Diese Bewertungseinheit wird auch als ZOI (*zone of interest*) oder Patch bezeichnet und hat einen quadratischen Aufbau aus jeweils mehreren Pixeln. Grundsätzlich kann man festhalten, je größer die ZOI ist und somit je mehr Pixel betrachtet werden, desto kleiner sind die Fehlerwerte. Nach Rastogi [RAS12] sollten die Unsicherheiten bei Verschiebungen nicht größer als  $5 \times 10^{-3}$  Pixel für ein 64 Pixel ZOI sein. Der gleiche Ansatz kann für Dehnungsfelder herangezogen werden. Dehnungsanalysen finden auf einer numerischen Basis statt, der Finite-Differenz-Methode. Die Differenz zwischen der Abschätzung und der exakten analytischen Berechnung ergibt den Fehler. Dieser sollte für ein 64 Pixel ZOI nach Rastogi [RAS12] eine Unsicherheit von  $6 \times 10^{-5}$  nicht überschreiten.

#### Kalibrierung in ISTR44D

Für die Aufbereitung der Bilder als Messdaten ist ein automatischer Kalibrierprozess mit Einzelaufnahmen einer Kalibriertafel mit bekanntem Aufbau und Abmessungen vorgesehen. Die Wahl einer passenden Kalibriertafel hängt von der Größe des Messobjektes, sowie dem Abstand der Kamera zu diesem ab. Der Punkt in der Mitte der Kalibriertafel dient in der späteren Auswertung standardmäßig zunächst als Koordinatenursprung und gibt auch die horizontale und die vertikale Achse für die Auswertung vor. Die Kalibriertafel wird an verschiedenen Positionen (Mitte, Eck- und Randbereiche) des Bildausschnittes abgelichtet und muss zusätzlich gedreht und gekippt fotografiert

werden. Es ist zu empfehlen, den Fokus manuell einzustellen, um mögliche Abbildungsfehler durch eine automatische Fokussierung zu vermeiden.

Über den Schritt der Kalibrierung werden die Bilddaten der eigentlichen Messaufnahmen entzerrt, entzeichnet und von Pixeln auf bspw. Millimeterbereich skaliert. Im Ergebnis des Kalibrierprozesses wird ein Datensatz erzeugt, der in der späteren Auswertung eingelesen wird.

Es ist zu beachten, dass die Kalibriertafel im ersten eingelesenen Bild möglichst den gleichen Abstand zur Kamera hat wie zum eigentlichen Messobjekt. Die Kalibriertafel wird zudem an verschiedenen Positionen direkt vor dem Messobjekt bzw. in der Ebene des Messobjektes positioniert. Eine Besonderheit ergibt sich bei DIC Messungen in der Geotechnik, da ein Sichtfenster verwendet wird und die Kalibrieraufnahmen meist aufgrund der Einfüllprozesse erst direkt vor oder nach Versuchsdurchführung erfolgen, um eine bereits installierte Kamera nicht zu beschädigen oder schadhaft zu verschmutzen. In der Konsequenz muss jedoch ein zusätzlicher Abstand zwischen Kalibriertafel zur Probenvorderseite berücksichtigt werden. Zudem muss ein möglicher Einfluss einer optischen Brechung durch das Scheibenmaterial des Sichtfensters beachtet werden. Im Rahmen der eigenen Versuche wurde eine Studie zu einer möglichen Beeinflussung der DIC-Ergebnisse durch die optische Brechung eines Sichtfensters mit einem idealisierten Versuchsaufbau durchgeführt. Die Durchführung und Ergebnisse werden in Anhang B erläutert.

Im Ergebnis dieser Studie wurde festgestellt, dass bei Verwendung eines transparenten Sichtfensters aus Glas oder PMMA eine fehlerhafte Beeinflussung von Verschiebungen erkennbar ist. Dieser Fehler kann aber im Versuchsablauf berücksichtigt und minimiert werden. Ein gewisser Fehler bei der Ermittlung von Dehnungen tritt unabhängig von der verwendeten Kalibrieremethode auf und ist im Rahmen der weiteren Auswertung bei Angaben zur Genauigkeit der Dehnungen zu berücksichtigen.

#### Koordinatensysteme in *ISTRA4D*

Bei der Anwendung der DIC-Methode an einer Ebene wird mit einem ebenen, kartesischen Koordinatensystem gearbeitet. In *ISTRA4D* wird als Voreinstellung mit einem *Initial System* gearbeitet. Die Ausrichtung dieses Systems wird aus der Orientierung des Kalibrierfeldes des ersten eingeladenen Bildes bestimmt. Die Darstellung des Objektes im Initial System ändert sich in Abhängigkeit von der Ausrichtung der Kalibrierplatte [DAN12]. Neben den bereits

voreingestellten Koordinatensystemen können auch eigene Systeme definiert werden.

#### Evaluierung der Bilder in *ISTRA4D*

Zur Evaluierung einer Bilderfolge müssen Einstellungen bezüglich einer weiteren Unterteilung des gesamten zu analysierenden Bereiches (ROI) in *Zones of interest* (ZOI) bzw. Patches oder Facetten getroffen werden. In *ISTRA4D* sind zur Definition der ZOI die Größe einer Facette (*facet size*) und der Abstand der Stützstellen (*grid spacing*) zu definieren. Eine Stützstelle ist der Mittelpunkt einer ZOI, für den ein Verformungswert berechnet wird. Werte zwischen den Stützstellen werden interpoliert. Das *grid spacing* bezeichnet den Abstand der Stützstellen zueinander. Nach [DAN12] wird ein Abstand von  $1/3$  der Facettengröße empfohlen. Dies kann je nach Genauigkeit der Ergebnisse variiert werden. Wird das Grid verkleinert, wodurch es zu einer Vergrößerung der Überlappung kommt, wirkt sich dies als eine Art Filter mit „Glättung“ der Ergebnisse aus. Eine Glättung der Ergebnisse kann weiterhin durch die Programmfunktion *Visualization settings – Smoothing* nach der Evaluierung der Daten erreicht werden. Beispielsweise kann eine *local Regression* oder eine *Smoothing Spline* angewendet werden. Bei einer *local Regression* ACSP 05x05 wird bspw. für einen Bereich von  $5 \times 5$  Stützstellen zunächst ein Durchschnittswert pro Facette berechnet. Der Einfluss einer Glättung auf eigene DIC-Ergebnisse wurde in einer Studie untersucht. Ergebnisse der Studie sind in Anhang D zusammengestellt und werden im Rahmen statischer Versuche in Kap. 6.2 erläutert.

Für die DIC-Analyse ist ein Referenzbild festzulegen, was das erste Bild einer Bildserie darstellt. Erfolgt die Analyse aller Folgebilder nur auf Basis des Referenzbildes, dann werden alle weiteren Bilder als *normal step* deklariert. Soll sich die Auswertung eines Bildes aufgrund sehr großer Verschiebungen oder Änderung der Textur während des Versuches auf das Referenzbild und weitere Bilder der Bildserie beziehen, können Zwischenbezugsschritte, sogenannte *rung steps* definiert werden. Hierbei ist zu beachten, dass sich durch eine Einbeziehung zusätzlicher *rung steps* zwar eher Lösungen in der DIC-Korrelation gefunden werden, jedoch wird je *rung step* ein zusätzlicher Fehler erzeugt, der sich über eine gesamte Versuchsstudie aufsummieren kann (auch bekannt als: *rung step error*). Die Auswirkungen der Verwendung von *rung steps* werden in einer eigenen Studie im Rahmen der statischen Versuche am

Versuchsstand-C untersucht. Die Ergebnisse der Studie sind in Anhang C zusammengestellt. Grundsätzlich ist demnach eine Reduzierung von *runge steps* auf ein notwendiges Maß dringend anzuraten. Insbesondere im Hinblick auf eine Auswertung von Dehnungen zeigen sich durch die zusätzlichen Fehler große Abweichungen bzw. Streuungen in den DIC-Ergebnissen.

#### Verschiebungs- und Dehnungsanalyse in *ISTR44D*

Kommerzielle DIC-Programme wie *ISTR44D* kommen häufig in der Prüfung von Bauteilen zum Einsatz, um flächenhaft eine experimentelle Überprüfung bspw. von FEM-Analysen zu ermöglichen. Dabei können an statischen und dynamischen Vorgängen lokalen Besonderheiten wie Verformungen und auch Rissbildungen üblicherweise an Starrkörpern bewertet werden

Das Programm arbeitet nach dem Prinzip der Verfolgung eines Zufallsmusters zwischen aufgezeichneten Kamerabildern. Eine Korrelation erfolgt dann über eine subpixelgenaue Musterzuordnung zwischen Referenz-Zustand und verformten Zustand. Die Verfolgung von Punkten erfolgt nach dem Prinzip der Nachbarschaft. Dabei wird das Ähnlichkeitsmaß für verschiedene Positionen in der Nähe der bisherigen Position bestimmt und es erfolgt ein Vergleich und eine Qualifizierung des Ähnlichkeitsmaßes. Eine analytische Lösung besteht nicht. Es kommt die klassische Korrelationsfunktion zum Einsatz, bei der die Summe aus quadrierten Differenzen der Pixelgrauwerte nach Gl. 4.1 gebildet wird.

$$C(\bar{x}, \bar{y}, u, v) = \sum_{i, j=-n/2}^{n/2} (I(\bar{x} + i, \bar{y} + j) - I^*(\bar{x} + u + i, \bar{y} + v + j))^2 \quad (4.1)$$

mit

$C$ : Korrelationsfunktion/Ähnlichkeitsmaß	$I$ : Bild vor der Bewegung
$\bar{x}, \bar{y}$ : Pixelkoordinaten des Referenzbildes	$\overline{x + i, y + j}$ : Pixelwert bei $(x+i; y+j)$
$u, v$ : Verschiebung	$I^*$ : Bild nach der Bewegung
$n$ : Größe der Teilmenge	$\overline{x + u + i, y + v + j}$ : Pixelwert bei $(x+u+i; y+v+j)$

Folgender iterativer Algorithmus wird nach Lichtenberger [LIC17] in *ISTRA4D* angewendet:

1. Berechnung der Kreuzkorrelation  $C(u, v)$  an einem Punkt
2. Variation der Verschiebung  $u, v$
3. Neues  $C(u, v)$  berechnen
4. Wiederholung der Schritte 1 bis 3 bis zum Konvergieren
5. Subpixelgenauigkeit durch Interpolation

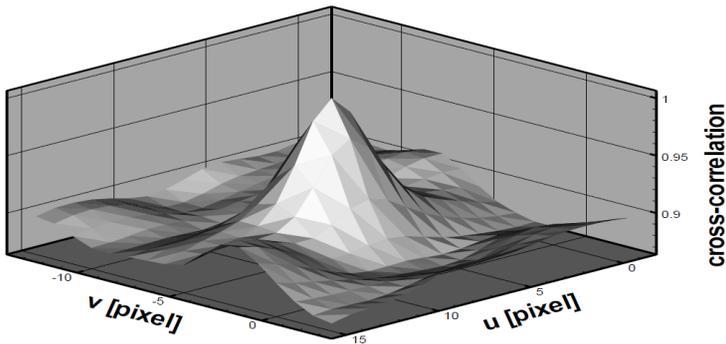


Abbildung 4.3 Beispielhaftes Ergebnis von Korrelationen zum Ähnlichkeitsmaß als Funktion der Verschiebung aus Lichtenberger [LIC17]

Es muss berücksichtigt werden, dass sich in der Realität die Facetten nicht nur verschieben, sondern auch verformen können. Zudem kann es auch zur Änderung der Helligkeit bzw. des Kontrastes während der Aufnahmen kommen.

In *ISTRA4D* wird das Ähnlichkeitsmaß  $C$  berücksichtigt als Funktion der Verschiebung  $u, v$  sowie der Verschiebungsgradienten  $du/dx, du/dy, dv/dx, dv/dy$ . Das Maximum wird über numerische Methoden nach Newton-Raphson bzw. Marquardt-Levenberg gemäß Gl. 4.2 gesucht.

$$C = f(u, v, du/dx, du/dy, dv/dx, dv/dy) \quad (4.2)$$

Der Korrelationsalgorithmus besitzt eine äußere Schleife, bei der eine Verarbeitung aller Facetten im Bild erfolgt und bei dem für jede Facette eine Startwertschätzung an die innere Schleife übergeben wird. Die innere Schleife verwendet die übergebene Startwertschätzung und optimiert mit der Korrelationsfunktion bis zur besten Übereinstimmung („Best Match“).

Die Software hat zudem ein Verfahren zur Berechnung von Dehnungen integriert. Dabei wird zum einen die Verformung einer Facette direkt aus der Korrelation berücksichtigt. Zum anderen wird für die Dehnungsberechnung das Verschiebungsfeld abgeleitet. Die Deformation wird so in eine Starrkörperbewegung und die eigentliche Verformung des Objektes aufgeteilt. Unter Verformung versteht man die reine Gestalt- oder Volumenänderung des Objektes. Man spricht von einer Starrkörperbewegung, wenn man die reine Translations- und Rotationsbewegung des Körpers betrachtet und der Verformungswert gleich 0 ist. *ISTRA4D* ermittelt die Flächen, in denen zwischen zwei Bildern nur eine Rotation und/oder Translation stattfindet und berechnet den Schwerpunkt des auszuwertenden Bereiches. Zumeist liegt dieser in der Mitte des Analysebereiches. Die Starrkörperbewegung berechnet sich demnach aus:

- dem Schwerpunkt des Analysebereiches in zwei Bildern,
- der Verschiebung des Schwerpunktes im zweiten Bild und
- der Rotation des Objektes um diesen Schwerpunkt.

Für die Dehnungsanalyse in *ISTRA4D* sind drei Ansätze zur Berechnung implementiert:

- Dehnungen nach Green-Lagrange nach Gl. 4.3,
- Ingenieurtechnische Dehnung nach Gl. 4.4 und
- Logarithmische Dehnung nach Gl. 4.5.

$$\varepsilon_{ij} = 0,5 \left( \frac{\delta u_i}{\delta x_i} + \frac{\delta u_j}{\delta x_j} + \sum_{l=1}^3 \frac{\delta u_l}{\delta x_l} \frac{\delta u_l}{\delta x_i} \right) \quad (4.3)$$

$$\varepsilon_{ing} = \Delta l / l_0 \quad (4.4)$$

$$\varepsilon_{log} = \ln(l/l_0) \quad (4.5)$$

Während die Dehnungen nach Green-Lagrange und die ingenieurtechnische Dehnung sich zur Berechnung kleiner Dehnungsbeträge eignen, sollte bei großen Dehnungen vor allem die logarithmische Dehnung genutzt werden. Bei kleinen Dehnungsbeträgen ist die Wahl nahezu unerheblich. Eine Vergleichsrechnung zeigt, dass bei einem ingenieurtechnischen Dehnungsbetrag von

10 %, die Ansätze nach Green-Lagrange zu einer Dehnung von 9,5 % und mit dem Ansatz der logarithmischen Dehnung zu einer Dehnung von 9,53 % führen. Die Auswirkung der unterschiedlichen Berechnungsansätze auf die eigenen Ergebnisse wird in einer gesonderten Studie untersucht und im Rahmen statischer Versuche in Kap. 6.2 erläutert.

Für jede der oben genannten Berechnungsansätze für Dehnungen können in *ISTRA4D* folgende Daten-sätze entnommen werden:

- Tangentiale Dehnung in x- und y- Richtung nach Gl. 4.6 und Gl. 4.7,
- Tangentiale Scherdehnung nach Gl. 4.8 und
- maximale (positive) und minimale (negative) Hauptnormaldehnung nach Gl. 4.9.

$$\varepsilon_x = u_x + 0,5(u_x^2 + v_x^2) \quad (4.6)$$

$$\varepsilon_y = v_y + 0,5(u_y^2 + v_y^2) \quad (4.7)$$

$$\gamma_{xy} = 0,5(u_x + v_x) \quad (4.8)$$

$$\varepsilon_{p1}, \varepsilon_{p2} = \frac{\varepsilon_x + \varepsilon_y}{2} \pm \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_x - \varepsilon_y}{2}\right)^2 + \left(\frac{\gamma_{xy}}{2}\right)^2} \quad (4.9)$$

Die allgemeinen Vorteile optischer Messungen mit der gewählten Variante der DIC-Methode lassen sich wie folgt zusammenfassen:

- Es wird eine hohe Messauflösung der Verschiebungen mit bis zu 1/100.000 des Bildfeldes bei einer 1 MPixel Kamera ermöglicht.
- Das Verfahren ist berührungslos. Einbauten, die die Probe beeinflussen existieren nicht. Zudem können auch große Verformungen und ein Versagen bzw. Scheren der Probe erfasst werden.
- Durch die Anwendung einer optischen Methode kann eine gesamte Schnittfläche als ROI flächenhaft und simultan erfasst werden.
- Das Verfahren ist in Abhängigkeit der Kamera sowohl für statische als auch für dynamische Vorgänge prinzipiell geeignet. Zu beachten ist, dass bei dynamischen Vorgängen mit entsprechend kurzer Belichtungszeit eine besondere Beleuchtung über Hochleistungs-LED notwendig ist (s. auch Kap. 5).

Voraussetzung neben einem optischen Zugang zum Messobjekt ist eine optische Eignung wie z. B. ein Specklemuster der Probenoberfläche. Sand besitzt ein natürliches Muster das günstig für die DIC-Methode ist. Böden mit hohem Feinkornanteil müssen hingegen durch ein Einstreuen von Farbpartikeln wie in Nazhat [NAZ13] aufbereitet werden.

#### Visualisierung von DIC-Ergebnissen in MATLAB

*ISTRA4D* bietet verschiedene Möglichkeit zum Datenexport bzw. zur Datenübergabe an. Für eine Weiterverarbeitung z. B. in *MS Excel*, *MATLAB* oder in *SCILAB* kann das *Hierarchical Data Format* (kurz: HDF) oder auch der *American Standard Code for Information Interchange* (kurz: ASCII) genutzt werden. Für jede DIC-Stützstelle werden für den Referenzschritt vor Belastung und für ausgewählte Messzeitpunkte während eines Versuches folgende Messdaten übernommen und in *MATLAB* eingelesen:

- Koordinaten der Stützstelle als x und y-Wert bezogen auf das *Initial System*,
- die Verschiebungskomponenten in x und y Richtung sowie als Verschiebungsbetrag sowie
- die Dehnungskomponenten nach Gl. 4.6 bis 4.9.

Die Verwendung von *MATLAB* bietet neben einer benutzerdefinierten Visualisierung der Messergebnisse auch Rechenoperationen an den Ergebnissen. Abbildung 4.4 zeigt für einen Fallgewichtsversuch exemplarisch ausgewählte DIC-Ergebnisse nach dem 1. Impuls. Über eine Darstellung als Isolinien oder Contourplots können sehr kleine Verschiebungs- oder Dehnungsbeträge veranschaulicht werden. Für eine Darstellung als Isolinien oder Contourplots in *MATLAB* werden die Ergebnisgrößen der Verschiebungen und Dehnungen mit zugehörigem Koordinatenpaar eingelesen. Über eine Funktion werden dann bspw. 1000 x 1000 Punkte unter Beachtung der Stützstellen interpoliert. Ergebnisse einer solchen Darstellung sind in Abbildung 4.4 a) und b) veranschaulicht.

Alternativ zu diesen Darstellungen können in Abhängigkeit besonderer Fragestellungen auch Schnitte oder einzelne Punkte ausgewertet werden. So lassen sich quantitativ eindeutig bestimmte Grenzwerte entlang eines Schnittes vergleichen und bewerten. Abbildung 4.4 d) zeigt exemplarisch die vertikalen Verschiebungen entlang unterschiedlicher vertikaler Schnitte gemäß Abbildung 4.4 c).

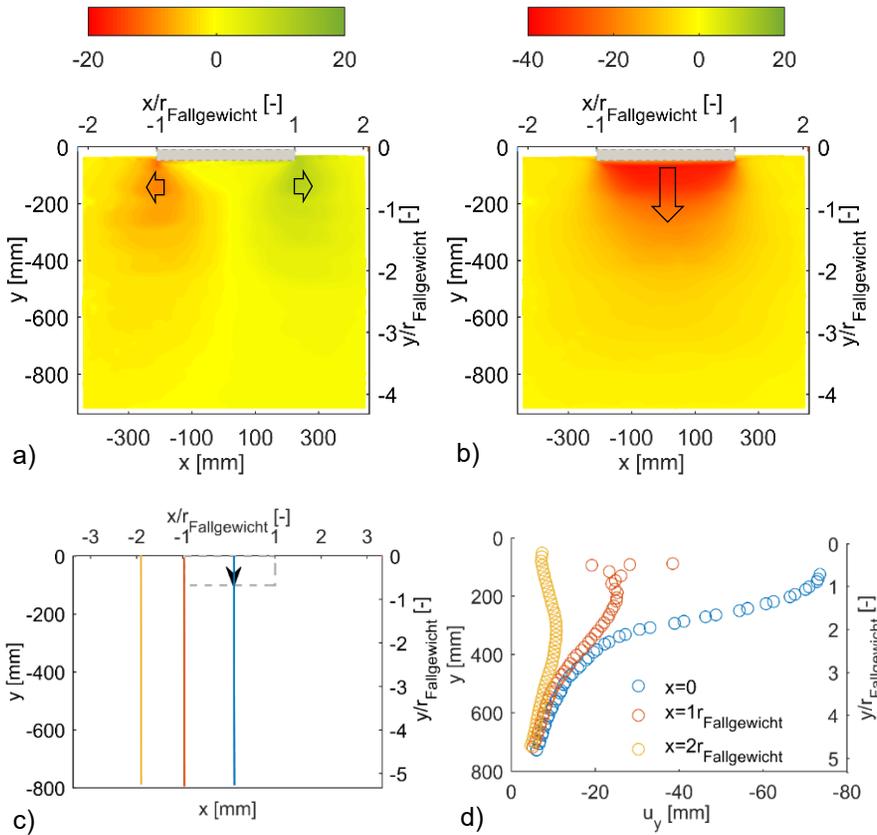


Abbildung 4.4 Beispiel für die Darstellung eines mit DIC ermittelten Verschiebungs- bzw. Verformungsfeldes anhand eines Modellversuches zur Fallgewichtsverdichtung hinter einer Glasscheibe am Versuchstand-M: a) Contourplot der Horizontal- und b) Vertikalverschiebungen nach dem 1. Impuls. Bilder c) und d) Exemplarische Darstellung der Vertikalverschiebungen in ausgewählten vertikalen Schnitten.

# 5 Versuchssand, Versuchsstände und Einbaumethoden

## 5.1 Versuchssand

Grundsätzlich war die Art des Versuchssandes für die Arbeiten von untergeordneter Bedeutung. Aus logistischen Gründen wurde als Versuchsmaterial ein regionaler Sand aus einem nahegelegenen Kieswerk Hirschfeld bei Leipzig als „Natursand gewaschen 0/2“ (Sorten-Nr. 01040) verwendet. Nach Prüfzeugnis vom Institut für Baustoffe und Umwelt Weimar GmbH & Co. KG handelt es sich um einen Quarzsand, der der frühsaalekaltzeitlichen Mulde zugeordnet wird und mäßig gerundet bis scharfkantig ist.

Für die Versuche wurden insgesamt 5 m<sup>3</sup> des Sandes in einer Asphaltmischanlage getrocknet und als loses Schüttgut für die Versuche an der HTWK Leipzig angeliefert und eingelagert. An dem Liefermaterial wurden mehrere Mischproben entnommen und die Korngrößenverteilung bestimmt. Die Einlagerung erfolgte in mehreren modifizierten *Intermediate Bulk Containern* (IBC) und in Bigbags (auch: *Flexible Intermediate Bulk Container*). Für die Versuche wurde Material aus max. 2 IBC genutzt und mehrfach verwendet. Es wurden regelmäßig an Mischproben die Korngrößenverteilungen bestimmt um Entmischungsprozesse zu überwachen. In der nachfolgenden Abbildung 5.1 werden die Ergebnisse mehrerer Korngrößenanalysen veranschaulicht.

Der Versuchssand ist als Mittelsand, grobsandig, leicht feinsandig mit einer Ungleichförmigkeit  $C_u = 3,0$  zu beschreiben. Der mittlere Korndurchmesser beträgt  $d_{50} = 0,61$  mm. Nach [DIN18126] wurden die Trockenrohdichte aus 5 Teilversuchen zu 1,495 g/cm<sup>3</sup> bei lockerster Lagerung und zu 1,763 g/cm<sup>3</sup> bei dichtester Lagerung bestimmt. Die Korndichte wurde nach DIN EN ISO 17982-3 (2015) zu 2,617 g/cm<sup>3</sup> ermittelt.

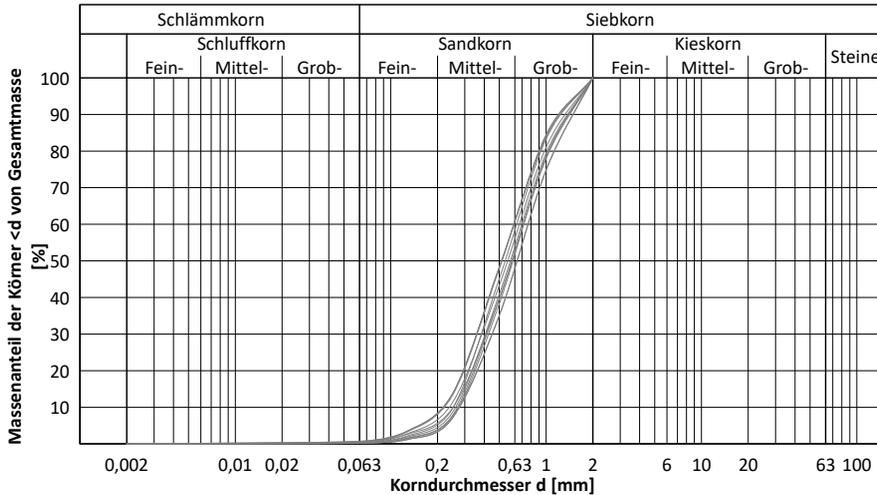


Abbildung 5.1: Korngrößenverteilungen des Versuchssandes aus mehreren Einzelversuchen nach DIN 18123:2011-04

Zur Untersuchung der Kompressionseigenschaften bei Erstbelastung wurden Ödometerversuche (auch Kompressionsversuch) nach [DIN18135] durchgeführt. Abbildung 5.2 veranschaulicht Ergebnisse aus Ödometerversuchen mit anfänglich locker bzw. dicht gelagerten Proben.

Der kritische Reibungswinkel  $\varphi_c$  wurde in Schüttkegelversuchen zu im Mittel  $\varphi_c = 32,4^\circ$  bestimmt. Der Peakreibungswinkel wurde in einem Rahmenscherversuch nach [DIN18137-3] an einer Probe in dichter Lagerung ( $I_{D,0}=0,91$ ) zu  $\varphi_p = 39,5^\circ$  ermittelt.

Der Versuchssand besteht zu ca. 70 % aus Mittelsand. Feinkorn- oder Feinkiesanteile sind nahezu nicht vorhanden. Es ist zu vermuten, dass sich daraus vergleichsweise vorteilhafte Eigenschaften für die Modellversuche hinsichtlich geringer Staubentwicklung beim Einbau in Rieselfverfahren sowie vernachlässigbaren elektrostatischen Einflüssen ergaben. Die Entnahme des Versuchssandes aus IBC Behältern erfolgte über größere Auslässe im Fußbereich der Behälter. Dabei wurden regelmäßig leichte Entmischungsvorgänge beobachtet. Zur Minimierung wurde der Versuchssand regelmäßig manuell durchmischt und so homogenisiert.

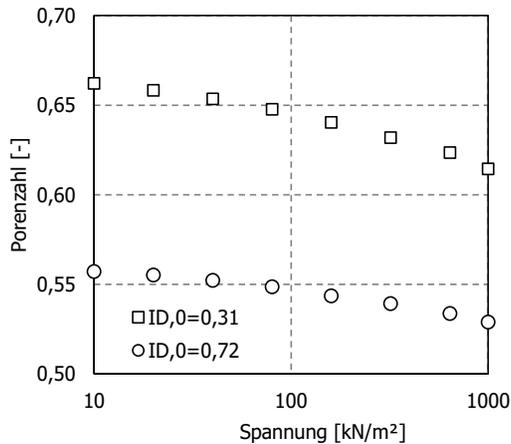


Abbildung 5.2 Ergebnisse von Ödometerversuchen am verwendeten Sand mit verschiedenen Anfangslagerungsdichten  $I_{D,0}$

## 5.2 Versuchsstand-C

### 5.2.1 Versuchsaufbau

Zur Untersuchung definierter Wege wurde der Versuchsstand-C für die Nutzung unter Prüfpresen konzipiert. Im Rahmen der eigenen Arbeit werden sowohl statische Belastungen über Laststufen in Anlehnung an Ödometerversuche, als auch eine weggesteuerte Lastaufbringung mit monotoner Belastungspfad und einer geringen Lastgeschwindigkeit von 2 mm/min vorgesehen. Der grundlegende Aufbau des Versuchsstands-C ist schematisch für die verwendeten Konfigurationen in Abbildung 5.3 dargestellt.

Auf einer massiven Stahlbodenplatte bildet eine gebogene Stahlplatte den seitlichen und hinteren äußeren Rahmen des Versuchsstandes. Die Innenseiten sind mit Teflonplatten ausgekleidet. Die Sichte Ebene wurde mit transparentem Acrylglas (PMMA) ausgeführt und an die Seiten mit dem Stahlrahmen verschraubt. Das maximale Probevolumen von 2,07 dm<sup>3</sup> ergibt sich aus 139 mm Breite, 61 mm Tiefe und 244 mm Höhe. Die vertikalen Bewegungen des Lastbügels werden durch Stahlholme geführt.

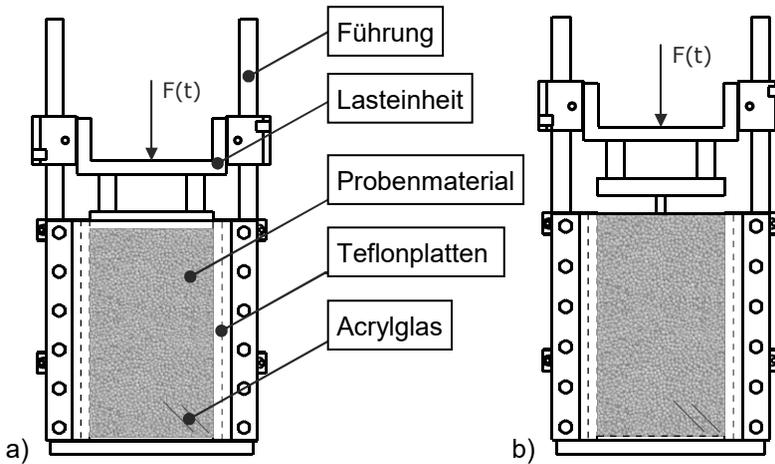


Abbildung 5.3 Versuchsstand-C als Prinzipskizze aus der Vorderansicht: a) Konfiguration eindimensionale Kompression und b) Konfiguration ebener Verformungszustand

In den Versuchen wird der Probenträger immer komplett mit Versuchssand gefüllt. Für den Lastbügel ergeben sich dabei vertikale Verschiebungen von wenigen Millimetern. Die Verschiebungen des Lastbügels hängen von der Lagerungsdichte des Sandes und der Belastung in der jeweiligen Laststufe ab. Für Messungen mit der DIC-Methode wird das gesamte Sichtfenster erfasst.

## 5.2.2 Konfiguration eindimensionale Kompression

In Versuchen unter eindimensionaler Kompression entsprechen die Abmessungen der Lasteinleitung nahezu den Innenabmessungen des Probenträgers und erlauben somit eine vollflächige Belastung eingebauter Sandproben. Für die Versuche wird der Probenträger eben abgezogen und der Lastbügel mit seinem Eigengewicht von ca. 4,7 kg bei Messbeginn auf der Oberfläche der Probe aufgesetzt.

Die Aufbringung weiterer Lasten erfolgt durch die Prüfpresse. In Anlehnung an die Ödometerversuche werden folgende Laststufen zu 10, 20, 40, 80, 160, 320, 640 und 1.000 kN/m<sup>2</sup> gewählt. Jede Laststufe wird nach Lastaufbringung bis zu 15 min gehalten um Setzungen je Laststufe abklingen zu lassen.

## 5.2.3 Konfiguration ebener Verformungszustand

Zur Realisierung von Versuchen im ebenen Verformungszustand wird an der Unterseite der Lasteinheit ein schmaler Metallblock mit Abmessungen der Grundfläche von 14 mm x 61 mm und einer Höhe von 24 mm befestigt. Ein Aufsetzen der Lasteinheit erfolgt zum Messbeginn. Die Wegsteuerung wird durch die Prüfpresse mit konstanter Setzungsgeschwindigkeit von 2 mm/min monoton ausgeführt. Der maximale Lastweg wurde zu 20 mm gewählt.

## 5.2.4 Instrumentierung und Datenerfassung

Für die Erfassung der Setzungen wird eine digitale Setzungs-Messuhr möglichst mittig auf der Oberseite der Lasteinheit angeordnet. Die Krafteinleitung der Prüfpresse wird über einen Kraftaufnehmer zur Normalkraftmessung erfasst. Beide Messgrößen werden durch eine Computersteuerung dokumentiert. Für die Steuerung von Prüfpresse und Kameras werden zwei gesonderte Computer eingesetzt. Für eine spätere Parallelisierung der Messdaten wird parallel zum Start des Versuches ein Chronograph gestartet und in den Fotoaufnahmen festgehalten. In Sonderversuchen wird gezielt das Verformungsverhaltens der Acrylglascheibe über eine 2. digitale Setzungs-Messuhr orthogonal auf der Vorderseite der Sichte Ebene erfasst. Die Fotoaufnahmen erfolgen mit einer *Olympus E-M10* Systemkamera (nachfolgend: OLY) sowie in einzelnen Messungen zusätzlich mit einer Hochgeschwindigkeitskamera Typ *PCO DMAXHD+* (nachfolgend PCO). Die Bildrate für die Versuche am Versuchsstand-C wird mit 1 Bild pro Minute gewählt und für beide Kameras computergesteuert. Zwei Hochleistungs-LED vom Typ *Imaging Solution Constellation 120* werden als Permanentscheinwerfer für die Ausleuchtung der Versuche eingesetzt.

## 5.2.5 Auswertung

Nach den Versuchen werden die Messergebnisse der Computersteuerung übertragen und es findet ein Abgleich des Messbeginnes zwischen den Datenreihen statt. Gemessene Kräfte werden in Abhängigkeit der Grundfläche der Lasteinleitung in Spannungen umgerechnet. Die Wahl der DIC-Konfiguration für die Größen von Facette bzw. Grid erfolgt in Abhängigkeit der Versuche und wird in den Ergebniskapiteln näher untersucht. Am Versuchsstand-C erfolgt eine Studie zu Auswirkungen verschiedener Korrelationseinstellungen im Hinblick auf eine Beeinflussung der DIC-Ergebnisse zu Verschiebungen

und Dehnungen. Die Vorstellung und Auswertung der Messergebnisse erfolgt in Kap. 6.

## 5.3 Versuchsstand-S

### 5.3.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsstand-S (*small*) wird für eine Studie zur Fallgewichtsverdichtung als Halbmodellversuche mit Fallgewichten mit Massen zwischen 4 kg und 8 kg verwendet. Hauptelemente des Versuchsstandes sind der Materialbehälter, die Rahmenkonstruktion mit zwei horizontalen und einer vertikalen Führungsschiene und der Fallschlitten mit befestigten austauschbaren Fallgewichten (nachfolgend bezeichnet als „Fallgewicht“). Der grundlegende Aufbau des Versuchsstand-S ist schematisch in Abbildung 5.4 dargestellt.

Der quaderförmige Materialbehälter hat die maximalen Innenabmessungen  $H \times B \times T = 0,62 \text{ m} \times 1,92 \text{ m} \times 0,40 \text{ m}$  und wurde für Versuche mit trockenen Versuchsmaterialien konzipiert. Für den Großteil der Versuche wird der Materialbehälter durch Zwischenwände in der Breite auf 0,88 m reduziert. Für den Befüllvorgang kann der Materialbehälter zeitweise vor die Rahmenkonstruktion geschoben werden. Auf dem Bodenbelag befestigte Führungsschienen ermöglichen eine leichtere Bewegung und minimieren ungewollte Erschütterungen beim Zurückziehen des gefüllten Materialbehälters. Für die Positionierung vor dem Fallvorgang wird die Position des Materialbehälters an dem späteren Einschlagpunkt des Fallgewichtes ausgerichtet. Die vertikale Führungsschiene kann entlang der horizontalen Führungsschienen bewegt werden und bei Bedarf nach jedem Impuls in eine neue Position gebracht werden. Für die Versuchsdurchführung wird die vertikale Führungsschiene an den horizontalen Führungsschienen fest verschraubt. Für den Großteil der Versuche wurde in Anlehnung an die reale Fallgewichtsverdichtung die Position der vertikalen Führungsschiene für mehrere Wiederholungen nicht verändert. Es kommen Fallgewichte mit Durchmesser von 100 mm, 125 mm und 150 mm mit nahezu identischen Massen zum Einsatz. Zur Realisierung von Halbmodellversuchen besitzen alle Fallgewichte eine halbrunde Grundform. Die Fallgewichte werden an der Unterseite des Fallschlittens befestigt. Durch Zusatzgewichte am Fallschlitten kann die Masse des gesamten Fallgewichtes, bestehend aus Fallschlitten, Fallgewichten und Zusatzgewichten, erhöht werden.

Der Fallweg zwischen Unterseite des Fallgewichtes und der Sandoberfläche kann stufenlos auf bis zu 1,2 m eingestellt werden. Die Auslösung des Fallvorganges erfolgt per Fernsteuerung über die Deaktivierung eines Elektromagneten.

Rahmenkonstruktion mit horizontalen und vertikalen Führungsschienen

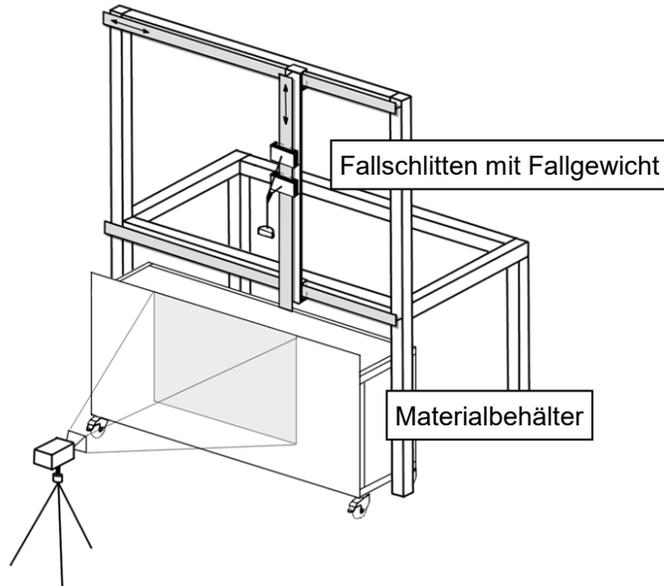


Abbildung 5.4 Versuchsstand-S als Prinzipskizze nach Knut [KNU17]

### 5.3.2 Fallgewichtsversuche als Halbmodell

Die Versuche zur Fallgewichtsverdichtung erfolgen nach dem Prinzip gemäß Abbildung 5.4. Das Fallgewicht wird an der Unterseite des Fallschlittens befestigt. Der gefüllte Materialbehälter wird so an den späteren Einschlagpunkt des Fallgewichtes herangeführt, dass ca. 1 mm Abstand zwischen Fallgewicht und Innenseite der Acrylglasscheibe bleiben. Für die Versuchsdurchführung wird ein Elektromagnet an der vertikalen Führungsschiene aktiviert, um daran den Fallschlitten in seiner Ausgangsposition zu halten.

### 5.3.3 Konfigurationen für die Versuchsstudie zur Fallgewichtsverdichtung

Die für die Versuchsstudie gewählten Konfigurationen am Versuchsstand-S werden in nachfolgender Tabelle 5.1 zusammengestellt. Variiert werden der Durchmesser des Fallgewichtes  $d_H$ , die Masse des Fallgewichtes mit Fallschlitten  $m_H$  sowie die Fallhöhe  $h_0$  als Distanz zwischen Unterseite des Fallgewichtes und der Sandoberfläche.

Tabelle 5.1: Kennzahlen der Versuchsstudie zur Fallgewichtsverdichtung, Versuche am Versuchsstand-S

Parameter	Einheit	Versuchsstand-S						
$d_H$ Durchmesser	m	0,100	0,100	0,100	0,100	0,100	0,125	0,150
$m_H$ Masse	kg	4,8	5,95	7,09	4,8	4,8	7,09	7,09
$h_0$ Fallhöhe	m	0,8	0,64	0,53	1,00	1,20	1,00	1,20
$N$ Impulse	-	N = 12, 4 Wiederholungen je Konfiguration (2 x je Seite)						

Neben der Untersuchung von bis zu 12 Impulsen an einer Position, werden am Versuchsstand-S auch drei Versuchsreihen mit je 60 Impulsen an 5 verschiedenen Positionen gemäß Abbildung 5.5 durchgeführt. Variante C01 in Abbildung 5.5a) sieht 12 Einzelimpulse an jeder der 5 Positionen vor. Diese Abfolge orientiert sich an der Vorgehensweise bei der Fallgewichtsverdichtung in der Baupraxis. Die Varianten C02 und C03 sehen ein Umsetzen nach jedem Impuls in unterschiedlichen Anordnungen vor. Diese Varianten sind fahrenden bzw. schreitenden Verdichterverfahren nachempfunden.

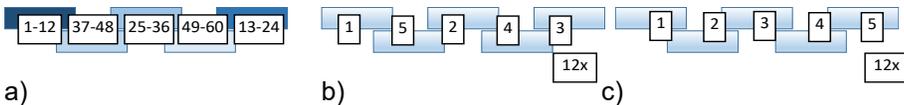


Abbildung 5.5 Versuchsreihen mit 60 Impulsen am Versuchsstand-S: a) Variante C01: Jede Position 12 Einzelimpulse, b) Variante C02: Jede Position 1 Einzelimpuls, 12 Wiederholungen, c) Variante C03: Jede Position 1 Einzelimpuls

Alle genannten Konfigurationen werden mit Fallgewichten mit glatter Unterseite durchgeführt (Typ A). Darüber hinaus werden auch Fallgewichte mit Sonderformen nach Abbildung 5.6 untersucht.



Abbildung 5.6 Sonderformen der Verdichterunterseite für die Studie zur Fallgewichtsverdichtung, Versuchsstand-S (von links nach rechts: Typ B, Typ C und Typ D)

### 5.3.4 Instrumentierung und Datenerfassung

Die Messungen am Versuchsstand-S beschränken sich im Rahmen dieser Arbeit auf DIC-Messungen. Der Versuchsstand-S wird im Rahmen der eigenen Arbeit nur als Teil der ergänzenden Versuchsstudie für Vergleiche zur Fallgewichtsverdichtung genutzt (s. Kap. 7.7). Ausführlichere Ergebnisdarstellungen im Sinne von Benchmark-Versuchen erfolgen am größeren Versuchsstand-M (s. Kap. 5.4).

Die Kameraaufnahmen für die DIC-Messungen werden mit der *PCO* Hochgeschwindigkeitskamera bei einer Bildrate von 1.603 fps und bei einer Auflösung von 1.920 x 1.440 Pixeln (ca. 2 MPixel) durchgeführt. Der *ROI* wird so gewählt, dass der gesamte gefüllte Materialbehälter erfasst wird. Ein Pixel entspricht etwa 0,52 mm, bzw. 1,9 Pixel pro mm. Vier Hochleistungs-LED vom Typ *Imaging Solution Constellation 120* werden für die Ausleuchtung des Bildbereichs eingesetzt. Die Scheinwerfer werden durch die Hochgeschwindigkeitskamera zeitlich gesteuert. Somit wird je Aufnahmebild eine maximale und gleich starke Ausleuchtung sichergestellt. Auf der Kamera können temporär bis zu 4.600 Bilder bei voller Auflösung von 1.920 x 1.440 Pixeln gespeichert werden.

### 5.3.5 Auswertung

Die Auswertung der Bilddaten wird entsprechend Kap. 4 durchgeführt. Zur Auswertung der Bilddaten wurde für die PCO Kamera folgende Einstellung gewählt:

- Facette 39 Pixel, Grid 24 Pixel

Die Ergebnisse der Versuche vom Versuchsstand-S werden im Kap. 7.7 vorgestellt.

## 5.4 Versuchsstand-M

### 5.4.1 Versuchsaufbau

Der Versuchsstand-M (*medium*) wird in Konfigurationen im ebenen Verformungszustand und als Halbmodell eingesetzt. Dabei werden Untersuchungen mit statischer Auflast und an Fallgewichtsversuchen durchgeführt. Die Massen der Fallgewichte werden zwischen 33 kg und 81 kg variiert. Hauptelemente des Versuchsstandes sind der variable Materialbehälter, die vertikale Führungsschiene und der Fallschlitten mit befestigten austauschbaren Fallgewichten (nachfolgend bezeichnet als „Fallgewicht“). Der Versuchsstand kann für Versuche im ebenen Verformungszustand und für Halbmodell-Versuche genutzt werden. Der grundlegende Aufbau des Versuchsstand-M ist schematisch in Abbildung 5.7 dargestellt.

Der Materialbehälter besteht aus Schalungselementen Typ *DOKA Framax Xlife* und wird für Halbmodell-Versuche durch Kanthölzer auf die maximalen Innenabmessungen  $H \times B \times T = 1,0 \text{ m} \times 1,5 \text{ m} \times 1,0 \text{ m}$  begrenzt. Für Versuche in ebenem Verformungszustand wird der Materialbehälter in der Tiefe auf 0,15 m reduziert. In das Schalungselement an der Vorderseite ist ein Rahmen mit einem Verbundsicherheitsglas mit einer Sichte Ebene von  $0,97 \times 0,97 \text{ m}$  eingearbeitet. Die Stärke des Verbundsicherheitsglases beträgt 25 mm. Auf der Innenseite des Verbundsicherheitsglases wird eine Acrylglasscheibe mit einer Stärke von 5 mm befestigt. Die Acrylglasscheibe verhindert ein Verkratzen des Verbundsicherheitsglases und kann bei Bedarf leicht ausgetauscht werden. Der Materialbehälter besitzt keine starre Unterseite. Unterhalb des

Materialbehälters stehen hoch verdichtete Böden an, die als Grobsand, feinkiesig zu beschreiben sind. Eine begleitende messtechnische Erfassung dieses Bodenmaterials erfolgt in den Arbeiten nicht. Für eine vereinfachte Berücksichtigung in numerischen Nachrechnungen können folgende Kennwerte genutzt werden.

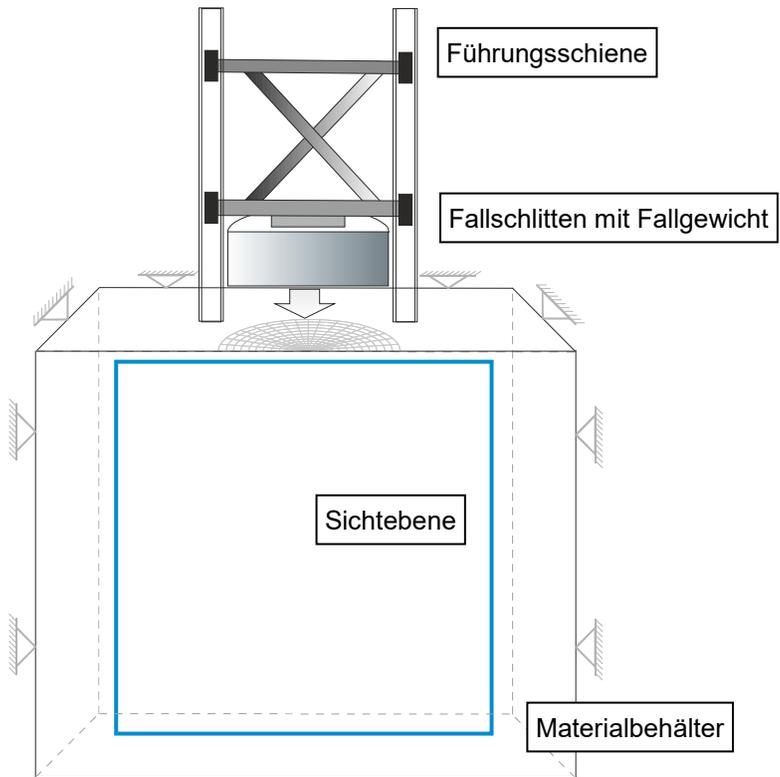


Abbildung 5.7 Versuchsstand-M als Prinzipskizze, Konfiguration für Fallgewichtsversuche

Tabelle 5.2: Ausgewählte Kennwerte zum Bodenmaterial unterhalb des Versuchsstand-M

$\varphi'$ [°]	$c$ [kN/m <sup>2</sup> ]	$E_s$ [MN/m <sup>2</sup> ]	$\rho_0$ [t/m <sup>3</sup> ]
32,4	50	60	1,78

Die vertikale Führungsschiene kann entlang des Hauptträgers eines Portalkranes bewegt werden und bei Bedarf nach jedem Impuls in eine neue Position gebracht werden. Für die Versuchsdurchführung wird die vertikale Führungsschiene am Träger des Portalkranes sowie am Schalungsrahmen des Versuchsträgers befestigt. Für den Großteil der eigenen Versuche wurde in Anlehnung an die reale Fallgewichtsverdichtung die Position der vertikalen Führungsschiene für mehrere Wiederholungen nicht verändert und mittig oberhalb des Sichtfensters angeordnet.

Im Rahmen der eigenen Arbeit kommen für Halbmodell-Versuche halbrunde Fallgewichtsplatten mit Durchmessern von 300 mm und 425 mm zum Einsatz. Für Versuche im ebenen Verformungszustand werden Fallgewichtsplatten mit einer rechteckigen Grundfläche bei einer Breite von 300 mm und einer Tiefe von 150 mm verwendet. Die Fallgewichte werden an der Unterseite des Fallschlittens befestigt. Die Masse des gesamten Fallgewichtmoduls, bestehend aus Fallschlitten und Fallgewichtsplatten kann durch Anordnung mehrerer Fallgewichtsplatten mit identischen Abmessungen variiert werden.

### **5.4.2 Versuche mit statischer Auflast**

Für Versuche mit statischer Auflast am Versuchsstand-M wird auf den Schalungselemente des Materialträgers eine Querbalkenkonstruktion als Widerlager verschraubt. Die Fallgewichtsplatte fungiert in diesem Versuch als statische Lasteinheit und wird mittig im oberen Sichtfeld positioniert. Die Lasteinheit ist dabei über den über den Fallschlitten in der Führungsschiene horizontal fixiert. Die Führungsschiene wird am Portalkran und an den Schalungselementen des Materialbehälters befestigt. Für die vertikale Lasteinleitung wird ein Hydraulikzylinder zwischen Lasteinheit und dem Querbalken positioniert. Über diese Konstruktion kann eine Kraft von bis zu 20 kN gezielt eingeleitet werden.

Nach Positionierung der Führungsschiene wird ein geringer Abstand zwischen Lasteinheit und Sichtebeine von max. 5 mm sichergestellt. Die Vertikalität auch bei großer Setzung wird durch die ebenfalls an den Schalungselementen fixierte vertikale Führungsschiene erreicht. Die Ausgangsmasse für eine Platte der Lasteinheit und Fallschlitten beträgt in Abhängigkeit der Größe und Anzahl der Platten mind. 12 kg.

### 5.4.3 Fallgewichtsversuche

Die Versuche zur Fallgewichtsverdichtung erfolgen für Halbmodell-Versuche nach dem Prinzip gemäß Abbildung 5.7. Für Betrachtungen in ebenem Verformungszustand wird ein Fallgewicht mit rechteckiger Grundfläche entsprechend der reduzierten Tiefe des Materialbehälters verwendet.

Nach Befüllung des Materialbehälters wird eine Fallgewichtsplatte am Fallschlitten montiert und durch einen Seilhebezug in die vertikale Führungsschiene gehoben. Die horizontale Position von Führungsschiene mit Fallgewicht kann entlang des Sichtfeldes gewählt werden. Anschließend wird die Führungsschiene am Portalkran und an den Schalungselementen des Materialbehälters fixiert.

Für die Versuchsdurchführung wird die Vertikalität der Führungsschiene geprüft und falls erforderlich durch eine leichte Positionsänderung des Portalcranes angepasst. Der Fallgewichtsschlitten wird für die Versuche durch ein Kabelband mit dem Seilhebezug verbunden und in seine Anfangsposition gehoben.

### 5.4.4 Konfigurationen für die Versuchsstudie zur Fallgewichtsverdichtung

Die für die Versuchsstudie gewählten Konfigurationen am Versuchsstand-M werden in nachfolgender Tabelle 5.3 zusammengestellt. Variiert werden die Kennzahlen für den Durchmesser des Fallgewichtes  $d_H$ , die Masse des Fallgewichtes mit Fallschlitten  $m_H$  sowie die Fallhöhe  $h_0$  als Distanz zwischen Unterseite des Fallgewichtes und Sandoberfläche. Je Konfiguration wurden mind. 12 Impulse durchgeführt. Zudem wird zur Orientierung die Fallenergie bzw. potentiellen Energie  $E$  nach Gl. 7.2 angegeben. Je Konfiguration werden mindestens 12 Einzelimpulse  $N$  durchgeführt.

Neben der Untersuchung von bis zu 12 Impulsen an einer Position, werden am Versuchsstand-M auch zwei Versuchsreihen mit je 36 Impulsen an 3 verschiedenen Positionen gemäß Abbildung 5.7 durchgeführt. Variante C01 ist der Arbeitsweise bei einer Fallgewichtsverdichtung in der Baupraxis nachempfunden. Variante C03 wurde in Anlehnung an fahrende/schreitende Verdichterverfahren gewählt.

Tabelle 5.3: Kennzahlen der Versuchsstudie zur Fallgewichtsverdichtung, Versuche am Versuchsstand-M

Parameter	Einheit	Versuchsstand-M							
		$d_H$ Durchmesser	m	0,550	0,435	0,435	0,300	0,200	0,300
$m_H$ Gewicht	kg	80,73	33,44	48,10	47,38	35,88	47,38	47,38	
$h_0$ Fallhöhe	m	0,20	0,48	0,34	0,34	0,45	0,46	0,91	
$N$ Impulse	-	12	12	12/12*	12/12*	12	12/12*	12/12*	

\* 12 Impulse auf der rechten Seite des ROI, im Anschluss 12 weitere Impulse auf der linken Seite

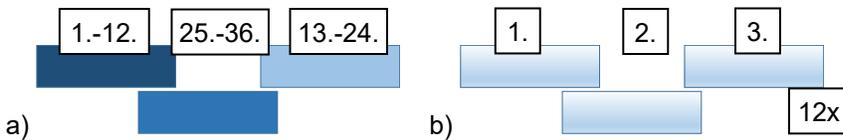


Abbildung 5.8 Versuchsserien mit 36 Impulsen am Versuchsstand-M: a) Variante C01: jede Position 12 Einzelimpulse, b) Variante C03: Jede Position 1 Einzelimpuls, 12 Wiederholungen

### 5.4.5 Instrumentierung und Datenerfassung

Neben den Bilddaten für die DIC-Auswertung werden bei einzelnen Fallgewichtsversuchen folgende Messgrößen erfasst:

- vertikale Beschleunigung ( $a_Y$ ) bzw. Geschwindigkeit des Fallgewichtes ( $v_Y$ )
- Beschleunigung in 3 Achsen an ausgewählten Punkten im Versuchsstand ( $a_i$ )
- Verschiebung/Durchbiegung der Sichtebene ( $s_{\text{Scheibe}}$ )

Zur Erfassung der vertikalen Beschleunigung ( $a_Y$ ) wird ein kapazitiver uniaxialer Beschleunigungssensor mit Messbereich bis 50-facher Erdbeschleunigung (nachfolgend bezeichnet als „50g“) mit der Bezeichnung 41049. Der Sensor wird vertikal ausgerichtet am Fallschlitten mit Schrauben befestigt. Für eine Ableitung einer Geschwindigkeit zum Zeitpunkt des Aufpralls wird die vertikale Beschleunigung mit einer zeitlichen Abtastung von 10 kHz erfasst.

Beschleunigungen innerhalb des Probenkörpers werden mit bis 3 kapazitiven triaxialen Beschleunigungssensoren mit Messbereichen bis 25-facher Erdbeschleunigung bzw. bis 50-facher Erdbeschleunigung gemessen. Die Sensoren werden bezeichnet mit 18259 (25g), 18260 (25g) und 18262 (50g). Die Sensoren werden in Lage und Höhe beim Einbau des Versuchssandes positioniert. Dabei wird eine Achse des Sensors in Richtung der Erdschwerkraft orientiert. Die Erfassung der Beschleunigungen erfolgt mit einer zeitlichen Abtastung von 10 kHz.

Die Messung der Durchbiegung der Sichtebeine ( $s_{\text{Scheibe}}$ ) erfolgt exemplarisch während eines Fallgewichtsversuches mit einem Lasertriangulations-Wegsensor Typ ILD1800. Dabei wird der Laser in einer Distanz von 10 mm vor einem Messpunkt an der Mitte der Sichtebeine positioniert. Die Erfassung der Distanz erfolgt mit einer zeitlichen Abtastung von 10 kHz. In einer Einzelmessung wird zudem das Bewegungsverhalten der Sichtebeine sowie ausgewählter Stellen der Behälterwände mit kapazitiven triaxialen Beschleunigungssensoren mit einer zeitlichen Abtastung von 10 kHz erfasst.

Der prinzipielle Versuchsaufbau für einen Fallgewichtsversuch mit Erfassung von Beschleunigungen mit den genannten Sensoren ist in Abbildung 5.9 schematisch dargestellt.

Die Kameraaufnahmen für die DIC-Messungen werden in den Fallgewichtsversuchen mit der *PCO* Hochgeschwindigkeitskamera bei einer Bildrate von 1.603 fps und einer Auflösung von 1.920 x 1.440 Pixeln (ca. 2 MPixel) durchgeführt. Die Ausleuchtung erfolgt mit 4 Hochleistungs-LED und zeitlicher Steuerung durch die Hochgeschwindigkeitskamera. Der ROI umfasst die gesamte Sichtebeine sowie den angrenzenden Rahmen. Bei maximaler Kamera-Auflösung ergibt sich eine DIC-Auflösung von 0,7 Pixel/mm bzw. 1,4 Pixel/mm.

Für die statischen Versuche werden abweichend zu den Versuchen mit Fallgewichten folgende Messgrößen neben den Bilddaten erfasst:

- Kraft am Hydraulikzylinder in kN ( $F_{\text{Lasteinheit}}$ )
- Vertikale Setzung der Lasteinheit in mm ( $s_{\text{Lasteinheit}}$ )
- Verschiebung/Durchbiegung der Verbundsicherheitsglas-Scheibe ( $s_{\text{Scheibe}}$ )
- Verschiebung/Durchbiegung hintere Kanthölzer ( $s_{\text{Kantholz}}$ )

Eine Messung der Durchbiegung der Sichtebene ( $s_{\text{Scheibe}}$ ) sowie der hinteren Kanthölzer ( $s_{\text{Kantholz}}$ ) erfolgt während der statischen Auflast mit einem Laser-Entfernungsmesser Typ *Bosch DLE40*.

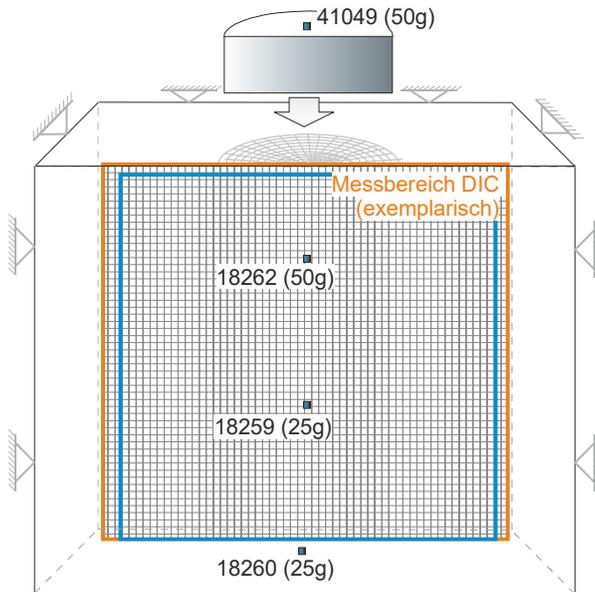


Abbildung 5.9 Schematische Darstellung vom Messaufbau für Fallgewichtsversuche am Versuchsstand-M

In den statischen Versuchen wird neben der *PCO* Hochgeschwindigkeitskamera optional die *Olympus* Kamera eingesetzt. 4 Hochleistungs-LED werden als Permanentscheinwerfer für die Ausleuchtung der Versuche eingesetzt. Die Aufnahmen der Bilder erfolgt computergesteuert mit 1 Bild pro Minute. Bei maximaler Auflösung der *Olympus* Systemkamera ergibt sich eine DIC-Auflösung von 0,3 mm/Pixel bzw. 3,4 Pixel/mm.

### 5.4.6 Auswertung

In den Fallgewichtsversuchen werden die Daten der Beschleunigungssensoren sowie des Lasertriangulations-Wegsensors für den relevanten Betrachtungszeitraum je Fallvorgang als Rohdaten sowie als physikalische Messgrößen

entsprechend den Kalibrierergebnissen des Herstellers gespeichert. Die Ermittlung der Geschwindigkeit und der Verschiebung aus den Messdaten der Beschleunigungssensoren erfolgt über Integration der Rohdaten des Beschleunigungssignals in *Matlab*. Die Geschwindigkeit des Fallgewichtes kann bei entsprechender Wahl des ROI näherungsweise auch mit der DIC-Methode sowie über Berechnungen überprüft werden. Die Auswertung dieser Messgrößen erfolgt für die Fallgewichtsversuche in Kap. 7.5.

Bei den statischen Versuchen wird zu festen Zeitpunkten sowie vor und nach Lasterhöhung die aufgebrachte Kraft  $F_{\text{Lasteinheit}}$  sowie die vertikale Setzung der Lasteinheit  $s_{\text{Lasteinheit}}$  dokumentiert. Parallel erfolgt auch eine Dokumentation der Messgrößen für Durchbiegung der Verbundsicherheitsglas-Scheibe ( $s_{\text{Scheibe}}$ ) sowie für hintere Kanthölzer ( $s_{\text{Kantholz}}$ ). Eine Auswertung der Messgrößen zur Verformung des Probenbehälters erfolgt für die statischen Versuche in in Kap. 6.4.

Die Auswertung der Bilddaten wird entsprechend Kap. 4 durchgeführt. Die DIC-Einstellung je Kamera wurden im Rahmen der jeweiligen Versuchsauswertung präzisiert und in den Ergebniskapiteln 6 und 7 angegeben.

## 5.5 Einbaumethoden

Für die Untersuchung von Verfahren und Mechanismen der Verdichtung ist es notwendig, den Anfangszustand des Versuchssandes möglichst genau zu kennen. Ziel der Einbaumethoden ist es, die Lagerungsdichte in engen Grenzen in reproduzierbaren homogenen Bodenproben herzustellen. Einflüsse der Einbaumethode auf das Bodenverhalten bei monotoner und auch bei zyklischer Beanspruchung wurden von Wichtmann [WIC16] untersucht.

Bei Betrachtung unterschiedlicher Lagerungsdichten und Arbeit an mehreren Versuchsständen müssen ggf. verschiedene Einbauvarianten gewählt bzw. eine einzelne Einbaumethode angepasst werden. Für jede Einbaumethode und jeden Versuchsstand muss grundsätzlich der Nachweis der Vorgaben zur Lagerungsdichte, Homogenität und Reproduzierbarkeit erbracht werden. An Vorversuchen kann eine Kalibrierung der Einbaumethode im Hinblick auf die erzielbare Lagerungsdichte erfolgen. Am eigentlichen Versuchsträger ist zumindest in Stichproben eine Überprüfung zur Probenhomogenität vorgesehen.

Die Herstellung von trockenen Sandproben kann durch Rieselfverfahren erfolgen. Bei diesem Vorgang wird die erzielbare Lagerungsdichte durch die Fallhöhe  $h_F$  und die Rieselintensität  $DI$  (*deposition intensity*) bestimmt. Somit kann auf weitere Verdichtungsverfahren verzichtet werden. Eine ausführliche Untersuchung zu Einflussgrößen der Rieselfverfahren erfolgte bereits durch Kolbuszewski [KOL48a] und [KOL48b]. Demnach entspricht die Fallhöhe  $h_F$  der Sedimentationsstrecke der Körner. Sie bestimmt die Geschwindigkeit beim Aufprall auf eine Oberfläche. Mit Zunahme der Fallhöhe werden höhere Lagerungsdichten erzeugt. Die Rieselintensität  $DI$  beschreibt die Sandmasse, die pro Zeit- und Flächeneinheit eine Oberfläche erreicht. Grundsätzlich führt eine Abnahme der Rieselintensität zur Erhöhung der Lagerungsdichte. Eine Ausnahme stellen besonders geringe Rieselintensitäten dar. Cresswell [CRE99] erläutern, dass eine Zunahme der Rieselintensität zu einer Zunahme gegenseitigen Behinderung der Sandkörner im Fallvorgang führt und damit die Anordnung eines aus 3-4 Körnern Dicke bestehender *energetic layer* gestört wird. In diesem *energetic layer* erfolgen horizontale Bewegungen der Körner und ermöglichen somit eine dichtere Anordnung der Körner.

Choi [CHO10] haben durch Messungen bestätigt, dass bei geringen Fallhöhen bis 30 cm die Fallhöhe maßgeblich für die Einstellung der Lagerungsdichte ist. Bei höheren Fallhöhen wird hingegen die Rieselintensität maßgebend.

Neben der Arbeit mit Rieselfmethoden und Einbau in horizontalen Ebenen können lockere Lagerungsdichten auch über das Schüttkegelverfahren hergestellt werden. Wird der Schüttkegel ohne Fallhöhe erzeugt, können in Analogie zum Vorgehen nach [DIN18126] sehr lockere Lagerungen erzeugt werden. Leichte horizontale Bewegungen nahezu ohne Fallhöhe führen zu lockeren Lagerungen.

Quantitativ ist der tatsächliche Zusammenhang zwischen Rieselfparametern und Lagerungsdichte immer vom jeweiligen Versuchsmaterial und der gewählten Ausführung der Einriesel-Apparatur abhängig. In allen 3 Versuchständen werden Versuche mit trockenem Sand durchgeführt.

Der Sandeinbau am **Versuchsstand-C** erfolgt kontinuierlich durch die gleiche Person mit Hilfe eines Trichters. Zum Erreichen mitteldichter bis sehr dichter Lagerungen wird die Fallhöhe  $h_F$  entsprechend erhöht. Der Sand wird in kreisenden Bewegungen über die Grundfläche des Versuchstandes geführt. Dabei entstehen Lagendicken von ca. 1 cm. Die Fallhöhe  $h_F$  wird über den ge-

samten Einbauprozess konstant gehalten, indem der Trichter parallel zur entstehenden Sandoberfläche nach oben gehoben wird. Sand wird fortlaufend händisch nachgefüllt bis der Versuchsstand komplett gefüllt und leicht überhäuft ist. Die Herstellung einer planen Oberkante erfolgt analog zu vergleichbaren Laborversuchen durch vorsichtiges Abziehen an der Behälteroberkante. Die Rieselintensität wird bei dieser Variante nicht variiert. Über die Variation der Fallhöhe  $h_F$  zwischen 15 cm und 120 cm können Lagerungsdichten im Bereich von  $I_D = 0,50$  bis  $0,95$  erreicht werden.

Um geringere Lagerungsdichten zu erreichen muss der Trichterauslass zunächst verlängert und beim Einbau kontinuierlich im Kontakt mit der entstehenden Sandoberfläche bleiben. Durch leichte horizontale Bewegungen während des Sandeinbaus kann nach diesem Prinzip reproduzierbar eine lockere Lagerungsdichte im Bereich  $I_D = 0,20$  bis  $0,30$  erreicht werden. Wird der Trichterauslass in Anlehnung an den Versuch zur Herstellung einer lockersten Lagerung nach [DIN18126] aufgesetzt und lediglich langsam beim Befüllen nach oben gehoben, kann auch eine sehr lockere Lagerung im Bereich  $0,20 < I_D < 0,25$  hergestellt werden.

Für den **Versuchsstand-S** wird eine Rieseleinheit mit rechteckiger Grundfläche und durch ein Lochblech fest gewähltem Durchfluss  $DI$  genutzt. Die Fallhöhe  $h_F$  kann stufenlos eingestellt werden. Zur Rieseleinheit gehört ein Vorrats-trichter, in den ca. 15 l Sand gefüllt werden. Rieseleinheit und Vorrats-trichter sind über ein Stahlseil an einem elektrischen Seilhebezug befestigt und werden über eine Fernbedienung in der Höhe gesteuert. Der Seilhebezug ist über eine Laufkatze mit einer horizontalen Traverse verbunden und ermöglicht durch langsame Bewegungen in einer Achse den Einbau in horizontalen Lagen mit jeweils 2 cm Dicke. Wenn sich die Rieseleinheit an einem Rand des Materialbehälters befindet, wird Sand nachgefüllt. Die Fallhöhe wird in den eigenen Versuchen über den gesamten Einbauvorgang konstant gehalten und parallel zur Erhöhung der entstehenden Sandoberfläche nach oben gezogen.

Ergebnisse von Versuchen zur Ermittlung des Verhaltens dieses Rieselmoduls sind in Abbildung 5.10 veranschaulicht. Über die Steuerung der Fallhöhe ist ein Einbau in mitteldichter bis dichter Lagerung im Bereich  $I_D = 0,41$  bis  $0,50$  möglich. Für die durchgeführten Versuche im Rahmen der Versuchsstudie zur Fallgewichtsverdichtung wird einheitlich eine Fallhöhe  $h_F = 20$  cm gewählt.

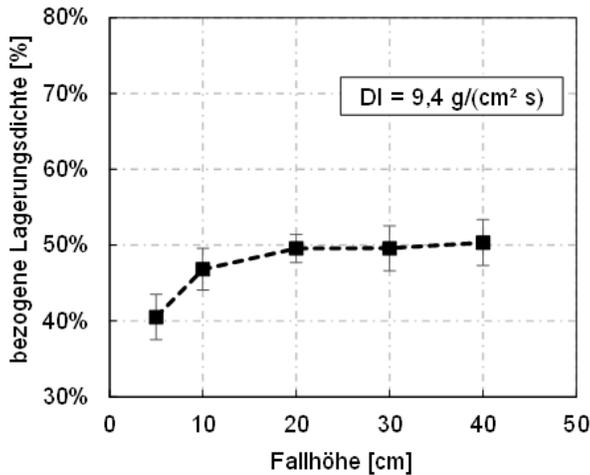


Abbildung 5.10 Einfluss der Fallhöhe  $h_F$  auf die bezogene Lagerungsdichte  $DI$  am Versuchsstand-S nach [KNU17]

Die für den **Versuchsstand-M** verwendete Rieseleinheit wurde bereits durch Al-Akel [AKE05] verwendet und besitzt eine Breite von ca. 96 cm mit einer Reihe von Löchern mit einem Durchmesser von 10 mm und einem Lochabstand von 5 mm. Die Rieseleinheit kann an der Unterseite und oberhalb verschlossen werden und ist über einen Bajonettverschluss mit dem Zwischensilo verbunden, in das bis zu 100 l Sand gefüllt werden kann. Zwischensilo und Rieseleinheit sind an der Kette eines manuellen Seilhebezuges befestigt und werden über eine Laufkatze eines Portalkranes bewegt. Dies ermöglicht es, alle Bereiche des Versuchsträgers in verschiedenen Höhen anzufahren. Die Fallhöhe wird durch ein Anheben der Rieseleinheit parallel zur Erhöhung der entstehenden Sandoberfläche über den gesamten Einbauvorgang konstant gehalten. Zum Abschluss der Arbeiten wird eine gleichmäßige, glatte Oberfläche durch ein Abziehen des gehäuften Sandes an der Oberseite des gefüllten Materialbehälters erreicht.

Das Prinzip zur Herstellung mitteldichter bis dichter Lagerungen am Versuchsstand-M ist schematisch in Abbildung 5.11a) für Halbmodell-Versuche und in Abbildung 5.11b) für Versuche im ebenen Verformungszustand dargestellt. Der Sand wird in horizontalen Schichten mit jeweils 2 cm Dicke eingebracht.

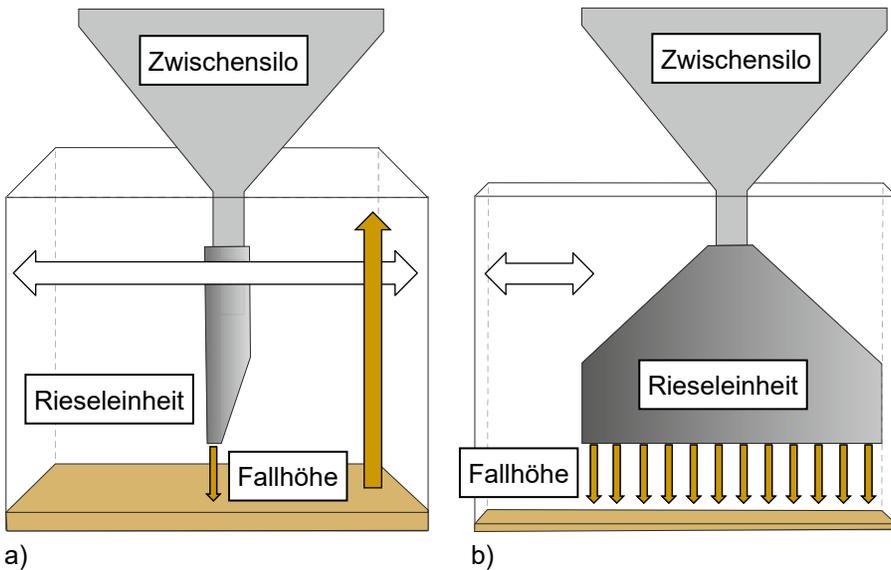


Abbildung 5.11 Schematische Darstellung der Methoden zum Einbau von trockenem Sand in den Versuchsstand-M: a) als Halbmodell-Versuchsstand und b) in ebenem Verformungszustand (Abbildung zeigt Basisschritt, in weiterem Schritt wird die Rieseleinheit zum Ausgleich der Randbereiche nur halbseitig geöffnet)

Für Versuche im ebenen Verformungszustand wird die Rieseleinheit horizontal um 90 Grad gedreht. Das Prinzip für den Einbau von Proben in mitteldichter bis dichter Lagerung ist in Abbildung 5.11b) veranschaulicht. Schrittweise erfolgt beim Einrieseln ein Versetzen bei abwechselnder Öffnung der gesamten Breite der Rieselvorrichtung bzw. Öffnung der halben Breite. Der Sand wird in horizontalen Lagen mit jeweils 5 cm Mächtigkeit eingerieselt.

Ergebnisse von Versuchen zur Ermittlung des Systemverhaltens sind in Abbildung 5.12 zu sehen. Über eine Steuerung der Fallhöhe ist ein Einbau in mitteldichter bis sehr dichter Lagerung im Bereich  $0,40 < I_D < 0,90$  möglich.

Um eine lockere oder sehr lockere Lagerungsdichte zu erreichen, wird unter das Zwischensilo ein starres Rohr mit einem Durchmesser  $d_{\text{Rohr}} = 70$  mm befestigt. Beim Sandeinbau wird Kontakt mit der entstehenden Sandoberfläche gehalten. Durch leichte horizontale Bewegungen während des Sandeinbaus kann nach diesem Prinzip reproduzierbar eine lockere Lagerungsdichte im Be-

reich  $I_D = 0,20$  bis  $0,30$  erreicht werden. Wird der Trichterauslass in Anlehnung an den Versuch zur Herstellung einer lockersten Lagerung nach DIN 18126 aufgesetzt und langsam beim Befüllen nach oben gehoben, lässt sich eine sehr lockere Lagerung im Bereich  $I_D < 0,20$  herstellen. Zum Abschluss der Arbeiten wird eine gleichmäßige glatte Oberfläche durch ein Abziehen des gehäuften Sandes an der Oberseite des gefüllten Materialbehälters erreicht.

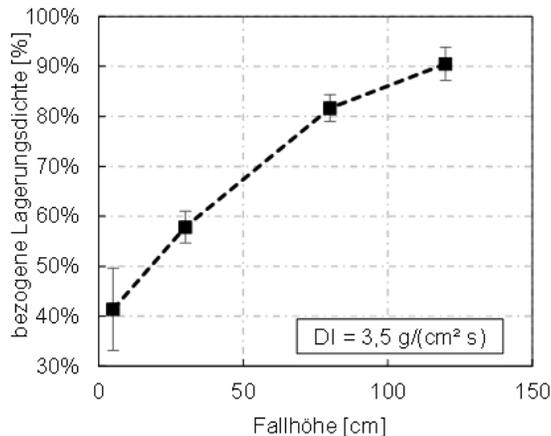


Abbildung 5.12 Einfluss der Fallhöhe  $h_F$  auf die bezogene Lagerungsdichte  $I_D$  beim Einrieseln nach dem Prinzip gemäß Abbildung 5.11

## 5.6 Kontrolle der Probenhomogenität

### 5.6.1 Grundlagen

Eine Kontrolle der Probenhomogenität wird in geotechnischen Versuchen häufig über Messungen der Lagerungsdichte vorgenommen. Man unterscheidet bei der Dichtemessung zwischen direkten Methoden wie z. B. Bodendensitometer, Ausstechzylinder oder Ersatzverfahren, bei denen die Materialdichte direkt über Wiegen und Volumenermittlung an einer Probe bestimmt wird. Bei indirekten Methoden wird zunächst eine andere Messgröße erfasst, die in bekannter Beziehung zur Lagerungsdichte steht. Varianten der indirekten Dichtemessungen sind Ramm- oder Drucksondierungen sowie Isotopen- oder elektrische Messsonden. Bei der Verwendung von Einrieselmethoden zur

Herstellung von Probekörpern können zur Kontrolle der Probenhomogenität wie in Al-Akel [AKE05] auch gesonderte Probenbehälter für eine spätere direkte Dichtebestimmung eingerieselt werden.

Die Trockenrohdichte des Versuchsmaterials weist mit  $1,495 \text{ g/cm}^3$  bei lockerster Lagerung und  $1,763 \text{ g/cm}^3$  bei dichtester Lagerung eine relativ geringe Bandbreite auf. Dies stellt für alle genannten Verfahren eine Herausforderung an Qualität der Probengewinnung bzw. Messdurchführung dar. Verlässliche Aussagen zur Dichteverteilung sind nur mit ausreichend hoher Anzahl an Messpunkten bzw. Probekörpern möglich. Dies wird jedoch durch die geringen Abmessungen erschwert.

Eine Kontrolle der Qualität nach dem Einbau in den Versuchsständen ist qualitativ für ein geübtes Auge visuell hinter den Sichtbereichen der Versuchsstände möglich. Unterschiede in der Lagerungsdichte können besonders bei lokalen Abweichungen meist in Form kleinerer horizontaler Schichtungen sehr gut erkannt werden. Nachfolgende Abbildung 5.13 zeigt Aufnahmen der Textur unterschiedlich dicht gelagerter Sande, aufgenommen am Versuchstand-C.



a)

b)

c)

Abbildung 5.13 Textur vom Versuchssand in 3 Lagerungsdichten am Versuchstand-C: a) Versuch EDZ\_02  $I_{D,0} = 0,22$ , b) Versuch EDZ\_01  $I_{D,0} = 0,52$  und c) Versuch EDZ\_03  $I_{D,0} = 0,94$

Eine verbreitete und anerkannte Form zur Überprüfung der Probenhomogenität an Modellversuchen ist der Einsatz von Drucksondierungen. Neben der Ermittlung der Dichte wird vor allem die Gleichmäßigkeit einer Dichteverteilung geprüft. Eine quantitative Bewertung der Sondierergebnisse in Versuchsbehältern ist nur unter sorgfältiger Berücksichtigung von Randeinflüssen möglich. Weitere Erläuterungen hierzu sind u.a. durch Vogelsang [VOG17]

zu finden. In den eigenen Arbeiten wurde jedes verwendete Einrieselverfahren in Vorstudien gem. Kap. 5.5 untersucht. Eine quantitative Bestimmung der erzielbaren Dichte kann in Vorstudien durch eine beliebig hohe Anzahl von Proben bzw. Erhöhung der Probenmengen die Qualität einer Einbaumethode zuverlässiger bewertet werden. Wenn, wie in den eigenen Arbeiten, ausschließlich Einrieselverfahren zum Einsatz kommen, kann auf eine Kontrolle der Probenhomogenität in den Versuchsständen weitestgehend verzichtet werden. Voraussetzung ist, dass beim Einbau des Versuchssandes mit den in Kap. 5.5 gezeigten Einrieselverfahren eine konstante Fallhöhe  $h_F$  sichergestellt wird und mögliche Störeinflüsse ausgeschlossen werden. Kontrollen der Probenhomogenität wurden lediglich an Einzelversuchen durchgeführt. Nachfolgend wird auf die Methodik und auf die Ergebnisse von Sondierungen mit einer Rammsonde vom Typ *Panda* am Versuchsstand-M eingegangen. Ziel der Untersuchungen ist es, zu prüfen, ob die Annahme einer in engen Grenzen homogenen Dichte gerechtfertigt ist.

### 5.6.2 Verwendete Sondiermethode

Die Sonde Typ *Panda* (nachfolgend: *Panda*-Sonde) der Firma *SOL SOLUTIONS* ist eine tragbare Rammsonde mit variabler Rammenergie. In Frankreich wird die Sonde häufiger zur Abgrenzung von Bodenschichten in Baugrunduntersuchungen sowie zur Verdichtungskontrolle eingesetzt. Mit der Einführung der französischen Norm [AFN00] im Jahr 2000 wurde die Vorgehensweise zur Verdichtungskontrolle erstmals standardisiert. Das Messverfahren wird durch den Hersteller der Sonde zur Erhöhung der Messgenauigkeit und für eine vereinfachte Anwendung zur computergestützten Verdichtungskontrolle und Baugrunduntersuchung weiterentwickelt. Die Sonde wird mit Sondiergestänge für eine maximale Tiefe von 5 m geliefert. Grenzen in der Anwendung ergeben sich bei der Untersuchung stark bindiger Böden durch die erhöhte Mantelreibung sowie bei nichtbindigen Böden mit einem Größtkorn von 45 mm nach Blume [BLU08] bzw. 70 mm nach Angaben des Herstellers [SOL].

Im Rahmen der eigenen Arbeit wird die Sonde in der Entwicklungsstufe *Panda 2* verwendet. Der wesentliche Aufbau dieser Variante ist in Abbildung 5.14 schematisch dargestellt.

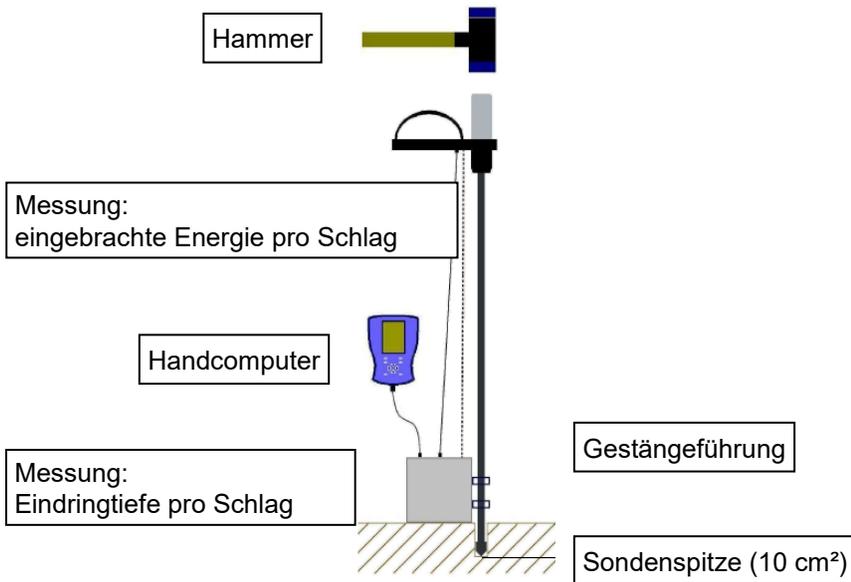


Abbildung 5.14 Schematische Darstellung zum Aufbau der verwendeten *Panda*-Sonde von *SOL SOLUTION* [SOL]

Die *Panda*-Sonde wird mit einem Hammer in den Boden getrieben. Dabei wird je Schlag über ein Bandmaß (Zahnriemen) die Eindringtiefe  $e'$  aufgenommen. Simultan wird die eingebrachte Energie über einen Amboss (Schlaghaube) mit integriertem Dehnmessstreifen erfasst und über einen angeschlossenen Handcomputer als dynamischer Spitzenwiderstand  $q_c$  umgerechnet. Die Berechnung des dynamischen Spitzenwiderstandes  $q_c$  erfolgt nach Gl. 5.1 aus der in das System eingebrachten Energie  $E_n$  in kJ, der Fallmasse des Hammers  $m_n$  in kN, der Querschnittsfläche der Sondenspitze  $A_n$  in  $\text{m}^2$ , der plastischen Eindringtiefe pro Schlag  $e'$  sowie der Gesamtmasse von Amboss, Sondiergestänge und Sondenspitze  $P_n$  in kN.

$$q_c = E_n \frac{m_n}{A_n e' (m_n + P_n)} \quad (5.1)$$

Dabei werden für die Anwendung von Gl. 5.1 folgende Annahmen vorausgesetzt:

- Es liegen ideal-plastische Eigenschaften des Untergrundes während der Rammsondierung vor.

- Die gesamte eingebrachte Rammenergie wird auf die Sondierspitze übertragen.
- Der Mantelreibungseinfluss zwischen dem Sondiergestänge und dem anstehenden Boden ist zu vernachlässigen.

Für den dynamischen Spitzenwiderstand sind für einen homogenen Boden mit konstanter Lagerungsdichte näherungsweise konstante Messwerte zu erwarten. Durch die Auflockerung beim Einschlagen der Sonde steigen die Messwerte bis Grenztiefe von ca. 10 cm bis 30 cm an. Diese Grenztiefe ist abhängig von Bodenart und –zustand und wird in der Norm [AFN00] als Grenztiefe  $z_c$  bezeichnet und bei Prüfungen des Verdichtungsgrades berücksichtigt.

Eindringtiefe  $e'$  und der dynamische Spitzenwiderstand  $q_c$  werden fortlaufend auf dem Handcomputer angezeigt und gespeichert.

In Abhängigkeit des zu untersuchenden Untergrundes kann zwischen 3 Spitzen mit Nennquerschnittsflächen von 2 cm<sup>2</sup>, 4 cm<sup>2</sup> und 10 cm<sup>2</sup> gewählt werden. Da für den trockenen Versuchssand nur geringe Spitzenwiderstände zu erwarten sind, wird mit der 10 cm<sup>2</sup> Spitze in den Versuchen gearbeitet. Die Energie muss so gewählt werden, dass je Hammerschlag eine Eindringtiefe zwischen 0,1 cm und 2,0 cm erreicht wird. Nach Versuchsdurchführung werden die Messdaten vom Handcomputer auf einen PC übertragen.

### 5.6.3 Ergebnisse der Sondierungen

Abbildung 5.15 zeigt exemplarisch die Ergebnisse von zwei Sondierungen im Versuchsstand-M in der Konfiguration für Versuche im ebenen Verformungszustand. Abbildung 5.15a) veranschaulicht die Lage der Sondierpunkte in der Draufsicht. Abbildung 5.15b) stellt den Sondierwiderstand in Abhängigkeit der Tiefe dar. Der Einbau der Probe erfolgt nach dem Verfahren gem. Abbildung 5.11b) bei einer Fallhöhe  $h_F$  von 20 cm.

Blume [BLU08] und die Norm [AFN00] weisen darauf hin, dass bis in eine Grenztiefe  $z_c$  („kritische Tiefe“) Messwerteinflüsse durch eine oberflächennahe Auflockerung durch die Sonde entstehen. Unterhalb dieser Tiefe verlaufen die Messwerte bei homogenem Bodenaufbau vertikal. Das Material wird hier nicht mehr aufgelockert. Die Grenztiefe  $z_c$  ist demnach abhängig von Bodenart- und zustand. In Beispielen nach Blume [BLU08] werden Grenztiefen in Tiefen von 20 cm bis 30 cm unter der Geländeoberkante ausgewiesen.

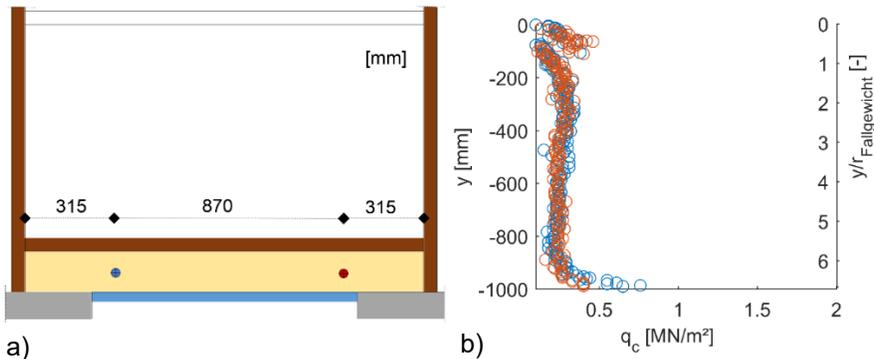


Abbildung 5.15 Ergebnisse von Sondierungen mit der Panda Sonde im Versuchsstand-M in der Konfiguration ebener Verformungszustand: a) Lage der Sondierungen in der Draufsicht, b) Sondierwiderstände  $q_c$  nach dem Sandeinbau ( $I_{D,0} = 0,5$ )

Die Sondierergebnisse in Abbildung 5.15b) zeigen für den Spitzenwiderstand  $q_c$  einen unstetigen Messwertverlauf bis in eine Tiefe von ca. 20 cm. Demnach ist an der Oberfläche des trockenen Versuchssandes nahezu kein Spitzenwiderstand  $q_c$  vorhanden, was auch den Eindrücken bei der Versuchsdurchführung entspricht. Bis in die Grenztiefe von ca. 20 cm nimmt der Widerstand unstetig aber erkennbar auf bis zu  $0,2 \text{ MN/m}^2$  zu. Unterhalb dieser Tiefe stellt sich im Profil ein vertikaler Verlauf bis zur Endtiefe der Sondierung von ca. 100 cm mit Messwerten um  $0,2 \text{ MN/m}^2$  ein. Erst am unteren Rand der Materialbefüllung nehmen die Messwerte wieder zu. Die Ergebnisse belegen, dass für die verwendete Einbaumethode auch mit der vorgestellten Sondiermethode eine Probenhomogenität bestätigt werden kann.

# 6 Versuche mit statischer Auflast

## 6.1 Versuchsprogramm und Ziele

Das Versuchsprogramm mit statischer Auflast umfasst 8 Versuche am Versuchsstand-C und 3 Versuche am Versuchsstand-M. Folgende Versuchskonfigurationen mit statischer Auflast sind vorgesehen:

- Kompressionsversuche am Versuchsstand-C mit Variation der Lagerungsdichte
- Streifenfundamentversuche am Versuchsstand-C in lockerer, mitteldichter und sehr dichter Lagerung
- Streifenfundamentversuche sowie (Halb-)Kreisfundamentversuche am Versuchsstand-M in mitteldichter Lagerung

Die folgenden zwei Tabellen geben einen Überblick mit den wichtigsten Merkmalen zu den Versuchen mit statischer Auflast am Versuchsstand-C und am Versuchsstand-M. Eine ausführliche Beschreibung der Versuchsanordnung und Instrumentierung findet sich in Kap. 5. Die Angabe zur Steuerung bezeichnen mit „Kraft“ eine auflast- bzw. kraftgesteuerte und mit „Weg“ eine weggesteuerte Laststeuerung.

Tabelle 6.1 Versuche mit statischer Auflast am Versuchsstand-C

Versuchsart	Name (intern)	Datum Versuch	$e_0$ [-]	$I_{D,0}$ [-]	Steuerung
Kompression	K_008	30.11.2016	0,51	0,92	Kraft
	K_012	28.12.2016	0,61	0,52	Kraft
	K_013	28.12.2016	0,51	0,92	Kraft
	K_014	28.12.2016	0,68	0,25	Kraft
	UC_002	29.06.2017	0,60	0,58	Kraft
	UC_003	29.06.2017	0,61	0,52	Kraft
Streifen- fundament	EDZ_01	01.12.2016	0,61	0,52	Weg
	EDZ_02	01.12.2016	0,69	0,22	Weg
	EDZ_03	01.12.2016	0,51	0,92	Weg

Tabelle 6.2 Versuche mit statischer Auflast am Versuchsstand-M

Versuchsart	Name (intern)	Datum Versuch	$e_0$ [-]	$I_{D,0}$ [-]	Steuerung
Streifen- fundament	EDZ_300R	15.12.2016	0,61	0,5	Kraft-
Kreisfundament	HR_300	21.12.2016	0,61	0,5	Kraft -
	HR_435	27.06.2017	0,61	0,5	Kraft -

Mit den Kompressionsversuchen am Versuchsstand-C werden folgende Ziele verfolgt:

- Können mit der DIC-Methode zuverlässig Verschiebungen bzw. Setzungen von Lasteinheit und Boden am Versuchsstand-C erfasst werden. Hierzu sind vergleichende Messungen zur Setzung der Lasteinheit einzubeziehen.
- Es ist zu prüfen, welchen Einfluss die Acrylglascheibe auf das Ergebnis der DIC-Messung insbesondere zu Bodenverformungen hat.
- Ergebnisse volumetrischen Dehnungen sind an den Messungen zur mittleren Setzung der Probe zu bewerten. Dabei ist zu prüfen, inwieweit eine Anwendung von Glättungsfiltern notwendig oder sinnvoll in der Ermittlung der volumetrischen Dehnungen ist.
- Im Hinblick auf Versuche am Versuchsstand-M ist zu prüfen, welche Genauigkeit in Form von Kameraauflösung bzw. DIC-Evaluierung notwendig bzw. ausreichend ist.

Folgende Ziele werden mit den Streifenfundamentversuchen am Versuchsstand-C verfolgt:

- Zu erfassen sind Bodenverformungen im Hinblick auf lokalen Scheerungen bis zur Ausbildung von Scherbändern. Hierzu sind Verschiebungsfelder und Dehnungsfelder zu erstellen. Dabei ist zu untersuchen, inwieweit sich mögliche Scherbereiche über die Ergebnisgrößen der Verschiebungen, Scherdehnung und volumetrische Dehnung identifizieren und vergleichen lassen.
- Es ist zu prüfen, inwieweit sich Besonderheiten im Verformungsverhalten zwischen Sand in lockerer, mitteldichter und dichter Lagerung eindeutig zuordnen lassen.

- Es ist zu prüfen, inwieweit eine Anwendung von Glättungsfiltern sinnvoll oder notwendig in der Bewertung der Scherverformungen ist.

Am Versuchsstand-M werden mit Streifenfundamentversuchen folgende Ziele verfolgt:

- Es ist zu prüfen, inwieweit sich aus dem größeren ROI bei gleicher Kameraauflösung Grenzen in der DIC-Auswertung ergeben.
- Darüber hinaus ist zu prüfen, ob sich durch die größeren Abmessungen des Streifenfundamentes lokale Besonderheiten im Nahbereich identifizieren lassen.

Folgende Zielstellung wird am Kreisfundamentversuch am Versuchsstand-M verfolgt:

- Es sind v. a. Gemeinsamkeiten und Unterschiede zu den Streifenfundamentversuchen am Versuchsstand-M zu identifizieren. Hierbei ist das Verformungsverhalten des Sandes anhand der Verschiebungs- und Dehnungsfelder darzustellen.

## 6.2 Kompressionsversuche

### 6.2.1 Lastregime

Zur Beantwortung der genannten Fragestellungen werden exemplarisch die Ergebnisse der Kompressionsversuche K\_012 und UC\_003 verwendet. Beide Versuche werden an Sand in mitteldichter Lagerung durchgeführt ( $e_0 = 0,61$ ,  $I_{D,0} = 0,52$ ). Wesentliche Angaben zu den Versuchen werden nachfolgend aufgelistet:

- Laststufen [ $\text{kN/m}^2$ ]: 20, 40, 80, 160, 320, 640, 1.000
- Zeit je Laststufe: mind. 2 min (K12) bzw. 20 min (UC\_003)
- Kamera 1: *Olympus* OM-D E-M10 (16 MP) / Kurzbezeichnung: OLY  
Konfiguration: 11,7 Pixel/mm, 0,085 mm/Pixel, 1 Bild pro Minute
- Kamera 2 (nur UC\_003): *PCO* DMAX HD+ (2,7 MP) / Kurzbezeichnung: PCO  
Konfiguration: 4,71 Pixel/mm, 0,21 mm/Pixel, 1 Bild pro Sekunde

## 6.2.2 Verschiebung der Lasteinheit

Anhand der Setzung der Lasteinheit sollen u.a. die Plausibilität der DIC-Kalibrierung und die Vertikalität der Lasteinheitsführung geprüft werden. Für eine Erfassung der Verschiebung an der Lasteinheit wurde ein Specklemuster auf die Vorderseite des Lastbügels aufgetragen (s. Abbildung 5.13).

Die Ergebnisse der Setzungsmessung werden nachfolgend exemplarisch für den Versuch K\_012 dargestellt. Aus der DIC-Messung wurden zwei Messpunkte jeweils mittig auf zwei seitlichen ROI der Lasteinheit gewählt. Zusätzlich werden Ergebnisse eines mittig auf der Lasteinheit angeordneten Wegaufnehmers (Bezeichnung: „Messung UP25“) abgebildet.

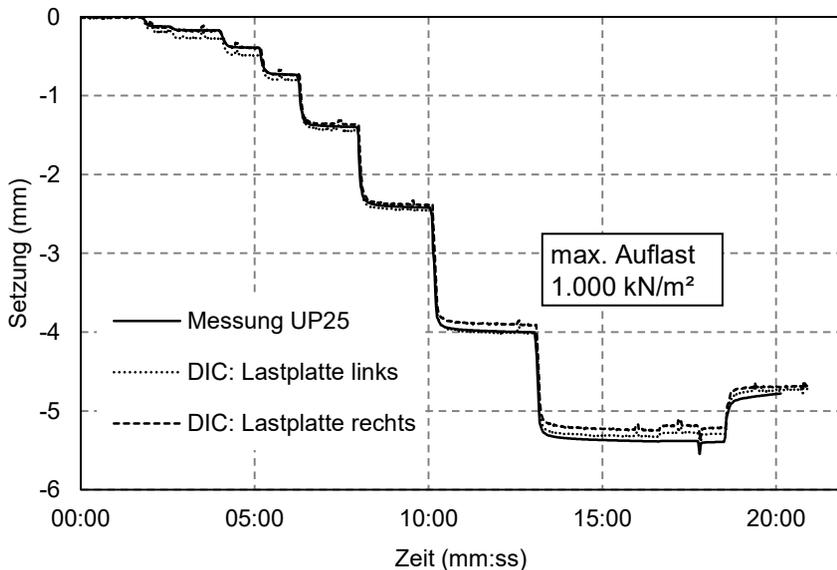


Abbildung 6.1 Gegenüberstellung der Messergebnisse der Setzung (Wegaufnehmer UP25/physisch) bzw. Gesamtverschiebung (DIC/optisch) auf der linken und rechten Seite der Lasteinheit am Versuch K\_012

Die Ergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung zwischen der Messung des Wegaufnehmers und der DIC-Auswertung. Die maximale Setzung betrug gemäß Wegaufnehmer -5,55 mm. In der DIC-Auswertung wurden maximale Verschiebungen von links -5,46 mm und rechts -5,37 mm

ermittelt. Die Ergebnisse zeigen somit eine sehr gute Übereinstimmung zwischen beiden Messverfahren.

### 6.2.3 Verschiebung des Bodens

Verschiebungen im Boden bei lokaler Einleitung einer Auflast variieren innerhalb einer Probe und somit auch innerhalb eines ROI. Um zu bewerten, welche Evaluationseinstellungen für eine DIC-Messung vorteilhaft sind, bieten sich Studien z. B. in Anlehnung an Nazhat [NAZ13] mit gezielter digitaler Verschiebung innerhalb eines ROI an. Nazhat [NAZ13] führt im Ergebnis seiner Studie mit *GeoPIV* aus, dass bei Facettengrößen größer 30 Pixeln keine Fehler in der Verschiebungsermittlung auftreten. Bei Facettengrößen kleiner 30 Pixeln nahm die Standardabweichung für horizontale und vertikale Verschiebungsbeträge auf i. M. 0,2 % bei 20 Pixel Facetten auf i. M. bis zu 1,1 % bei 9 Pixel Facetten zu.

Im Rahmen der eigenen Arbeit wird i. d. R mit Facetten von mind. 27 Pixeln gearbeitet. Somit ist nicht von einem nennenswerten Einfluss dieser Evaluierungsmöglichkeiten der DIC-Berechnung auszugehen. Es scheint entscheidender, mögliche Einflüsse durch optische Brechung hinter einer Sichte Ebene zu kennen und falls erforderlich zu berücksichtigen.

Deutlichere Einflüsse aus der DIC-Evaluierung bzw. Größe von Facetten und Gridabstand ergeben sich bei der Ermittlung von Dehnungen mit der DIC-Methode. Aus diesem Grund werden gesonderte Studien in Kap. 6.2.4 vorgestellt.

Für Arbeiten mit *GeoPIV* finden sich hohe Anforderungen an die Auflösung der Digitalkamera für DIC-Messungen. In diesem Zusammenhang wird geprüft, ob sich die geringe Auflösung der Hochgeschwindigkeitskamera negativ gegenüber den Messungen mit der Systemkamera auswirkt. Dabei wurden ähnliche Abstände zur Kamera sowie eine ähnliche ROI gewählt.

Abbildung 6.2a) veranschaulicht die Verschiebung des Bodens in vertikaler Richtung (y-Richtung) für einen vertikalen Schnittlinie in der Mitte der sichtbaren Probenseite gemäß Abbildung 6.2b). Die Messung erfolgte bei Aufbringung der maximalen Auflast von 1.000 kN/m<sup>2</sup>. Der Vergleich der Messergebnisse zeigt für beide Kameras eine sehr gute Übereinstimmung. Die vertikale Verschiebung entlang des Pfades nimmt nahezu linear ab und deutet auf eine

maximale Setzung von 5,5 mm an der Probenoberkante und keiner Setzung an der Unterkante der Probe.

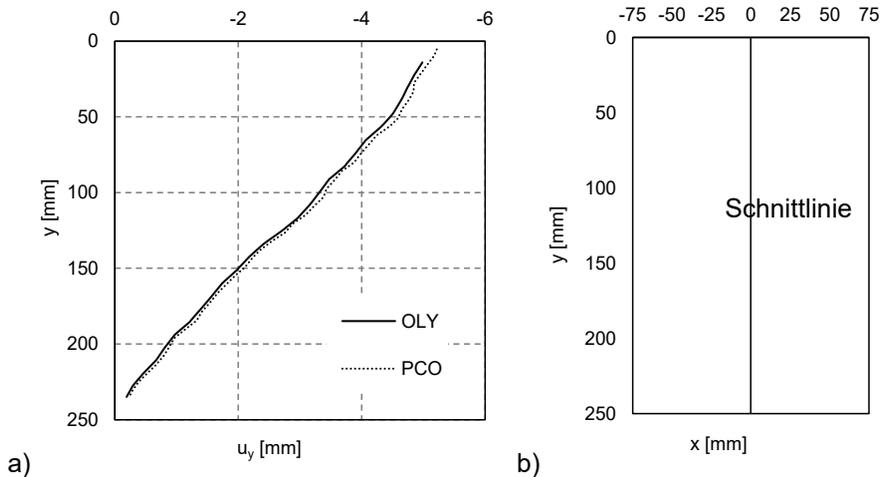


Abbildung 6.2 a) Darstellung der Vertikalverschiebungen entlang eines vertikalen Schnittes, Versuch UC\_003, Auflast 1.000 kN/m<sup>2</sup>, b) Lage der Schnittlinie

Für weiterführende Darstellungen von Verschiebungsfeldern wurden die DIC-Ergebnisse der *PCO* Kamera verwendet. Nach einem Einlesen der Messdaten für die Stützstellen wird in *Matlab* eine Interpolation auf 1000 x 1000 Werte durchgeführt. Abbildung 6.3 zeigt die DIC-Ergebnisse der Verschiebung zum Zeitpunkt der maximalen Auflast von 1.000 kN/m<sup>2</sup>. Die Werte beziehen sich dabei immer auf die Änderung gegenüber dem Ausgangszustand zu Messbeginn. Bei den Contourplots orientiert sich die Farbwahl einheitlich an den Koordinatenachsen mit rot für negative Wertebereiche und grün für positive Wertebereiche. Ein gelber Farbton steht für einen Verschiebungsbetrag gleich Null.

Die Darstellungen zeigen, dass die hauptsächlichen Verschiebungen in  $y$ -Richtung auftreten und an der Probenoberseite bei ca. 5,2 mm liegen. Die Messwerte an der Probenunterseite tendieren gegen 0,0 mm. Zudem ist zu erkennen, dass die vertikale Verschiebung über die Probenbreite nicht konstant ist. Die Verschiebungen an den Seitenrändern sind geringer. Dies ist auf Reibung zwischen Boden und den Teflonplatten in den Randbereichen zurück zu führen.

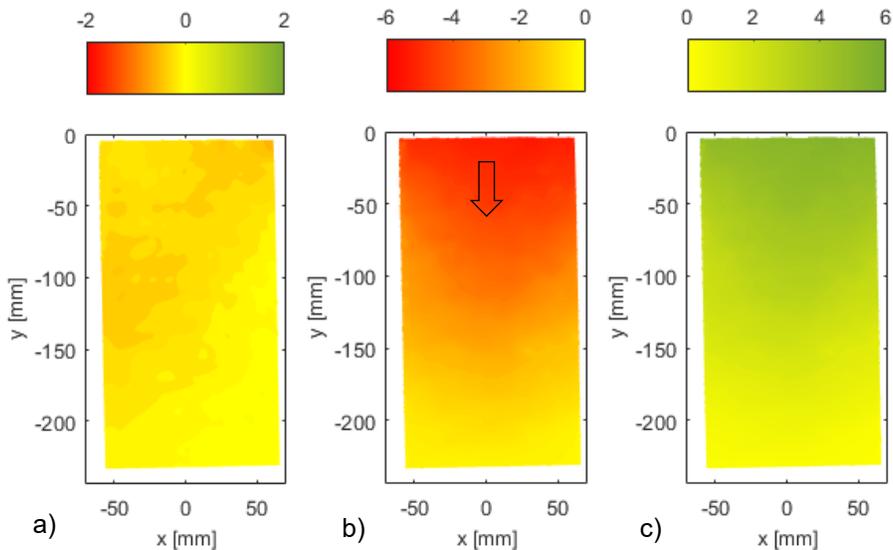


Abbildung 6.3 Verschiebungsfelder für a)  $u_x$  und b)  $u_y$  und c)  $|u|$  in mm, Versuch UC\_003, Auflast  $1.000 \text{ kN/m}^2$

Es hat sich gezeigt, dass sich bei den DIC-Messungen von Bodenverschiebungen für diesen Aufbau Differenzen zur maximalen Verschiebung gegenüber den Messungen zur Setzung der Lasteinheit ergeben. Beim Versuch UC\_003 wurde eine maximale Setzung an der Lasteinheit von  $6,5 \text{ mm}$  ermittelt. Die DIC-Messung weist für den Boden ein um ca.  $1 \text{ mm}$  kleinere maximale Verschiebung an der Probenoberseite aus. Diese Differenzen werden auch in anderen Arbeiten z. B. zur Pfahlrammung nach Vogelsang [VOG17] festgestellt. Für diesen Versuchsaufbau sind diese Differenzen u. a. mit der Lichtbrechung v. a. an der Oberkante der Acrylglascheibe zu erklären. Eine Studie zur optischen Brechung am Versuchsstand-C in Anhang B dokumentiert diese Besonderheit. Bei sorgfältiger Kalibrierung der Methode weisen die DIC-Messungen auch hinter einer Acrylglascheibe eine hohe Genauigkeit auf.

### 6.2.4 Dehnungen des Bodens

Softwarelösungen für die DIC oder die PIV-Methode bieten häufig Möglichkeiten zur Ermittlung von Dehnungen an. Die Grundlagen für *ISTRA4D* wurden hierzu im Kap. 4.5 erläutert. An Veröffentlichungen zu DIC-Messungen an geotechnischen Versuchen ist festzustellen, dass bei einer Angabe von

Dehnungen häufig qualitativ mit Contourplots gearbeitet wird bzw. auf die Größe der Dehnungsbeträge nicht näher eingegangen wird.

Nachfolgende Abbildungen zeigen die DIC-Ergebnisse der Dehnungen zum Zeitpunkt der maximalen Auflast von 1.000 kN/m<sup>2</sup>. Zu diesem Zeitpunkt betrug die Setzung der Lasteinheit im Versuch K\_012 ca. 5,5 mm und im Versuch UC\_003 ca. 6,5 mm. Unter Berücksichtigung einer Probenhöhe von 244 mm entspricht dies einer mittleren Dehnung in y-Richtung von 2,25 % (K\_012) bzw. 2,66 % (UC\_003). Veranschaulicht werden die DIC-Ergebnisse zur Dehnung  $\varepsilon_y$  zunächst entlang eines Schnittes gemäß Abbildung 6.2b). Es wird darauf hingewiesen, dass sich am Versuchstand-C die Ermittlung der vertikale Dehnung als Mittelwerte in Horizontalscheiben anbietet, da für die theoretische Lösung die Breite des Behälters im Kompressionsversuch keine Rolle spielt. In allen anderen weiteren Versuchen mit lokaler Lasteinleitung ist dieses Vorgehen nicht möglich. Aus Gründen der Vergleichbarkeit wurde daher nachfolgend die Darstellung von Dehnungen entlang eines Schnittes verwendet.

In Abbildung 6.4 werden Ergebnisse zu  $\varepsilon_y$  aus einer manuellen Berechnung („Handrechnung“) auf Grundlage der DIC-Ergebnisse zur Lage bzw. Verschiebung von Facetten mit den von *ISTRA4D* generierten Ergebnissen zur Dehnung gegenübergestellt. Zur Orientierung wird die mittlere Dehnung in y-Richtung als vertikale Linie angegeben. Bei der Handrechnung wurde die Position für jede Facette berücksichtigt (Bezugslänge = Gridabstand = 27 Pixeln). Die Auswertung in *ISTRA4D* erfolgte für Facetten mit einer Seitlänge von 39 Pixeln.

Ein Vergleich beider Graphen ist nur bedingt möglich, da die Dehnungen an unterschiedlichen Positionen entlang des vertikalen Pfades ermittelt wurden. Beide Graphen besitzen jedoch eine gute Übereinstimmung bei einem ähnlich un stetigen Verlauf mit deutlicheren Extremen bei den *ISTRA4D* Ergebnissen. Ein weiter Grund für die Abweichungen ist in dem Berechnungsprinzip für Dehnungen in *ISTRA4D* zu suchen (s. Kap. 4.5). Neben der Berücksichtigung der Lage der Mittelpunkte der Facetten zueinander, wird in *ISTRA4D* auch die Verzerrung einer Facette berücksichtigt.

Ein im Anhang D dargestellter Vergleich von 3 Verfahren zur Ermittlung von Dehnungen nach Gl. 4.3, 4.4 und 4.5 führte für die Messung zu nahezu identischen Ergebnissen, da nur relative kleine Dehnungsbeträge ermittelt wurden.

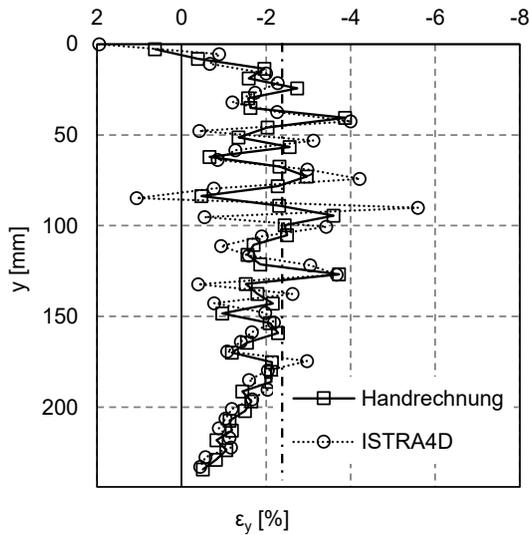


Abbildung 6.4 Dehnung des Bodens in y-Richtung am Versuch K\_012 entlang eines vertikalen Schnittes gemäß Abbildung 6.2b), Gegenüberstellung einer manuellen Berechnung aus den Verschiebungen („Handrechnung“) und einer automatisierten Berechnung aus *ISTRA4D*

Nachfolgend werden für die vertikalen Dehnungen bei Variation vom Abstand der Stützstellen (Grid-abstand) sowie bei unterschiedlichen Kameraauflösungen überprüft. Tabelle 6.3 gibt einen Überblick zu den betrachteten DIC-Korrelationen für den Versuch UC\_003. In der weiteren Auswertung bspw. die Kurzform PCO\_Set\_01 für die Korrelation Set 01 von Aufnahmen der PCO Kamera verwendet. Abbildung 6.5a) stellt die Ergebnisse für  $\varepsilon_y$  aus DIC-Auswertungen mit der PCO Kamera bei Variation des Gridabstands gegenüber. Abbildung 6.5b) vergleicht die Dehnungsergebnisse von Auswertungen der beiden eingesetzten Kameras entsprechend den Korrelation OLY\_Set\_00 und PCO\_Set\_01. Bezogen auf das reale Längenmaß führen diese beiden Korrelationen zu ähnlich großen Facetten bzw. Abständen der Stützstellen.

Abbildung 6.5a) zeigt einen deutlichen Einfluss des Gridabstands auf die Dehnungsergebnisse. Für die DIC-Korrelation mit geringstem Gridabstand ergeben sich demnach besonders unstetige Dehnungsergebnisse. Dies deutet darauf hin, dass sich aus dem Kompressionsvorgang im Sand bei genauer Betrachtung lokal stark schwankende Dehnungsbeträge ergeben. Die Standardabweichungen  $\sigma$  der drei Ergebnisreihen liegen bei 0,32 für PCO\_Set\_00, 0,67 für PCO\_Set\_01 und 1,13 für PCO\_Set\_02.

Tabelle 6.3 DIC-Korrelationen für den Versuch UC\_003 mit Angabe der Größe für Facetten und Abstand Stützstellen

Kamera	Set DIC	Größe Facette		Abstand Stützstellen	
		Pixel	mm	Pixel	mm
Olympus (OLY)	00	149	12,5	100	8,4
	00	197	41,8	116	24,6
PCO	01	59	12,5	40	8,5
	02	39	8,3	27	5,7

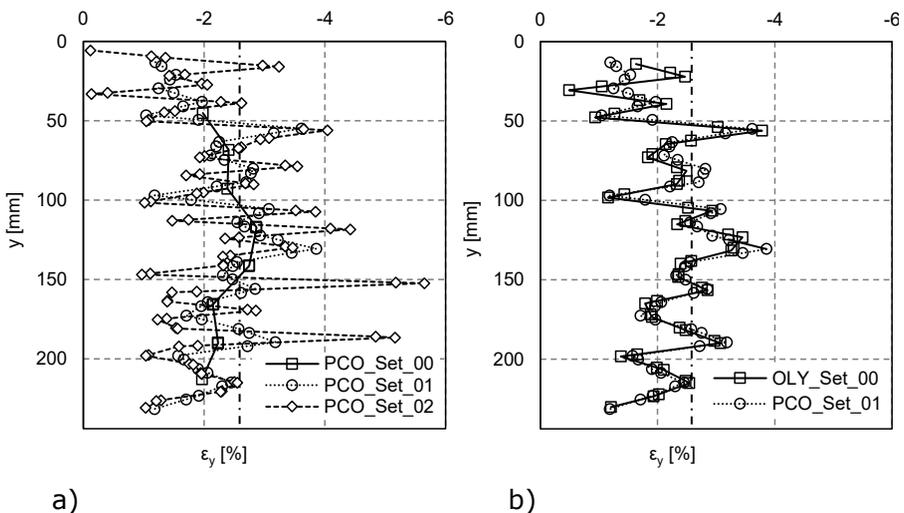


Abbildung 6.5 Dehnung des Bodens in y-Richtung am Versuch UC\_003 entlang eines vertikalen Schnittes in der Mitte der sichtbaren Probenseite: a) Ergebnisse für  $\varepsilon_y$  aus DIC-Auswertungen mit einer Kamera bei Variation des Gridabstands; b) Gegenüberstellung der Messdaten von 2 Kameras (DIC Korrelationen gemäß Tabelle 6.3, Lage des Schnittes s. Abbildung 6.2b)

Zur Überprüfung dieses Ergebnisses wurde eine ergänzende Betrachtung an einem idealisierten Versuchsaufbau gemäß Anhang B durchgeführt. An diesem Versuchsaufbau wurde untersucht, inwieweit eine Variation des Gridabstands bei DIC-Messungen auch an einem starren Messobjekt zu Streuungen für  $\varepsilon_y$  aus der DIC-Auswertung führt. Im Ergebnis der Studie zeigt sich tendenziell ein ähnliches Ergebnis bei Variation des Gridabstands. Ungenauigkeiten bei der Erfassung der Position bzw. Verschiebung einzelner Stützstellen führen bei geringerem Gridabstand zu einem höheren Dehnungsgradienten

und somit zu einer größeren Ergebnisstreuung für die Dehnungsbeträge. Die Standardabweichungen  $\sigma$  der drei Ergebnisreihen für einen betrachteten horizontalen Pfad lagen bei 0,02 für PCO\_Set\_00, 0,14 für PCO\_Set\_01 und 0,31 für PCO\_Set\_02. Am idealisierten Versuchsaufbau sind die Standardabweichungen für  $\varepsilon_y$  somit im Vergleich zur Auswertung von Versuch UC\_003 deutlich geringer. Daraus wird geschlossen, dass der methodische Fehler bei der Ermittlung von Dehnungen mit der DIC-Methode mit Reduzierung des Gridabstands immer steigt. Die großen Schwankungen der Dehnungsbeträge am Versuch UC\_003 sind jedoch vor allem auf das tatsächliche Verformungsverhalten zwischen einzelnen Korngruppen zurückzuführen. In Abhängigkeit der eigenen Fragestellungen ist jedoch abzuwägen, welche räumliche Ergebnisauflösung in Form der Gridabstände tatsächlich notwendig ist.

Die Graphen in Abbildung 6.5 weisen qualitativ und quantitativ eine gute Übereinstimmung auf. Kleinere Abweichungen sind durch die leicht unterschiedliche Lage der Pfade zwischen den DIC-Auswertungen zu begründen. Die Ergebnisse belegen, dass die Auflösung der Kameras auch bei der Ermittlung der Dehnungen keinen nennenswerten Einfluss hat. Entscheidender ist die DIC-Evaluierung vor allem mit Wahl des Gridabstands, bezogen auf reale Distanzen am Messobjekt.

Für die Ermittlung von volumetrischen Dehnung  $\varepsilon_{\text{vol}}$  und der Scherdehnung  $\gamma$  erfolgt eine Berechnung nach Gl. 6.1 und 6.2. Die 1. und 2. Hauptnormaldehnung  $\varepsilon_I$  bzw.  $\varepsilon_{II}$  wird in *ISTRA4D* ermittelt und für den gewählten Bewertungszeitraum ausgegeben (s. auch Kap. 4.5):

$$\varepsilon_{\text{vol}} = \varepsilon_I + \varepsilon_{II} \quad (6.1)$$

$$\gamma = \varepsilon_I - \varepsilon_{II} \quad (6.2)$$

Zudem lassen sich  $\varepsilon_y$  bzw.  $\gamma$  auch nach Gl. 6.3 bzw. Gl. 6.4 berechnen. In der eigenen Arbeit wird der im Ingenieurbereich übliche Ansatz zur Berechnung von Scherdehnungen nach Gl. 6.4 verwendet. Ebenfalls möglich ist eine Ermittlung nach Gl. 6.5 wie bspw. nach Nazhat [NAZ13] erfolgt.

$$\varepsilon_{\text{vol}} = \varepsilon_x + \varepsilon_y \quad (6.3)$$

$$\gamma = \varepsilon_x - \varepsilon_y \quad (6.4)$$

$$\gamma = \sqrt{(\varepsilon_x - \varepsilon_y)^2 + 4\varepsilon_{xy}^2} \quad (6.5)$$

In Abbildung 6.6 werden für den Versuch UC\_003 die DIC-Ergebnisse der Konfiguration PCO\_Set\_01 nach Tabelle 6.3 als Contourplots für die horizontale und vertikale Dehnungskomponente  $\varepsilon_x$  und  $\varepsilon_y$  sowie die nach Gl. 6.1 ermittelte volumetrische Dehnung  $\varepsilon_{\text{vol}}$  dargestellt.

Die Extremwerte liegen für  $\varepsilon_x$  bei - 3,7 und 3,5 % bzw. für  $\varepsilon_y$  bei - 9,0 % und 13,0 % liegen. Aus Gründen der besseren Darstellbarkeit und Vergleichbarkeit erfolgen in den Contourplots die farblichen Abstufungen in Anlehnung an eine spätere Auswertung mit Glättungsalgorithmus in Abbildung 6.8.

Alle drei Contourplots in Abbildung 6.6 zeigen eine sehr unregelmäßige Verteilung mit starken Messwertschwankungen. In weiteren Studien wurde daher geprüft, inwieweit Möglichkeiten der DIC-Evaluierung u.a. zu Facettengröße und Gridabstand oder Formen der Ergebnisglättung Einfluss auf die Ergebnisse zur Dehnung besitzen. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wurde diese Studie im Anhang D angefügt. Im Ergebnis der Studie ist festzuhalten, dass eine Glättung der DIC-Ergebnisse zur Dehnung möglich aber nicht zwingend notwendig ist. Falls überhaupt erforderlich, lässt sich eine ähnliche Harmonisierung der Ergebnisse über eine Vergrößerung der Facetten bzw. der Gridabstände erreichen. Exemplarisch hierzu werden nachfolgend in Abbildung 6.7 die Auswirkungen eines Glättungsalgorithmus aus *ISTRA4D* (*Displacement Smoothing*: „PCO\_Set\_01\_S“) veranschaulicht und mit nicht geglätteten Ergebnissen von zwei DIC-Korrelation für  $\varepsilon_y$  am Schnitt gemäß Abbildung 6.2 b) gegenübergestellt („PCO\_Set\_01“ und „PCO\_Set\_00“).

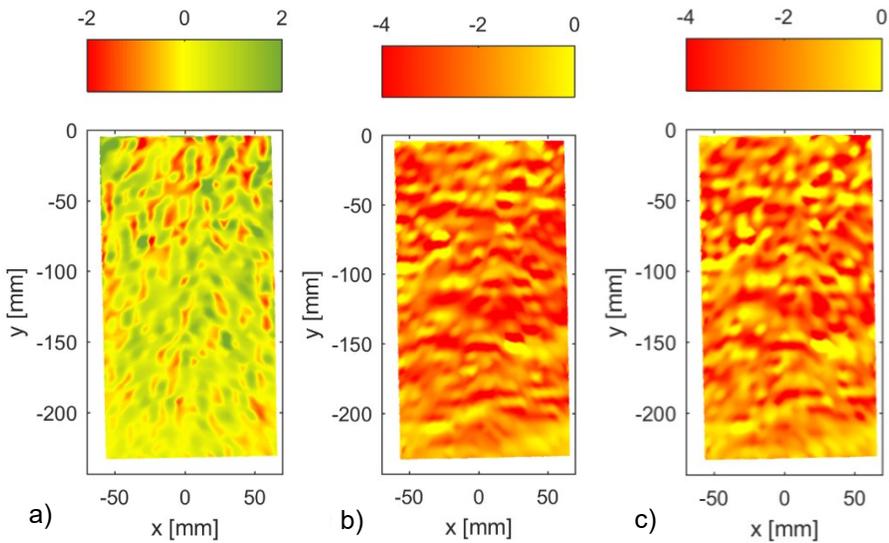


Abbildung 6.6 Dehnungsfelder für a)  $\epsilon_x$ , b)  $\epsilon_y$  und c)  $\epsilon_{vol}$  in %, Versuch UC\_003, Auflast 1.000 kN/m<sup>2</sup>, DIC-Evaluierung PCO Set\_01 nach Tabelle 6.3

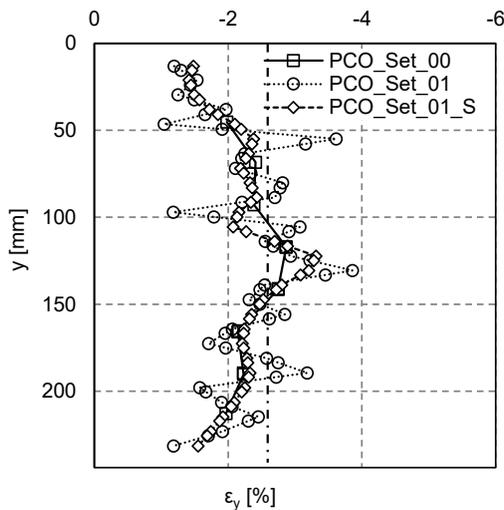


Abbildung 6.7 Dehnung des Bodens in y-Richtung am Versuch UC\_003 entlang eines vertikalen Pfades in der Mitte der sichtbaren Probenseite, Gegenüberstellung unterschiedlicher DIC Korrelation gemäß Tabelle 6.3 (Lage des Schnittes s. Abbildung 6.2b)

Die Graphen der Ergebnisse mit Glättungs-Algorithmus (PCO\_Set\_01\_S) zeigen im Vergleich zu den Ergebnissen mit weniger Stützstellen (PCO\_Set\_00) eine gute qualitative und quantitative Übereinstimmung und verdeutlichen somit das Arbeitsprinzip des Glättungsalgorithmus.

Nachfolgend wurden exemplarisch die DIC-Ergebnisse der Konfiguration „PCO\_Set\_01“ mit Glättungs-Algorithmus als Dehnungsplots für die horizontale und vertikale Dehnungskomponenten  $\varepsilon_x$  und  $\varepsilon_y$  sowie die nach Gl. 6.1 ermittelte volumetrische Dehnung  $\varepsilon_{vol}$  dargestellt.

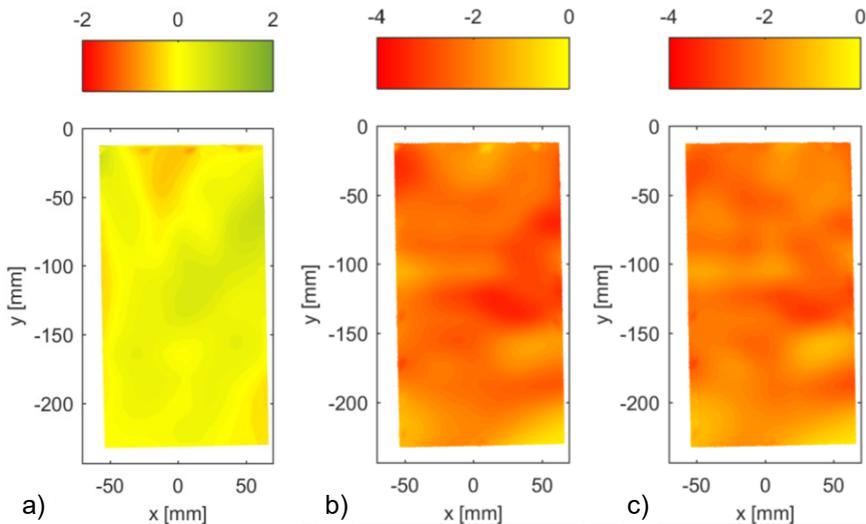


Abbildung 6.8 Dehnungsfelder für a)  $\varepsilon_x$ , b)  $\varepsilon_y$  und c)  $\varepsilon_{vol}$  in %, Versuch UC\_003, Auflast 1.000 kN/m<sup>2</sup>, DIC-Evaluierung PCO Set\_01 nach Tabelle 6.3 mit Anwendung eines Glättungsalgorithmus

Die Dehnungsfelder mit Glättungsalgorithmus für  $\varepsilon_y$  in Abbildung 6.8b) und  $\varepsilon_{vol}$  in Abbildung 6.8c) zeigen qualitativ und quantitativ eine große Ähnlichkeit. Im Mittel werden Dehnungen von 0,19 % für  $\varepsilon_x$ , -2,20 % für  $\varepsilon_y$  und ca. -2,0 % für  $\varepsilon_{vol}$  ausgewiesen. Die Dehnungsergebnisse der DIC-Auswertung zeigen somit eine gute Näherung zur mittleren vertikalen Dehnung der Probe von -2,66 %, die aus der Gesamtsetzung der Probe ermittelt wurde. Jedoch deuten die Ergebnisse darauf, dass mit der DIC-Methode die tatsächlichen Dehnungen leicht unterschätzt werden.

Anhand der Dehnungsergebnisse entlang des vertikalen Schnittes konnten Zusammenhänge und eine gute Übereinstimmung für eine Ermittlung der volumetrischen Dehnung  $\varepsilon_{\text{vol}}$  gezeigt werden. Auffällig dabei sind jedoch:

- Es zeigen sich starke Einflüsse der Ergebnisverläufe in Abhängigkeit der Größe der Facetten bzw. des Gridabstandes.
- Lokale Dehnungsmaxima im oberen und unteren Randbereich der Probe deuten auf den Einfluss der optischen Brechung an der Acrylglascheibe.

Folgende Zusammenhänge lassen sich an den Versuchen erkennen und sollten berücksichtigt werden:

1. Das Verformungsverhalten von Sand bei Kompression kann durch die DIC-Auswertung von Verschiebungen grundsätzlich gut erfasst werden.
2. Kleine Facetten/Gridabstände führen bei der Ermittlung von Dehnungen zu sehr un stetigen Ergebnisverläufen. Es ist davon auszugehen, dass durch die Berücksichtigung einer Verzerrung einzelner Facetten in *ISTRA4D* diese Unstetigkeit für Versuche an granulearem Material wie Sand verstärkt werden. In anderen Software Lösungen wie *GeoPIV* muss dieser Effekt nicht so deutlich auftreten. Für komplexere Versuche und Belastungsformen ist zu erwarten, dass lokale Extremwerte die Ergebnisinterpretation erschweren.

## 6.3 Streifen- und Kreisfundamentversuche

### 6.3.1 Streifenfundamentversuche am Versuchsstand-C

Nachfolgend wird auf die Streifenfundamentversuche EDZ\_01, EDZ\_02 und EDZ\_03 am Versuchsstand-C eingegangen. Die Lasteinleitung über die Prüfpressen erfolgte bei konstanter Geschwindigkeit von 2 mm/min. Die Aufnahmen wurden ausschließlich mit der *PCO* Kamera DMAX HD+ (2,7 MP) bei einer zeitlichen Auflösung von i.d.R. 1 fps (*frame per second*) durchgeführt.

Wesentliche Angaben zu den Versuchen werden nachfolgend aufgelistet:

- Belastungsgeschwindigkeit (mm/min): 2
- Belastungsweg: 20 mm

- Kamera: *PCO DMAX HD+* (2,7 MP) / Kurzbezeichnung: **PCO**  
Konfiguration: 4,71 Pixel/mm, 0,21 mm/Pixel, 1 bis 15 Bild(er) pro Sekunde (1 bis 15 fps)

Exemplarisch wird zunächst auf den Versuch EDZ\_003 mit sehr dichter Lagerung eingegangen ( $I_{D,0} = 0,94$ ). Der Suchbereich ROI für die DIC-Messung wurde auf eine Fläche von  $B \times H = 130 \text{ mm} \times 75 \text{ mm}$  begrenzt, da in diesem Bereich die relevanten Verformungen erwartet werden. Nachfolgende Abbildungen zeigen die Bodenverformungen bei einer Setzung des Lastbügels von ca. 1,5 mm. Für die Auswertung der Versuche wurden die Korrelationseinstellung gemäß Tabelle 6.4 gewählt:

Tabelle 6.4 DIC Korrelationen für EDZ\_003 mit Angabe der gewählten Größe für Facetten und Abstand Stützstellen

Kamera	Set DIC	Größe Facette		Abstand Stützstellen	
		Pixel	mm	Pixel	mm
PCO (4,71 Px/mm)	07	25	5,31	17	3,61

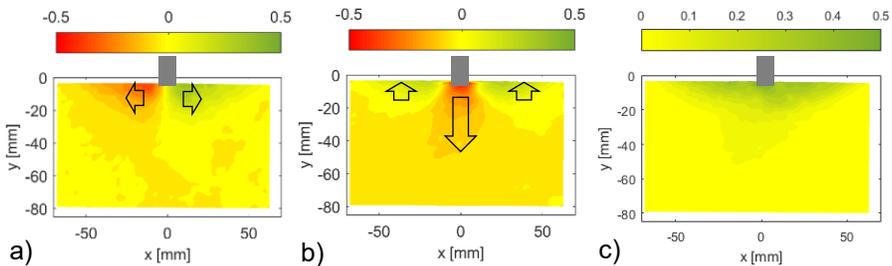


Abbildung 6.9 Verschiebungsfelder für a)  $u_x$ , b)  $u_y$ , und c)  $|u|$  in mm, Versuch EDZ\_003, Setzung der Lasteinheit = 1,5 mm

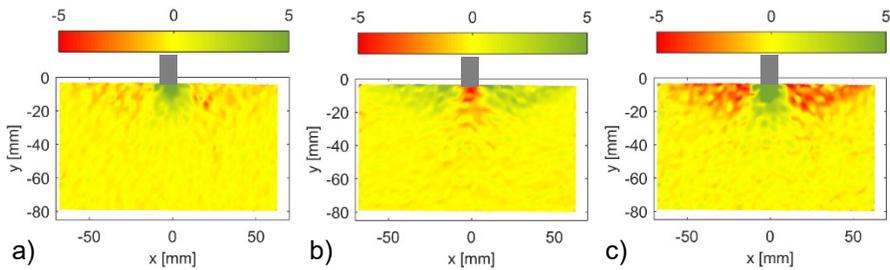


Abbildung 6.10 Dehnungsfelder für a)  $\varepsilon_x$ , b)  $\varepsilon_y$ , und c)  $\gamma$  in %, Versuch EDZ\_003, Setzung der Lasteinheit = 1,5 mm

Die Verschiebungsfelder in Abbildung 6.9 veranschaulichen deutlich die lokalen Bodenverformungen mit Setzungen unterhalb sowie Hebungen und Seitwärtsbewegungen neben der Lasteinleitung. Auch in Abbildung 6.10a) und b) lassen sich über die Darstellungen zur richtungsabhängigen Dehnung deutlich die u.a. nach Prandtl [PRA20] unterschiedenen Verformungsbereiche mit Ausbildung von Scherzonen erkennen.

In einer ergänzenden DIC-Auswertung wurde der Einfluss einer Glättung betrachtet (gewählt: *Smoothing Spline 2 -1* analog Versuch UC\_003 in Kap. 6.2.4):

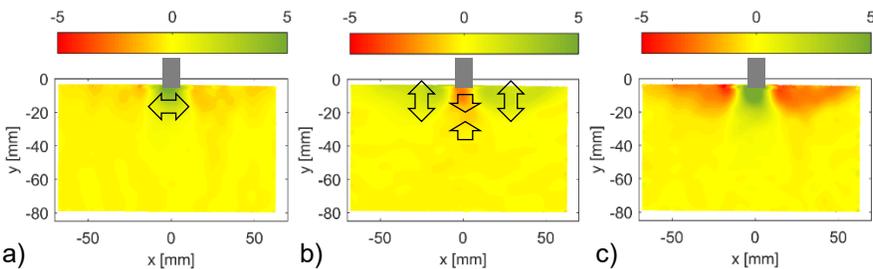


Abbildung 6.11 Dehnungsfelder für a)  $\varepsilon_x$ , b)  $\varepsilon_y$ , und c)  $\gamma$  in %, Versuch EDZ\_003, Setzung der Lasteinheit = 1,5 mm, Ergebnisglättung *Smoothing Spline* aus *ISTRA4D*

Die Auswirkung des Glättungsalgorithmus ist an den Darstellungen der Dehnungsfelder gut erkennbar. Für die Darstellungen zur Dehnung lassen sich v.a. Bereiche unterschiedlicher Vorzeichen eindeutiger unterscheiden. Die Maximalwerte der Scherdehnung  $\gamma$  nahe dem Fundament wurden mit bis zu 8 %

ausgegeben. Im Gegensatz hierzu wurde in der Auswertung ohne Glättungsalgorithmus eine maximale Scherdehnung von  $\gamma$  von 13 % nahe dem Fundament ausgewiesen.

Nachfolgend werden Ergebnisse zur Scherdehnung  $\gamma$  der Streifenfundamentversuche EDZ\_01, EDZ\_02 und EDZ\_03 gegenübergestellt. Dabei werden exemplarisch die DIC-Messungen bei Setzungen des Lastbügels von 1,5 mm in Abbildung 6.12 und bei Setzungen des Lastbügels von 10 mm in Abbildung 6.13 veranschaulicht.

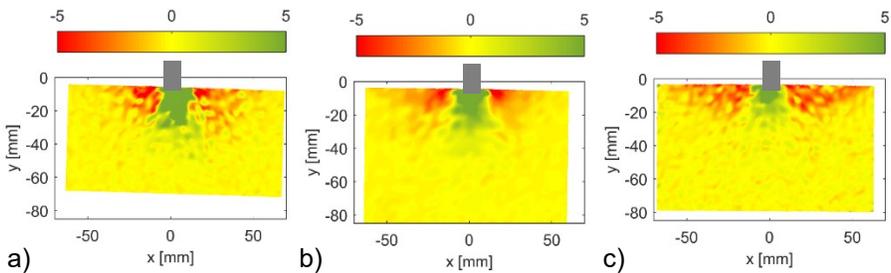


Abbildung 6.12 Dehnungsfelder für  $\gamma$  in % a) Versuch EDZ\_002 (lockere Lagerung), b) EDZ\_001 (mitteldichte Lagerung) und c) EDZ\_003 (dichte Lagerung), Setzung der Lasteinheit = 1,5 mm

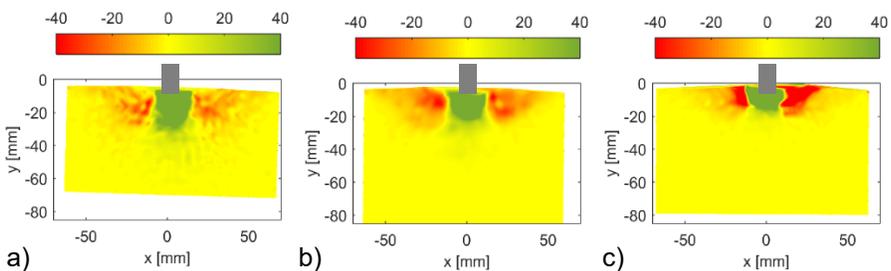


Abbildung 6.13 Dehnungsfelder für  $\gamma$  in % a) Versuch EDZ\_002 (lockere Lagerung), b) EDZ\_001 (mitteldichte Lagerung) und c) EDZ\_003 (dichte Lagerung), Setzung der Lasteinheit = 10 mm

Die Dehnungsfelder in Abbildung 6.12 lassen bereits bei geringer Setzung des Lastbügels von 1,5 mm die u.a. nach Prandtl [PRA20] bekannten Verformungsbereiche erkennen. Dabei stellen sich auch innerhalb der seitlichen Scherzonen deutliche Scherungen aufgrund starker vertikaler Dehnungen bzw. Auflockerungen ein (s. Abbildung 6.11b). Besonders intensive Scherungen ergeben sich am Versuch EDZ\_003 in anfangs sehr dichter Lagerung (s.

Abbildung 6.13c). Abbildung 6.12 und Abbildung 6.13 veranschaulichen, dass sich in den Versuchen mit höherer Lagerungsdichte die seitlichen Scherbereiche weniger tief und gleichzeitig einheitlicher ausbilden. Bei lockerer Lagerung stellen sich vielmehr viele kleine lokale Verformungen ein. Grundsätzlich lässt sich an den Streifenfundamentversuchen am Versuchsstand-C Folgendes erkennen:

- Eine Erfassung unterschiedlicher Scher- bzw. Verformungsbereiche ist mit der gewählten Variante der DIC-Methode über Darstellungen von Verschiebungs- und Dehnungsfeldern möglich und führt zu plausiblen Ergebnissen. Lokale Scherzonen ließen sich dabei an den Versuchen bedingt erkennen.
- Neben Darstellungen von Dehnungsfeldern sind auch horizontale und vertikale Dehnungsfelder geeignet, um qualitativ unterschiedliche Scherbereiche abzugrenzen.
- Der Einsatz von Glättungsfiltern wurde bei dichter Lagerung geprüft und kann helfen, Verformungsbereiche deutlicher zu identifizieren. Bei mitteldichter oder lockerer Lagerung kann die Anwendung von Glättungsfiltern helfen, Übergänge zwischen Verformungsbereichen überhaupt zu identifizieren. Jedoch können gleichzeitig kleinräumige Scherbereiche mit geringem Verformungsgrad übersehen werden.

### **6.3.2 Streifen- und Kreisfundamentversuche am Versuchsstand-M**

#### Streifenfundamentversuche am Versuchsstand-M

Nachfolgend wird auf den Streifenfundamentversuch EDZ\_M am Versuchsstand-M eingegangen. Die Lasteinleitung erfolgte in Laststufen über einen Hydraulikzylinder. Die Belastung wurde in Schritten bis 6,5 kN und bis zu einer maximalen Setzung der Lasteinheit von 109 mm gesteigert. Die Aufnahmen erfolgten mit der *PCO* Kamera DMAX HD+ (2,7 MP) bei einer zeitlichen Auflösung von 1 fps. Der Suchbereich ROI für die DIC-Messung wurde auf eine Fläche von ca.  $B \times H = 880 \text{ mm} \times 580 \text{ mm}$  begrenzt, da in diesem Bereich die relevanten Verformungen erwartet werden. Die DIC-Auswertungen erfolgten mit den DIC-Konfigurationen gemäß Tabelle 6.5.

Wesentliche Angaben zu den Versuchen werden nachfolgend aufgelistet:

- Belastung: in Laststufen von 0,5 kN bis 6,5 kN
- Sandeinbau in mitteldichter Lagerung ( $I_{D,0} = 0,5$ )
- Kamera: PCO DMAX HD+ (2,7 MP) / Kurzbezeichnung: **PCO**  
Konfiguration: 4,71 Pixel/mm, 0,21 mm/Pixel, 1 bis 15 Bild(er) pro Sekunde (1 bis 15 fps)

Tabelle 6.5 DIC Korrelationen für EDZ-M mit Angabe der gewählten Größe für Facetten und Abstand Stützstellen

Kamera	Set DIC	Größe Facette		Abstand Stützstellen	
		Pixel	mm	Pixel	mm
PCO (1,45 Px/mm)	00	59	85,46	40	57,94
	01	27	39,11	18	26,07

Nachfolgende Abbildungen zeigen die DIC-Ergebnisse am Versuch EDZ-M mit Set 00 bei einer Setzung der Lasteinheit von ca. 15 mm.

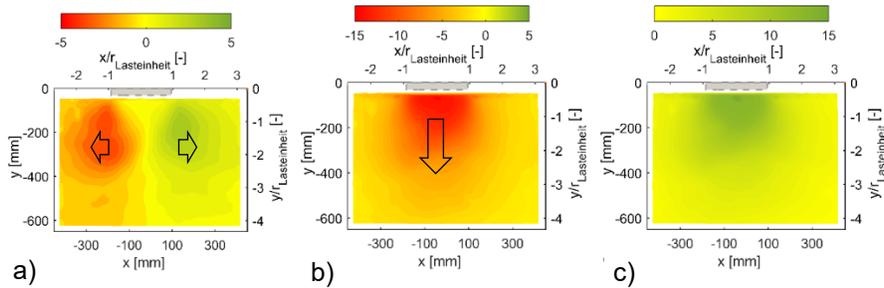


Abbildung 6.14 Verschiebungsfelder für a)  $u_x$ , b)  $u_y$ , und c)  $|u|$  in 66mm, Versuch EDZ-M, Setzung der Lasteinheit = 15 mm

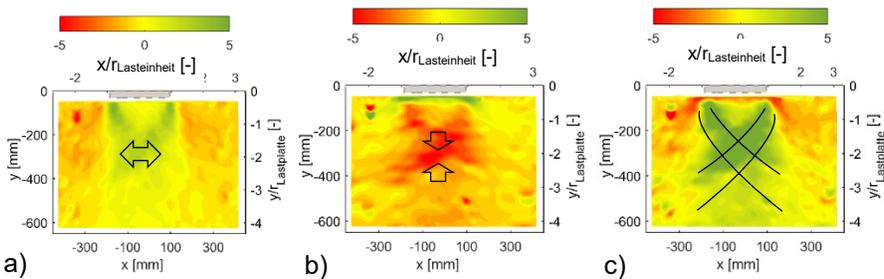


Abbildung 6.15 Dehnungsfelder für a)  $\varepsilon_x$ , b)  $\varepsilon_y$ , und c)  $\gamma$  in %, EDZ-M, Setzung der Lasteinheit = 15 mm

Die Ergebnisse der Verschiebungsfelder in Abbildung 6.14 lassen gut die grundsätzlichen Verformungsrichtungen mit seitlichem Verdrängen neben und Setzungen unterhalb der Lasteinheit erkennen. Die Dehnungsfelder in Abbildung 6.15 veranschaulichen zudem, dass sich ausgehend von den Rändern der Lasteinheit massive Scherzonen ausbreiten. Bemerkenswert ist, dass der von diesen Scherzonen eingeschlossene Bereich direkt unterhalb der Lasteinheit nahezu keine Scherung erfährt. Grundsätzlich lässt sich Folgendes feststellen:

- Es konnte gezeigt werden, dass mit den Aufnahmen der *PCO* Kamera auch am Versuchsstand-M DIC-Messungen möglich sind und zu plausiblen Ergebnissen führen. Somit ist das Prinzip vom Versuchsstand-C auch bei größeren Facetten und Gridabständen am Versuchsstand-M anwendbar.
- Die wesentlichen Mechanismen und Gesamtverformungen können abgegrenzt werden. Es ist jedoch zu vermuten, dass aufgrund der Vergrößerung des ROI bei gleicher Kameraauflösung lokale Bodenverformungen wie feinere Scherbänder nicht erkannt werden können. Wichtig war am Versuchsstand-M, dass die Lichtverhältnisse über die gesamte Versuchsdauer konstant gehalten und ungewollte Sonneneinstrahlungen verhindert werden.
- Durch die gegenüber den Streifenfundamentversuchen am Versuchsstand-C deutlich größeren Abmessungen des Lastbügels kann das Verschiebungs- und Dehnungsfeld im Nahbereich des Streifenfundamentes besser erfasst und beschrieben werden.

#### Kreisfundamentversuche am Versuchsstand-M

Nachfolgend wird auf die Kreisfundamentversuche am Versuchsstand-M eingegangen. Die Lasteinleitung erfolgte schrittweise in Laststufen über einen Hydraulikzylinder. Für die Versuche wurden halbkreisförmige Lasteinheiten mit Durchmessern von 300 mm (HK\_300) und 435 mm (HK\_435) verwendet. Die Lasten wurden im Versuch HR\_300 auf bis zu 7 kN bei einer maximalen Setzung der Lasteinheit von 78 mm und im Versuch HK\_435 auf bis zu 18,5 kN bei einer maximalen Setzung von 128 mm schrittweise gesteigert. Die Aufnahmen erfolgten mit der *PCO* Kamera bei einer zeitlichen Auflösung von 1 fps im Versuch HK\_300 und manueller Auslösung im Versuch HK\_435. Nachfolgend wird exemplarisch auf DIC-Ergebnisse vom Versuch

HK-435 eingegangen. Wesentliche Angaben zu den Versuchen werden nachfolgend genannt:

- Belastung: in Laststufen von ca. 0,5 kN
- Sandeinbau in mitteldichter Lagerung ( $I_{D,0} = 0,5$ )
- Kamera: *PCO DMAX HD+* (2,7 MP) / Kurzbezeichnung: **PCO**  
Konfiguration: 4,71 Pixel/mm, 0,21 mm/Pixel, manuelle Auslösung

Als Suchbereich ROI für die DIC-Messung wurde mit einer Fläche von ca.  $B \times H = 900 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$  näherungsweise die gesamte Sichte Ebene berücksichtigt. Die DIC-Auswertungen erfolgten mit den DIC-Konfigurationen gemäß Tabelle 6.6.

Tabelle 6.6 DIC Korrelationen für HK\_435 mit Angabe der gewählten Größe für Facetten und Abstand Stützstellen

Kamera	Set DIC	Größe Facette		Abstand Stützstellen	
		Pixel	mm	Pixel	mm
PCO (1,45 Px/mm)	00	59	85,46	40	57,94
	01	49	70,97	34	49,25
	02	39	56,49	27	39,11
	03	25	36,21	17	24,62

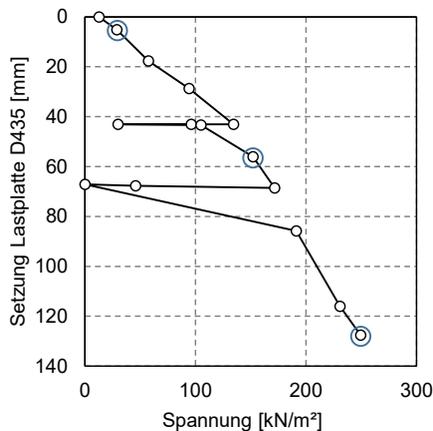


Abbildung 6.16 Spannungs-Setzungsdiagramm des auflastgesteuerten Kreisfundamentversuches HK\_435 mit Kennzeichnung ausgewählter Messzeitpunkte bei Setzungen von 5 mm, 57 mm und 127 mm

Abbildung 6.16 zeigt das Spannungs-Setzungsdiagramm des Versuches. Dabei wurden ausgewählte Messzeitpunkte gekennzeichnet, auf die exemplarisch nachfolgend weiter eingegangen wird.

Abbildung 6.17 zeigt die DIC-Verschiebungsfelder am Versuch HK\_435 bei einer Setzung von ca. 57 mm. Für die DIC-Auswertung wurde die DIC-Evaluierung nach Set\_00 gemäß Tabelle 6.6 genutzt. Die Verschiebungsfelder zeigen deutlich die weiträumige Ausdehnung der Verschiebungen mit seitlichem Verdrängen neben und Setzungen unterhalb der Lasteinheit.

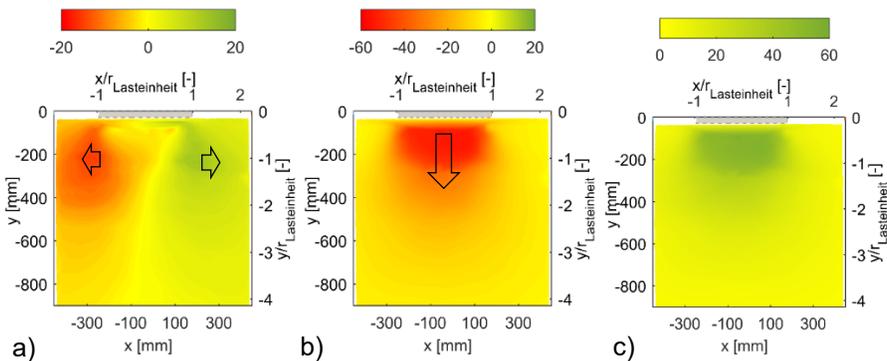


Abbildung 6.17 Verschiebungsfelder für a)  $u_x$ , b)  $u_y$ , und c)  $|u|$  in mm, Versuch HK\_435, Setzung der Lasteinheit = 57 mm, Set\_02 gemäß Tabelle 6.6

Nachfolgende Abbildung 6.18 veranschaulicht die Vertikaldehnung  $\varepsilon_y$  entlang eines Schnittes mittig unterhalb der Lasteinheit. In Abbildung 6.18a) wurden die DIC-Konfigurationen Set\_00, Set\_02 und Set\_03 nach Tabelle 6.6 gegenübergestellt. Abbildung 6.18b) veranschaulicht die Ergebnisse der Vertikaldehnung  $\varepsilon_y$  für 3 Versuchszeitpunkte mit Setzungen der Lasteinheit von 5 mm, 57 mm und 127 mm. Für die Darstellung in Abbildung 6.18b) wurde die DIC-Evaluierung nach Set\_00 gewählt.

Abbildung 6.18a) zeigt anschaulich den Einfluss der DIC-Evaluierung auf die Ergebnisse zur Dehnung in  $y$ -Richtung. Der Einfluss auf lokale Maximalwerte der Dehnungen ist besonders deutlich, der überwiegende Ergebnisbereich wird analog einem Glättungsalgorithmus lediglich harmonisiert.

Am Diagramm in Abbildung 6.18b) lässt sich der Einfluss der Setzungszunahme an der Verschiebung des Graphen gut erkennen. Die maximalen Stauchungen in  $y$ -Richtung treten demnach bei  $y = 200$  mm ( $0,5 r_{\text{Lasteinheit}}$ ) auf. Di-

rekt unterhalb der Lasteinheit wird ein schmaler horizontaler Streifen mit starken Dehnungen ausgewiesen. Dies ist mit dem Versuchsaufbau zu erklären. Bei der Lasteinleitung verbleibt ein Spalt von wenigen mm zwischen Lasteinheit und Sichtebene. So ist es nicht zu verhindern, dass einzelne Sandkörner bei der Setzung der Lasteinheit in diesem Spalt geschoben werden.

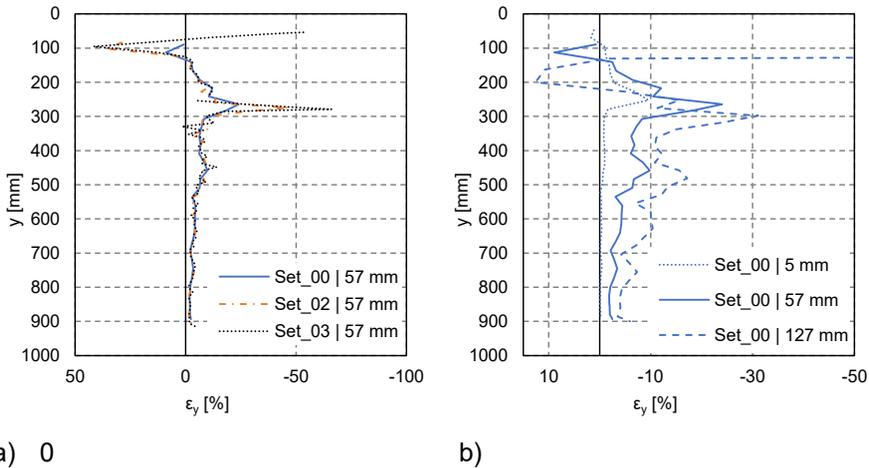


Abbildung 6.18  $\varepsilon_y$  entlang eines vertikalen Schnittes mittig unterhalb der Lasteinheit am Versuch HK\_435: a) Gegenüberstellung von DIC-Konfigurationen gemäß Tabelle 6.6, b) Gegenüberstellung für verschiedene Zeitpunkte / Laststufen der Messung, DIC-Evaluierung Set\_00 gemäß Tabelle 6.6

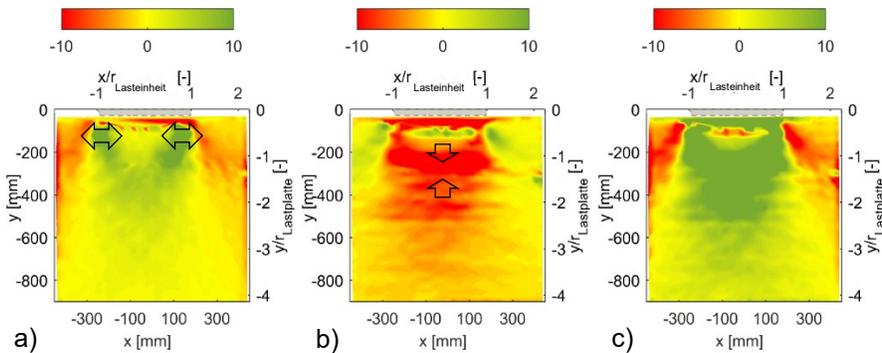


Abbildung 6.19 Dehnungsfelder für a)  $\varepsilon_x$ , b)  $\varepsilon_y$ , und c)  $\gamma$  in %, HK\_435, Setzung der Lasteinheit = 57 mm, Set\_02 gemäß Tabelle 6.6

An den Dehnungsfeldern in Abbildung 6.19 lassen sich wesentliche Verformungsbereiche gut abgrenzen. Neben einem keilförmigen Bereich direkt unter

der Lasteinheit zeigen sich in größeren Tiefen massive Scherzonen, die durch leichte horizontale Dehnungen (Auseinanderdriften) und massive negative vertikale Dehnungen (Kompression) gekennzeichnet sind. Es ist davon auszugehen, dass der vorhandene Spalt zwischen Lasteinheit und Scheibe Ursache für die lokalen starken positiven Dehnungen in y-Richtung im keilförmigen Bereich unterhalb der Lasteinleitung ist. Abbildung 6.19c) lässt ausgehend von den Rändern des Kreisfundamentes die Ausbreitung massiver Scherzonen erkennen. In diesen Bereichen treten Scherdehnungen auch in der DIC-Evaluierung Set\_00 von deutlich größer 10 % auf. Von diesem Bereich ausgehend bilden sich Ansätze einzelner Scherbänder. Nennenswerte negative Dehnungen in y-Richtung von  $\varepsilon_y < 5 \%$  sind bis in eine Tiefe von ca. 500 mm unter Probenoberkante erkennbar. Bis in eine ähnliche Tiefe zeigen sich nennenswerte positive horizontalen Dehnungen (Auseinanderdriften).

## 6.4 Ergänzende Messungen

Nachfolgend werden Ergebnisse von Messungen an ausgewählten Versuchen bei statischer Auflast vorgestellt. Die Messdaten geben zusätzliche Informationen zu den Versuchen, die für eine Interpretation der DIC-Ergebnisse sowie für eine Erstellung und Validierung numerischer Modelle helfen sollen. Folgende Ergebnisse werden vorgestellt:

- Verformung der Sichtebene am Versuchsstand-C bei einem Versuch unter eindimensionaler Kompression
- Last-Setzungs-Kurven für Streifenfundamentversuche am Versuchsstand-C
- Spannungs-Setzungskurven für den Kreisfundamentversuch HK\_300 am Versuchsstand-M sowie Messergebnisse zur Verformung der Sichtebene

Der Versuchsstand-C wird in der Konfiguration eindimensionale Kompression stufenweise mit bis zu 1.000 kN/m<sup>2</sup> Auflastspannung belastet. Abbildung 6.20b) veranschaulicht Ergebnisse der Verformungen in der Mitte der Sichtebene. Positive Verschiebungswerte kennzeichnen eine Verformung der Acrylglasplatte nach außen. Der Aufbau des Versuches wird als Prinzipskizze in Abbildung 6.20a) gezeigt. Die Ergebnisse der Messung deuten auf eine näherungsweise lineare Zunahme der Verschiebung zur Steigerung der Auflastspannungen. Bei maximaler Auflastspannung von 1.000 kN/m<sup>2</sup> wurde eine

Verschiebung der Sichtebene von 0,34 mm festgestellt. Der Versuch zeigt zudem, dass sich bei einer anschließenden Reduzierung der Auflastspannung bleibende Verformungen der Sichtebene einstellen.

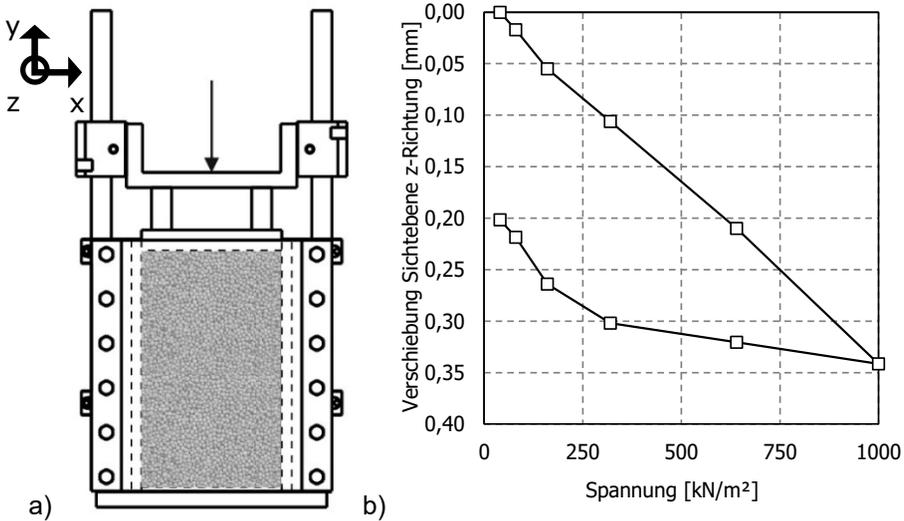


Abbildung 6.20 Messergebnisse von Verformungen in der Mitte der Sichtebene, Versuchsstand-C, Konfiguration Eindimensionale Kompression,  $I_{D,0} = 0,52$ : a) Prinzipskizze zum Aufbau des Versuches und b) Ergebnisse der Verformungen in der Mitte der Sichtebene

Die Durchführung der Streifenfundamentversuche erfolgt bei konstanter Steuerung des Setzungsweges von 2 mm/min. Nachfolgende Abbildung 6.21b) zeigt Spannungs-Setzungs-Linien von den Versuchen EDZ\_01 ( $I_{D,0} = 0,52$ ) und EDZ\_03 ( $I_{D,0} = 0,94$ ). Der Aufbau des Versuches ist als Prinzipskizze in Abbildung 6.21a) dargestellt. Die Ergebnisse in Abbildung 6.21b) weisen für den Versuche EDZ\_01 ( $I_{D,0} = 0,52$ ) eine Spannung für Lastfläche von ca. 30 kN/m<sup>2</sup> kurz nach Beginn des Versuches auf. Mit zunehmender Setzung des Lastbügels steigen die Spannungen stetig auf bis zu 118 kN/m<sup>2</sup> bei einer Setzung von 20 mm. Die Ergebnisse im Versuch EDZ\_03 in sehr dichter Lagerung ( $I_{D,0} = 0,94$ ) zeigen nach Versuchsbeginn einen deutlichen Anstieg der Spannungen auf bis auf eine Bruchspannung  $\tau_f = 115$  kN/m<sup>2</sup> bei einer Setzung von 1,5 mm. Dies entspricht ca. 10 % der Breite des Lastbügels. Bei weiterer Setzung stellt sich ähnlich Versuch EDZ\_01 eine Restscherspannung von  $\tau_f = 50$  kN/m<sup>2</sup> bei einer Setzung von 4 mm ein. Somit zeigt der Versuch EDZ\_03 ein für dicht gelagerte Sande typisches Scherverhalten. Im weiteren

Versuchsverlauf erhöhen sich die Spannungen auf bis zu  $260 \text{ kN/m}^2$  bei einer Setzung von  $20 \text{ mm}$ .

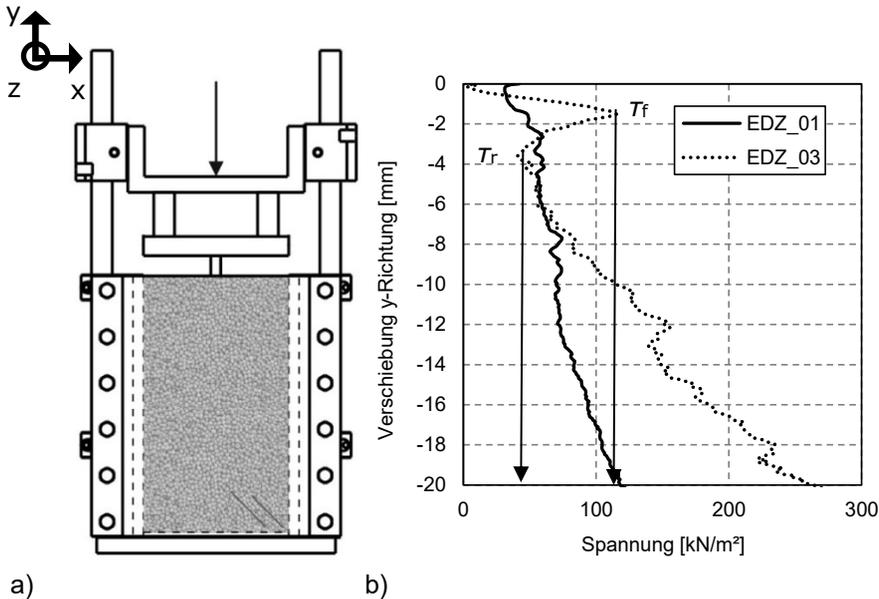


Abbildung 6.21 Spannungs-Setzungs-Linien für Streifenfundamentversuche am Versuchsstand-C: a) Prinzipskizze zum Aufbau des Versuches und b) Spannungs-Setzungs-Linien für EDZ\_01 und EDZ\_03

Nachfolgend werden für die statischen Versuche am Versuchsstand-M exemplarisch Ergebnisse aus dem Versuch HK\_300 vorgestellt. In diesem Versuch wird ein halbes Kreisfundament stufenweise belastet. Abbildung 6.22a) veranschaulicht schematisch den Versuchsaufbau. Abbildung 6.22b) zeigt die Ergebnisse der Spannungs-Setzungs-Linie. Zudem werden Messergebnisse zur Verformung der Sichtebene dargestellt. Positive Verschiebungswerte entsprechen einer Verformung der Sichtebene nach außen (z-Richtung). Die Ergebnisse zur Setzung des Lastbügels zeigen ein ähnliches Verhalten wie im Versuch HK\_435. Die Setzung bei einer Auflastspannung von  $200 \text{ kN/m}^2$  beträgt  $78 \text{ mm}$ . Im Versuch HK\_435 wurde bei gleicher Auflastspannung eine Setzung von  $90 \text{ mm}$  gemessen. Die Verschiebungen der Sichtebene nehmen näherungsweise linear mit Steigerung der Spannungen zu. Bei einer Spannung von  $200 \text{ kN/m}^2$  wurden  $4 \text{ mm}$  Verschiebung in der Mitte der Sichtebene gemessen.

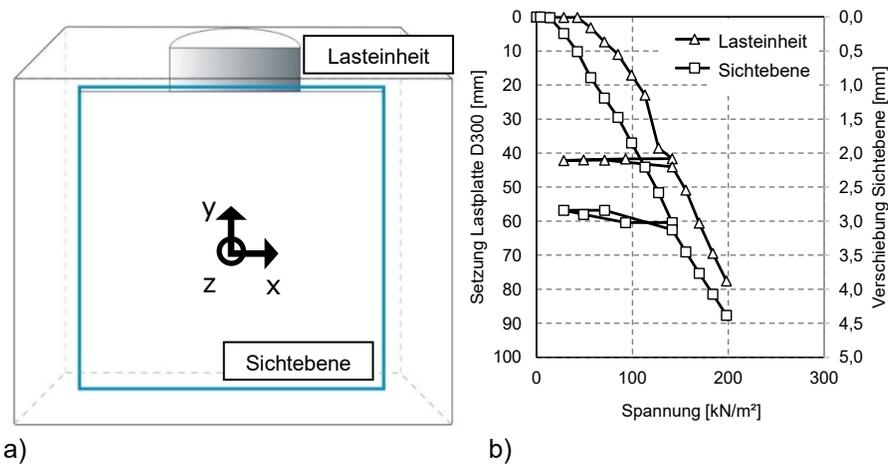


Abbildung 6.22 Kreisfundamentversuch HK\_300 am Versuchsstand-M: a) schematischer Versuchsaufbau, b) Spannungs-Setzungs-Linie mit Angabe von Verschiebungen in der Mitte der Sichtebene

## 6.5 Zusammenfassung

Mit Bezug auf die Anfangs gestellten Fragen, lassen sich die wesentlichen Untersuchungsergebnisse der statischen Versuche wie folgt zusammenfassen:

- Mit der DIC-Methode lassen sich an den statischen Versuchen Bodenverformungen zuverlässig erfassen. Die Ergebnisse der Kompressionsversuche am Versuchsstand-C belegen sehr hohe Genauigkeiten der Messmethode für die Erfassung von Verschiebungen am Lastbügel. Eine Erfassung von Bodenverformungen mit der DIC-Methode wurde in Einzelstudien betrachtet. Eine DIC-Messung von Verschiebungen am Boden erweist sich insgesamt als zuverlässige und genaue Messgröße. Einflüsse unterschiedlicher Kameraauflösungen sowie die Variation der DIC-Konfiguration für die Größe von Stützstellen und Facetten haben in den gewählten Varianten nur sehr geringen Einfluss auf die Messergebnisse der Verschiebungen. Durch die Verwendung einer Acrylglasscheibe zeigt sich ein geringer Einfluss auf die Ergebnisse, der nur bedingt zu korrigieren ist. Besonders stark zeigt sich dieser Einfluss am oberen Rand der Acrylglasscheibe am Versuchsstand-C.

- Mit der DIC-Methode weisen am Sand ermittelte Dehnungen einen sehr un stetigen Ergebnisverlauf auf. In Abhängigkeit der DIC-Konfiguration für die Größe von Stützstellen und Facetten zeigen sich starke Unterschiede der Ergebniswerte. Eine Vergrößerung von Stützstellen und Facetten hat dabei einen ähnlichen Effekt auf die Dehnungsergebnisse, wie die Anwendung eines Glättungsalgorithmus. Unter Berücksichtigung dieser Besonderheiten ist eine Verwendung der Dehnungsergebnisse aus den DIC-Messungen möglich. Für den Kompressionsversuch ergeben sich vertikale Dehnungen, die im Mittel mit der Setzung der Gesamtprobe korrelieren. Die Ermittlung von volumetrischen Dehnungen weist für diesen Versuch plausible Messwerte aus. Mit weiteren Setzungen kann über die Auswertung am Schnitt sowie an Dehnungsplots gut die zunehmende Bodenveränderung erfasst werden.
- An Versuchen zum Grundbruchverhalten können mit den DIC-Messungen typische Bodenverformungen mit Ausbildung eines Setzungskeils unterhalb der Lasteinleitung und Zonen mit Bodenbewegungen zur Seite und nach oben erfasst werden. Eine Erfassung von Scherzonen ist mit der verwendeten Methode sehr gut möglich. Auch für die Versuche am Versuchstand-M mit deutlich größerem ROI bei gleicher Kameraauflösung lassen sich mit der verwendeten DIC-Software *ISTRA4D* sehr detailreich Messergebnisse generieren.
- In Vergleichen zwischen Grundbruchuntersuchungen am Versuchstand-M im ebenen Verformungszustand und als Halbmodell-Versuch zeigen sich große Ähnlichkeiten im Verformungsverhalten. Unterschiede zeigen sich in der Ausbildung der Scherbereiche. Im ebenen Verformungszustand bilden sich die Scherzonen deutlicher und weitreichender als im Halbmodell-Versuch aus. Grund hierfür ist, dass bei ebener Verformung die Bodenverformungen nur in der Bildebene stattfinden. Im Halbmodellversuch ist eine Bodenverformung nach außen auch mit einer Verformung in radialer Richtung (Umfangsrichtung) verbunden. Daher sind Verschiebungen bzw. Verformungen hier weniger stark ausgeprägt.

# 7 Versuche mit skalierten Fallgewichten

## 7.1 Versuchsprogramm und Ziele

Folgende Versuchsarten sind vorgesehen:

- Fallgewichtsversuche im ebenen Verformungszustand am Versuchsstand-M an Boden in lockerer und mitteldichter Lagerung
- Fallgewichtsversuche als Halbmodellversuche am Versuchsstand-S und Versuchsstand-M an Boden in mitteldichter Lagerung

Die Versuchsreihen als Halbmodellversuche umfassen insgesamt 13 Konfigurationen am Versuchsstand-S und 11 Konfigurationen am Versuchsstand-M. Kenndaten der Konfigurationen wurden bereits im Kap. 5 entsprechend den Versuchsständen genannt. Eine ausführliche Zusammenstellung aller Versuche im Rahmen der Versuchsstudie erfolgt im Kap. 7.7. Die Versuchsplanung sieht eine Variation von der Masse, der Fallhöhe und dem Durchmesser des Fallgewichtes vor. Die Bezeichnung der Versuche erfolgt dabei unter Berücksichtigung dieser Steuerparameter wie folgt: m4\_80-h0\_80-D100 steht exemplarisch für ein Fallmasse von 4,80 kg, eine Fallhöhe von 0,80 m und einen Durchmesser des Fallgewichtes von 100 mm. Je Konfiguration wurden mindestens 12 Impulse an einer Position durchgeführt. In einer Studie zu unterschiedlichen Abfolgen und Anordnung von Einzelschlägen erfolgten je Konfiguration 36 Impulse am Versuchsstand-M und 60 Impulse am Versuchsstand-S.

Mit den Fallgewichtsversuchen werden grundsätzlich folgende Fragestellungen verfolgt:

- Wie äußern sich Unterschiede zwischen Fallgewichtsversuchen im ebenen Verformungszustand und im Halbmodell?
- Ist eine Beziehung zwischen Verschiebungen und volumetrischen Dehnungen für eine Abschätzung der Wirtktiefe erkennbar?

An der Versuchsstudie zur Fallgewichtsverdichtung werden zudem folgende Ansätze untersucht:

- Wie wirken sich Variationen der Steuergrößen auf die Wirtiefe der Fallgewichtsmodelle aus?
- Welche Bedeutung hat der Durchmesser eines Fallgewichtes auf die Wirtiefe?
- Hat eine Anpassung der Abfolge und Anordnung von Einzelimpulsen Einfluss auf den Verdichtungserfolg?
- Welche Zusammenhänge lassen sich an den Ergebnissen erkennen und führt eine Skalierung der Ergebnisse aus den Modellversuchen zu realistischen Ergebnissen für Realverfahren?

## 7.2 Fallgewichtsversuche im ebenen Verformungszustand

Nachfolgend wird auf die Fallgewichtsversuche m47\_90-h0\_34-D300R mit mitteldicht gelagertem Sand ( $I_{D,0} = 0,50$ ) und m47\_90-h0\_34-D300R\_L ( $I_{D,0} = 0,22$ ) mit locker gelagertem Sand am Versuchsstand-M eingegangen. Die Aufnahmen erfolgten ausschließlich mit der Kamera *PCO DMAX HD+* (2,7 MP) bei einer zeitlichen Auflösung von 1.603 fps.

Wesentliche Angaben zu den Versuchen werden nachfolgend angegeben:

- Fallmasse  $m_0$ : 47,9 kg
- Fallhöhe  $h_0$ : 0,34 m
- Grundfläche des Fallgewichtes (B x T): 300 mm x 150 mm
- Kamera: *PCO DMAX HD+* (2,7 MP) / Kurzbezeichnung: **PCO**  
Konfiguration: 4,71 Pixel/mm, 0,21 mm/Pixel, 1.603 Bilder pro Sekunde

Exemplarisch wird zunächst auf den Versuch **m47\_90-h0\_34-D300R** mit Boden in mitteldichter Lagerung eingegangen ( $I_{D,0} = 0,50$ ). Der Suchbereich ROI für die DIC-Messung wurde auf eine Fläche von ca. B x H = 900 mm x 750 mm begrenzt. Für die Auswertung der Versuche wurden die Korrelations-einstellungen gemäß Tabelle 7.1 gewählt:

Tabelle 7.1 DIC-Korrelationen für m47\_90-h0\_34-D300R mit Angabe der gewählten Größe für Facetten und Abstand Stützstellen

Kamera	Set DIC	Größe Facette		Abstand Stützstellen	
		Pixel	mm	Pixel	mm
PCO (1,45 Px/mm)	00	59	85,46	40	57,94
	01	39	39,11	27	26,07

Nachfolgende Abbildungen zeigen DIC-Ergebnisse vom Versuch m47\_90-h0\_34-D300R mit DIC Set 00 nach dem 1. Impuls. Die Tiefe des Setzungs-kraters betrug ca. 80 mm.

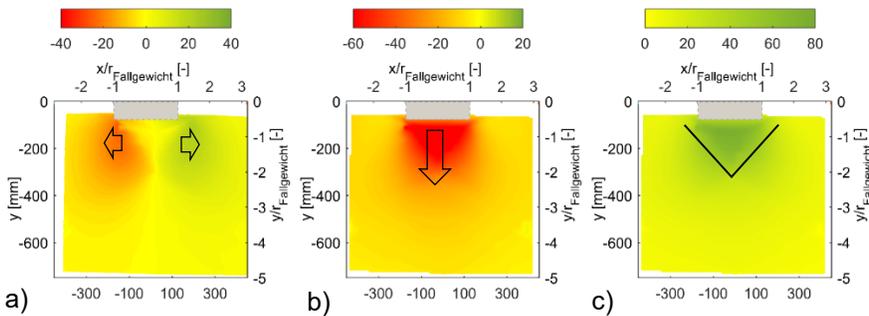


Abbildung 7.1 Verschiebungsfelder für a)  $u_x$ , b)  $u_y$ , und c)  $|u|$  in mm, Versuch m47\_90-h0\_34-D300R, nach dem 1. Impuls

Die Verschiebungsfelder in Abbildung 7.1 veranschaulichen deutlich die lokalen Bodenverschiebungen mit starken Setzungen unterhalb und Seitwärtsbewegungen neben dem Fallgewicht. Gemäß Abbildung 7.1c) finden die größten Verschiebungen in einem keilförmigen Bereich unterhalb des Fallgewichtes statt.

An den Scherdehnungen  $\gamma$  in Abbildung 7.2c) lassen sich deutlich die nach Prandtl [PRA20] und aus den statischen Versuchen bekannten Scherzonen erkennen. Die vertikalen Dehnungsanteile  $\varepsilon_y$  treten v.a. unterhalb des Setzungs-kraters bis in eine Tiefe von ca. 400 mm auf. Diese Dehnungsanteile prägen deutlich die Ausbildung der Verformungen in diesem Fallgewichtsversuch.

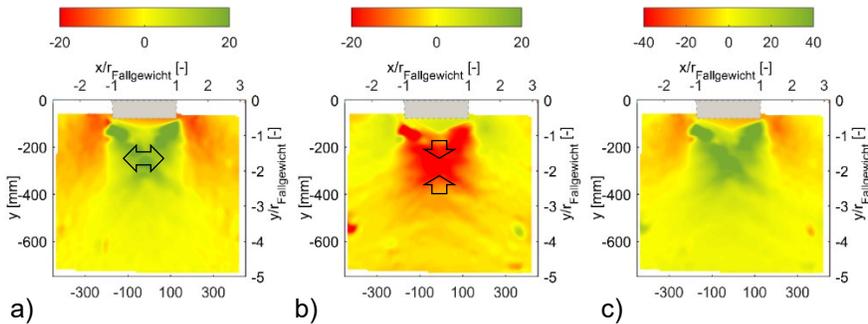


Abbildung 7.2 Dehnungsfelder für a)  $\varepsilon_x$ , b)  $\varepsilon_y$ , und c)  $\gamma$  in %, Versuch m47\_90-h0\_34-D300R, nach dem 1. Impuls

Zur Bewertung einer Verdichtungswirkung werden in nachfolgender Abbildung 7.3 die Dehnungsfelder für  $\varepsilon_{vol}$  nach dem 1, 2. und 3. Impuls dargestellt. Während des 3. Impulses kam es zu einem Ausfall einer Beleuchtungseinheit. Aus diesem Grund konnte der Bildbereich oben rechts in Abbildung 7.3c) mit der DIC-Methode nicht vollständig ausgewertet werden.

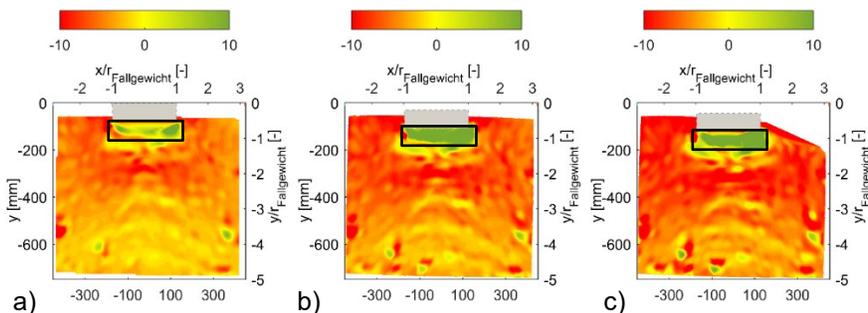


Abbildung 7.3 Dehnungsfelder für  $\varepsilon_{vol}$  in %, Versuch m47\_90-h0\_34-D300R: a) nach dem 1. Impuls (Kratertiefe ca. 80 mm), b) nach dem 2. Impuls (Kratertiefe ca. 119 mm) und c) nach dem 3. Impuls (Kratertiefe ca. 134 mm)

Die Darstellungen zur volumetrischen Dehnung  $\varepsilon_{vol}$  deuten darauf, dass bereits nach dem 1. Impuls gemäß Abbildung 7.3a) der Versuchssand in der oberen Hälfte des Versuchsbehälters nennenswert verdichtet wurde. Anhand der Darstellungen in Abbildung 7.2a) und b) lässt sich differenzierter erkennen, dass diese Verdichtung unterhalb des Verdichtungskraters vor allem auf vertikale Dehnungsanteile zurückzuführen ist. Seitlich des Verdichtungskraters führen

vor allem horizontale Dehnungsanteile zur Volumenverringerng. Nicht ausgeschlossen werden kann, dass ungewollte Vibrationen am Versuchstand diesen Effekt verstärkt haben. Direkt unterhalb des Fallgewichts werden positive Dehnungen des Sandes durch die DIC-Methode ausgegeben, die auf eine Auflockerung deuten. Die Ergebnisse für diesen Teilbereich gelten jedoch nur für einzelne Sandkörner, die beim Aufprallvorgang in einen Spalt zwischen Fallgewicht und Sichtebeine gedrängt wurden. Diese Ergebnisse sind als nicht repräsentativ einzuschätzen und wurden daher mit einem Rahmen markiert.

Zur Quantifizierung der Verschiebungs- und Dehnungsergebnisse werden in nachfolgende Abbildungen exemplarisch Ergebnisse für den 1. Impuls an vertikalen Schnitten veranschaulicht. Die Lage der Schnitte ist in Abbildung 7.4a) dargestellt.

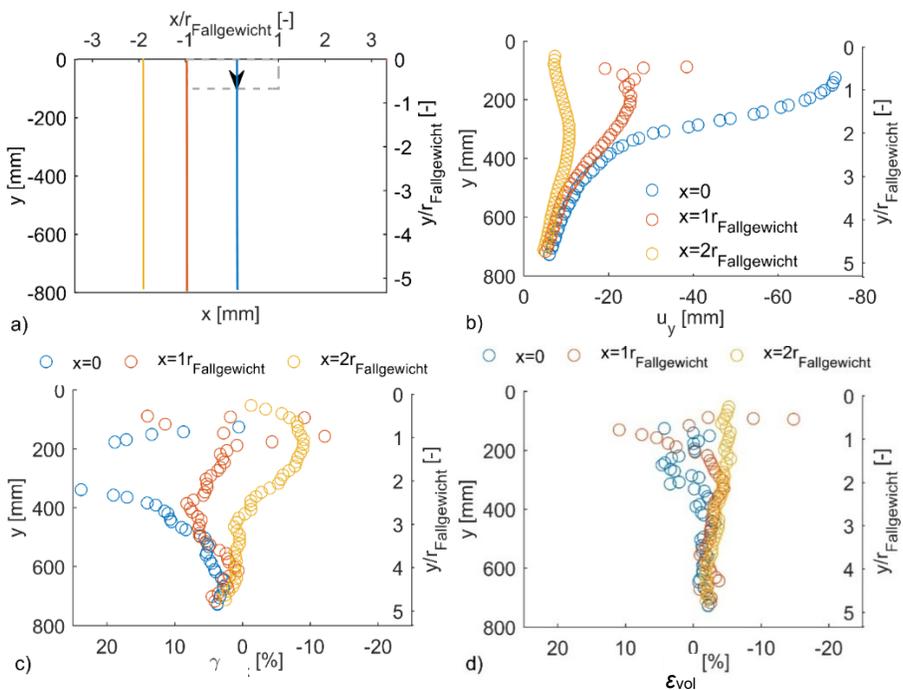


Abbildung 7.4 Versuch m47\_90-h0\_34-D300R mit Ergebnisdarstellung entlang von Schnittlinien: a) Lage der Schnittlinien, b) Verschiebungen  $u_y$  in mm, c)  $\gamma$  in %, d)  $\epsilon_{\text{vol}}$  in %

Die Diagramme in Abbildung 7.4b) weisen die maximalen Verschiebungen  $u_y$  direkt unterhalb des Fallgewichtes aus. Mit zunehmender Entfernung von der Achse  $x=0$  nehmen auch die maximalen Verschiebungen  $u_y$  deutlich ab. In einem Abstand von  $x=2r_{\text{Fallgewicht}}$  (300 mm) werden die maximalen Verschiebungen bei  $u_y$  bei  $y=-300$  mm ausgegeben.

Die Ergebnisse für  $\gamma$  zeigen, dass sich das Verformungsverhalten im Hinblick auf das Vorzeichen in Abhängigkeit von der Lage des Schnittes gegensätzlich verhält. Besonders deutliche Scherdehnungen werden in einer Tiefe von ca. 300 mm unterhalb der ursprünglichen Oberfläche erhalten. Trotz starker Scherdehnungen ergeben sich gleichzeitig relativ geringe volumetrische Dehnungen. Bis in eine Tiefe von ca. 400 mm zeigen sich beim Vergleich der Schnitte stark unterschiedliche Ergebnisse. Ab dieser Tiefe zeigen sich einheitlich leicht negative volumetrische Dehnungen, die mit weiter zunehmender Tiefe stetig gegen 0 tendieren.

Nachfolgend werden für den Versuch **m47\_90-h0\_34-D300R\_L** in lockerer Lagerung ( $I_{D,0} = 0,22$ ) die DIC-Ergebnisse veranschaulicht. Die Dehnungsfelder nach dem 1. Impuls sind in Abbildung 7.5 dargestellt. Die weiteren Abbildungen stellen Ergebnisse für die Verschiebungsbeträge  $|u|$  und die volumetrische Dehnung  $\varepsilon_{\text{vol}}$  jeweils nach dem 1., 2. und 3. Impuls nebeneinander.

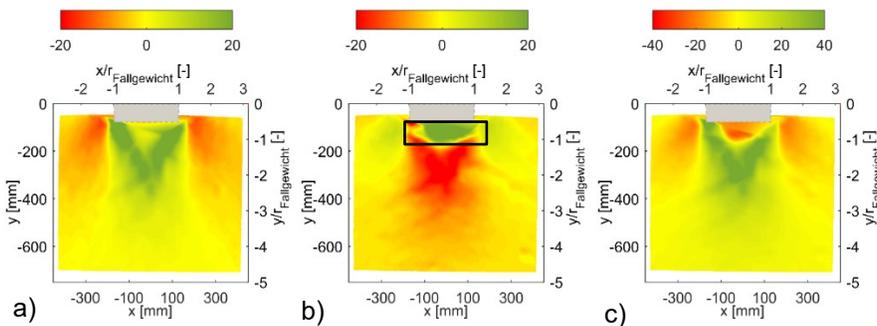


Abbildung 7.5 Dehnungsfelder für a)  $\varepsilon_x$ , b)  $\varepsilon_y$ , und c)  $\gamma$  in %, Versuch m47\_90-h0\_34-D300R\_L, nach dem 1. Impuls

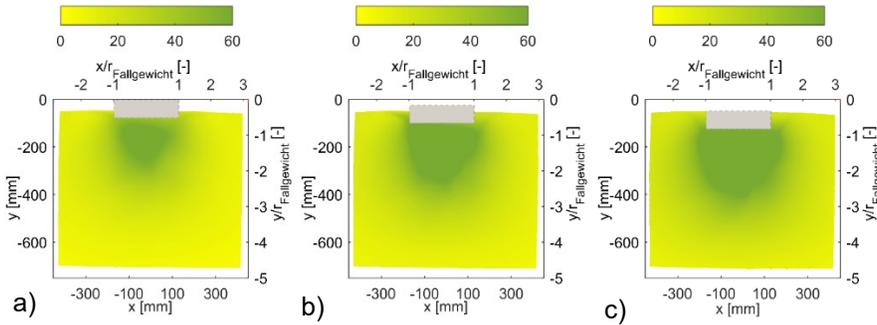


Abbildung 7.6 Verschiebungsfelder für  $|u|$  in mm, Versuch m47\_90-h0\_34-D300R\_L: a) nach dem 1. Impuls (Kratertiefe ca. 83 mm), b) nach dem 2. Impuls (Kratertiefe ca. 115 mm) und c) nach dem 3. Impuls (Kratertiefe ca. 144 mm)

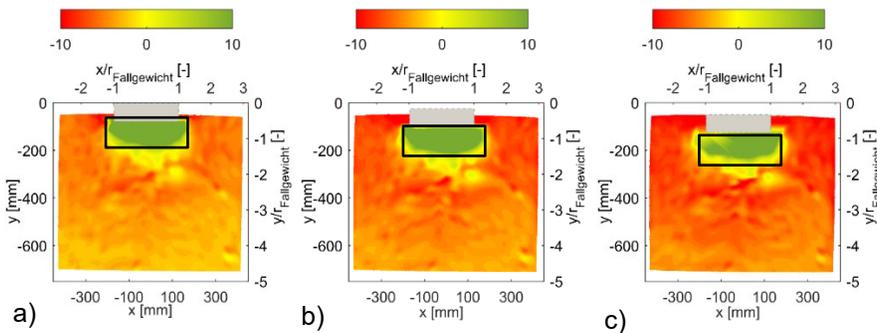


Abbildung 7.7 Dehnungsfelder für  $\varepsilon_{vol}$  in %, Versuch m47\_90-h0\_34-D300R\_L: a) nach dem 1. Impuls (Kratertiefe ca. 83 mm), b) nach dem 2. Impuls (Kratertiefe ca. 115 mm) und c) nach dem 3. Impuls (Kratertiefe ca. 144 mm)

Die Darstellungen in Abbildung 7.5 veranschaulichen anhand der richtungsabhängigen Dehnungen  $\varepsilon_x$  und  $\varepsilon_y$  sowie anhand der Scherdehnungen  $\gamma$ , dass sich auch beim Versuch in lockerer Lagerung deutlich Scherbereiche ausgehend von den Rändern des Verdichtungskraters ausbilden. Auch in diesem Versuch kam es beim Aufprall des Fallgewichtes zu ungewollter Verdrängung von Sandkörnern zwischen Fallgewicht und Sichtebeine. Diese Messbereiche sind somit nicht repräsentativ und wurden in Abbildung 7.5 und Abbildung 7.7 mit Rahmen gekennzeichnet.

Die Verschiebungsfelder in Abbildung 7.6 zeigen die Ausbildung eines keil- bis halbkreisförmigen Bereiches, der mit zunehmender Impuls-Anzahl intensiver und großräumiger ausgebildet ist.

Die Darstellungen zur volumetrischen Dehnung in Abbildung 7.7 weisen für einen großen Bereich des ROI negative volumetrische Dehnungen (Kompression) aus. Mit zunehmender Anzahl der Impulse lässt sich an der intensiveren roten Färbung die Zunahme der Verdichtungswirkung erkennen. Analog zum Versuch m47\_90-h0\_34-D300R in anfangs mitteldichter Lagerung ist diese Volumenabnahme unterhalb des Verdichtungskraters vor allem auf vertikale Dehnungsanteile zurückzuführen. Seitlich des Verdichtungskraters sind überwiegend horizontale Dehnungsanteile für den Verdichtungseffekt ursächlich (s. Abbildung 7.5a) und b)).

An den beiden Fallgewichtsversuchen im ebenen Verformungszustand kann zusammenfassend Folgendes gezeigt werden:

- An den Darstellungen der Verschiebungs- und Dehnungsfelder lassen sich an den Fallgewichtsversuchen Verformungsbereiche abgrenzen, die aus den quasistatischen Streifenfundamentversuchen bekannt sind. Dabei bilden sich bereits nach dem 1. Impuls massive Scherzonen unterhalb des Verdichtungskraters aus. Besonders unterhalb des Fallgewichtes werden starke vertikale Verschiebungen und auch negative vertikale Dehnungen festgestellt.
- Die Ergebnisse der volumetrischen Dehnungen lassen mit zunehmenden Impulsen eine generelle Verdichtungswirkung an den Versuchen erkennen. Eine räumliche Abgrenzung ist jedoch nicht eindeutig möglich. Eine ungewollte Übertragung von Schwingungen bzw. Verformungen der Behälterwände kann als Teilgrund für die Verdichtungseffekte nicht ausgeschlossen werden. Die Darstellung über Schnittlinien zeigt für den Versuch m47\_90-h0\_34-D300R bis in eine Tiefe von 400 mm relativ deutliche volumetrische Änderungen.

### **7.3 Fallgewichtsversuche als Halbmodell**

Nachfolgend wird zunächst exemplarisch auf den Fallgewichtsversuch m48\_10-h0\_34-D435 am Versuchsstand-M eingegangen.

Wesentliche Angaben zu den Versuchen werden nachfolgend aufgelistet:

- Fallmasse  $m_0$ : 48,1 kg
- Fallhöhe  $h_0$ : 0,34 m
- Durchmesser des Fallgewichtes: 435 mm
- Kamera: *PCO DMAX HD+* (2,7 MP) / Kurzbezeichnung: **PCO**  
Konfiguration: 4,71 Pixel/mm, 0,21 mm/Pixel, 1.603 Bilder pro Sekunde (1.603 fps)

Der Versuch wurde mit Sand in mitteldichter Lagerung durchgeführt ( $I_{D,0} = 0,50$ ). Der Suchbereich ROI für die DIC-Messung wurde auf eine Fläche von ca.  $B \times H = 900 \text{ mm} \times 900 \text{ mm}$  festgelegt. Für die Auswertung der Versuche wurden die Korrelationseinstellungen gemäß Tabelle 7.2 gewählt:

Tabelle 7.2 DIC Korrelationen für m47\_38-h0\_34-D435 mit Angabe der gewählten Größe für Facetten und Stützstellenabstand

Kamera	Set DIC	Größe Facette		Abstand Stützstellen	
		Pixel	mm	Pixel	mm
PCO (1,45 Px/mm)	00	59	85,46	40	57,94
	01	39	56,55	26	37,70
	02	25	36,25	17	24,65

Nachfolgende Abbildungen zeigen die DIC-Ergebnisse für den Versuch m47\_38-h0\_34-D435 mit Set 01 nach dem 1. Impuls. Die Tiefe des Setzungs-kraters betrug ca. 44 mm.

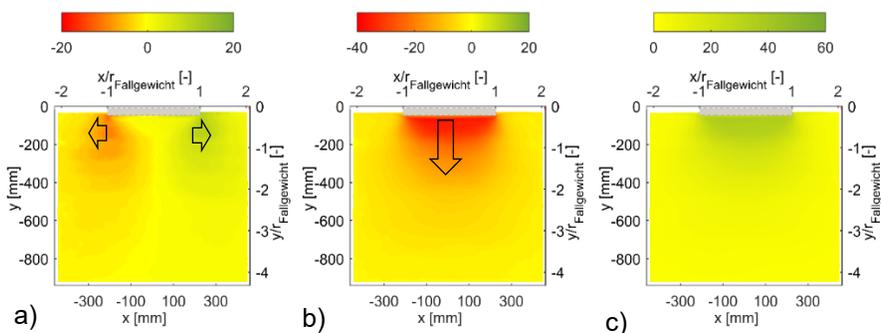


Abbildung 7.8 Verschiebungsfelder für a)  $u_x$ , b)  $u_y$ , und c)  $|u|$  in mm, Versuch m48\_10-h0\_34-D435, nach dem 1. Impuls

Die Verschiebungsfelder in Abbildung 7.8 zeigen ein sehr symmetrisches Bild mit leichten horizontalen Verschiebungen unter den Ecken des Verdichtungskraters. Ein halbkreis- bis keilförmiger Bereich unter dem Verdichtungskrater wird v.a. vertikal verschoben. In diesem Bereich und entlang eines vertikalen Bandes mittig unter dem Verdichtungskrater treten nahezu keine horizontalen Verschiebungen auf.

An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass die Scherdehnungen und volumetrischen Dehnungen in Analogie zu den Versuchen im ebenen Verformungszustand nach den Gl. 6.3 und 6.4 ermittelt wurden. Diese Annahme ist für den hier vorliegenden räumlichen Fall nicht korrekt, ermöglicht aber eine saubere Nachrechnung im Sinne eines Benchmark-Test mit numerischen Methoden. Annahmen zur Berücksichtigung der 3. räumlichen Dehnungskomponente auf Grundlage der 2 Dehnungskomponenten aus der DIC-Ebene basieren auf stark idealisierten Annahmen wie bspw. Axialsymmetrie, weisen jedoch große Unsicherheiten auf und können bei der Auswertung kleiner Dehnungen wie bei der Verdichtung von Boden zu unplausiblen Ergebnissen führen.

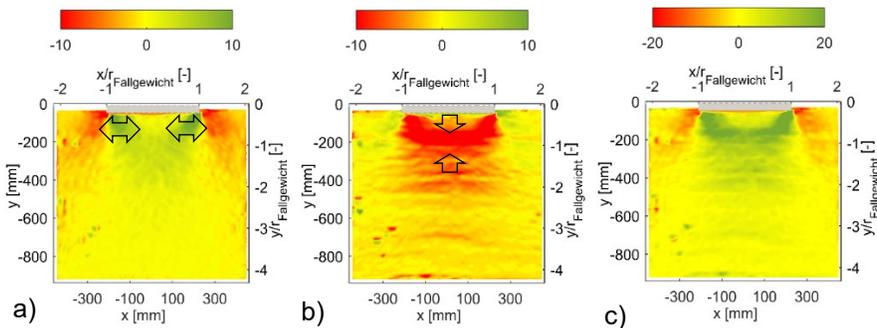


Abbildung 7.9 Dehnungsfelder für a)  $\varepsilon_x$ , b)  $\varepsilon_y$ , und c)  $\gamma$  in %, Versuch m48\_10-h0\_34-D435, nach dem 1. Impuls

Die Dehnungsfelder in Abbildung 7.9 zeigen deutlich die lokalen Dehnungsbereiche unterhalb und seitlich des Verdichtungskraters. Dabei lässt sich ein halbkreis- bis keilförmiger Bereich unter dem Verdichtungskrater erkennen, in dem nahezu keine Scherung auftritt. Für den gleichen Bereich wird in Abbildung 7.8 die maximale Setzung ausgewiesen.

In nachfolgender Abbildung 7.10 werden ausgewählte Verschiebungs- und Dehnungsergebnisse nach dem 1. Impuls an vertikalen Schnitten dargestellt. Die Lage der Schnitte ist in Abbildung 7.10a) gekennzeichnet.

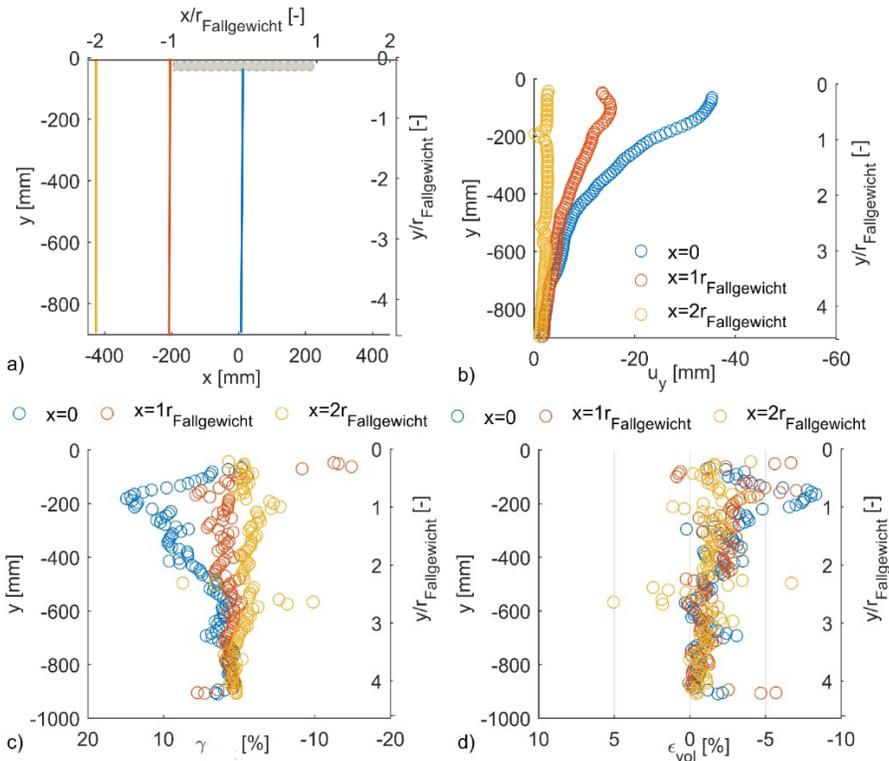


Abbildung 7.10 Versuch m48\_10-h0\_34-D435 mit Ergebnisdarstellung entlang von Schnittlinien: a) Lage der Schnittlinien, b) Verschiebungen  $u_y$  in mm, c)  $\gamma$  in %, d)  $\epsilon_{\text{vol}}$  in %

Die Abbildungen zeigen, dass mit fast 40 mm die stärksten Setzungen mittig unterhalb des Setzungskraters bei  $x=0$  auftreten und mit zunehmender Tiefe abnehmen. Der Graph für den Schnitt am Rand des Setzungskraters weist einen ähnlichen Verlauf mit einem Maximum an der Probenoberseite auf. Das Maximum wird hier mit ca. 15 mm deutlich geringer ausgewiesen. Die Ergebnisse der Dehnungen weisen die stärksten Scherungen für den Schnitt  $x=0$  bei ca. 200 mm bzw. bei  $y/r_{\text{Fallgewicht}} = 1$  aus. An gleicher Stelle werden mit ca.



Bereich ist nicht repräsentativ und führt fälschlicherweise zur Ausgabe von positiven volumetrischen Dehnungen in Abbildung 7.12 (grüne Teilbereiche).

Die Abbildungen für volumetrische Dehnung  $\epsilon_{\text{vol}}$  zeigen, dass in einer Tiefe von ca. 200 mm bei  $y/r_{\text{Fallgewicht}} = -1$  ein Bereich in etwa in der Breite des Fallgewichtes nennenswert verdichtet wird. Mit zunehmender Impulsanzahl wird die Ausdehnung dieses Bereiches vergrößert. Zusätzlich zeigen sich unterhalb und neben dem Setzungskrater mehrere Bereiche, in denen anteilig eine Verdichtung ausgewiesen wird (rote Färbung im Dehnungsfeld). Eine lokale Abgrenzung des verdichteten Bereiches ist nur bedingt möglich.

Nachfolgend werden entlang der Schnittlinie  $x=0$  gemäß Abbildung 7.10a) für den 1., 2. und 3. Impuls die Verschiebungen  $u_y$  und in die volumetrischen Dehnungen  $\epsilon_{\text{vol}}$  dargestellt.

Die Graphen in Abbildung 7.13a) lassen für die vertikalen Verschiebungen  $u_y$  mit zunehmender Anzahl von Impulsen deutlich eine Zunahme der maximalen Verschiebung sowie gleichzeitig einhergehende Verlagerung in die Tiefe erkennen. Die Darstellung der volumetrischen Dehnungen  $\epsilon_{\text{vol}}$  in Abbildung 7.13b) zeigt im Vergleich zu Abbildung 7.13a) ein eher unstetiges Verhalten. Es lassen sich dennoch eine Zunahme der Verdichtungsarbeit mit jedem Impuls an einer leichten horizontalen und vertikalen Verlagerung des Graphen erkennen.

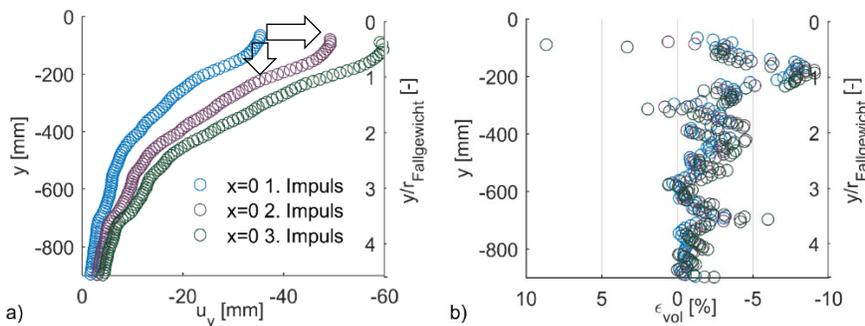


Abbildung 7.13 Versuch m48\_10-h0\_34-D435 mit Ergebnisdarstellung entlang der Schnittlinie  $x=0$  mittig unter dem Verdichtungskrater für den 1., 2. und 3. Impuls: a) Verschiebungen  $u_y$  in mm, b)  $\epsilon_{\text{vol}}$  in %

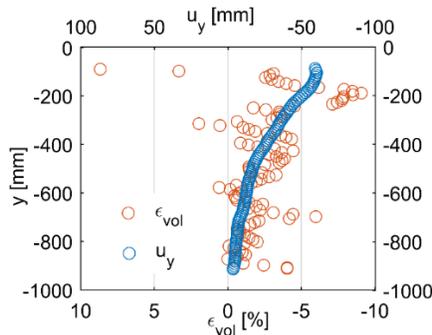


Abbildung 7.14 Versuch m48\_10-h0\_34-D435 mit Ergebnisdarstellung entlang der Schnittlinie  $x=0$  mittig unter dem Verdichtungskrater für den 1. Impuls: Verschiebungen  $u_y$  in mm und volumetrische Dehnungen  $\epsilon_{vol}$  in %

Abbildung 7.14 veranschaulicht für den 1. Impuls die Verschiebungen  $u_y$  und die volumetrischen Dehnungen  $\epsilon_{vol}$  für die Schnittlinie  $x=0$  gemeinsam in einem Diagramm. Die Graphen zeigen in Abhängigkeit der gewählten Skalierung der x-Achsen tendenziell einen ähnlichen Verlauf über die Tiefe. Für den vorliegenden Fall der Fallgewichtsverdichtung entlang eines vertikalen Schnittes mittig unter dem Verdichtungskrater kann demnach näherungsweise ein Zusammenhang zwischen Verschiebungen  $u_y$  und volumetrischer Dehnungen  $\epsilon_{vol}$  von  $10 \text{ mm } u_y \triangleq 1 \% \epsilon_{vol}$  angegeben werden. Es ist jedoch zu beachten, dass eine solche Beziehung nicht verallgemeinert werden kann.

Folgendes konnte an der Auswertung des Fallgewichtsversuches am Halbmodell gezeigt werden:

- Anhand der Verschiebungsfelder lassen sich deutlich wesentliche Verformungsbereiche nach einzelnen Impulsen erkennen. Es handelt sich dabei vor allem um vertikale Verschiebungsanteile. Leichte horizontale Verschiebungen treten v.a. seitlich vom Verdichtungskrater auf.
- Die Dehnungsfelder in Abbildung 7.9 weisen vor allem vertikale Dehnungsanteile aus. Die horizontalen Dehnungsanteile konzentrieren sich auf die Bodenbereiche unterhalb der Ränder des Verdichtungskraters. Die Scherbereiche ähneln dabei im Ansatz denen, die aus den statischen Versuchen unter Streifen- oder Kreisfundamenten bekannt sind. Die Darstellungen zur volumetrischen Dehnung  $\epsilon_{vol}$  in Abbildung 7.12 deuten auf großräumige Verdichtung nahezu im gesamten ROI. Unterhalb des Verdichtungskraters wurde besonders ab

einer Tiefe von ca. 200 mm unter ursprünglicher Probenoberfläche eine deutliche Volumenreduzierung ausgewiesen.

- Die Gegenüberstellung an einem vertikalen Schnitt in Abbildung 7.14 mittig unter dem Verdichtungskrater deutet auf einen Zusammenhang zwischen vertikalen Verschiebungen  $u_y$  und volumetrischer Dehnungen  $\varepsilon_{\text{vol}}$  im Verhältnis von näherungsweise 10 mm  $u_y$  zu 1 %  $\varepsilon_{\text{vol}}$  hin.

## 7.4 Ergebnisse zusätzlicher Sondierungen

Die Sonde Typ *Panda* wurde vordergründig zur Kontrolle der Probenhomogenität am Versuchsstand-M gemäß Kap. 5.6 eingesetzt. Nachfolgend soll geprüft werden, ob mit Hilfe der *Panda*-Sonde auch Hinweise auf eine Verdichtungswirkung der Fallgewichtsversuche am Versuchsstand-M erkannt werden können. Betrachtet werden der Halbmodell-Versuch m48\_10-h0\_34-D435 mit 24 Impulsen sowie der Fallgewichtsversuch m47\_90-h0\_34-D300R\_L im ebenen Verformungszustand mit 12 Impulsen. Um den Versuch nicht zu beeinflussen wurden die Sondierungen nach Abschluss der Fallgewichtsversuche durchgeführt. Die Lage der Sondierungen wurden in Abbildung 7.15a) und Abbildung 7.16a) veranschaulicht. Eine Sondierung wurde dabei jeweils mittig im Verdichtungskrater angeordnet. 2 weitere Sondierungen wurden in einem möglichst großen Abstand vom Verdichtungskrater von mind. 435 mm (Durchmesser des Fallgewichtes) angeordnet.

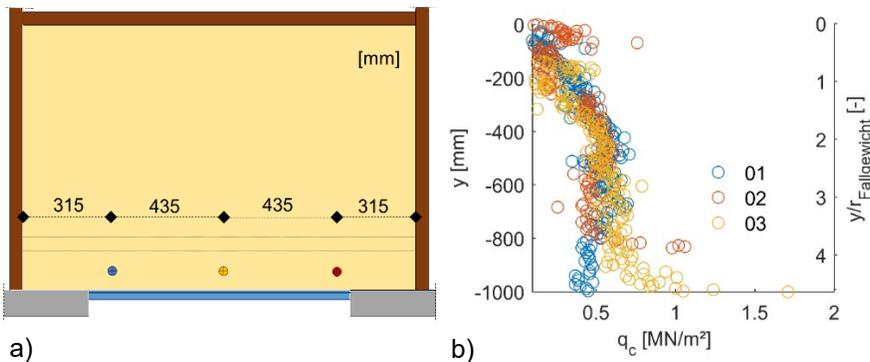


Abbildung 7.15 Ergebnisse von Sondierungen mit der *Panda*-Sonde im Versuchsstand-M: a) Lage der Sondierungen in der Draufsicht, b) Sondierwiderstände  $q_c$  nach 24 Impulsen im Versuch m48\_10-h0\_34-D435 ( $I_{D,0} = 0,5$ )

Die Ergebnisse zum Halbmodell-Versuch m48\_10-h0\_34-D435 in Abbildung 7.15b) zeigen keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Sondierungen. Mögliche Gründe hierfür sind, dass im Versuch keine nennenswerte Verdichtung erreicht wurde. Dies widerspricht jedoch den Ergebnissen der DIC-Messungen für die ersten 3 Impulse nach Kap. 7.3. Ein anderer möglicher Grund ist, dass es durch die hohe Anzahl von 24 Impulsen zu einer Vergleichmäßigung der Lagerungsdichte gekommen ist und eine Verdichtungswirkung nicht nur zentral unter Verdichtungskrater, sondern auch im Abstand von  $2 \times r_{\text{Fallgewicht}}$  (435 mm) eingetreten ist.

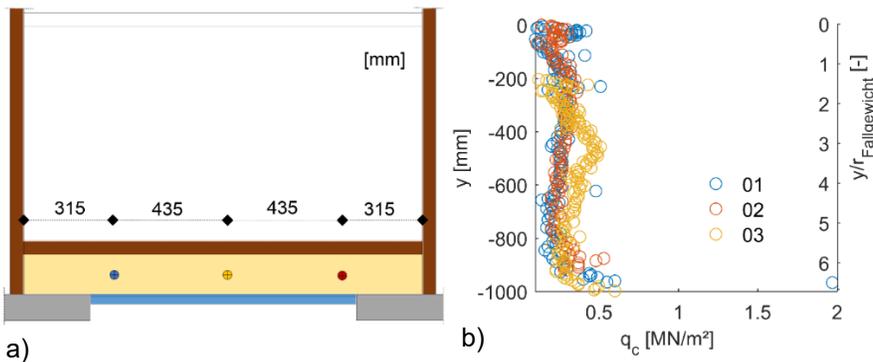


Abbildung 7.16 Ergebnisse von Sondierungen mit der *Panda*-Sonde im Versuchsstand-M: a) Lage der Sondierungen in der Draufsicht, b) Sondierwiderstände  $q_c$  nach 12 Impulsen im Versuch m47\_90-h0\_34-D300R\_L ( $I_{D,0} = 0,22$ )

Im Versuch m47\_90-h0\_34-D300R\_L ( $I_{D,0} = 0,22$ ) werden in den jeweils äußeren Sondierungen Nr. 01 und Nr. 02 näherungsweise konstante Sondierwiderstände über die Probenhöhe festgestellt. Ab einer Probentiefe von ca. 200 mm zeigen sich bis in die max. Sondiertiefe relativ konstante Messwertniveaus für  $q_c$  zwischen  $0,2 \text{ MN/m}^2$  und  $0,3 \text{ MN/m}^2$ . Dies deutet auf eine homogene Probenverteilung und gibt gleichzeitig keine Hinweise auf Verdichtungswirkung in diesen äußeren Sondierungen hin. Für die mittige Sondierung Nr. 03 zeigt sich ebenfalls der charakteristische Verlauf des Sondierwiderstandes an der Oberfläche mit einem Messwertanstieg bis auf ca.  $0,5 \text{ MN/m}^2$  in einer Tiefe von 500 mm (ca. 200 mm bis 300 mm unter Verdichtungskrater). Mit zunehmender Sondiertiefe zeigt sich ein Messwertrückgang bis auf das Niveau ca.  $0,3 \text{ MN/m}^2$  (analog der beiden äußeren Sondierungen). Diese Bereiche mit Messwerten für  $q_c$  oberhalb der äußeren Sondierungen deuten auf erfolgreiche Verdichtungsarbeit in einer Tiefe von 500 mm bis 700 mm unter

ursprünglicher Geländeoberkante. Eine Bewertung der Verdichtungswirkung bis 500 mm unter Geländeoberkante ist aufgrund der Auflockerung durch die Sondenspitze an den Messwerten nicht eindeutig möglich.

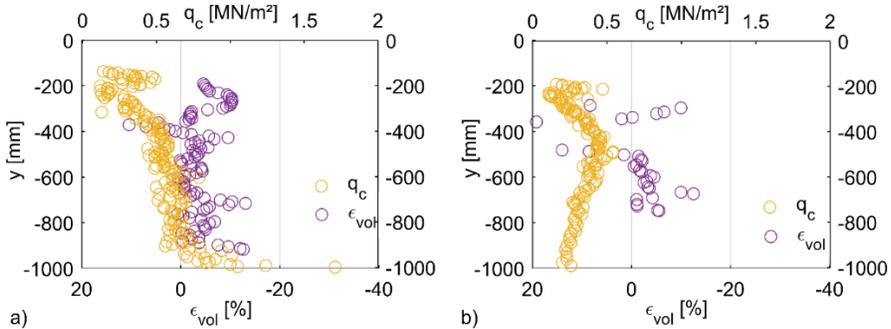


Abbildung 7.17 Sondierwiderstände  $q_c$  der Sondierung 03 zusammen mit DIC-Ergebnissen zur und volumetrische Dehnungen  $\epsilon_{vol}$  in %  $x=0$  mittig unter dem Verdichtungskrater: a) nach 24. Impuls vom Versuch m48\_10-h0\_34-D435, b) nach 12. Impuls vom Versuch m47\_90-h0\_34-D300R

Nachfolgend werden DIC-Ergebnisse zur volumetrischen Dehnung nach 24 Impulsen vom Versuch m48\_10-h0\_34-D435 und nach 12 Impulsen vom Versuch m47\_90-h0\_34-D300R veranschaulicht. Abbildung 7.17 zeigt die DIC-Ergebnisse für die volumetrische Dehnung  $\epsilon_{vol}$  entlang von Schnitt  $x=0$  mittig unter dem Verdichtungskrater zusammen mit den Sondierergebnissen der Sondierung 03.

Die DIC Ergebnisse in Abbildung 7.17a) deuten mit überwiegend negativen volumetrischen Dehnungen  $\epsilon_{vol}$  auf eine erfolgreiche Verdichtung für den Versuch m48\_10-h0\_34-D435. Die volumetrischen Dehnungen betragen über die gesamte Messhöhe im Mittel -3,8 % (ca. 200 mm bis 900 mm unter ursprünglicher Probenoberkante). Für den Versuch m47\_90-h0\_34-D300R weist die DIC-Auswertung in Abbildung 7.17b) nach 12 Impulsen v.a. ab einer Tiefe von ca. 500 mm unter ursprünglicher Probenoberkante ebenfalls eine erfolgreiche Verdichtung mit negativen volumetrischen Dehnungen aus. Die volumetrische Dehnung  $\epsilon_{vol}$  beträgt für diesen Tiefenbereich bis zur maximalen Messtiefe i.M. - 3,5 %. Oberhalb werden jedoch sehr deutliche positive volumetrische Dehnungen ausgegeben, welche auf Auflockerungen deuten. Die detaillierteren DIC Ergebnisse zum 1. Impuls in Kap. 7.2 (Abbildung 7.2) deuten darauf, dass unterhalb des Verdichtungskraters der Boden neben einer ver-

tikalen Stauchung gleichzeitig eine sehr starke horizontale Verdrängung erfährt, die letztendlich zu den positiven volumetrischen Dehnungen führt. Bemerkenswert ist, dass sich diese Art der Bodenverformung über die Sondierungen nicht detektieren lässt. Vielmehr lassen die Sondierergebnisse auf eine erfolgreiche Verdichtungsarbeit ab 400 mm unter ursprünglicher Probenoberkante schließen. Für den Versuch m48\_10-h0\_34-D435 deuten sowohl DIC-Auswertung als auch die Sondierung auf eine erfolgreiche Verdichtungsarbeit ab einer Tiefe von 500 mm unter ursprünglicher Probenoberkante hin.

## 7.5 Ergänzende Messungen

Nachfolgend werden Messergebnisse zum Bewegungsverhalten des Fallgewichtes sowie zur Verformung der Sichtebene und der Behälterwand vorgestellt. Die Messungen wurden exemplarisch an Fallgewichtsversuchen am Versuchsstand-M durchgeführt. Abbildung 7.18 veranschaulicht in Prinzipskizzen die Anordnung von 4 kapazitiven Beschleunigungssensoren mit Messbereichen bis max. 50-facher Erdbeschleunigung. Zudem wird die Position des Lasertriangulations-Wegsensor Typ ILD1800 zur Erfassung von Verschiebungen der Sichtebene in Feldmitte dargestellt. Der Laser-Wegsensor muss in geringem Abstand von wenigen Millimetern zur Sichtebene angeordnet werden. Für diesen Sonderversuch wurde ein Querträger zur Befestigung des Sensors angeordnet. Um mögliche Bewegungen des Querträgers zu erfassen, wird der Beschleunigungssensor 18262 neben dem Laser-Wegsensor angeordnet. Der Sensor 18260 wird auf die Mitte der Sichtebene geklebt und soll ebenfalls zur Ermittlung von Verschiebungen bzw. Verformungen der Sichtebene verwendet werden. Der Sensor 18259 wurde zu Erfassung von Verschiebungen an der seitlichen Behälterwand mit den Kanthölzern verschraubt.

Abbildung 7.19 zeigt Rohdaten zur Messung von Beschleunigungen während des 1. Impulses im Fallgewichtsversuch m35\_88\_h0\_45\_D200. Gemessen wurde mit einer zeitlichen Abtastung von 10 kHz. Abbildung 7.20 veranschaulicht Ergebnisse zur Geschwindigkeit  $v(t)$  und zum Weg  $u(t)$  des Sensors während des Impulses. Die Ermittlung von  $v(t)$  und  $u(t)$  erfolgt in *Matlab* über eine Integration der Rohdaten der Beschleunigungssensoren mit der Funktion *trapz* nach dem Trapezverfahren.

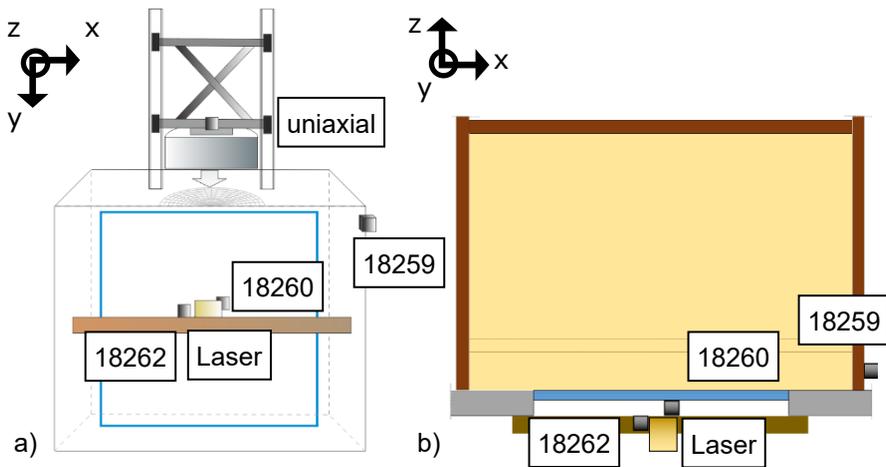


Abbildung 7.18 Prinzipskizzen zur Anordnung von 4 Beschleunigungssensoren und einem Lasertriangulations-Wegsensor während Versuchen zur Fallgewichtsverdichtung am Versuchstand-M

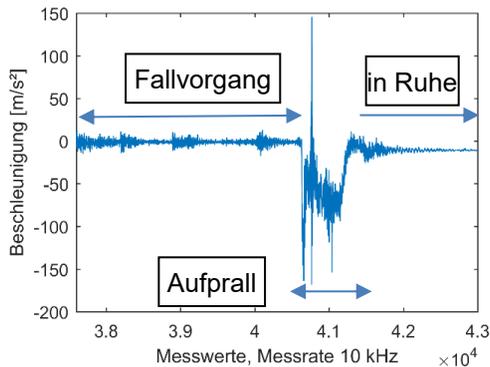


Abbildung 7.19 Messung der Beschleunigung des Fallgewichtes, Versuchstand-M, Versuch m35\_88\_h0\_45\_D200, 1. Impuls

Die Messergebnisse der vertikalen Beschleunigung am Fallgewicht in Abbildung 7.19 belegen die wesentlichen Bewegungsphasen des Fallgewichtes mit Fallvorgang, Aufprall und anschließender Lage in Ruhe. Die Ergebnisse zur Geschwindigkeit weisen unmittelbar vor dem Aufprall eine maximale Geschwindigkeit  $v_{\max} = 2,92 \text{ m/s}$  aus. Die Ergebnisdaten können belegen, dass das Fallgewicht während des Aufpralls stark abgebremst wird und anschließend in Ruhe liegen bleibt ( $v = 0 \text{ m/s}$ ). Dies bestätigt eine gute Qualität der durchgeführten Integration aus den Rohdaten der Beschleunigungsmessung.

Der gesamte Weg des Fallgewichtes  $u_{\max}$  setzt sich aus der Fallhöhe  $h_0$  von 0,45 m und der Eindringtiefe bzw. Tiefe des Setzungskraters zusammen. Die Ergebnisse in Abbildung 7.20b) weisen für den Versuch eine maximale Verschiebung  $u_{\max} = 0,53$  m aus. Dies entspricht einer plausiblen Kratertiefe von ca. 8 cm.

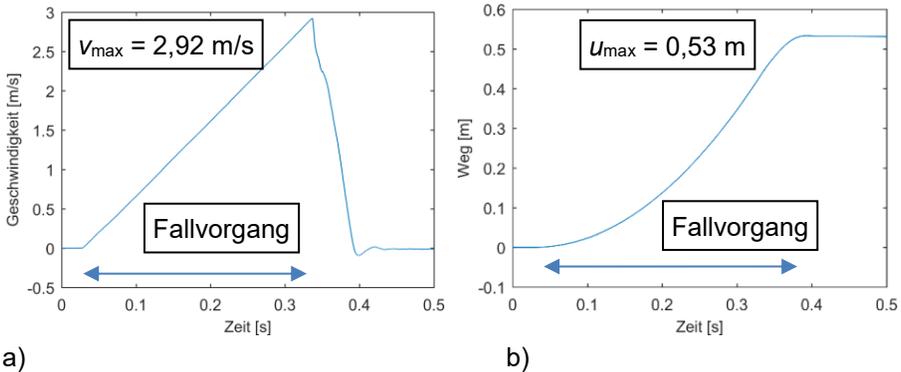


Abbildung 7.20 Messung des Bewegungsverhaltens des Fallgewichtes, Versuchsstand-M, Versuch m35\_88\_h0\_45\_D200, 1. Impuls: a) Geschwindigkeit des Fallgewichtes  $v(t)$ , b) Weg des Fallgewichtes

Die Geschwindigkeit eines Objektes im vertikalen freien Fall kann in Abhängigkeit der Fallhöhe bei Vernachlässigung von Reibungsverlusten näherungsweise nach Gl. 7.1 ermittelt werden:

$$v(h) = \sqrt{2gh_0} \quad (7.1)$$

mit

$v$ : Geschwindigkeit

$g$ : konstante Erdbeschleunigung  
(9,81 m/s<sup>2</sup>)

$h_0$ : Fallhöhe

Für den betrachteten Versuch ergibt sich nach Gl. 7.1 eine Geschwindigkeit für die Fallhöhe von 0,45 m von  $v = 2,97$  m/s. Die im Versuch ermittelte maximale Geschwindigkeit  $v_{\max} = 2,92$  m/s zeigt somit eine sehr gute Näherung und belegt, dass am Versuchsstand-M nahezu Freifallbedingungen vorliegen.

Ein nennenswertes Abbremsen des Fallvorganges ist nicht erkennbar. Vergleichbare Auswertungen für Fallgewichtsversuche am Versuchsstand-S zeigen hingegen, dass der Fallvorgang in Abhängigkeit der Masse der Fallgewichte an diesem Versuchsstand unterschiedlich stark abgebremst wird. Ein Vergleich theoretischer und gemessener Geschwindigkeiten für den Fallvorgang deutet auf eine Reduzierung der maximalen Geschwindigkeit auf 60 % bis 80 % hin.

Nachfolgende Abbildungen veranschaulichen Messergebnisse zum Verformungsverhalten bzw. zu Verschiebungen von Sichtebeine und Behälterwand. Abbildung 7.21 zeigt Messergebnisse aus dem Fallgewichtsversuch m47\_38-h0\_46-D300. Dargestellt sind Ergebnisse zur Verschiebung, die aus den Messdaten der Beschleunigungssensoren 18260 in der Mitte der Sichtebeine sowie durch den Sensor 18259 am seitlichen Behälterrand ermittelt wurden. Die Ergebnisse in Abbildung 7.21 weisen eine maximale Verformung der Sichtebeine in Feldmitte von  $u_{\max} = 1,5$  mm aus. Nach dem Aufprallvorgang reduziert sich die Verschiebung der Sichtebeine auf  $u = 0,8$  mm. An der gemessenen Stelle der Behälterwand werden maximale Verformungen  $u_{\max} = 0,2$  mm ausgewiesen.

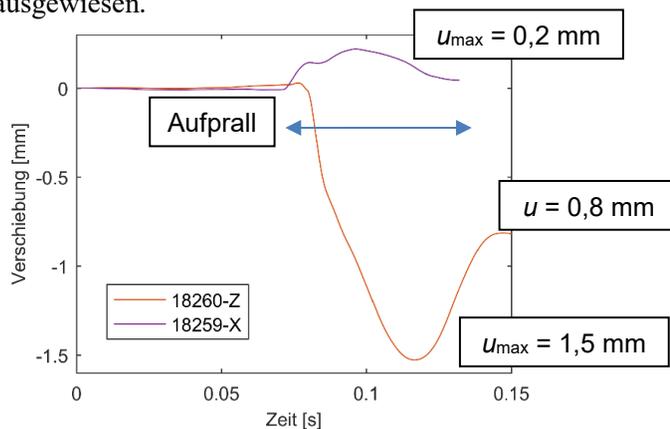
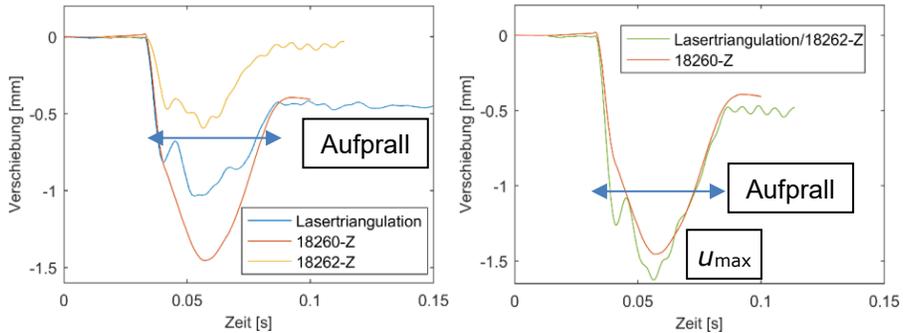


Abbildung 7.21 Messung der Verformung der Sichtebeine und der Behälterwand über Beschleunigungssensoren während des 1. Impulses im Versuch m47\_38-h0\_46-D300, Anordnung der Sensoren gemäß Abbildung 7.18

Abbildung 7.22 veranschaulicht Ergebnisse zum Verformungsverhalten der Sichtebeine in Feldmitte. Dargestellt werden Ergebnisse zur Verschiebung, die aus Messdaten der Beschleunigungssensoren 18260 und 18262 an Positionen

gem. Abbildung 7.18. Zudem werden Messergebnisse des verwendeten Lasertriangulations-Wegsensors veranschaulicht. Mit diesem Verfahren wird der Weg direkt gemessen.



a)

b)

Abbildung 7.22 Messung der Verformung der Sichtebene über Beschleunigungssensoren und Lasertriangulation während eines Fallgewichtversuches, Anordnung der Sensoren gemäß Abbildung 7.18

Die Ergebnisse in Abbildung 7.22a) weisen für den Beschleunigungssensor 18260 direkt auf der Sichtebene ein Ergebnis ähnlich den Versuchsergebnissen gemäß Abbildung 7.21 aus. Die maximale Verformung der Sichtebene in Feldmitte wird mit  $u_{max} = 1,5$  mm ermittelt. Nach dem Aufprallvorgang reduziert sich die Verschiebung der Sichtebene auf  $u = 0,5$  mm. Der Vergleich mit der Lasertriangulation zeigt eine gute Übereinstimmung für das Verschiebungsverhalten zu Beginn des Aufprallvorgangs und für die bleibenden Verformungen nach dem Aufprallvorgang. Für die maximale Verformung  $u_{max}$  zeigen sich hingegen deutliche Unterschiede. Die Verschiebungen von Sensor 18262 direkt neben dem Laser-Wegsensor zeigen, dass auch auf dem Querträger Bewegungen übertragen werden. In Abbildung 7.22b) werden die Verschiebungen für die Lasertriangulation und den Sensor 18262 addiert. Der Vergleich mit dem Sensor 18260 direkt auf der Sichtebene zeigt nun eine gute Übereinstimmung. Durch beide Verfahren wird eine maximale Verschiebung der Sichtebene in Feldmitte von ca. 1,5 mm ausgewiesen. Ergänzende Messungen haben gezeigt, dass mit weiteren Impulsen auch die bleibende Verschiebung der Sichtebene weiter zunimmt. Somit werden wie auch bei den statischen Versuchen deutlich messbare Verformungen der Sichtebene im Millimeterbereich festgestellt. Für eine Untersuchung bspw. einer Einbringung von Pfahlhälften, müsste die Sichtebene deutlich ausgesteift werden, da sich Sand

zwischen Pfahl und Sichtebeine schieben wird. Versuche zur Fallgewichtsverdichtung sind aber möglich. Streng genommen ist die wesentliche Randbedingung des DIC-Versuches als vertikale Schnittebene nicht mehr gegeben. Die Schnittebene erhält vermutlich eine leichte Wölbung nach außen. Dies kann bedeuten, dass durch die Wölbung zusätzliche horizontale Dehnungen versuchsbedingt eingeleitet werden, die z.B. in der Berechnung der volumetrischen Dehnungen Einfluss haben. Nahezu keinen Einfluss sollten diese Verformungen hingegen auf die vertikalen Verschiebungen bzw. Dehnungen unterhalb der Lasteinleitung haben.

## 7.6 Kinematik

Durch Messungen mit Beschleunigungssensoren können das Bewegungsverhalten des Fallgewichtes sowie auch punktuell Bodenbewegungen erfasst werden. Bei Verwendung von mehreren Sensoren lässt sich so auch die Ausbreitung von Wellenfronten in Boden detektieren. Im Versuch m48\_10-h0\_34-D435 wurden Messungen der Beschleunigung am Fallgewicht und an ausgewählten Punkten im Versuchssand durchgeführt. Die Anordnung der Sensoren im Versuch ist in Abbildung 7.23a) schematisch dargestellt. In Abbildung 7.23b) werden die Messergebnisse der Sensoren im Boden für die vertikale Beschleunigung unmittelbar nach dem Aufprall des Fallgewichtes veranschaulicht.

Die Messergebnisse lassen die Auswirkungen des Aufprallvorganges im Boden gut erkennen. In allen Messdaten zeigt sich jeweils ein sehr deutlicher Messwertausschlag, der den Durchgang einer Wellenfront kennzeichnet. Mit zunehmendem Abstand zum Verdichtungskrater nimmt der Betrag dieses Messwertausschlages von  $624 \text{ m/s}^2$  im Sensor 18262 (50g) auf  $15 \text{ m/s}^2$  im Sensor 18260 (25g) ab. Unter Berücksichtigung der räumlichen Abstände der Sensoren zueinander und der Zeitpunkte der Extremwertereignisse ist beim 1. Impuls von einer näherungsweise konstanten Ausbreitungsgeschwindigkeit der Wellenfront von ca.  $140 \text{ m/s}$  auszugehen.

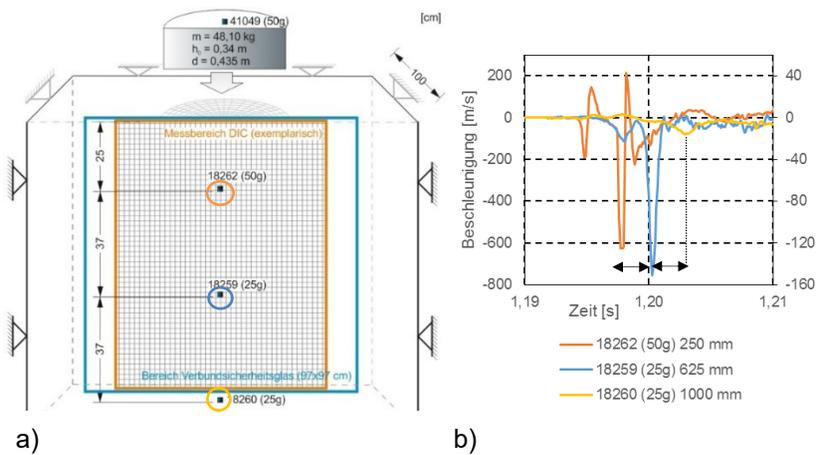


Abbildung 7.23 Versuch m48\_10-h0\_34-D435, mitteldichter Sand ( $I_{D,0} = 0,5$ ): a) Versuchsprinzip mit Darstellung der Beschleunigungssensoren und b) Ergebnis der Beschleunigungsmessung im Boden unmittelbar nach dem Aufprall des Fallgewichtes beim 1. Impuls (Messwerte normalisiert)

DIC-Messungen mit einer Hochgeschwindigkeitskamera ermöglichen ebenfalls die Erfassung und Bewertung dynamischer Vorgänge. Abbildung 7.24 zeigt die Verschiebungsfelder für  $|u|$ . Dabei werden nur kleinste Verschiebungen bis max. 0,5 mm zu drei Zeitpunkten unmittelbar nach dem Aufprall in Abständen von ca. 3 Millisekunden veranschaulicht.

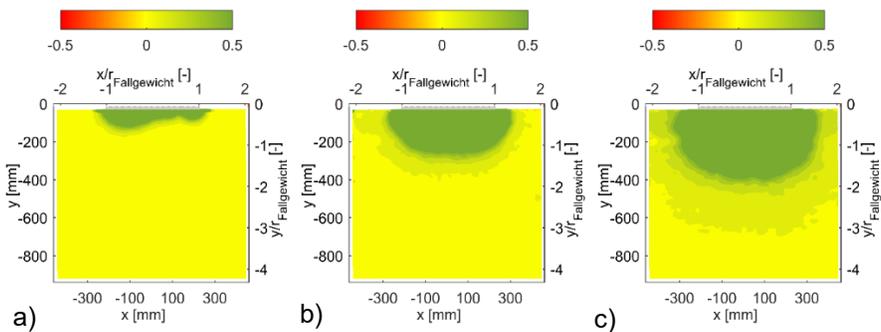


Abbildung 7.24 Verschiebungsfelder für  $|u|$  in mm, Darstellung von Verschiebungen bis max. 0,5 mm, Versuch m48\_10-h0\_34-D435, während des 1. Impulses zu 3 Zeitpunkten jeweils in Abständen von ca. 3,1 Millisekunden

Die Abbildungen zeigen, dass sich messbare Verschiebungen von ca. 0,1 mm in vertikaler Richtung je Zeitschritt ca. 350 mm bis 400 mm zwischen Abbildung 7.24a) und Abbildung 7.24b) und weitere 300 mm bis 350 mm zwischen Abbildung 7.24b) und Abbildung 7.24c) ausbreiten. Dies entspricht Geschwindigkeiten zwischen 96 m/s und 130 m/s. Mit der DIC-Methode ist eine Veranschaulichung von Wellenfronten somit grundsätzlich möglich. Es ist jedoch davon auszugehen, dass nicht das Extremereignis einer Welle, sondern der Beginn der Welle erfasst wird. Dies ist in Vergleichen mit Beschleunigungsmessungen zu beachten.

Die Ausbreitgeschwindigkeit von Kompressions- und Scherwellen ist stark von Bodenart und -zustand abhängig. Für Boden in lockerer bis mitteldichter Lagerung geben Liu [LIU92] sowie Uyanik [UYA10] Wellengeschwindigkeiten von ca. 110 m/s für Kompressionswellen und ca. 75 m/s für Scherwellen an. Nazhat [NAZ13] gibt im Ergebnis seiner Versuche ähnliche Wellengeschwindigkeiten für die ersten Impulse von 90 m/s für lockeren Sand ( $I_{D,0} = 0,15$ ) an.

Für den betrachteten Versuch ergibt sich nach Gl. 7.1 eine Geschwindigkeit des Fallgewichtes beim Aufprall von ca. 2,6 m/s. Die ermittelten Ausbreitgeschwindigkeiten der Welle im Boden sind somit deutlich größer als die Geschwindigkeit des Fallgewichtes zum Zeitpunkt des Aufpralls.

In nachfolgender Abbildung wurden die Messwertentwicklung bei mehreren Impulsen im Versuch m48\_10-h0\_34-D435 betrachtet. Abbildung 7.25a) zeigt die Extremwerte der Beschleunigungen der einzelnen Sensoren. Abbildung 7.25b) veranschaulicht die Ausbreitgeschwindigkeiten der Extremwertereignisse jeweils zwischen dem oberen sowie unteren Sensorpaar.

Die Abbildungen zeigen, dass die zunehmende Anzahl von Impulsen auf beide Messgrößen einen Einfluss hat. Gemäß Abbildung 7.25a) ist ab dem 6. Impuls einheitlich ein Rückgang der Extremwerte der Beschleunigungen erkennbar. Abbildung 7.25b) deutet mit zunehmender Anzahl von Impulsen eine Zunahme der Ausbreitgeschwindigkeiten der Wellenfront an. Dabei wurde für das obere Sensorpaar ein stärkerer Anstieg der Ausbreitgeschwindigkeit ermittelt. Es wird darauf hingewiesen, dass für die Berechnung der Geschwindigkeiten der beim Einbau der Sensoren definierte Abstand als konstant angenommen wurde. Eine nachträgliche Veränderung der Positionen der Sensoren durch die Fallgewichtsversuche kann somit ebenfalls Einfluss auf

die dargestellten Ergebnisse zur Ausbreitgeschwindigkeit der Wellenfront haben.

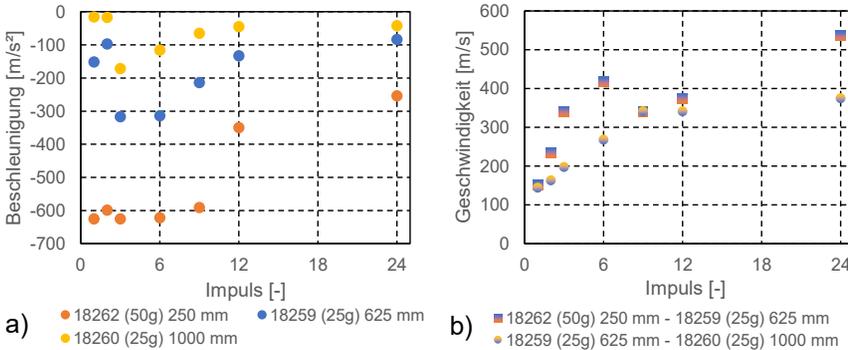


Abbildung 7.25 Versuch m48\_10-h0\_34-D435, 1. bis 24. Impuls: a) Extremwerte der Beschleunigungen an 3 Sensoren im Boden, b) Ausbreitgeschwindigkeiten des Extremwertereignisses jeweils zwischen 2 Sensoren

Die vorgestellten Ergebnisse weisen auf Möglichkeiten der Korrelation zwischen Extremwerten der Beschleunigungen im Boden und einer Zunahme der Verdichtungsarbeit hin. Dies zeigt sich erwartungsgemäß auch für die Ausbreitgeschwindigkeit einer Wellenfront. Die Ergebnisse in Abbildung 7.25b) deuten dabei auf eine erfolgreichere Verdichtungsarbeit zwischen dem oberen Sensorpaar als zwischen dem unteren Sensorpaar. Dies entspricht auch den Ergebnissen der DIC-Auswertung nach Kap. 7.3. In den weiteren Studien wurden keine Sensoren im Boden eingebaut, um das Bodenverhalten bei der Fallgewichtsverdichtung nicht zu beeinflussen.

## 7.7 Versuchsstudie zur Fallgewichtsverdichtung

### 7.7.1 Versuchsumfang

Zur Beantwortung der in Kap. 7.1 angeführten Fragen zu Einflüssen auf Einflussstiefen bei der Fallgewichtsverdichtung wurde ein umfangreiches Versuchsprogramm mit 22 verschiedenen Fallgewichtskonfigurationen an den Versuchsständen-S und -M vorgesehen und in Kapitel 5 entsprechend den Versuchsständen aufgelistet. Jede Konfiguration wurde in der Regel in mindestens 2 Versuchsreihen getestet. In den nachfolgenden Kapiteln werden

Einflusstiefen je Konfiguration als Mittelwerte dargestellt. Die Ergebnisse der Einzelversuche sind in Anhang A getrennt für Versuchsstand-S und Versuchsstand-M tabellarisch angegeben und als Diagramme veranschaulicht. Die nachfolgenden Tabellen geben eine Übersicht mit wesentlichen Merkmalen der Fallgewichtsversuche der Versuchsstudie. An jeder Konfiguration wurden mindestens 12 Impulse durchgeführt.

Tabelle 7.3 Fallgewichtsversuche der Versuchsstudie am Versuchsstand-S

Versuchsart	Konfiguration / Name (intern)	Datum Versuch	$e_0$ [-]	$I_{b,0}$ [-]	$E$ [Nm]
	m4 80-h0 80-D100	13./14.06.2016-	0,61	0,5	37,7
	m5-95-h0 64-D100	14.06.2016	0,61	0,5	37,4
Halbmodell /	m7-09-h0-53-D100	15.06.2016	0,61	0,5	36,9
Einzelposi- tionen	m4 80-h1 00-D100	08./09.06.2016	0,61	0,5	47,1
	m4 80-h1 20-D100	12.07.2016	0,61	0,5	56,5
	m4 80-h1 22-D125	08.12.2016	0,61	0,5	70,6
	m4 80-h1 22-D150	13.12.2016	0,61	0,5	84,8
Halbmodell / Sonderfor- men	m4_95-h1_16-D100 Typ B/C/D	10./09./08.08. 2016	0,61	0,5	56,3
Halbmodell / Abfolgen	m4_80-h1_00-D100 C01/C02/C03	15./18./19.07. 2016	0,61	0,5	47,1

Tabelle 7.4 Fallgewichtsversuche der Versuchsstudie am Versuchsstand-M

Versuchsart	Konfiguration / Name (intern)	Datum Versuch	$e_0$ [-]	$I_{b,0}$ [-]	$E$ [Nm]
	m47 38-h0 34-D300	27.06.2016	0,61	0,5	158,5
	m47 38-h0 34-D435	08.07.2016	0,61	0,5	158,5
Halbmodell /	m47 38-h0 46-D300	22.06.2016	0,61	0,5	211,5
Einzelposi- tionen	m47 38-h0 91-D300	04.07.2016	0,61	0,5	423,0
	m48 10-h0 34-D435	25.10.2016	0,61	0,5	163,5
	m35 88-h0 45-D200	30.06.2017	0,61	0,5	158,4
	m80 73 h0 20 D550	07.07.2017	0,61	0,5	158,4
Halbmodell /	m33 44 h0 48-D435 / C01	13.07.2017	0,61	0,5	157,5
Abfolgen	m33_44_h0_48-D435 / C03	21.07.2017	0,61	0,5	157,5

Zur Orientierung wird in diesem Kapitel die potentielle Energie nach Gl. 7.2 angegeben. In der Baupraxis wird diese Energiegröße zur Verfahrensbeschreibung verwendet und als Fallenergie bezeichnet.

$$E = mgh \quad (7.2)$$

mit

$E$ : potentielle Energie	$g$ : konstante Erdbeschleunigung (9,81 m/s <sup>2</sup> )
$h$ : Fallhöhe	$m$ : Masse des Fallgewichtes

Es wird an dieser Stelle jedoch darauf hingewiesen, dass die Verwendung dieser Energiegröße nur für Körper gilt, die tatsächlich in einem vertikalen freien Fall sind. Ein Großteil der Realverfahren sowie auch viele Modelle werden durch Seile oder Führungsschienen geführt. Für eine näherungsweise Ermittlung der Wirtiefe der Fallgewichtsverdichtung nach Gl. 3.8 wird daher auch versucht, diesen Effekt durch Verwendung eines linearen Abminderungsfaktors zu berücksichtigen. Die Messungen zum Fallvorgang an eigenen Versuchen gem. Kap. 7.5 zeigen, dass am Versuchsstand-S die Beschleunigung des Fallgewichtes in Abhängigkeit der Fallmassen auf bei ca. 60 % bis 80 % der Erdbeschleunigung reduziert wird. Die Intensität der Abminderung ist v.a. von der Masse des Fallgewichtes abhängig und kann für die eigenen Versuche nicht pauschal mit einem Faktor berücksichtigt werden. Im Versuchsstand-M konnten Beschleunigungen entsprechend freiem Fall mit nahezu 9,81 m/s<sup>2</sup> bestätigt werden.

## 7.7.2 Bewertungsgrundlagen

Eine Bewertung der Versuchsergebnisse erfolgt im Hinblick auf die erzielbare Tiefenwirkung. In Kap. 7.3 wurde an den Fallgewichtsversuchen über Darstellungen der volumetrischen Dehnung  $\varepsilon_{\text{vol}}$  grundsätzlich eine erfolgreiche Verdichtungsarbeit nachgewiesen. Jedoch zeigen die Ergebnisse große Streuungen, die einen Vergleich der Wirkweise ähnlicher Fallgewichtskonfigurationen nicht ermöglichen. Für eine Bewertung der Wirtiefe der Versuche wird in dieser Studie daher die Ergebnisgröße der Verschiebung  $|u|$  entlang einer vertikalen Schnittlinie mittig unterhalb des Verdichtungskraters genutzt. Über



durchgeführt. Dabei haben sich trotz Abständen von z.T. 10-fachem Durchmesser des Fallgewichtes  $d_H$  besonders am Versuchsstand-S deutliche Einflüsse auf die Einflusstiefe der 2. Versuchsreihe gezeigt. Nachfolgend werden daher nur die Ergebnisse der 1. Behälterhälfte berücksichtigt. Ein Vergleich der mittleren Einflusstiefen je Versuchsreihe für identische Fallgewichtskonfigurationen ergab am Versuchsstand-S Standardabweichungen zwischen 0,9 % und 1,6 % bei Fallhöhen bis 0,8 m. Bei höheren Fallhöhen ergaben sich Standardabweichungen von bis zu 5,3 % (s.  $\sigma_{1/3}$  in Anhang A.1). Am Versuchsstand-M ergaben sich beim Vergleich einer mittleren Einflusstiefe für identische Konfigurationen Standardabweichungen zwischen 1,6 % und 3,0 % (s.  $\sigma_{1-2}$  in Anhang A.2).

#### Einzelposition am Versuchsstand-S

Am Versuchsstand-S werden folgende Vergleiche der Fallgewichtskonfigurationen betrachtet:

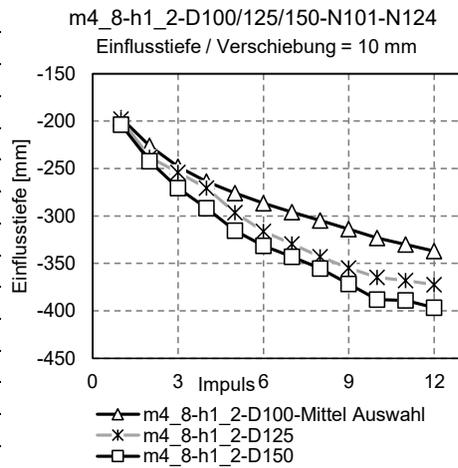
- Variation des Durchmessers  $d_H$  bei konstanter Fallmasse  $m_H$  und konstanter Fallhöhe  $h_0$
- Variation von Fallmasse  $m_H$  und Fallhöhe  $h_0$  bei konstantem Durchmesser  $d_H$
- Variation der Verdichtergeometrie

In Tabelle 7.5 werden Ergebnisse zur Einflusstiefe für 3 Konfigurationen mit konstanter Fallmasse  $m_H = 4,8$  kg sowie konstanter Fallhöhe  $h_0 = 1,2$  m zusammengestellt. Variiert wurde der Durchmesser des Fallgewichtes zwischen 100 mm, 125 mm und 150 mm. Für die Konfiguration mit Durchmesser D100 wurde ein Mittelwert von 2 Versuchsreihen verwendet.

Die Zusammenstellung zeigt, dass bei Vergrößerung des Durchmessers eine Steigerung der Wirtktiefe erreicht wird. Im Mittel der 12 Impulse beträgt die Steigerung 8,9 % ( $d_H = 125$  mm zu  $d_H = 100$  mm) bzw. 14,6 % ( $d_H = 150$  mm zu  $d_H = 125$  mm). Es zeigt sich, dass dieser Effekt einer Erhöhung der Wirtktiefe nur durch Vergrößerung von  $d_H$  nicht beliebig gesteigert werden kann. Vielmehr wird erwartet, dass sich bei deutlicher Vergrößerung von  $d_H$  der Verbesserungseffekt umkehrt.

Tabelle 7.5 Einflusstiefen je Impuls mit Angabe der Standardabweichungen, Versuche m4\_80-h1\_20-D100/-D125/-D150

Impuls	Mittel		
	D100	D125	D150
-	mm	mm	mm
1	-197,0	-198,1	-203,7
2	-226,0	-238,3	-242,3
3	-248,2	-254,0	-270,7
4	-263,9	-270,8	-291,9
5	-275,8	-296,6	-315,6
6	-286,8	-316,3	-331,5
7	-296,1	-329,5	-343,2
8	-304,7	-343,0	-355,5
9	-313,9	-354,9	-371,6
10	-323,4	-364,7	-388,1
11	-330,2	-368,2	-389,0
12	-337,0	-372,4	-396,7
<b>Mittel</b>	<b>-283,6</b>	<b>-308,9</b>	<b>-325,0</b>



In Abbildung 7.27 werden Ergebnisse der 3 Konfigurationen m4\_80-h0\_80-D100, m5-95-h0\_64-D100 und m7-09-h0-53-D100 verglichen. Je Konfiguration wurden Mittelwerte der Ergebnisse aus den jeweils ersten Versuchsordnungen auf der linken Seite der Sichtebeine gebildet. Alle Konfigurationen besitzen theoretisch die gleiche Fallenergie  $E$  von ca. 37 Nm. Variiert wurde jeweils die Fallmasse  $m_H$  zwischen 4,8 kg, 5,95 kg und 7,09 kg. Zur Gewährleistung einer konstanten Fallenergie von 37 Nm wurde die Fallhöhe  $h_0$  entsprechend angepasst.

Die Zusammenstellung zeigt für die Konfiguration 37\_1 (m4\_80-h0\_80-D100) und 37\_2 (m5-95-h0\_64-D100) einen nahezu identischen Ergebnisverlauf. Für die Konfiguration 37\_3 (m7-09-h0-53-D100) wurden im Mittel Wirkiefen 7,4 % unterhalb 37\_1 bzw. 5,6 % unterhalb 37\_2 ermittelt. Die trotz konstanter Fallenergie  $E$  unterschiedlichen Ergebnisse belegen, dass die Bezugsgröße Fallenergie  $E$  nach Gl. 7.2 nicht allein zur Beschreibung bzw. Klassifizierung der Fallgewichtskonfigurationen genügt.

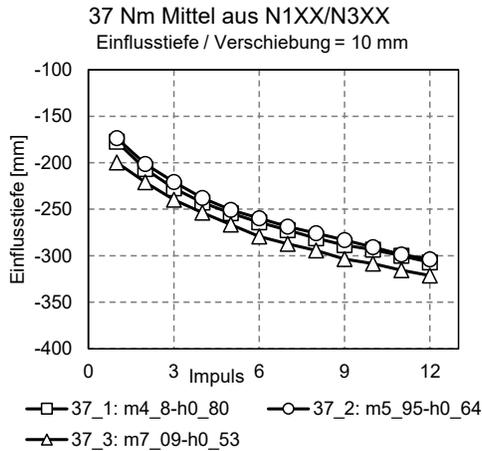


Abbildung 7.27 Einflusstiefen je Impuls, Versuchsreihen mit 37 Nm Fallenergie, Einzelposition am Versuchsstand-S

Ergänzend zu dem Vergleich in Abbildung 7.27 werden in nachfolgender Abbildung 7.28 Ergebnisse der Konfigurationen m4\_80-h1\_00-D100 (47\_1) und m4\_80-h1\_20-D100 (57\_1) mit höherer Fallenergie dargestellt. Die Zusammenstellung zeigt, dass die Einflusstiefen der Versuche m4\_80-h1\_00-D100 (47\_1) und m4\_80-h1\_20-D100 (57\_1) größer als bei den Versuchen mit einer Fallenergie von 37 Nm sind. Zwischen beiden Versuchen werden jedoch trotz unterschiedlicher Fallenergie  $E$  ähnliche Ergebnisniveaus erzielt. Auch diese Ergebnisse bestätigen, dass eine Klassifizierung der Fallgewichtskonfigurationen nicht allein auf Grundlage der Fallenergie möglich ist. Vielmehr haben sehr wahrscheinlich das Verhältnis zwischen Fallmasse  $m_H$  und Fallhöhe  $h_0$  einen deutlichen Einfluss. Zudem hat sich gezeigt, dass am Versuchsstand-S die Führungsschiene den Fallvorgang abbremst. In Abhängigkeit der Masse eines Fallgewichtes wird die Fallgeschwindigkeit dabei unterschiedlich stark reduziert. Somit kann die vereinfachte Annahme von Freifallbedingungen für die Betrachtung am Versuchsstand-S nicht angewendet werden. In diesem Fall ist es notwendig, die tatsächliche Geschwindigkeit beim Aufprallvorgang zu kennen und in eine Bewertung bzw. Klassifizierung von Konfigurationen zur Fallgewichtsverdichtung einzubeziehen.

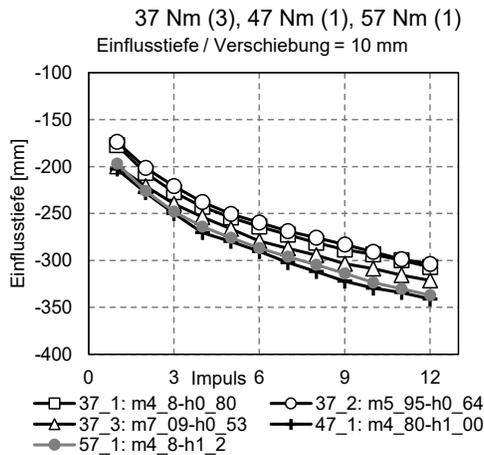


Abbildung 7.28 Einflusstiefen je Impuls, Versuchsreihen mit 37 Nm, 47 Nm und 57 Nm Fallenergie, Einzelposition am Versuchsstand-S

Der Vergleich zu Fallgewichten mit unterschiedlicher Geometrie erfolgt mit konstanten Fallmassen  $m_H$  sowie konstanten Fallhöhen  $h_0$ . Nachfolgend werden für Typ A Ergebnisse für den verbesserten Mittelwert aus N1XX/ N3XX aus der Konfiguration m4\_80-h1\_20-D100 übernommen. Die weiteren 3 Typen B bis D wurden in Kap. 5.3.3 vorgestellt. Die Ergebnisse der 12 Impulse wurden von den Versuchen der linken Seite der Sichte ebene (N101-N112) übernommen. Für die Gegenüberstellungen wird zudem ein maximaler Wirkradius auf Basis der Verschiebungen von 10 mm angegeben. Die Ergebnisse dieses Vergleiches zeigen ähnliche Wirktiefen für die Grundform A (flache Unterseite) und Grundform C (konkave Unterseite). Die weiteren Grundformen erreichen geringere Wirktiefen von i. M. 93,5 % (Typ D / Typ C) bzw. 91,4 % (Typ D / Typ C). Aus diesem einfachen Vergleich lassen sich zunächst keine Anreize erkennen, von einem Verdichter mit glatter Unterseite abzuweichen. Ergebnisse anderer Untersuchungen nach Nazhat [NAZ13] zeigen hingegen, dass eine Anpassung der Fallgewichtsgeometrie durchaus positive Effekte auf eine Wirktiefe haben können. Diese und Aussagen anderer Forscher weichen in Abhängigkeit der untersuchten Bodenarten jedoch deutlich voneinander ab.

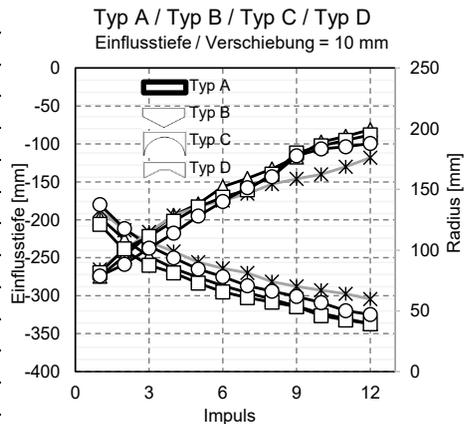
Im Diagramm zur Tabelle 7.6 wurden auch Ergebnisse zur Ermittlung eines Wirkradius bzw. maximalen lateralen Wirkungsbereich angegeben. Dabei wurde je Impuls der horizontale Abstand zur Mittelachse erfasst. Auffällige Ergeb-

nisse ergaben sich lediglich für die Grundform B (spitze Unterseite). Der ermittelte Radius war i. M. 6,4 % geringer als bei der Grundform A (glatte Unterseite). Es wird darauf hingewiesen, dass eine Beziehung zwischen Verschiebungen und volumetrischen Dehnungen für einen Wirkradius im Rahmen der eigenen Arbeiten nicht geprüft wurden.

Tabelle 7.6 Einflusstiefen je Impuls mit Angabe der Standardabweichungen, Versuche mit Variation der Verdichtergeometrie

**Impuls Typ A Typ B Typ C Typ D**

-	mm	mm	mm	mm
1	-197,0	-187,1	-205,9	-180,1
2	-226,0	-213,8	-240,6	-211,8
3	-248,2	-229,3	-260,0	-234,6
4	-263,9	-241,8	-270,0	-250,0
5	-275,8	-255,9	-283,3	-265,0
6	-286,8	-264,0	-295,1	-274,9
7	-296,1	-269,9	-302,6	-286,7
8	-304,7	-281,6	-308,5	-294,1
9	-313,9	-287,7	-314,6	-301,1
10	-323,4	-292,7	-326,3	-309,0
11	-330,2	-297,7	-332,1	-319,8
12	-337,0	-304,6	-337,2	-324,8
<b>Mittel</b>	<b>-283,6</b>	<b>-264,7</b>	<b>-289,7</b>	<b>-271,0</b>



### Einzelpositionen am Versuchsstand-M

Am Versuchsstand-M werden folgende Vergleiche der Fallgewichtskonfigurationen betrachtet:

- Variation des Durchmessers  $d_H$  bei konstanter Fallmasse  $m_H$  und konstanter Fallhöhe  $h_0$
- Variation von Fallmasse  $m_H$  und Fallhöhe  $h_0$  bei konstantem Durchmesser  $d_H$  und konstanter Fallenergie  $E$
- Variation von Fallhöhe  $h_0$  bei konstanter Fallmasse  $m_H$  und konstantem Durchmesser  $d_H$

In nachfolgender Abbildung 7.29 werden Einflusstiefen für jeweils zwei Konfigurationen mit konstanter Fallmasse sowie konstanter Fallhöhe gegenübergestellt. Variiert wurde der Durchmesser der Fallgewichte zwischen 200 mm und 435 mm in Abbildung 7.29a) sowie zwischen 300 mm und 435 mm in

Abbildung 7.29b). Die Fallenergie in allen 4 Konfigurationen beträgt ungefähr  $E = 160 \text{ Nm}$ .

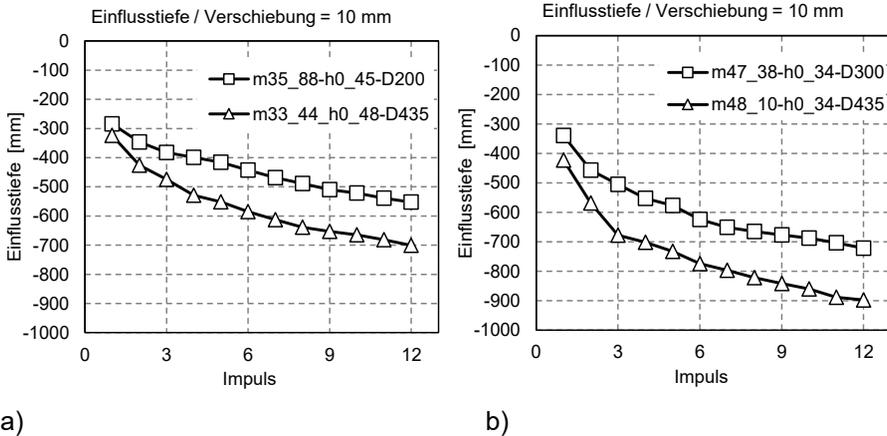


Abbildung 7.29 Einflusstiefen je Impuls, Versuchsreihen mit Variation des Durchmessers, Einzelposition am Versuchsstand-M: a) m35\_88-h0\_45-D200 und m33\_44\_h0\_48-D435, b) m47\_38-h0\_34-D300 und m47\_38-h0\_34-D435

Die Ergebnisse zeigen deutlich, dass analog zu den Konfigurationen am Versuchsstand-S bei Vergrößerung des Durchmessers eine Steigerung der Wirtktiefe erreicht wird. Im Mittel der 12 Impulse wird die Einflusstiefe beim Vergleich in Abbildung 7.29a) um 17,5 % von - 446 mm für Versuch m35\_88-h0\_45-D200 auf - 524 mm für Versuch m33\_44\_h0\_48-D435 gesteigert. Die Steigerung im Vergleich gemäß Abbildung 7.29b) beträgt im Mittel 25,5 % von - 596 mm für Versuch m47\_38-h0\_34-D300 auf - 748 mm für Versuch m48\_10-h0\_34-D435.

Der Vergleich der Einflusstiefen für die Konfigurationen m33\_44\_h0\_48-D435 und m48\_10-h0\_34-D435 zeigt, dass sich trotz identischer Fallenergie  $E$  und gleichem Durchmesser deutlich unterschiedliche Einflusstiefen ergeben. Es präzisiert die Erkenntnisse von Versuchen am Versuchsstand-S: Die Fallenergie  $E$  alleine genügt nicht zur Klassifizierung von Fallgewichtskonfigurationen. Im Vergleich wurde zwischen den Konfigurationen Masse des Fallgewichtes  $m_H$  und Fallhöhe  $h_0$  gegenseitig in gleichem Maße variiert. Dennoch stellen sich nach 12 Impulsen sehr unterschiedliche Wirtktiefen von bis zu - 700 mm in der Konfiguration m47\_38-h0\_34-D435 und bis zu - 897 mm

in der Konfiguration m48\_10-h0\_34-D435 ein. Eine Anpassung der Fallmasse hat im Vergleich zu einer Anpassung der Fallhöhe somit einen größeren Einfluss. Nach Gl. 7.1 ergeben sich die Geschwindigkeiten beim Aufprall zu  $v(h_0) = 3,07 \text{ m/s}$  für den Versuch m33\_44\_h0\_48-D435 und zu  $v(h_0) = 2,58 \text{ m/s}$  für den Versuch m48\_10-h0\_34-D435. Dies entspricht einer Reduzierung um ca. 19 %. Gleichzeitig wird die Masse des Fallgewichtes  $m_H$  von 33,4 kg auf 48 kg um ca. 44 % erhöht. Für den aktuellen Vergleich ergibt sich aus der Reduktion  $v(h_0)$  um 19 % und Steigerung der Masse des Fallgewichtes  $m_H$  um 44 % demnach insgesamt eine Steigerung der Summe beider Einflussgrößen von 25 %. Die Beträge der maximalen Einflusstiefen werden in diesem Vergleich von ca. - 700 mm auf - 897 mm um ca. 28 % gesteigert und deuten darauf, dass statt der Fallhöhe  $h_0$  eine Einbeziehung von  $v(h_0)$  in eine Bewertung von Einflussgrößen der Fallgewichtsverdichtung zwingend notwendig ist.

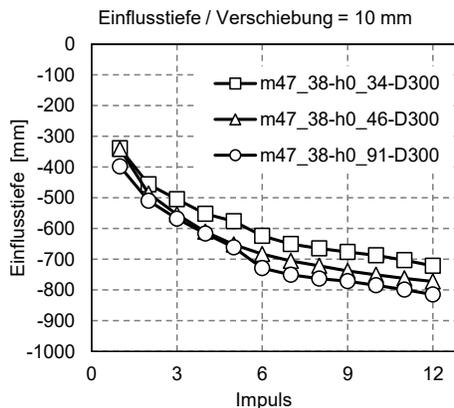


Abbildung 7.30 Einflusstiefen je Impuls, Versuchsreihen mit Variation der Fallhöhe  $h_0$ , Einzelposition am Versuchsstand-M: m47\_38-h0\_34-D300, m47\_38-h0\_46-D300 und m47\_38-h0\_91-D300

Abbildung 7.30 veranschaulicht die Einflusstiefen für drei Konfigurationen mit konstanter Masse des Fallgewichtes  $m_H$  sowie konstantem Durchmesser  $d_H$ . Variiert wurde die Fallhöhe  $h_0$  zwischen 0,34 m, 0,46 m und 0,91 m.

Die Ergebnisse zeigen, dass eine Erhöhung der Fallhöhe  $h_0$  und damit auch eine Erhöhung der Geschwindigkeit beim Aufprall  $v(h_0)$  zu Steigerungen der Wirktiefen um i. M. 8,7 % (m47\_38-h0\_46-D300 zu m47\_38-h0\_34-D300)

bzw. um i. M. 14,1 % (m47\_38-h0\_91-D300 zu m47\_38-h0\_34-D300) führen. Es zeigt auch deutlich, dass eine Erhöhung allein der Fallhöhe  $h_0$  bzw. Geschwindigkeit beim Aufprall  $v(h_0)$  erwartungsgemäß nicht linear zu einer Steigerung der Einflusstiefe führt und sich bereits in diesem Vergleich Grenzen klar andeuten. Sollen deutlich höherer Einflusstiefen erreicht werden, ist zwingend auch eine Erhöhung der Fallmasse in ähnlichem Maße zur Erhöhung von  $v(h_0)$  notwendig.

Abbildung 7.31 zeigt exemplarisch Ergebnisse der Konfigurationen m33\_44\_h0\_48-D435 und m48\_10-h0\_34-D435. In dem Diagramm wurde eine in Forschungsarbeiten zur Fallgewichtsverdichtung häufige Darstellung einer Wirk- oder Einflusstiefe normiert über den Durchmesser des Fallgewichtes  $d_H$  gewählt.

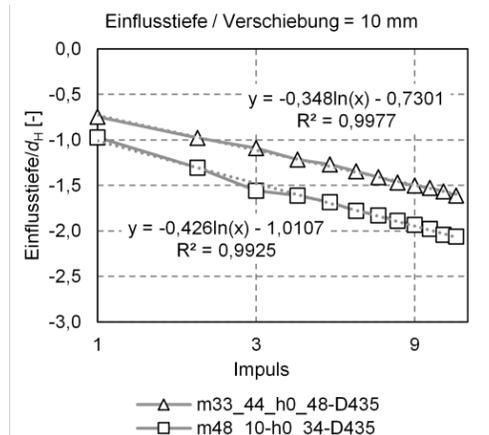


Abbildung 7.31 Einflussstiefen je Impuls, Konfigurationen m33\_44\_h0\_48-D435 und m48\_10-h0\_34-D435, Einzelposition am Versuchsstand-M

Das Diagramm zeigt, dass die Ergebnisse sehr gut durch eine logarithmische Funktion nach Gl. 7.3 beschrieben werden können. In Tabelle 7.7 werden die Parameter nach Gl. 7.3 für alle am Versuchsstand-M im Rahmen der Versuchsstudie betrachteten Konfigurationen zusammengestellt.  $R^2$  belegt hier als Gütemaß eine Beschreibung des linearen Zusammenhangs zwischen den Ergebnissen und der logarithmischen Funktion nach Gl. 7.3.

Tabelle 7.7 Konfigurationen der Versuchsstudie zur Fallgewichtsverdichtung als Einzelpositionen am Versuchsstand-M mit Angabe der Parameter nach Gl. 7.3

Konfiguration	Fallenergie	Parameter nach Gl. 7.3		R <sup>2</sup>
	Nm	$k_1$	$k_2$	
m47 38-h0 34-D300	158,5	-0,508	-1,1420	0,996
m47 38-h0 46-D300	211,5	-0,572	1,2076	0,992
m47 38-h0 91-D300	423,0	-0,578	1,3051	0,990
m48 10-h0 34-D435	163,5	-0,426	1,0107	0,993
m35 88-h0 45-D200	158,4	-0,539	1,3317	0,971
m80 73 h0 20 D550	158,4	-0,215	0,8808	0,967
m33 44 h0 48-D435	157,5	-0,348	0,7301	0,998

$$\frac{E_T}{d_H} = k_1 \ln(n) - k_2 \quad (7.3)$$

mit

$E_T$ : Einflusstiefe  $n$  Anzahl der Impulse  
 $d_H$ : Durchmesser des Fallgewichtes  $k_1$  Parameter nach Tabelle 7.7

#### Impulse an mehreren Positionen nebeneinander

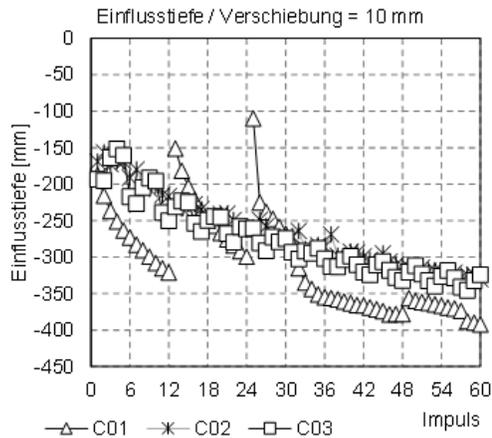
In nachfolgenden Abbildungen wird die Auswirkung einer unterschiedlichen Abfolge von Einzelimpulsen auf die Einflusstiefe betrachtet. Im Vergleich am Versuchsstand-S werden 3 Varianten mit insgesamt 60 Impulsen verteilt auf 5 Positionen nebeneinander verglichen. Am Versuchsstand-M wurde dieser Vergleich mit 2 Versuchen mit insgesamt 36 Impulsen an 3 Positionen nebeneinander ergänzt.

Die Versuchsanordnungen C01, C02 und C03 am Versuchsstand-S wurden mit jeweils konstanter Masse des Fallgewichtes  $m_H = 4,8$  kg, konstanter Fallhöhe  $h_0$  sowie konstantem Durchmesser des Fallgewichtes  $d_H = 100$  mm durchgeführt. Variiert wurde die Abfolge an den 5 Positionen (Erläuterung s.

Kap. 5.3.3). Tabelle 7.8 gibt die Einflusstiefen für die Position an, an der der Impuls gerade durchgeführt wurde.

Tabelle 7.8 Einflusstiefen je Impuls, Versuchsreihen mit Variation der Abfolge bei der Verdichtung an 5 Positionen am Versuchsstand-S, 60 Impulse in der Konfiguration m4\_80-h1\_20-D100

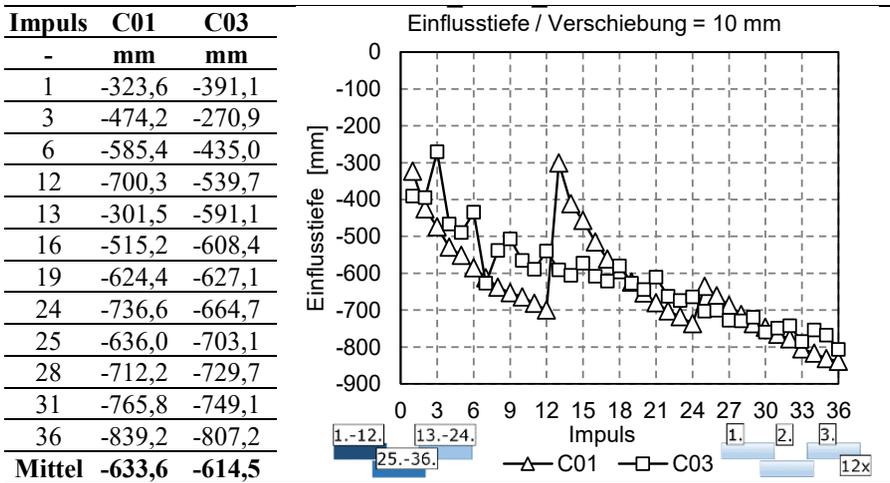
<b>Impuls</b>	<b>C01</b>	<b>C02</b>	<b>C03</b>
-	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>
1	-187,3	-169,2	-193,5
12	-321,1	-216,3	-250,3
13	-151,0	-232,1	-231,0
24	-299,2	-263,0	-261,3
25	-109,9	-258,9	-260,5
36	-355,2	-285,9	-302,2
37	-356,1	-268,9	-313,0
48	-378,2	-312,5	-331,8
49	-356,6	-313,8	-320,5
60	-392,2	-330,1	-324,4
<b>Mittel</b>	<b>-306,0</b>	<b>-264,6</b>	<b>-275,8</b>



Die Varianten C02 und C03 mit Wechsel der Fallgewichtsposition nach jedem Impuls in Anlehnung an fahrende oder schreitende Verdichter erreichen nach den 60 Impulsen maximale Wirktiefen von 330 mm (C02) bzw. 324 mm (C03). Die Versuchsreihe C01 mit jeweils 12 Drops je Position erreicht eine um 21% (zu C02) bzw. um 19% (zu C03) größere maximale Einflusstiefe von 392 mm. Dieser einfache Vergleich deutet darauf hin, dass durch Wiederholung mehrerer Impulse nacheinander an der gleichen Positionen (Variante C01) größerer Einflusstiefen erzielt werden können.

Am Versuchsstand-M wurde dieser Vergleich in ähnlicher Form wiederholt. Die Versuchsanordnungen C01 und C03 am Versuchsstand-M wurden mit jeweils konstanter Masse des Fallgewichtes  $m_H = 33,44$  kg, konstanter Fallhöhe  $h_0 = 0,48$  m sowie konstantem Durchmesser des Fallgewichtes  $d_H = 435$  mm durchgeführt. Variiert wurde die Abfolge in diesem Fall an 3 Positionen (Erläuterung s. Kap. 5). Tabelle 7.9 gibt die Einflusstiefen für die Position an, an der der Impuls gerade durchgeführt wurde.

Tabelle 7.9 Einflusstiefen je Impuls, Versuchsreihen mit Variation der Abfolge bei der Verdichtung an 3 Positionen am Versuchsstand-S, 36 Impulse in der Konfiguration m33\_44-h0\_48-D435



An den Ergebnissen am Versuchsstand-M zeigen sich nach 36 Impulsen in beiden Konfigurationen sehr ähnliche Wirtiefen. Anhand dieses Vergleiches lässt sich nicht pauschal eine Abfolge ableiten, mit der eindeutig größere Einflusstiefen generiert werden können. Demnach können auch mit Verfahren, die nach jedem Impuls umsetzen, ähnliche Wirtiefe bei gleicher Anzahl von Impulsen bzw. „Energieaufwand“ generiert werden. Unterschiede zeigen sich vielmehr in der Gleichmäßigkeit der maximalen Einflusstiefen an den 3 Positionen. Für die linke / mittlere / rechte Position ergeben sich nach 12 Impulsen je Position folgende maximale Einflusstiefen:

- C01: 700,3 mm / 839,2 mm / 736,6 mm (im Mittel: 758,7 mm)
- C03: 754,1 mm / 768,5 mm / 807,2 mm (im Mittel: 776,6 mm)

Demnach ist Konfiguration C03 eher geeignet, gezielt und effizient eine einheitliche Mindesttiefe an mehreren Positionen zu erreichen. Zudem ist davon auszugehen, dass auch eine gleichmäßigere Verdichtungswirkung mit dieser Konfiguration erreicht wird.

### 7.7.4 Ansatz zur Skalierung der Versuchsergebnisse

1g-Modellversuche sind i.d.R. nicht oder nur sehr begrenzt zur Ergebnisskalierung geeignet. Roscoe [ROS70] und Walz [WAL06] führen als Gründe hierfür die Grenzen in der Skalierbarkeit von volumetrischem Verhalten von Böden sowie Effekten wie Scherlokalisierung an. Zudem sind gemäß Berg-holz [BER17] die nichtlinearen Spannungsgrenzbedingungen zu beachten. Diese gilt vor allem für überkonsolidierte feinkörnige und dichte grobkörnige Böden. In Abbildung 7.32 werden Ergebnisse der Wirtiefe einzelner Konfigurationen am Versuchsstand-M in Abhängigkeit der Fallenergie dargestellt. Dabei wurden beide Parameter jeweils durch den Radius des Fallgewichtes dividiert. Berücksichtigt werden exemplarisch Ergebnisse nach dem 1., 6. und nach dem 12. Impuls.

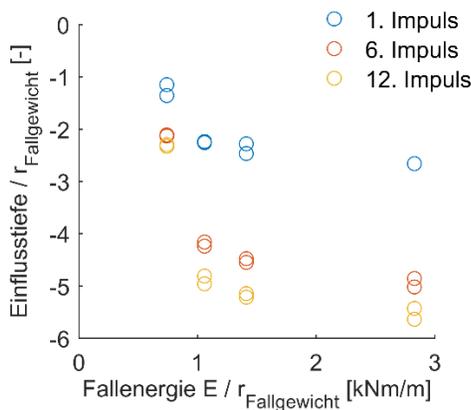


Abbildung 7.32: Zusammenstellung von Einflusstiefen in Abhängigkeit der Fallenergie nach 1, 6 und 12 Impulsen bei einem Grenzwert der Verschiebungen von 10 mm, ausgewählte Fallgewichtsversuche am Versuchsstand-M

Abbildung 7.33 zeigt mögliche Trendlinien als Verbindung der Wertepaare auf. Dabei werden die Residuen für jeden Wert graphisch angegeben. Die Summe der Quadrate der Residuen (in *Matlab* *SSE*) lag bei 0,059 (1. Impuls), 0,0636 (6. Impuls) bzw. 0,0745 (12. Impuls).

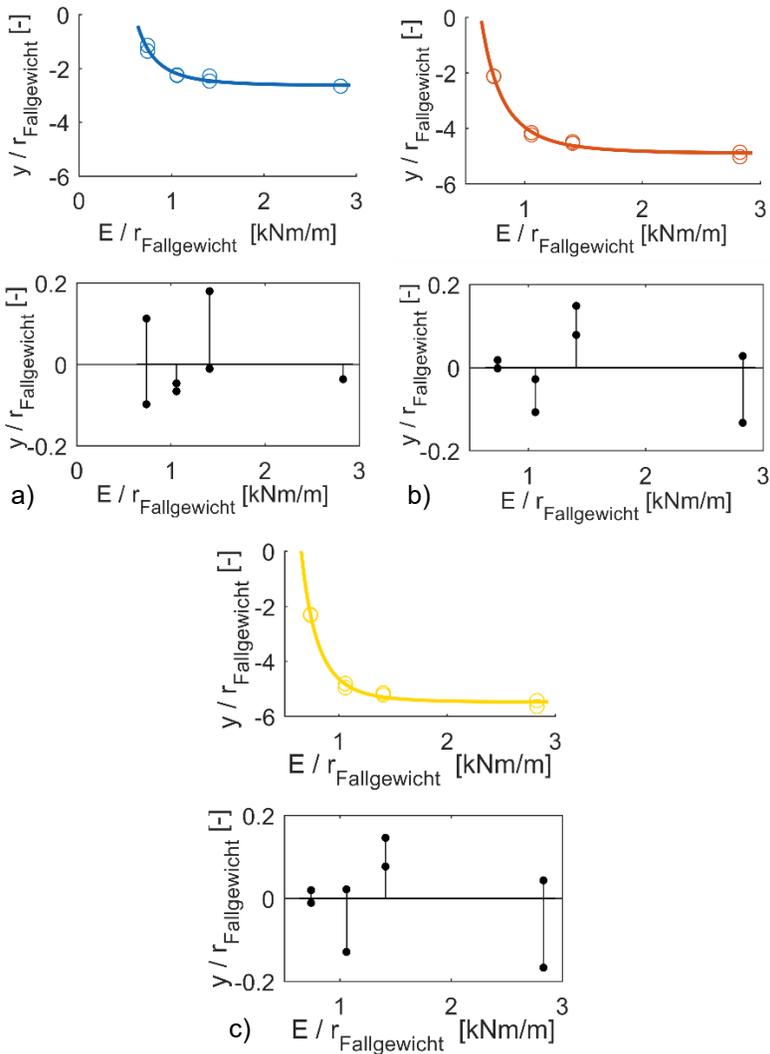


Abbildung 7.33 Trendlinien als näherungsweise Verbindung der Wertepaare nach Abbildung 7.32 mit Angaben der Residuen: a) Ergebnisse nach 1. Impuls, b) Ergebnisse nach 6. Impuls und c) Ergebnisse nach 12. Impuls

Die Trendlinien können sehr gut durch Funktionen nach Gl. 7.4 beschrieben werden. Die Werte für die Funktionsparameter a, b und c werden in Tabelle 7.10 zusammengestellt.

$$y/r_{\text{Fallgewicht}} = a(E/r_{\text{Fallgewicht}})^b + c \quad (7.4)$$

Tabelle 7.10 Werte der Funktionsparameter a, b und c nach Gl. 7.4 und Abbildung 7.33

	a	b	c
1. Impuls	0,5411	-3,116	-2,645
6. Impuls	0,9568	-3,546	-4,911
12. Impuls	0,8404	-4,401	-5,482

Bei Extrapolation der Ergebnisse über die Gl. 7.4 würde ein Verfahren vergleichbar dem Impulsverdichter *RIC 9000* ( $m=9000$  kg,  $h_0=1,2$ m,  $d=1,5$ m) Einflusstiefen von 1,95 m (1 Impuls) bzw. 3,73 m (6 Impulse) und 4,10 m (12 Impulse) erreichen. Hamann [HAM11] geben im Ergebnis numerischer Simulationen für dieses System auf trockenem Sand Wirkttiefen zwischen 2,40 m (1 Impuls) bis 4,60 m (5 Impulse) an. Dieser Vergleich deutet darauf, dass mit den Modellversuchen eine Skalierung einzelner Ergebnisgrößen zu plausiblen Ergebnissen führen kann, jedoch tatsächlich erzielbare Wirkttiefen ggf. um ca. 20 % unterschätzt werden.

## 7.8 Zusammenfassung

Die wesentlichen Ergebnisse zur Fallgewichtsverdichtung können im Hinblick auf die anfangs gestellten grundsätzlichen Fragestellungen wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Fallgewichtsversuche führen zur Ausbildung keil- bis halbkreisförmiger Bereiche mit starken Setzungen unterhalb des Fallgewichtes sowie massiven Scherzonen am Rand dieser Bereiche. Ähnlich wie bei den statischen Versuchen zeigen sich große Ähnlichkeiten im Verformungsverhalten zwischen einem Versuch im ebenen Verformungszustand und einem Halbmodell-Versuch. Unterschiede zeigen sich in der Ausbildung der Scherbereiche. Im ebenen Verformungszustand bilden sich die Scherzonen deutlicher und weitreichender als im Halbmodell-Versuch aus. Es zeigt sich zudem, dass experimen-

telle Details, wie ein kleiner Spalt zwischen Fallgewicht und Sichtebene einen deutlichen Einfluss auf die DIC-Ergebnisse haben. Eine modelltechnische Besonderheit, die im Feld oder bei einer klassischen Erfassung der Verdichtungswirkung über direkte Messungen oder über Sondierungen nicht auftritt.

- Die Ergebnisse zur volumetrischen Dehnung belegen tendenziell aber un stetig eine Verdichtungswirkung unterhalb des Fallgewichtes. Für Vergleiche oder Studien mit ähnlichen Kenngrößen von Verdichterverfahren scheint es ratsam, vorab Zusammenhänge zwischen volumetrischer Dehnung und Verschiebungen entlang ausgewählter Positionen zu prüfen. Verschiebungen können verlässlicher durch die DIC-Methode erfasst werden.
- Die Ergebnisse zur Kinematik deuten Möglichkeiten der Korrelation zwischen Extremwerten der Beschleunigungen im Boden und einer Zunahme der Verdichtungsarbeit an. Eine solche Korrelationsmöglichkeit zeigt sich noch deutlicher für die Ausbreitgeschwindigkeit einer Wellenfront. Die Ergebnisse im Versuch belegen eine intensivere Verdichtungsarbeit zwischen dem oberen Sensorpaar. Dies zeigen auch die Ergebnisse der DIC-Auswertung.

Die Ergebnisse der Studie zur Fallgewichtsverdichtung können im Hinblick auf die eingangs gestellten Fragestellungen wie folgt zusammengefasst werden:

- An den Versuchen am Versuchsstand-S haben bremsende Effekte mit Fallmassen von max. 8 kg einen so erheblichen Einfluss, dass eine Bewertung von Einfluss- oder Wirtiefen nicht allein auf Grundlage der genannten Fallenergie erfolgen konnte. Als wesentliche Steuergröße sollte neben der Fallmasse die tatsächliche Geschwindigkeit beim Aufprall erfasst und berücksichtigt werden.
- Die Versuche am Versuchsstand-M mit größeren Massen der Fallgewichte und einer anderen Variante der Führung beim Fallvorgang weisen nahezu keine Effekte einer Abbremsung auf. Hier kann die Geschwindigkeit beim Aufprall nach Gl. 7.1 für den freien Fall ermittelt werden. Es hat sich gezeigt, dass eine Steigerung der Fallhöhe bei konstanter Fallmasse erwartungsgemäß auch zu einer Steigerung der Wirtiefe führt. Für eine deutliche Erhöhung der Wirtiefe ist jedoch gleichzeitig eine Erhöhung der Masse des Fallgewichtes notwendig.

- Der in der Baupraxis geprägte Begriff der Fallenergie in Anlehnung an die potentielle Energie eines Körpers vor dem freien Fall kann nur bedingt zur Klassifizierung für Fallgewichtskonfigurationen verwendet werden. Ein wesentlicher Grund ist, dass in den Modellversuchen und in der weit verbreiteten Variante der Fallgewichtsverdichtung mit Kabelführung kein tatsächlicher freier Fall auftritt. Vielmehr wird in Abhängigkeit der Fallmasse und der verwendeten Technologie der Fallvorgang unterschiedlich stark gebremst. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass bei gleicher Fallenergie eine Variation zwischen Masse und Fallhöhe des Fallgewichtes zu sehr unterschiedlichen Einflusstiefen führt.
- Die weiteren Teilstudien deuten an, dass eine Abänderung der Geometrie eines Fallgewichtes mit glatter Unterseite für den Versuchssand nicht zu einer Erhöhung der Wirtktiefe führen. Vergleiche unterschiedlicher Abfolgen von Impulsen nebeneinander weisen unter Berücksichtigung der Ergebnisse beider Versuchsstände keine einheitlichen Ergebnisse aus. Folgt man den Ergebnissen am größeren Versuchsstand-M, führt eine Arbeit mit mehreren Wiederholung an einer Position und anschließendem Umsetzen zu ähnlichen Gesamtwirtktiefen, wie eine Arbeit mit Umsetzen nach jedem Impuls analog einem fahrenden oder schreitenden Prinzip. Die fahrende bzw. schreitende Variante deutet dabei eine größere Eignung an, eine Mindesttiefe zuverlässig an mehreren Positionen zu erreichen. Zudem ist davon auszugehen, dass auch eine gleichmäßigere Verdichtungswirkung mit dieser Konfiguration erreicht wird.
- Eine Zusammenstellung ausgewählter Einflusstiefen der Fallgewichtsversuche am Versuchsstand-M deutet Möglichkeiten der Skalierung bzw. Extrapolation für reale Verdichterverfahren mit impulsartigem Energieeintrag an.

## 8 Vergleich zwischen statischen und dynamischen Versuchen

Für einen direkten Vergleich zum Verformungsverhalten werden in diesem Kapitel Ergebnisse der Versuche HK\_435 mit statischer Auflast und die Ergebnisse des Fallgewichtsversuches m48\_10-h0\_34-D435 gegenübergestellt. In beiden Versuchen wurden soweit wie möglich gleiche Randbedingungen für den Versuch gewählt. Die Ergebnisse vom Versuch m48\_10-h0\_34-D435 wurden nach dem 1. Impuls bei einer Tiefe des Verdichtungskraters von ca. 35 mm übernommen. Die Ergebnisse vom Versuch HK\_435 stammen von einem Versuchszeitpunkt bei einer ähnlichen Tiefe des Setzungskraters von ca. 30 mm gemäß Abbildung 8.1b).

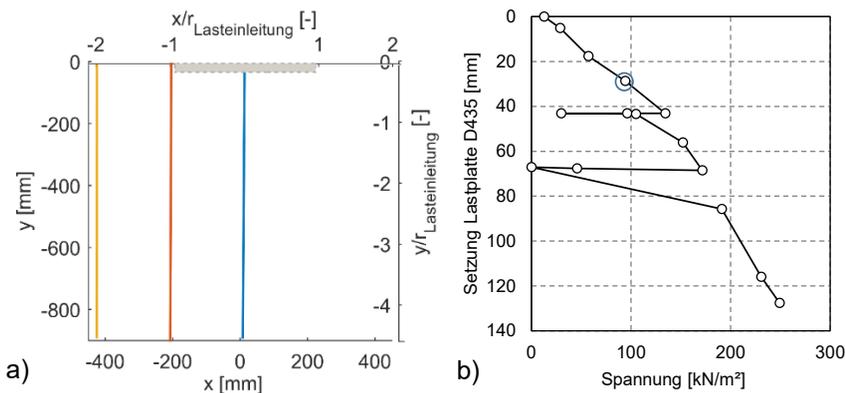


Abbildung 8.1 a) Lage der Schnittlinien für Versuch m48\_10-h0\_34-D435 und HK\_435, b) Spannungs-Setzungsdiagramm des auflastgesteuerten Kreisfundamentversuches HK\_435 mit Kennzeichnung des Messzeitpunktes

Die nachfolgenden Abbildungen zeigen ausgewählte Verschiebungs- und Dehnungsergebnisse beider Versuche an den 3 Schnitten gemäß Abbildung 8.1a). Die Graphen der Fallgewichtsversuche wurden dabei mit Kreisen und die Graphen des statischen Versuches mit Kreuzen gekennzeichnet. Ziel der Darstellungen ist weniger die Präsentation der Einzelergebnisse. Vielmehr soll ein Vergleich beider Versuchstypen ermöglicht werden.

Die Ergebnisdarstellungen bestätigen ein grundsätzlich ähnliches Verformungsverhalten des Bodens in beiden Versuchen mit stärkeren horizontalen Verformungen beim statischen Versuch. Die Abbildungen der richtungsbezogenen Verschiebungen unterscheiden sich für die horizontalen Verschiebungen  $u_x$  im äußeren Schnitt  $x=2r$ . Hier zeigt der statische Versuch HK\_435 Verschiebungsbeträge von bis zu 4 mm. Im Fallgewichtsversuch werden maximal 2,1 mm Verschiebungen ausgewiesen. Beide Maximalbeträge werden in Tiefen zwischen 200 mm und 250 mm unter ursprünglicher Geländeoberfläche festgestellt. Für die vertikalen Verschiebungen  $u_y$  zeigen sich hingegen große Ähnlichkeiten.

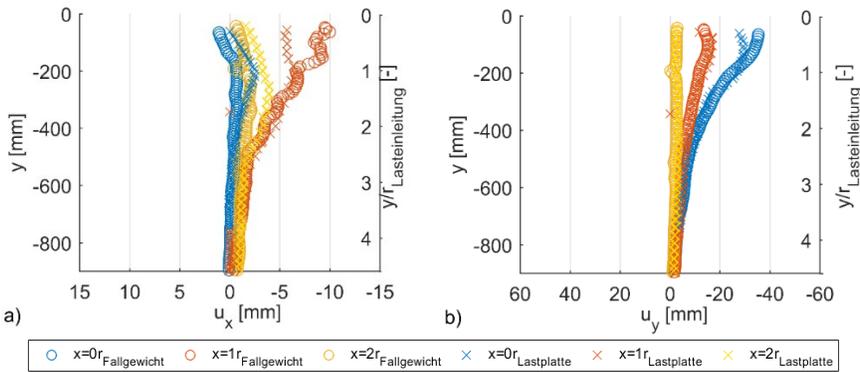


Abbildung 8.2 Versuche m48\_10-h0\_34-D435 (Fallgewicht) und HK\_435 (Lasteinheit) mit Ergebnisdarstellung entlang von Schnittlinien: a) Verschiebungen  $u_x$  in mm und b) Verschiebungen  $u_y$  in mm

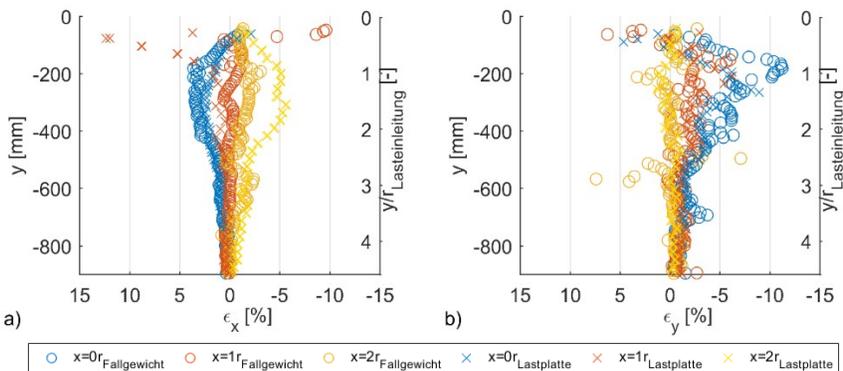


Abbildung 8.3 Versuche m48\_10-h0\_34-D435 (Fallgewicht) und HK\_435 (Lasteinheit) mit Ergebnisdarstellung entlang von Schnittlinien: a) horizontale Dehnungen  $\epsilon_x$  in % und b) vertikale Dehnungen  $\epsilon_y$  in %

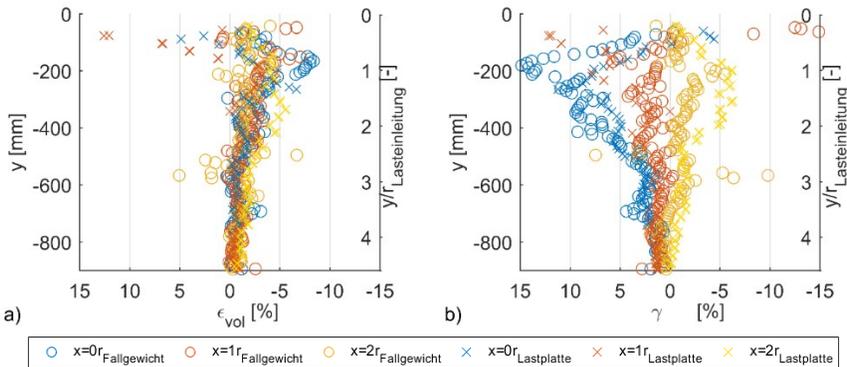


Abbildung 8.4 Versuche m48\_10-h0\_34-D435 (Fallgewicht) und HK\_435 (Lasteinheit) mit Ergebnisdarstellung entlang von Schnittlinien: a) volumetrische Dehnungen  $\epsilon_{\text{vol}}$  in % und b) Scherdehnungen  $\gamma$  in %

Abbildung 8.3a) weist für die horizontalen Dehnungen  $\epsilon_x$  große Ähnlichkeiten für  $x=0r$  und  $x=1r$  aus. Unterschiede zeigen sich für Ergebnisse im Schnitt  $x=2r$  analog zu den horizontalen Verschiebungen. Im Schnitt  $x=2r$  treten deutlich größere Dehnungsbeträge im statischen Versuch HK\_435 auf.

Die Ergebnisse in Abbildung 8.3b) veranschaulichen, dass in beiden Versuche vertikale Dehnungen in den Schnitten  $x=0r$  und  $x=1r$  bis in eine Tiefe von ca. 600 mm ( $3r_{\text{Lasteinleitung}}$ ) auftreten. Mittig unter der Lasteinleitung bei  $x=0r$  zeigen sich im Fallgewichtsversuch nahezu durchgehend stärkere negative Dehnungen mit Maximalbeträgen von bis 11 % gegenüber meist maximal 8 % für den statischen Versuch HK\_435. Im Schnitt  $x=2r$  treten in keinem der beiden Versuche nennenswerte vertikale Dehnungen auf.

Abbildung 8.4a) zeigt für die volumetrischen Dehnungen an beiden Versuchen ähnliche Ergebnisverläufe. Hinweise auf eine überwiegend erfolgreiche Verdichtungsarbeit zeigen sich in beiden Versuchen mit Maximalbeträgen in Tiefen von 200 mm bis 300 mm unter der Geländeoberkante und einer Abnahme über die Tiefe. Leichte Unterschiede zeigen sich im Schnitt  $x=0r$  und  $x=2r$ . Im Schnitt  $x=0r$  wird für den Fallgewichtsversuch eine intensivere Verdichtungswirkung ausgewiesen. Hingegen ergeben sich im Schnitt  $x=2r$  lediglich für den statischen Versuch HK\_435 nennenswerte negative volumetrische Dehnungen.

Abbildung 8.4b) weist für beide Versuche ein ähnliches Scherverhalten entlang der Schnitte aus. Die stärksten Scherungen treten mittig unterhalb der

Lasteinleitung im Schnitt  $x=0r$  mit Maximalbeträgen von bis zu 15 % auf. Moderate Scherungen werden im Schnitt  $x=2r$  mit Maximalbeträgen von bis ca. 6 % ausgewiesen. Unterschiede zeigen sich im Schnitt  $x=1r$  mit Maximalbeträgen im Fallgewichtsversuch von bis zu 6 % und Maximalbeträgen im statischen Versuch von bis zu 8 % bzw. auch 12 %.

Der Vergleich zeigt überwiegend große Ähnlichkeiten im Verformungsverhalten zwischen dem statischen und dem dynamischen Versuch. Die Ergebnisse beider Versuche zeigen Hinweise auf erfolgreiche Verdichtungsarbeit im Umfeld der Lasteinleitung. Unterschiede ergeben sich im Hinblick auf ein seitliches Verdrängen am Rand und neben der Lasteinleitung. Diese Verdrängungen sind im statischen Versuch stärker ausgeprägt. Durch die Lasteinleitung mit dem Fallgewicht ergeben sich weniger horizontale Verformungen. Die Ergebnisse der vertikalen Dehnungen zeigen für beide Versuche ein ähnliches Dehnungsverhalten mit etwas stärkeren Dehnungsbeträgen beim Fallgewichtsversuch. Die überwiegend negativen volumetrischen Dehnungen gehen mit Scherdehnungen von bis zu 15 % einher. In diesem Versuch zeigten sich die größten volumetrischen Dehnungsbeträge im Bereich mittig unterhalb der Lasteinleitung in Tiefen von ca. 200 mm bis 300 mm bzw. 1 bis 2-fachen Radius der Lasteinleitung unter ursprünglicher Geländeoberkante. In diesem Bereich wurden auch die stärksten Scherdehnungen ermittelt.

# 9 Numerische Berechnungen mit der Finite-Elemente-Methode

## 9.1 Grundlagen der verwendeten Finite-Elemente-Methode

### 9.1.1 Verwendete Finite-Elemente-Methoden

Im Vordergrund dieser Arbeit stehen die Methodik und die Ergebnisse von Experimenten. Eigene numerische Berechnungen sollen in diesem Zusammenhang zur ersten Bewertung der experimentellen Arbeiten genutzt werden und weniger selbst als Nachrechnungen im Vordergrund stehen. Für die Simulationen kommen die Finite-Elemente-Methode (FEM) als klassische *Lagrange*-FEM sowie in einer Erweiterung als gekoppelte *Euler-Lagrange* (engl.: *Coupled Eulerian Lagrangian*, kurz CEL) Methode zum Einsatz.

Die klassische *Lagrange*-FEM wird zur Kalibrierung der Stoffparameter sowie zur Simulation der Versuche in der Konfiguration eindimensionale Kompression am Versuchsstand-C verwendet. Die CEL-Methode wird für die Simulation der weiteren Versuche mit großen Verformungen verwendet. Dabei werden die Lasteinheiten oder Fallgewichte mit einem *Lagrange*-Netz diskretisiert. Der Boden wird hingegen durch ein *Euler*-Netz abgebildet. Die Bewegung des Euler-Materials im Euler-Netz wird durch die Berechnung eines *Eulerian Volume Fraction* (EVF) Wertes erhalten. Bei vollkommener Materialfüllung eines *Euler*-Elementes ist der EVF-Wert = 1. Ohne Materialfüllung ist der EVF-Wert eines *Euler*-Elementes = 0. *Abaqus* bietet bisher keine Möglichkeit an, Bewegungen des Materials in Eulerelementen direkt als Verschiebungen analog zu einem *Lagrange*-Netz zu veranschaulichen. In den eigenen Simulationen wurde daher auf die Ergebnisgröße der Geschwindigkeit  $v$  zurückgegriffen. Darüber hinaus wird durch die Hypoplastizität auch die Verwendung der Porenzahl  $e$  ermöglicht. Der Kontakt zwischen Lasteinheit bzw. Fallgewicht und Boden wird durch eine *General Contact* Formulierung auf Basis der *Penalty Contact* Methode beschrieben. Dabei bewegen sich in einer

CEL-Berechnung *Lagrange*-Elemente ohne Widerstand durch *Euler*-Elemente ohne Materialfüllung bis sie auf ein *Euler*-Element mit Materialfüllung treffen.

### 9.1.2 Verwendete Software Abaqus

In dieser Arbeit werden numerische Berechnungen mit dem Programm *Abaqus* (Version 2017 und 2018) durchgeführt. Dabei kommen in Abhängigkeit des Modells die Module *Abaqus/Standard* oder *Abaqus/Explicit* zum Einsatz. Das Programm *Abaqus* wird in der Geotechnik vor allem im Umfeld der Hochschulen zur Bearbeitung von Forschungsansätzen verwendet. In dem Modul *Abaqus/Standard* ist es möglich, klassische Lagrange Methoden zu berechnen, bei denen ein Finite Elemente Netz fest mit dem Material verbunden bleibt. *Abaqus/Standard* nutzt eine implizite Zeitintegration und ist daher auf Gleichgewichtsiterationen angewiesen. Großen Deformationen führen zu großen Netzverformungen und somit zu einer schlechteren Qualität der Berechnungen.

*Abaqus/Explicit* wird vor allem für die Berechnung dynamischer Probleme eingesetzt. Die Zeitintegration erfolgt mit Hilfe eines zentralen Differenzenschemas. Somit sind Iterationen nicht notwendig. Eine diagonalisierte Massenmatrix lässt sich dabei leichter invertieren und kann zu einem effizienten Rechenmodell führen (*lumped mass matrix*). Es ergeben sich über einfachere Berechnungen mehr Möglichkeiten auch bei großen Verformungen sowie komplizierten Kontaktproblemen [SIM17]. Eine Stabilitätsbedingung ergibt sich bei der Ausbreitung von Körperwellen. Je Inkrement darf die Welle max. 1 Element passieren. Die Größe des stabilen Zeitinkrements ist somit abhängig von Steifigkeit und Dichte des Materials sowie der Elementgröße. Über Berechnungen mit *double precision* können Stoffmodelle benutzerdefiniert integriert werden.

### 9.1.3 Verwendete Stoffmodelle

Das Bodenverhalten des trockenen Versuchssandes wird durch das verbreitete hypoplastische Modell nach von Wolffersdorff [WOL96] mit der Erweiterung um das Konzept der intergranularen Dehnungen nach Niemunis und Herle

[NIE97] beschrieben. Ein kurzer Überblick über die mathematische Darstellung des verwendeten Stoffmodells wird in Anlehnung an Wolffersdorff [WOL01] in Anhang F und Anhang G gegeben.

Die Möglichkeiten und Grenzen des verwendeten Stoffmodells zur Beschreibung des Verformungsverhaltens von Sanden wurden im deutschsprachigen Raum intensiv erörtert und beschrieben. Bekannt ist eine realistische Beschreibung des Verhaltens unter monotoner Belastung. Zudem werden das Kompressionsverhalten und das Kontraktanz-Dilatanz-Verhalten bei monotoner Scherung gut wiedergegeben. Somit können wesentliche Mechanismen bei der Verdichtung durch statische Lasten oder durch Fallgewichte abgebildet werden. Bekannte Grenzen liegen bei der Modellierung von Wechselbeanspruchungen wie sie auch bei Verdichterverfahren mit harmonischer Anregung auftreten können. Die intergranulare Dehnung gilt dabei immer nur für einen begrenzten Dehnungsbereich. Aufgrund der genannten vorteilhaften Eigenschaften wird das hypoplastische Stoffmodell auch in der eigenen Arbeit für die Simulation des Bodenverhaltens bei monotoner statischer Belastung sowie in Fallgewichtversuchen verwendet.

Für die Kalibrierung der Stoffparameter und zur Simulation der Versuche in der Konfiguration eindimensionale Kompression am Versuchsstand-C in *Abaqus/Standard* wird das Stoffmodell benutzerdefiniert als *umat* Routine eingebunden. Für die weiteren Simulationen mit der CEL-Methode in *Abaqus/Explicit* erfolgt eine Einbindung des Stoffmodells als *vumat* Routine. Im Rahmen der eigenen Arbeit wurden die *umat* und die *vumat* Routine über die Webseite [soilmodels.info](http://soilmodels.info) bezogen. Inhalt und Aufbau der Routinen sind bis auf eine Interface Formulierung in der *vumat* Routine identisch.

### 9.1.4 Modellerstellung und Validierung

Für die Erstellung der numerischen Modelle wird *Abaqus CAE* sowie *Abaqus Scripting* verwendet. Der Vorteil aus der Anwendung von *Abaqus CAE* liegt in der einfachen Handhabung bei der Erstellung der 3D Modelle. Die Grundmodelle werden dann als *Input* Datei (.inp) für eine weitere Bearbeitung übergeben. *Abaqus Scripting* bietet große Vorteile bei der Durchführung von Variantenstudien sowie nur geringfügigen Modellanpassungen. Für die Bearbeitung der *Input* Datei wird das Software-Tool *Notepad++* verwendet. Eine manuelle Bearbeitung der *Input* Datei bietet noch mehr Einstellmöglichkeiten

gegenüber einer Anwendung von *Abaqus CAE*. So kann beispielsweise eine einheitliche Anfangsporenzahl  $e_0$  zum Berechnungsbeginn festgelegt werden oder gezielt nur einzelne Zustandsvariablen in der Ergebnisausgabe geschrieben werden.

Eine Validierung der Simulationen erfolgt in erster Linie an den eigenen Experimenten. Aus diesem Grund werden die Simulationen schrittweise analog den Experimenten vom Problem mit relativ einfachen Randbedingungen zu den komplexeren Fallgewichtsversuchen entwickelt und validiert. Ein Ziel ist es, Grenzen bzw. Möglichkeiten der Modellmodifikationen gegenüber der Arbeit mit einem reinen Elementversuch bzw. Versuch mit einfachen Randbedingungen aufzuzeigen. Bisher liegen nur wenige Arbeiten mit quantitativer Überprüfung der Qualität der Berechnungsansätze zur Fallgewichtsverdichtung vor. In diesem Zusammenhang soll auch ein Vergleich zwischen Versuchen im ebenen Verformungszustand und mit einem axialsymmetrischen bzw. einem Halbmodell eingegangen werden. Die numerischen Arbeiten dienen somit zur Modellvalidierung bzw. dem Aufzeigen der Grenzen der gewählten Modellierungstechniken.

## 9.2 Bestimmung der Stoffmodellparameter

Die Bestimmung der Stoffmodellparameter des Versuchssandes wurde im Rahmen der Masterarbeit von Rosa Elena Ocaña Atencio durchgeführt und in [OCA16] ausführlich beschrieben. Nachfolgend wurden wesentliche Angaben daraus zusammengestellt. Eine ergänzende Darstellung von Ergebnissen der Bestimmung und Kalibrierung der Stoffmodellparameter erfolgt in Anhang E.

Die verwendete Formulierung der Hypoplastizität nach [WOL96] mit Erweiterung um das Modell der intergranularen Dehnungen nach [NIE97] wird durch 13 Parameter beschrieben. Für 8 Parameter kann eine Bestimmung auf Grundlage bodenmechanischer Laborversuche nach Tabelle 9.1 erfolgen.

Nach [OCA16] wurden der kritische Reibungswinkel und die Porenzahlen direkt aus den Laborversuchen übernommen. Die Granulathärte und die Exponenten  $n$ ,  $\alpha$  und  $\beta$  wurden anhand von Simulationen der entsprechenden Laborversuche kalibriert. Die Versuche wurden mit nur einem axialsymmetrischen Element in *Abaqus/Standard* simuliert. Die Simulationsergebnisse der Elementversuche mit den kalibrierten Stoffgesetzparametern sind in Anhang E zusammengestellt. Die Erhöhungsfaktoren  $m_R$  und  $m_T$ , der Maximalwert der

intergranularen Dehnungen  $R$  sowie die Exponenten  $\beta_r$  und  $\chi$  wurden aus der Literatur abgeschätzt. Die im Ergebnis dieser Arbeiten ermittelten Stoffparameter des verwendeten Versuchssandes sind in Tabelle 9.2 zusammengestellt.

Tabelle 9.1 Bestimmung von Stoffgesetzparametern in bodenmechanischen Laborversuchen nach [OCA16]

Parameter	Bestimmungsweise
kritischer Reibungswinkel $\varphi_C$	Schüttkegelversuch
Granulathärte $h_s$ und Exponent $n$	Ödometerversuch nach [DIN18135] (Probe in lockerer Lagerung)
Porenzahl $e_{d0}$ , $e_{c0}$ und $e_{i0}$	Dichtebestimmung nach [DIN18126]
Exponent $\alpha$	Triaxialversuch nach [DIN18137-2]
Exponent $\beta$	Ödometerversuch nach [DIN18135] (Probe in dichter Lagerung)

Tabelle 9.2 Stoffmodellparameter des verwendeten Versuchssandes nach [OCA16]

$\varphi_C$	$h_s$	$n$	$e_{d0}$	$e_{c0}$	$e_{i0}$	$\alpha$	$\beta$	$m_R$	$m_l$	$R$	$\beta_r$	$\chi$
32,4°	3300 MPa	0,26	0,484	0,750	0,863	0,25	1,5	5	2	6,5*E-5	0,5	6

Auf eine spätere Optimierung der Stoffmodellparameter an den Randwertproblemen wird verzichtet, um eine realistische Qualität zu dokumentieren.

### 9.3 Simulation der Kompressionsversuche

Für eine Simulation der Kompressionsversuche am Versuchsstand-C soll der Versuch UC\_003 als numerisches Modell erstellt werden. Abbildung 9.1 zeigt eine schematische Ansicht des Versuches sowie den Aufbau und wesentliche Randbedingungen des numerischen Modells.

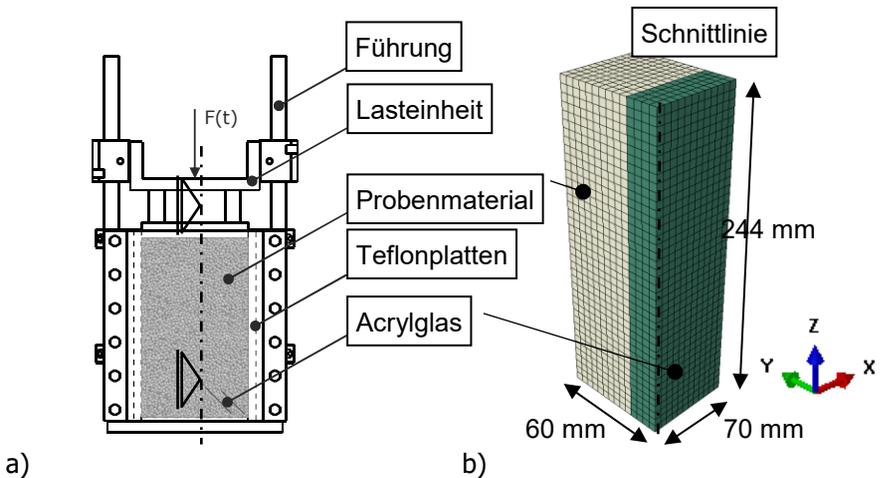


Abbildung 9.1 a) Schematische Ansicht und b) 3D-Ansicht eines verwendeten FE-Modells für die Simulation der Kompressionsversuche im Versuchsstand-C mit Kennzeichnung einer vertikalen Schnittlinie für Auswertungen

Wesentliche Angaben zum numerischen Modell werden nachfolgend genannt:

- Das numerische Modell nutzt den symmetrischen Aufbau des Versuches und bildet lediglich eine Hälfte des Versuchsstandes ab. In den Knoten der Symmetrieebene werden die Symmetriebedingungen *XSYMM* vorgegeben.
- Der Versuchssand und die Acrylglas-Scheibe werden mit trilinearen Kontinuums Elementen mit reduzierter Integration (C3D8R) modelliert.
- Das Material Acrylglas wird vereinfacht linear elastisch mit einem E Modul = 3.000 MPa, einer Poissonzahl  $\nu = 0,4$  und einer Dichte von  $1,18 \text{ t/m}^3$  modelliert.
- Die Teflonschichten an der Rückseite und der Seitenfläche sind vollflächig auf einem Stahlrahmen mit 8 mm Stärke befestigt. Es wird davon ausgegangen, dass sich Verformungen am Behälter bei sehr hohen Lasten zunächst am Acrylglas einstellen. Im numerischen Modell werden die Teflonflächen daher vereinfacht als diskret starre und unbewegliche Oberflächen abgebildet.

- Die Verschiebungsfreiheitsgrade der Knoten werden am Acrylglas am seitlichen Rand gehalten. Darüber hinaus werden auch Verschiebungen an der Unterseite der Bodenprobe in vertikaler Richtung nicht zugelassen.
- Die Aufbringung der Auflast erfolgt direkt an den Knoten der Probenoberseite.
- Die Randbedingungen für den Sand ergeben sich aus Kontaktbedingungen zu den Seitenwänden und zum Acrylglas. Im Rahmen der eigenen Arbeiten werden keine Messdaten zum Reibungswinkel zwischen Sand und Behälterwand ermittelt. In Anlehnung an vergleichbare Modellaufbauten von Vogelsang [VOG17] wird für das Kontaktverhalten zwischen dem Sand und den Strukturbauteilen die *Penalty*-Methode und ein Coulomb'sches Reibmodell genutzt. Für sehr glatte Oberflächen wie Teflon und das Acrylglas kann demnach der Reibungswinkel  $\delta = 12^\circ$  angenommen werden.
- Die Befüllung des Versuchsstandes im Rieselfverfahren führt im Versuch UC\_003 zu einer mittleren Trockenrohdichte  $\rho_{d,0} = 1,624 \text{ t/m}^3$  ( $I_{D,0} = 0,52$ , Anfangsporenzahl  $e_0 = 0,611$ ).
- Der Versuchssand wird mit Stoffmodellparametern nach Tabelle 9.2 beschrieben.

### 9.3.1 Simulation des Befüllvorgangs

Voll befüllt haben die Sandproben im Versuchsstand-C eine Höhe von 244 mm, eine Tiefe von 60,5 mm und eine Breite von 139 mm. Nach Janssen (1895) ist näherungsweise bei Behältern mit größerer Höhe als Breite oder Tiefe von Siloeffekten durch Reibung zwischen Befüllmaterial und Behälterwand auszugehen. Der Behälter besitzt somit in Bezug auf Siloeffekte eine ungünstige Geometrie. Es ist von einer Abweichung beim Anfangsspannungszustand von  $K_0$ -Bedingungen auszugehen und in der Simulation zu berücksichtigen.

Eine Spannungsberechnung nach dem Befüllen kann für ein ebenes Problem der Tiefe  $b$  vereinfacht nach Gl. 9.1 erfolgen. Betrachtet wird das Kräftegleichgewicht an einer unendlich dicken horizontalen Bodenscheibe mit der Grundfläche  $A$  und dem Umfang  $U$ . Die Tiefe  $Y$  ist definiert ab der Bodenoberfläche. Für  $\gamma$  wird mit der Anfangstrochdichte  $\rho_{d,0}$  gerechnet.  $\sigma_{y0}$  berücksichtigt eine eventuelle Auflast:

$$\sigma_y = \frac{\gamma r}{2K \tan \delta} (1 - e^{-2K \tan \delta Y/b}) + \sigma_{y0} e^{-2K \tan \delta Y/b} \quad (9.1)$$

*Abaqus* bietet die Möglichkeit der vereinfachten Ermittlung eines Anfangsspannungszustandes entsprechend  $K_0$ -Bedingungen. Sollen die Anfangsspannungen von Boden in schlanken Behältern realitätsnah angesetzt werden, sollte der Befüllvorgang simuliert werden. Vogelsang [VOG17] vergleicht hier verschiedene Methoden. Dabei erfolgt die Simulation des Einbauvorganges in *Abaqus/Standard*. Der ermittelte Anfangsspannungszustand kann bei Bedarf für eine dynamische Belastungsphase auch zu *Abaqus/Explicit* übernommen werden. Abbildung 9.2 zeigt die Vorzugsvariante zur Simulation des Einbauvorganges nach Vogelsang [VOG17]. Dabei wird der zeitliche Ablauf des Befüllens berücksichtigt. Die Gravitation wird zeitverzögert von unten nach oben schichtweise in Elementgruppen erhöht.

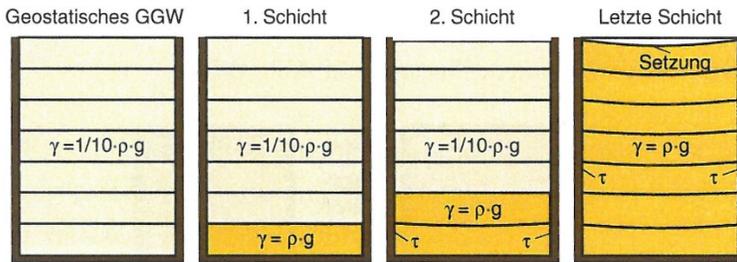


Abbildung 9.2 Schematische Darstellung der Simulation eines Befüllvorgangs nach Vogelsang [VOG17]

In der numerischen Berechnung des Befüllvorgangs am Versuchsstand-C werden mehrere gleichmäßige Schichten in Anlehnung an Abbildung 9.2 definiert. Ausgehend von einem Ansatz von 1/10 der Anfangswichte über die gesamte Probenhöhe, wird je Zeitschritt die volle Anfangswichte von Ebene zu Ebene übernommen. Wie im Experiment wird die Anfangsporenzahl  $e_0$  entsprechend dem Rieselfverfahren zu Beginn der Simulation einheitlich vorgegeben (im nachfolgenden Beispiel:  $e_0 = 0,6114$ ).

Abbildung 9.3a) zeigt einen Ergebnisplot der vertikalen Verschiebungen zum Ende des simulierten Befüllvorgangs. In Abbildung 9.3b) wird die Porenzahlverteilung nach Ende des simulierten Befüllvorgangs dargestellt. Das Dia-

gramm in Abbildung 9.4 veranschaulicht Berechnungsergebnisse der vertikalen Spannung über die Höhe von Versuchsstand-C exemplarisch für verschiedene Wandreibungswinkel  $\delta$ . Je größer der Wandreibungswinkel, desto größer der Siloeinfluss auf die vertikale Spannungsverteilung. Ungünstig ist demnach ebenfalls ein großes Verhältnis von Behälterumfang zu Behältergrundfläche. Der Graph „FEM / 21 Steps / 12°“ zeigt Ergebnisse zur Spannungsermittlung aus einer Simulation mit 21 Ebenen zur Beschreibung des Befüllvorgangs.

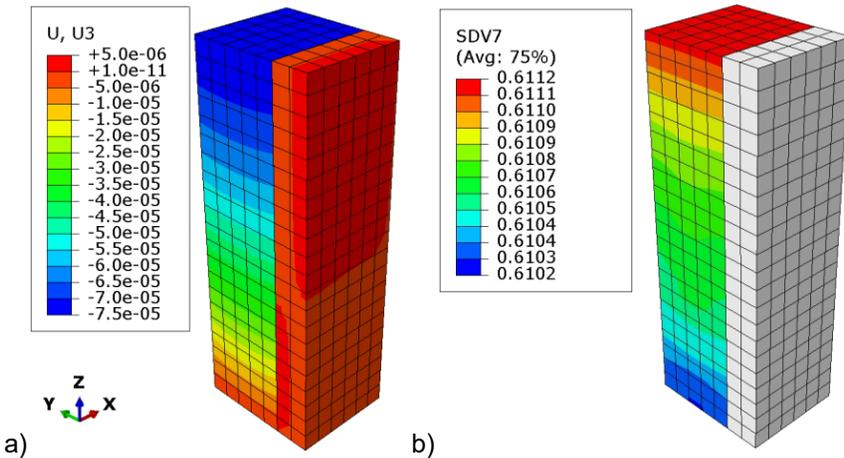


Abbildung 9.3 Ergebnisplots nach Ende des simulierten Befüllvorgangs für den Versuch UC\_003 ( $e_0 = 0,6114$ ): a) vertikale Verschiebungen [m], b) Porosität  $e_0$

Abbildung 9.3a) lässt erkennen, dass sich durch die Reibung zwischen Sand und Behälterwand ein typisches Setzungsverhalten mit maximalen Setzungen in der Mitte der Probenoberfläche des Bodens nach dem Befüllvorgang einstellt. Abbildung 9.3b) zeigt, dass es durch die Simulation des Einrieselvorgangs die Anfangsporenzahl  $e_0$  leicht über die Tiefe der Probe abnimmt. Der Vergleich in Abbildung 9.4 deutet darauf hin, dass in der Simulation der Siloeffekt qualitativ korrekt berücksichtigt wird. Gemäß diesem Vergleich wird der Effekt jedoch in der Simulation am Versuchsstand-C unterschätzt.

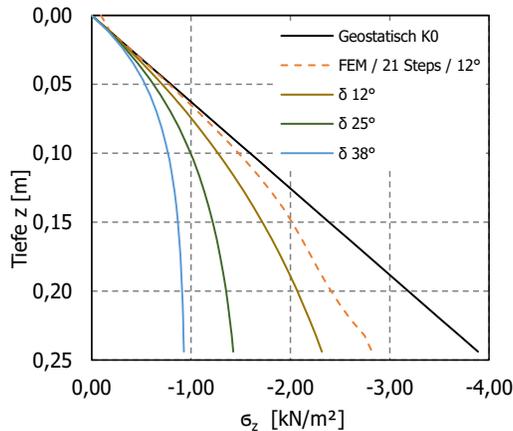


Abbildung 9.4 Ergebnisse zur vertikalen Spannung in Abhängigkeit der Probenhöhe:  $K_0$ -Zustand, exemplarischer Berechnungen nach Gl. 9.1 sowie Ergebnisse einer Simulation („FEM / 21 Steps /  $12^\circ$ )

### 9.3.2 Simulation der Lastaufbringung

Die Lastaufbringung in der Simulation des Versuches UC\_003 wurde an mehreren Simulationsvarianten mit unterschiedlichen Vereinfachungen in *Abaqus/Standard* berechnet. Wesentliche Eigenschaften ausgewählter Modelle wurden in Tabelle 9.3 zusammengestellt:

Tabelle 9.3 Wesentliche Modelleigenschaften von Simulationen des Versuches UC\_003 in *Abaqus/Standard*

Modellbezeichnung	Bestandteile in Simulation	Spannungszustand	Randbedingungen der Bodenprobe
Einfache Randbedingungen	Bodenprobe	$K_0$ / geostatisch	Knoten am Probenrand in Richtung Wand/Acrylglas unverschieblich
Kontakt	Bodenprobe, Probenbehälter	$K_0$ / geostatisch	Kontakt zwischen Sandprobe und Behälterwand
Kontakt/Silo	Bodenprobe, Probenbehälter	aus Simulation Einbauvorgang	Kontakt zwischen Sandprobe und Behälterwand

Abbildung 9.5 zeigt exemplarisch Ergebnisplots richtungsabhängiger Verschiebungen bei maximaler Auflast von  $1.000 \text{ kN/m}^2$  für das Modell „Kontakt“ mit Berücksichtigung von Wandreibung und Verformungen der Acrylglasscheibe. Die Ergebnisse veranschaulichen, dass bei maximaler Auflast der Verformungsanteil in Richtung der Acrylglasscheibe mit größer  $1 \text{ mm}$  nicht mehr unerheblich ist. Im Experiment wurde bei maximaler Auflast eine Verschiebung der Acrylglasscheibe von  $0,34 \text{ mm}$  gemessen. Somit werden die Verformungen der Acrylglasscheibe in der Simulation überschätzt. Gründe hierfür können in Vereinfachungen bei der Simulation in der Beschreibung der seitlichen Einspannung der Acrylglasscheibe liegen. Denkbar sind auch Unterschiede in der Steifigkeit der Scheibe.

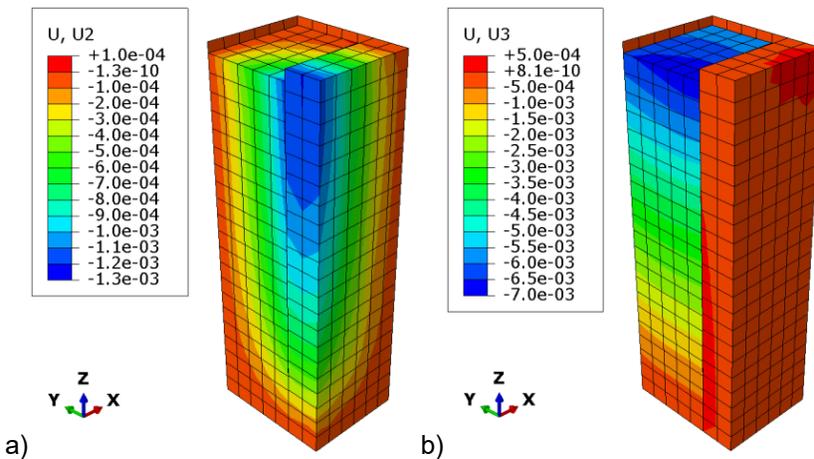


Abbildung 9.5 Ergebnisplots der Verschiebungen bei Auflast  $1.000 \text{ kN/m}^2$  für das Modell „Kontakt“ in *Abaqus/Standard* mit Berücksichtigung von Wandreibung und Verformungen einer Acrylglasscheibe mit reduzierter Steifigkeit: (a) Verschiebung  $u_y$  [m] (b) Verschiebung  $u_z$  [m]

Nachfolgend wird das Setzungsverhalten der Lasteinheit bzw. Oberseite der Probe näher analysiert. Abbildung 9.6 zeigt die Setzungsergebnisse der Lasteinheit in Abhängigkeit der Auflastspannung für den Versuch UC\_003. Die Ergebnisse werden in Abbildung 9.6(a) der Simulation des Probenkörpers mit einfachen Randbedingungen gegenübergestellt. Abbildung 9.6(b) vergleicht die Ergebnisse des Experimentes mit den erweiterten Simulationen „Kontakt“ sowie „Kontakt/Silo“. In diesen Simulationen wird ein Kontakt zwischen Versuchssand und Behälterwandungen sowie eine Verformbarkeit der Acrylglasscheibe berücksichtigt.

Die Ergebnisse zeigen für alle Berechnungsvarianten eine näherungsweise Abbildung des Setzungsverhaltens aus dem Experiment UC\_003. Jedoch kann mit keiner Konfiguration das Setzungsverhalten aus dem Experiment exakt beschrieben werden. Die Simulation „einfache Randbedingungen“ weist für die ersten drei Laststufen zunächst zu große Setzungen aus. Bei höheren Laststufen deuten die Setzungen in der Simulation hingegen auf ein zu steifes Verformungsverhalten. Die Ergebnisse der weiteren Simulationen in Abbildung 9.6b) deuten darauf hin, dass eine Berücksichtigung von Verformungen der Acrylglasscheibe, Kontakt zwischen Sandprobe und Behälterwandungen sowie ggf. auch eine Simulation des Einrieselvorgangs für eine präzise Beschreibung dieses Versuches erforderlich sind. Auf eine nachträgliche Anpassung von Modelleigenschaften wie dem gewählten Wandreibungswinkel  $\delta$  bzw. Steifigkeiten der Acrylglasscheibe wurde jedoch im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

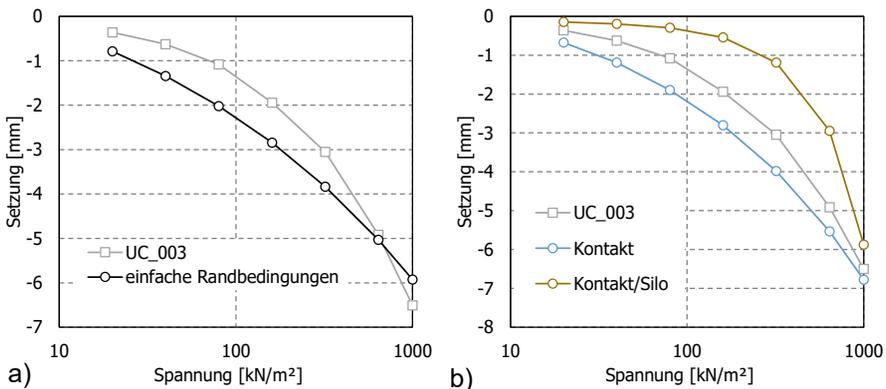


Abbildung 9.6 Vertikale Setzung der Lasteinheit in Abhängigkeit der Auflastspannung für den Versuch UC\_003: a) Vergleich der Ergebnisse von Experiment und der Simulation „einfache Randbedingungen“, b) Vergleich der Ergebnisse von Experiment und den Simulationsmodellen „Kontakt“ sowie „Kontakt/Silo“

### 9.3.3 Vergleich von Experiment und Simulation

Nachfolgend werden vertikale Verschiebungen und volumetrische Dehnungen in vertikaler Richtung betrachtet. Abbildung 9.7 stellt Ergebnisse aus Experiment sowie exemplarisch aus der Simulation „Kontakt“ entlang einer vertikalen Schnittlinie bei maximaler Auflastspannung von  $1.000 \text{ kN/m}^2$  gegenüber. Die Lage der Schnittlinie ist in Abbildung 9.1 dargestellt. Abbildung 9.7a) zeigt die Ergebnisse der vertikalen Verschiebungen. In Abbildung 9.7b) werden die Ergebnisse zur volumetrischen Dehnung  $\varepsilon_{\text{vol}}$  verglichen. Die vertikale Achse wird nachfolgend in Anlehnung an den Aufbau der Simulationen als z-Richtung dargestellt.

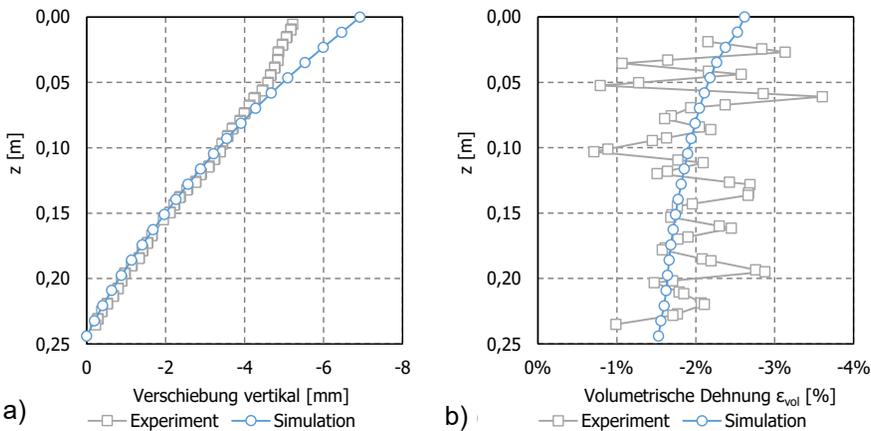


Abbildung 9.7 Ergebnisse für den Versuch UC\_003 aus Experiment und Simulation entlang des vertikalen Schnittlinie gemäß Abbildung 9.1 bei maximaler Auflastspannung von  $1.000 \text{ kN/m}^2$ : a) Verschiebung vertikal und b) volumetrische Dehnung

Abbildung 9.7a) zeigt für den Vergleich der Verschiebungsergebnisse eine sehr gute Übereinstimmung. Beide Ergebnisverläufe zeigen bei einer maximalen Setzung an der Probenoberseite eine näherungsweise lineare Abnahme der Setzungen entlang des Pfades bis zur Probenunterseite. Ausnahme stellen die Ergebnisse nahe der Probenoberseite dar. Hier zeigen sich Einflüsse aus der optischen Brechung am Rand der Acrylglascheibe. Diese Besonderheit wurde in Kap. 6.2 näher erläutert. Der Ergebnisvergleich in Abbildung 9.7b) zeigt für die Simulation die stärkste Kompression mit  $\varepsilon_{\text{vol}} = -2,67\%$  an der Probenoberseite. Über die Probertiefe ändert sich dieser Wert entlang der

Schnittlinie kontinuierlich auf bis zu  $\varepsilon_{\text{vol}} = -1,5\%$  an der Probenunterseite. Im Mittel beträgt die volumetrische Dehnung  $-1,9\%$ . Der Vergleich mit dem Experiment ist für die Ergebnisgröße der volumetrischen Dehnungen aufgrund der starken Streuung der experimentellen Werte nur bedingt möglich. Die mittlere volumetrische Dehnung im Experiment beträgt  $\varepsilon_{\text{vol}} = -2,0\%$  und liegt somit nah am Simulationsergebnis von  $-1,9\%$ .

## 9.4 Simulation der Streifenfundamentversuche

### 9.4.1 Vorbemerkung

Nachfolgend werden wesentliche Merkmale und ausgewählte Ergebnisse von Simulationen der Grundbruchuntersuchungen mit Streifenfundamentmodellen am Versuchsstand-C und am Versuchsstand-M vorgestellt. Im Gegensatz zu den Simulationen der Kompressionsversuche werden die Grundbruchuntersuchungen unter Nutzung der *Coupled Eulerian-Lagrangian* (CEL) Methode simuliert. Im Vordergrund der Simulationen steht die Bewertung der Bodenverformungen durch die konzentrierte Lasteinleitung an der Probenoberfläche. Auf eine Abbildung des Kontaktverhaltens, von Behälterverformungen oder von Siloeffekten wurde daher nachfolgend verzichtet.

### 9.4.2 Streifenfundamentversuche am Versuchsstand-C

Der Aufbau des numerischen Modells vom Versuchsstand-C für die Streifenfundamentversuche erfolgt ähnlich den Kompressionsversuchen in Kap. 9.3 unter Ausnutzung der Symmetrieebene. Folgende Besonderheiten kennzeichnen das Modell für die Streifenfundamentversuche am Versuchsstand-C:

- Die Lasteinheit im Experiment wird mit einem *Lagrange*-Netz diskretisiert.
- Für die Diskretisierung des Versuchssandes wird ein *Euler*-Netz verwendet.
- Die Aufbringung der weggesteuerten Last erfolgt an den Knoten der Lasteinheit.
- Zwischen Lasteinheit und Bodenprobe wird eine *general contact* Formulierung verwendet.

- Auf eine Modellierung der Acrylglascheibe wird verzichtet.

Tabelle 9.4 zeigt eine Übersicht der simulierten Streifenfundamentversuche am Versuchsstand-C:

Tabelle 9.4: Bezeichnungen und Anfangszustand der simulierten Streifenfundamentversuche am Versuchsstand-C

Name (intern)	$e_0$ [-]	$I_{D,0}$ [%]
EDZ_01	0,61	52
EDZ_02	0,69	22
EDZ_03	0,51	92

Abbildung 9.8 zeigt 3D-Ansichten des verwendeten numerischen Modells zur Simulation von Streifenfundamentversuchen am Versuchsstand-C.

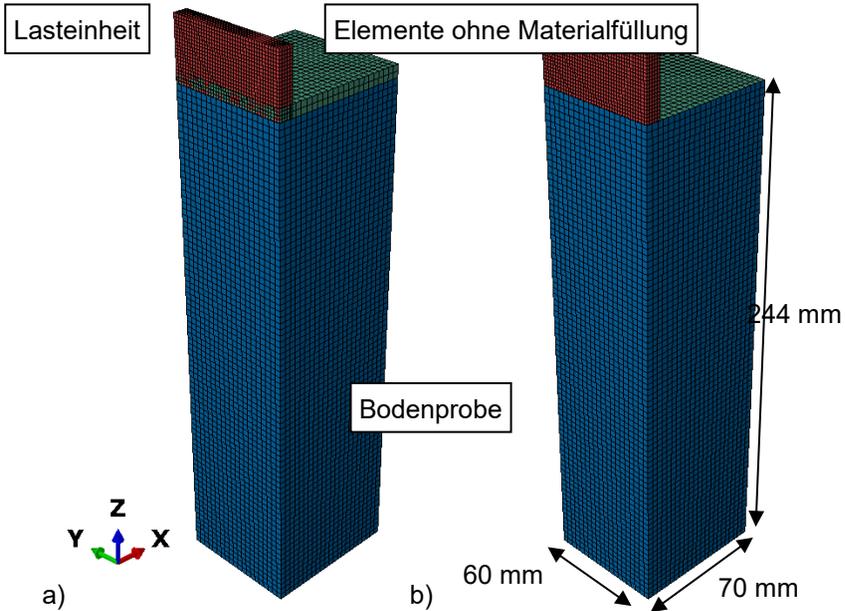


Abbildung 9.8 3D-Ansicht des verwendeten numerischen Modells der Streifenfundamentversuche am Versuchsstand-C mit der *CEL* Methode in *Abaqus/Explicit*: a) mit Darstellung aller Elemente im Modell, b) die Elementebenen ohne anfängliche Materialfüllung wurden ausgeblendet

Nachfolgende Abbildungen zeigen Ergebnisplots der Simulationen der Versuche EDZ\_01, EDZ\_02 und EDZ\_03 bei einer Setzung des Lastbügels von 1,6 mm. Dargestellt werden jeweils die richtungsabhängigen Geschwindigkeiten  $v_x$  und  $v_z$  und die Porenzahl  $e$ .

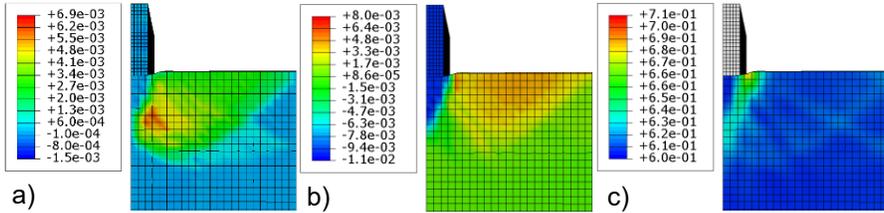


Abbildung 9.9 Ergebnisplots für die Simulation von Versuch EDZ\_01 ( $e_0=0,61$ ) bei einer Setzung des Lastbügels von 1,6 mm: (a) Geschwindigkeit  $v_x$  [m/s], (b) Geschwindigkeit  $v_z$  [m] und c) Porenzahl  $e$

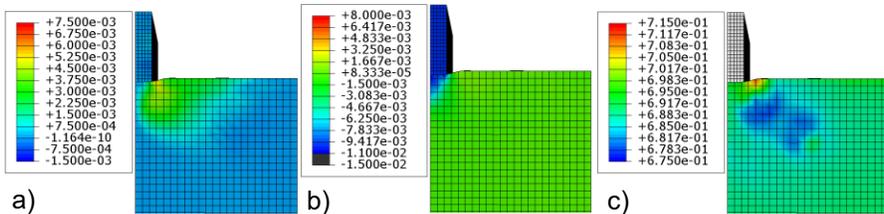


Abbildung 9.10 Ergebnisplots für die Simulation von Versuch EDZ\_02 ( $e_0=0,69$ ) bei einer Setzung des Lastbügels von 1,6 mm: (a) Geschwindigkeit  $v_x$  [m/s], (b) Geschwindigkeit  $v_z$  [m] und c) Porenzahl  $e$

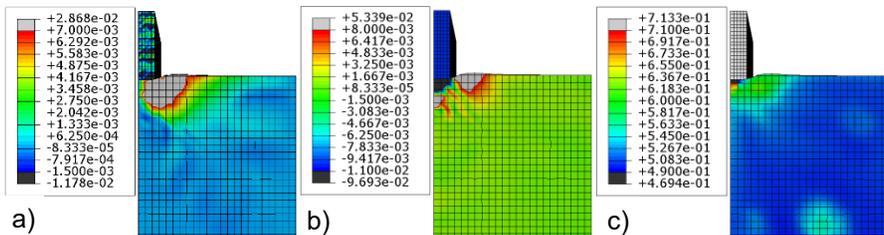


Abbildung 9.11 Ergebnisplots für die Simulation von Versuch EDZ\_03 ( $e_0=0,51$ ) bei einer Setzung des Lastbügels von 1,6 mm: (a) Geschwindigkeit  $v_x$  [m/s], (b) Geschwindigkeit  $v_z$  [m] und c) Porenzahl  $e$

Die Ergebnisse der Simulationen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Ergebnisplots der richtungsbezogenen Geschwindigkeiten deuten in allen drei Versuchen auf ein ähnliches Verformungsverhalten mit

Ausbildung der 3 Zonen nach Prandtl [PRA20] hin. Direkt unterhalb des Lastbügels bildet sich ein keilförmiger Bereich aus (Zone 1), der nahezu nur Setzungen erfährt. In den Bodenbereichen seitlich unterhalb des Lastbügels zeigen sich deutliche Bodenverschiebungen zur Seite und mit Ausnahme des Versuches EDZ\_02 in anfänglich lockerer Lagerung ( $e_0 = 0,69$ ) auch nach oben.

- An den Ergebnisplots der Porenzahl  $e$  lassen sich unterschiedliche Auswirkungen auf die seitlichen Scherbereiche erkennen. So wird in der Simulation des Versuches EDZ\_02 ( $e_0 = 0,69$ ) flächig eine Verdichtung mit Reduzierung der Porenzahl beidseitig der Scherebene ausgewiesen. Für die Simulation von Versuch EDZ\_03 ( $e_0 = 0,51$ ) ergibt sich eine Auflockerung mit Vergrößerung der Porenzahl für den seitlichen Bereich. Die Simulation von Versuch EDZ\_01 ( $e_0 = 0,61$ ) zeigt ein differenziertes Bild. Am Rand der keilförmigen Zone 1 unterhalb des Lastbügels bildet sich eine massive Scherzone mit deutlicher Auflockerung. Seitlich lässt sich auch an der Darstellung der Porenzahl  $e$  ein typisches Scherband entlang der Zonen 2 und 3 nach Prandtl [PRA20] erkennen. Zudem werden in dieser Darstellung auch Scherbänder mit geringerer Intensität ausgegeben, die näherungsweise orthogonal zur Bewegungsrichtung der Grundbruchfigur liegen.

### 9.4.3 Streifenfundamentversuche am Versuchsstand-M

Der Aufbau des numerischen Modells vom Versuchsstand-M ähnelt bewusst sehr dem Modell für den Versuchsstand-C. Folgende Besonderheiten kennzeichnen das Modell für die Streifenfundamentversuche am Versuchsstand-M:

- Die Lasteinheit im Experiment wird mit einem *Lagrangian*-Netz diskretisiert.
- Für die Diskretisierung des Versuchssandes wird ein *Euler*-Netz verwendet.
- Die Auflast wird direkt an den Knoten der Lasteinheit aufgetragen.
- Zwischen Lasteinheit und Bodenprobe wird eine *general contact* Formulierung verwendet.
- Auf eine Modellierung der Verbundsicherheitsglasscheibe wird verzichtet.

Simuliert wird der Versuch EDZ\_300R mit  $e_0 = 0,61$  bzw.  $I_{D,0} = 0,5$ . Abbildung 9.12 zeigt 3D-Ansichten des verwendeten numerischen Modells.

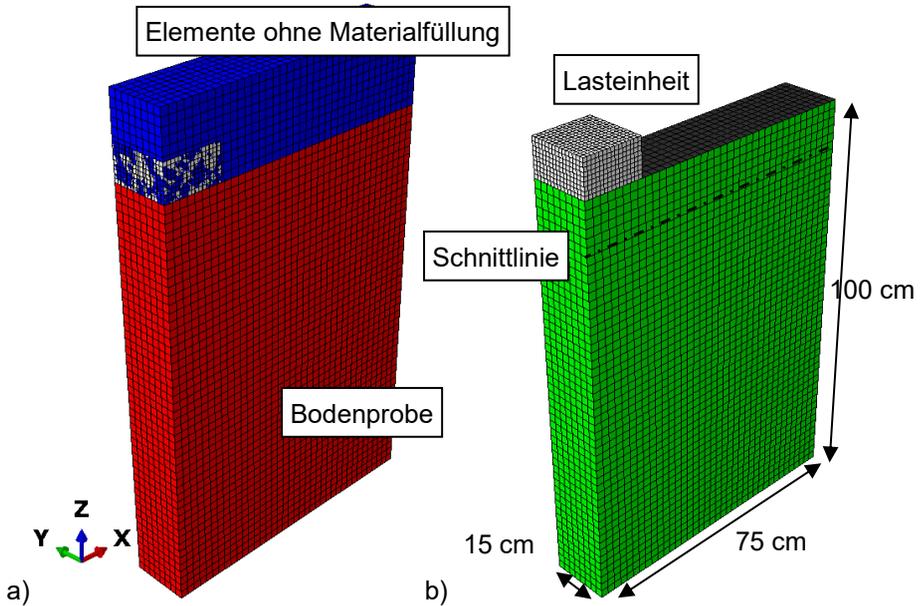


Abbildung 9.12 3D-Ansicht des verwendeten numerischen Modells der Streifenfundamentversuche am Versuchsstand-M mit der *CEL* Methode in *Abaqus/Explicit*: a) mit Darstellung aller Elemente im Modell, b) Elemente ohne Materialfüllung wurden ausgeblendet

In einer Sensitivitätsstudie wurde der Einfluss der Diskretisierung an Simulationen mit Elementen mit Kantenlängen von 20 mm bzw. mit 25 mm untersucht. Nachfolgende Abbildung 9.13 stellt die Ergebnisse zur Porenzahl an Knoten entlang einer horizontalen Schnittlinie 10 cm unter Probenoberkante gemäß Abbildung 9.12 für zwei Versuchszeitpunkte gegenüber.

Die Ergebnisse in Abbildung 9.13 weisen mittig unterhalb des Lastbügels ( $x = 0$  mm) leichte Unterschiede zwischen den beiden Simulationen auf. Demnach werden die Verdichtungseffekte bei der Simulation mit den größeren Elementen mit Kantenlänge von 25 mm leicht unterschätzt. Für die Knoten in größerem Abstand zur Probenmitte weisen beide Simulationen hingegen nahezu identische Ergebnisse auf und deuten somit auf einen geringen Einfluss der Elementgröße. Auf ergänzende Sensitivitätsstudien bspw. an Modellen

mit deutlicheren Unterschieden bei den Elementgrößen sowie auf eine Bewertung von Kraft-Verschiebungsdiagrammen wurde im Rahmen der eigenen Arbeiten verzichtet.

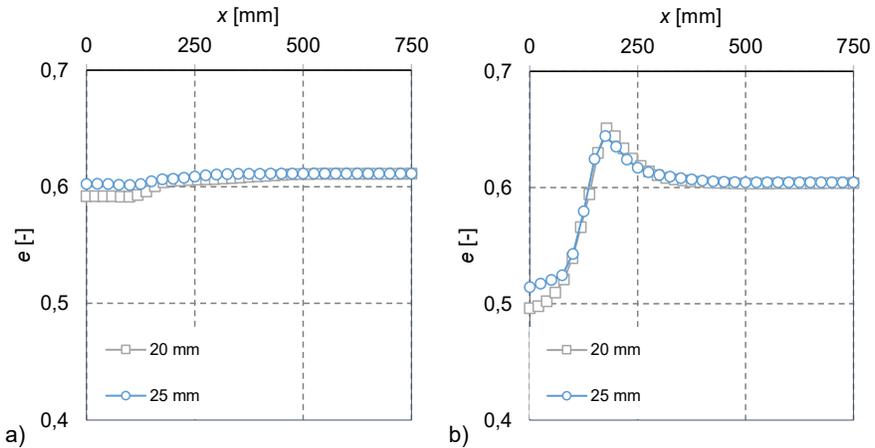


Abbildung 9.13 Ergebnisdarstellung der Porenzahl  $e$  entlang einer horizontalen Schnittlinie 10 cm unter Probenoberkante für die Simulation von Versuch EDZ\_300R ( $e_0=0,61$ ) mit Elementen mit Kantenlängen von 20 mm bzw. mit 25 mm: a) Setzung des Lastbügels von 20 mm und b) Setzung des Lastbügels von 50 mm

Nachfolgende Abbildungen zeigen Ergebnisplots der Simulationen des Versuchs EDZ\_300R bei einer Setzung der Lasteinheit von 15 mm. Dargestellt werden die richtungsabhängigen Geschwindigkeiten  $v_x$  und  $v_z$  sowie die Porenzahl  $e$ .

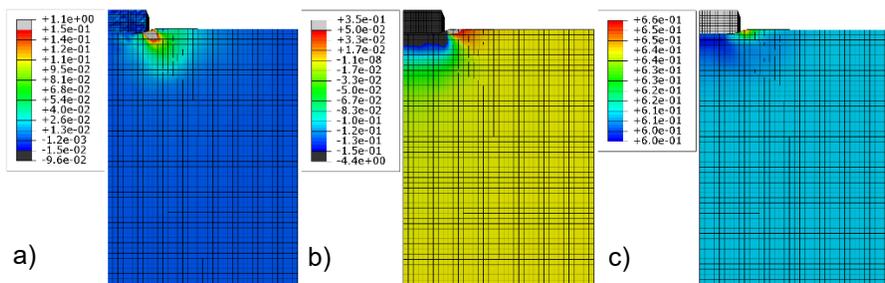


Abbildung 9.14 Ergebnisplots für die Simulation von Versuch EDZ\_300R ( $e_0=0,61$ ) bei einer Setzung des Lasteinheit von 15 mm: (a) Geschwindigkeit  $v_x$  [m/s], b) Geschwindigkeit  $v_z$  [m/s] und c) Porenzahl  $e$

Die Ergebnisse der Simulationen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Darstellungen der richtungsbezogenen Geschwindigkeiten verdeutlichen ein typisches Verformungsverhalten des Bodens mit Ausbildung der 3 Zonen nach Prandtl [PRA20]. Unterhalb des Lastbügels erfolgen in einem halbrunden Bodenbereich nahezu nur Setzungen (Zone 1). Seitlich unterhalb des Lastbügels zeigen sich Bewegungen seitlich (Zone 2) und auch Bewegungen nach oben (Zone 3).
- Anhand der Darstellung der Porenzahl  $e$  ist zu erkennen, dass die Setzung des Lastbügels zur Verdichtung unterhalb des Setzungskraters führt. Seitlich des Setzungskraters zeigt sich ein differenziertes Bild. Während der Bodenbereich unterhalb der Scherzone leicht verdichtet wird, kommt es oberhalb der Scherzone zur Auflockerung des Bodens mit Vergrößerung der Porenzahlen.

## 9.5 Simulation der Fallgewichtsversuche

### 9.5.1 Fallgewichtsversuche im ebenen Verformungszustand

Der Aufbau des numerischen Modells vom Versuchsstand-M für die Fallgewichtsversuche entspricht dem Aufbau für die Streifenfundamentversuche in Kap. 9.4.3. Die Geschwindigkeit des Fallgewichtes beim Aufprall wird entsprechend der Fallhöhe des Experimentes beim freien Fall an den Knoten nach Gl. 7.1 vorgegeben. Simuliert werden jeweils die ersten drei Impulse.

Tabelle 9.5 gibt einen Überblick zu den simulierten Fallgewichtsversuchen am Versuchsstand-M.

Tabelle 9.5: Übersicht zu Bezeichnung und Anfangszustand der simulierten Fallgewichtsversuche am Versuchsstand-M

Name (intern)	$e_0$ [-]	$I_{D,0}$ [%]
m47_90-h0_34-D300R	0,61	52
m47_90-h0_34-D300R_L	0,69	22

Abbildung 9.15 zeigt 3D-Ansichten des verwendeten numerischen Modells zur Simulation von Fallgewichtsversuchen im ebenen Verformungszustand am Versuchsstand-M.

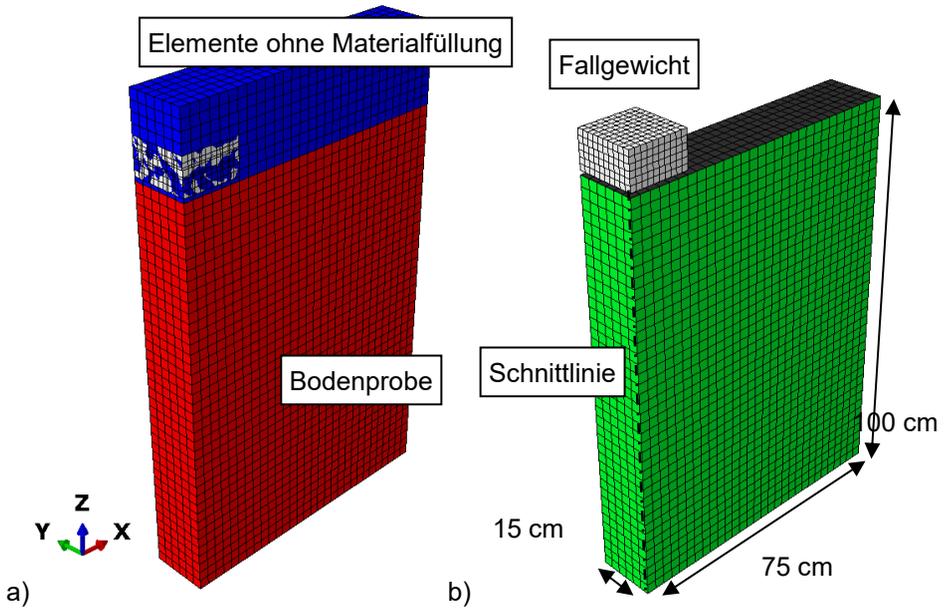


Abbildung 9.15 3D-Ansicht des verwendeten numerischen Modells der Versuche m47\_90-h0\_34-D300R und m47\_90-h0\_34-D300R\_L mit der *CEL* Methode in *Abaqus/Explicit*: a) mit Darstellung aller Elemente im Modell, b) Elemente ohne Materialfüllung wurden ausgeblendet

Nachfolgende Abbildungen zeigen Ergebnisplots der Simulationen der Versuche m47\_90-h0\_34-D300R und m47\_90-h0\_34-D300R\_L nach dem ersten, zweiten und dritten Impuls. Dargestellt werden jeweils die Porenzahl  $e$ . Zusätzlich werden die Ergebnisse für die Porenzahl  $e$  entlang eines vertikalen Schnittes unterhalb des Fallgewichtes dargestellt. Die Lage der Schnittlinie ist in Abbildung 9.15b) gekennzeichnet.

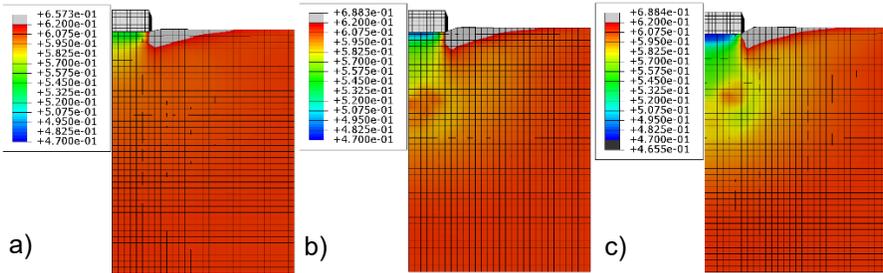


Abbildung 9.16 Ergebnisplots der Porenzahl  $e$  für die Simulation von Versuch m47\_90-h0\_34-D300R ( $e_0=0,61$ ): a) 1. Impuls, b) 2. Impuls und c) 3. Impuls

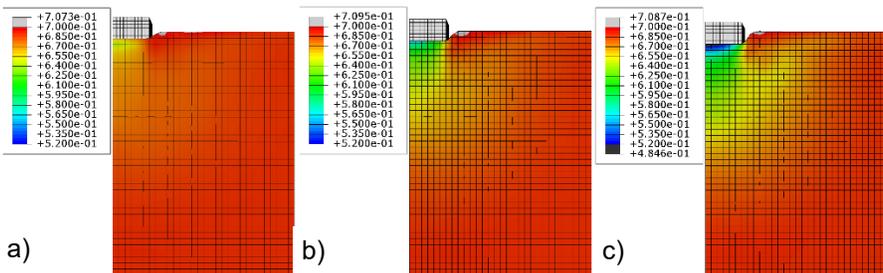


Abbildung 9.17 Ergebnisplots der Porenzahl  $e$  für die Simulation von Versuch m47\_90-h0\_34-D300R\_L ( $e_0=0,69$ ): a) 1. Impuls, b) 2. Impuls und c) 3. Impuls

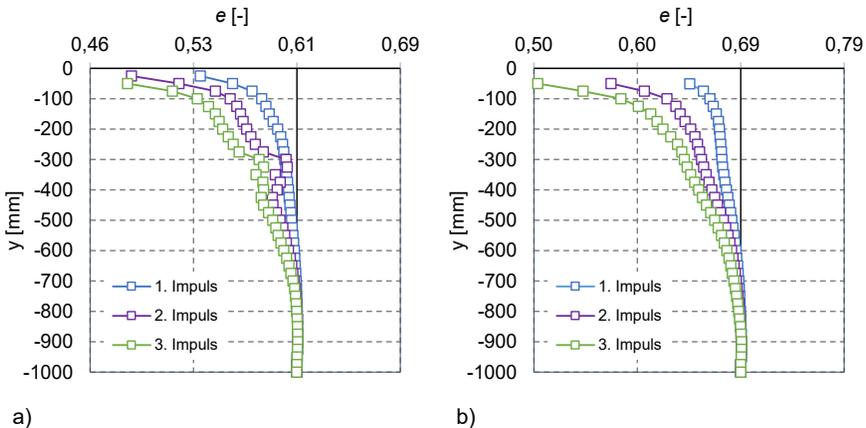


Abbildung 9.18 Ergebnisdarstellung der Porenzahl  $e$  entlang der Schnittlinie mittig unter dem Verdichtungskrater nach dem 1., 2. und 3. Impuls: a) für die Simulation von Versuch m47\_90-h0\_34-D300R ( $e_0=0,61$ ) und b) für die Simulation von Versuch m47\_90-h0\_34-D300R\_L ( $e_0=0,69$ )

Die Ergebnisse der Simulationen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Ergebnisplots der Porenzahl  $e$  zeigen für beide Versuche eine deutliche Verdichtungswirkung unterhalb des Setzungskraters. Mit zunehmender Anzahl von Impulsen nimmt dabei sowohl das Ausmaß des verdichteten Bereiches als auch die Intensität der Verdichtung zu. Abbildung 9.16 zeigt, dass es seitlich des Verdichtungskraters im Versuch m47\_90-h0\_34-D300R ( $e_0=0,61$ ) auch zu Auflockerung eines oberflächennahen Bodenbereiches bereits nach dem 1. Impuls kommt. Die Abmessungen dieses aufgelockerten Bereiches bleiben auch bei den weiteren Impulsen nahezu unverändert.
- Die Darstellung der Porenzahlen  $e$  entlang der Schnittlinie weisen ebenfalls eine Zunahme der Verdichtungswirkung mit zunehmender Anzahl der Impulse aus. In beiden Versuchen zeigt sich die maximale Verdichtungswirkung direkt unterhalb des Verdichtungskraters. Über die Tiefe nimmt die Verdichtungswirkung in beiden Versuchen ab. Eine Verringerung der Porenzahl um mind. 10 % ergibt sich im Versuch m47\_90-h0\_34-D300R ( $e_0=0,61$ ) bis in eine Tiefe von 260 mm nach dem 1. Impuls, bis 510 mm nach dem 2. und bis 585 mm nach dem 3. Impuls. Im Versuch m47\_90-h0\_34-D300R\_L ( $e_0=0,69$ ) ergibt sich eine Verringerung der Porenzahl um 10 % bis in eine Tiefe von 460 mm nach dem 1. Impuls, bis 560 mm nach dem 2. und bis 635 mm nach dem 3. Impuls.

## 9.5.2 Fallgewichtsversuche als Halbmodell

Der Aufbau des numerischen Modells vom Versuchsstand-M für einen Fallgewichtsversuch ähnelt dem Aufbau für Fallgewichtsversuche im ebenen Verformungszustand in Kap. 9.5.1. Angepasst wurden die Geometrie von Bodenkörper und Fallgewicht. Simuliert werden die ersten drei Impulse des Versuches m48\_10-h0\_34-D435 mit  $e_0 = 0,61$  bzw.  $I_{D,0} = 0,5$ . Abbildung 9.19 zeigt 3D-Ansichten des verwendeten numerischen Modells.

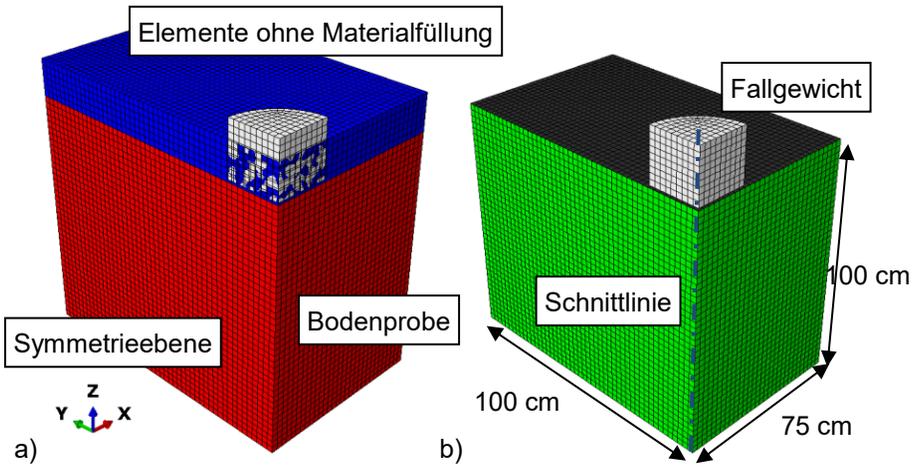


Abbildung 9.19 3D-Ansicht des verwendeten numerischen Modells zur Simulation vom Versuch m48\_10-h0\_34-D435 mit der *CEL* Methode in *Abaqus/Explicit*: a) mit Darstellung aller Elemente im Modell, b) Elemente ohne Materialfüllung wurden ausgeblendet

Nachfolgende Abbildungen zeigen Ergebnisplots der Simulationen des Versuches m48\_10-h0\_34-D435 nach dem ersten, zweiten und dritten Impuls. Dargestellt werden jeweils die Porenzahl  $e$ .

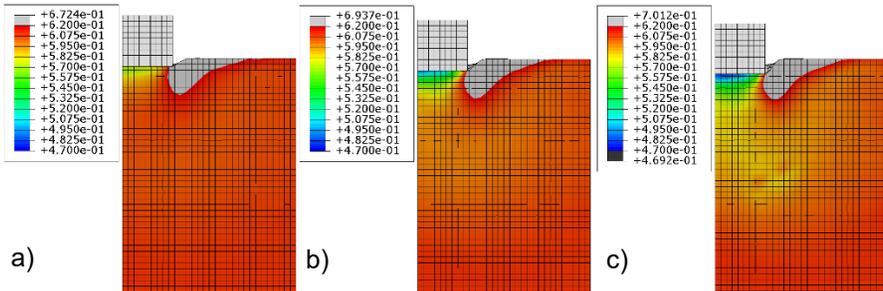


Abbildung 9.20 Ergebnisplots der Porenzahl  $e$  für die Simulation von Versuch m48\_10-h0\_34-D435 ( $e_0=0,61$ ): a) 1. Impuls, b) 2. Impuls und c) 3. Impuls

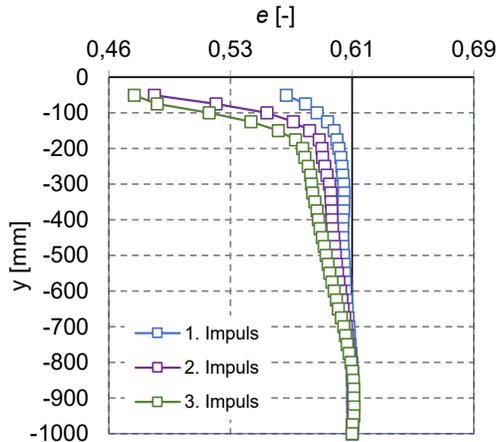


Abbildung 9.21 Ergebnisdarstellung der Porenzahl  $e$  entlang der Schnittlinie mittig unter dem Verdichtungskrater nach dem 1., 2. und 3. Impuls für die Simulation von Versuch m48\_10-h0\_34-D435 ( $e_0=0,61$ )

Die Ergebnisse der Simulationen können wie folgt zusammengefasst werden:

- Die Ergebnisplots der Porenzahl  $e$  belegen eine deutliche Verdichtungswirkung unterhalb des Setzungskraters. Mit zunehmender Anzahl von Impulsen vergrößern sich die Abmessungen des verdichteten Bereiches in die Tiefe. Sehr deutlich zeigen sich nach allen Impulsen auch Auflockerungen direkt seitlich des Verdichtungskraters.
- Die Darstellung der Porenzahlen  $e$  entlang der Schnittlinie belegen eine erfolgreiche Verdichtungswirkung mit zunehmender Anzahl der Impulse. Die Verdichtungswirkung ist direkt unterhalb des Verdichtungskraters maximal und nimmt über die Tiefe ab. Eine Verringerung der Porenzahl um mind. 10 % zeigt sich bis in eine Tiefe von 165 mm nach dem 1. Impuls, bis 510 mm nach dem 2. und bis 615 mm nach dem 3. Impuls.

Nachfolgende Abbildung 9.22 stellt für den Versuch m48\_10-h0\_34-D435 die Ergebnisse aus der Simulation und dem Experiment gegenüber. In beiden Fällen werden die Ergebnisse entlang einer Schnittlinie mittig unter dem Verdichtungskrater genutzt. Für den Vergleich werden die Simulationsergebnisse der Porenzahl  $e$  nach Gl. 9.2 in eine volumetrische Dehnung  $\varepsilon_{\text{vol}}$  umgerechnet.

$$\varepsilon_{vol} = -\ln\left(\frac{1+e}{1+e_0}\right) \quad (9.2)$$

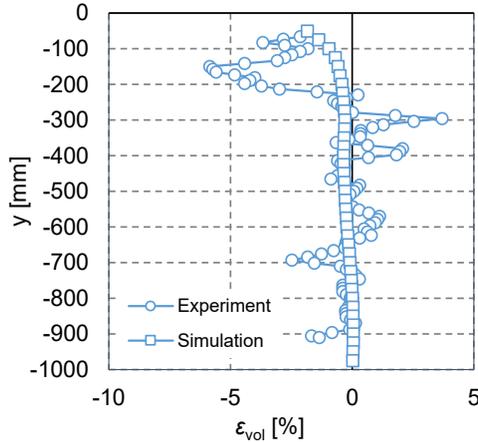


Abbildung 9.22 Ergebnisdarstellung der volumetrischen Dehnung  $\varepsilon_{vol}$  entlang der Schnittlinie mittig unter dem Verdichtungskrater nach dem 1. Impuls vom Versuch m48\_10-h0\_34-D435 ( $e_0=0,61$ )

Die Darstellung der volumetrischen Dehnung entlang der Schnittlinie weist für Simulation und Experiment eine maximale Verdichtungswirkung in den oberen 250 mm (ca.  $0,5 r_{\text{Fallgewicht}}$ ) aus. Die Ergebnisse in diesem Tiefenbereich liegen in der Simulation zwischen - 2,6 % und - 0,4 % (i.M. - 1,0 %) und im Experiment zwischen - 5,7 % und 0,2 % (i.M. - 3,1 %). Im Mittel werden über die gesamte Probenhöhe volumetrische Dehnungen  $\varepsilon_{vol}$  von -0,4 % in der Simulation und -0,7 % im Experiment ausgewiesen. Ein Vergleich zur Tiefenwirkung zwischen Simulation und Experiment ist aufgrund des un stetigen Messwertverlaufes beim Experiment nur bedingt möglich.

## 9.6 Kinematik

In diesem Kapitel wird auf einzelne Aspekte der Kinematik bzw. der Ausbreitung von Wellenfronten durch Aufprallvorgänge eines Fallgewichtes eingegangen. Diese Betrachtung erfolgt exemplarisch an der Simulation von Versuch m48\_10-h0\_34-D435. Die Qualität und Stabilität einer Simulation bo-

dendynamischer Vorgänge mit der Finite-Elemente-Methode wird grundsätzlich stark durch die räumliche und zeitliche Diskretisierung sowie durch die Dämpfung beeinflusst. Die zeitliche Diskretisierung hat Einfluss auf die Stabilität einer Berechnung. In *Abaqus Explicit* wird jedes Problem als Wellenausbreitungsproblem gelöst. Das Zeitinkrement eines Berechnungsschrittes muss dabei stets kleiner als das stabile Zeitinkrement  $\Delta t$  nach Gl. 9.3 sein.

$$\Delta t = L_e / c_d \quad (9.3)$$

mit

$L_e$ : kleinste Abmessung eines Einzelelementes       $c_d$ : maximale Wellengeschwindigkeit

*Abaqus Explicit* überprüft dieses Kriteriums vor und während der Simulation und bietet eine automatisierte Anpassung des aktuellen Zeitinkrements an. Bei der Simulation von Wellenausbreitungen im Boden sollte der Zeitschritt so gewählt werden, dass die Welle innerhalb eines Berechnungsschrittes nicht mehr als ein Element überqueren kann. In der Simulation von Versuch m48\_10-h0\_34-D435 beträgt das Anfangszeitinkrement  $\Delta t = 3,8 \cdot 10^{-5}$  s und variiert in der weiteren Berechnung nur geringfügig. Die Kantenlänge der quadratischen Bodenelemente beträgt 0,025 m. Somit wird das Kriterium für Wellen mit Geschwindigkeiten bis ca. 650 m/s erfüllt.

Einflüsse der räumlichen Diskretisierung zeigen sich meist in der Filterung hochfrequenter Wellen, in dem Entstehen von Nebenschwingungen sowie in einer Streuung bzw. Dispersion der Wellengeschwindigkeiten. Für präzise Betrachtungen zur Ausbreitung dynamischer Wellen sind daher umfangreiche Sensitivitätsstudien z.B. wie nach Zerwer [ZER02] zu empfehlen. In den eigenen Arbeiten wurden bewusst eine sehr einfache Geometrie und einheitliche nahezu quadratische Elemente verwendet, um Einflüsse aus einer räumlichen Diskretisierung zu minimieren.

Reflektionen von Wellenfronten an Modellrändern sind in der FEM kaum zu vermeiden. In Simulationen mit der CEL-Methode in *Abaqus* lassen sich ungewollte Reflektionen am Modellrand durch die Wahl der *Outflow* Bedingun-

gen minimieren. In den eigenen Simulationen wurde die Variante *Nonreflecting* für die *Outflow* Bedingungen an den Elementen an den Seiten und der Unterseite des Modells gewählt.

Abbildung 9.23 zeigt Ergebnisplots der Beschleunigung zu 3 Zeitpunkten kurz nach dem Aufprallvorgang des 1. Impulses. Über die gewählte Darstellung von kleinen Beschleunigungsbeträgen bis  $0,1 \text{ m/s}^2$  bzw. auch bis  $1 \text{ m/s}^2$  lässt sich die Ausbreitung einer Kompressionswelle sehr gut veranschaulichen. An den Modellen wurde 3 Knoten hervorgehoben, die den Positionen von Beschleunigungssensoren im Experiment entsprechen (Position unter Probenoberfläche: 250 mm, 625 mm, 1000 mm).

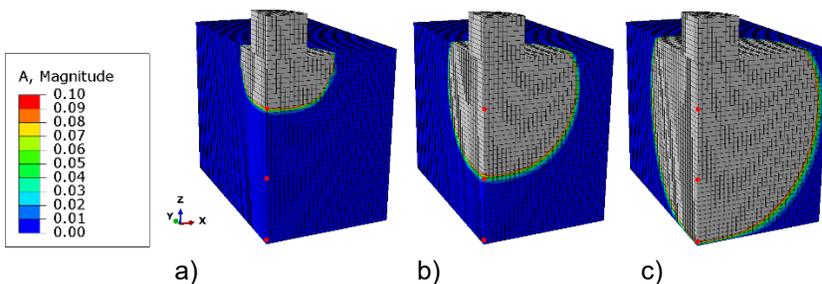


Abbildung 9.23 Ergebnisplots der vertikalen Beschleunigung der Simulation von Versuch m48\_10-h0\_34-D435 zu 3 Zeitpunkten kurz nach dem Aufprallvorgang des 1. Impulses: a) 250 mm, b) 625 mm und c) 1.000 mm

Die Darstellung zeigt, dass für die Ausbreitung einer ersten Kompressionswelle mögliche Reflektionen keine besondere Bedeutung haben. Die nachfolgende Betrachtung zur Ausbreitung endet mit dem Erreichen des unteren Modellrandes durch die Kompressionswelle. Die Ausbreitgeschwindigkeiten dieser Wellenfront liegen beim ersten Impuls bei  $150 \text{ m/s}$  im oberen Bereich und  $165 \text{ m/s}$  im unteren Bereich der Probe. Eine Auswertung des Beschleunigungssignals an den 3 ausgewählten Knoten lässt prinzipiell auch Vergleiche maximaler Beschleunigungsbeträge zu. Abbildung 9.24 stellt die Ergebnisse der Ausbreitgeschwindigkeiten der ersten Kompressionswelle jeweils beim 1., 2. und 3. Impuls dar. Zudem wurden die Beschleunigungssignale in den 3 Tiefenbereichen auf ein Maximum untersucht. In Abbildung 9.24 sind die Ergebnisse des Maximalbetrages der vertikalen Beschleunigung nach dem 1., 2. und 3. Impuls am Knoten in der Tiefenlage 250 mm veranschaulicht.

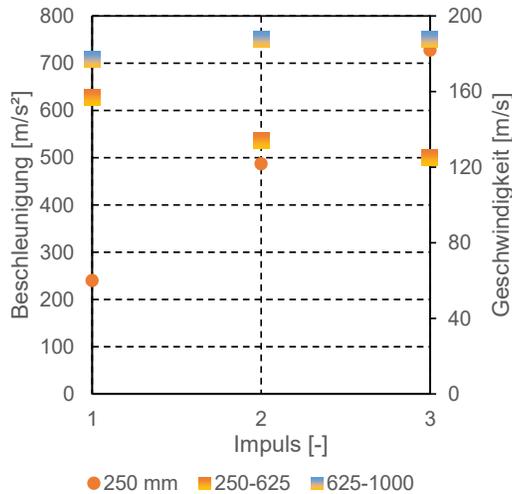


Abbildung 9.24 Ergebnisse der Simulation von Versuch m48\_10-h0\_34-D435 nach dem 1., 2. und 3. Impuls mit Darstellung der Extremwerte der vertikalen Beschleunigung 250 mm unter Probenoberkante sowie Darstellung der Geschwindigkeiten der Wellenausbreitung jeweils zwischen 2 Tiefenlagen

Abbildung 9.24 zeigt, dass sich die Wellengeschwindigkeiten im unteren Bereich wenig verändern. Gegenüber 165 m/s im ersten Impuls, treten beim 2. und 3. Impuls Wellengeschwindigkeiten von 187 m/s auf. Im oberen Bereich ist mit Zunahme der Impulse ein leichter Rückgang der Wellengeschwindigkeiten von 156 m/s beim ersten Impuls bis auf 125 m/s beim dritten Impuls erkennbar. Gegenüber dem Experiment wurden somit vergleichbare Geschwindigkeiten beim 1. Impuls festgestellt (s. Abbildung 7.25b). Die im Experiment festgestellte deutliche Erhöhung der Ausbreitungsgeschwindigkeit mit Zunahme der Impulse zeigt sich in der Simulation nicht. Grund hierfür kann die bei der Auswertung am Experiment getroffene Vereinfachung eines konstanten Abstandes zwischen den Sensorpaaren über die Versuchsabfolge sein.

Die Ergebnisse der Maximalbeschleunigungen zeigen, dass die Extremwertbeträge am Knoten 250 mm unter Gelände mit jedem Impuls deutlich zunehmen. Die maximalen Beschleunigungen sind von 240 m/s<sup>2</sup> nach dem 1. Impuls auf bis zu 728 m/s<sup>2</sup> nach dem 3. Impuls angestiegen.

Einflüsse aus der räumlichen Diskretisierung aus der Feinheit des FE-Netzes können in dieser Studie nicht ausgeschlossen werden. Hinweise auf diese Ein-

flüsse zeigen sich am wenig harmonischen Ausschwingverhalten an den betrachteten Knoten nach einem Wellendurchgang. Für eine zuverlässige Bewertung der Simulationen sollten Sensitivitätsstudien u.a. zum Einfluss der Netzfeinheit erfolgen. Es wird darauf hingewiesen, dass eine Erfassung der Extremwerte der Beschleunigungen an einem Punkt nicht immer ein eindeutig möglich ist. Eindeutiger lässt sich das Eintreffen einer Welle durch Überschreiten geringer Grenzwerte wie z.B. einer vertikalen Beschleunigung von  $1 \text{ m/s}^2$  lokalisieren. Sehr hilfreich zeigen sich in diesem Zusammenhang Möglichkeiten einer Visualisierung über flächige Ergebnisplots wie in Abbildung 9.23.

## 9.7 Zusammenfassung

Das Setzungsverhalten der Lasteinheit des Kompressionsversuches UC\_003 kann in den gewählten Konfigurationen der Simulationen näherungsweise beschrieben werden. Für eine exakte Beschreibung erscheint eine Berücksichtigung von Verformungen der Acrylglasplatte, eine geeignete Beschreibung der Reibung zwischen Sandprobe und Behälterwandungen sowie auch eine Simulation des Einrieselvorgangs.

Die Simulationen der Grundbruchversuche mit der *CEL* Methode weisen typische Versagensformen nach Prandtl [PRA20] auf. So zeigt sich in allen Simulation deutlich ein dreieckförmiger Bodenkeil unterhalb der Lasteinleitung. Seitlich der Lasteinleitung treten horizontale Verschiebungen und in Abhängigkeit der Anfangsporenzahl  $e_0$  auch Hebungen auf. An Darstellungen der Porenzahl  $e$  lassen sich zudem plausibel Scherbereiche erkennen.

Die Simulationen der Fallgewichtsversuche lassen sich ebenfalls mit der *CEL* Methode und Verwendung der Hypoplastizität simulieren. Die Ergebnisse zur Porenzahl  $e$  deuten auf ein plausibles Verformungsverhalten mit Auflockerung seitlich des Verdichtungskraters und Verdichtung unterhalb des Fallgewichtes hin. Ein Vergleich für Fallgewichtsversuche im ebenen Verformungszustand weist größere Wirtktiefen für den Versuch mit größerer Anfangsporenzahl  $e_0$  aus. Dies entspricht auch den gesammelten Feldergebnissen nach Slocombe [SLO93].

Die Simulation eines Fallgewichtsversuches im Halbmodell zeigt für die Verdichtungswirkung unterhalb des Setzungskraters große Ähnlichkeit zum Ver-

such im ebenen Verformungszustand. Unterschiede zeigen sich v.a. im Bodenverhalten seitlich des Verdichtungskaters. Für diesen Bereich wird in der Simulation im ebenen Verformungszustand eine größere Beeinflussung ausgewiesen. Dies entspricht auch den experimentellen Ergebnissen. Eine Validierung der Verdichtungswirkung über die volumetrische Dehnung scheint prinzipiell möglich. Der sehr un stetige Verlauf der experimentellen Ergebnisse lässt für den betrachteten Versuch jedoch keine präzise Bewertung zu. An den Simulationsergebnissen lassen sich ebenfalls Betrachtungen zur Ausbreitung von Wellenfronten durchführen. Ein erster Vergleich zeigt eine gute Übereinstimmung der experimentellen Daten für den 1. Impuls. Die Entwicklung der Geschwindigkeit der Wellenfronten sowie der Betrag des Extremwertes der Beschleunigung bei weiteren Impulsen zeigen teilweise deutliche Unterschiede zum Experiment. Es wird davon ausgegangen, dass eine höhere Netzfeinheit für ein korrekteres kinematisches Verhalten der Simulation erforderlich ist. Auf eine nachträgliche Anpassung der Simulation wurde im Rahmen dieser Arbeit verzichtet.

# 10 Zusammenfassung

## Zielstellung und Methodik

Für eine quantitative Validierung von Simulationen sowie die Ableitung von Zusammenhängen zur Wirkweise von geotechnischen Verfahren werden hochwertige experimentelle Daten benötigt. In der eigenen Arbeit werden 1g-Modellversuche vorgestellt, die eine direkte Beobachtung und Messung des Verformungsverhaltens von sandigem Boden während einer statischen oder dynamischen Belastung ermöglichen. Ziel der Versuche ist es, eine Verdichtungswirkung in hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung messtechnisch zu erfassen und somit qualitative und quantitative Möglichkeiten für numerische Nachrechnungen zu bieten. Die messtechnische Erfassung des Bodenverhaltens erfolgt an Versuchsständen mit Sichtebenen durch die DIC-Methode (*Digital Image Correlation*). Ein wichtiger Teil der Arbeiten ist in diesem Zusammenhang die Prüfung und Kalibrierung der DIC-Methode an eigenen Versuchen mit statischer Auflast.

Für Betrachtungen zur Fallgewichtsverdichtung wird die DIC-Methode an Aufnahmen einer Hochgeschwindigkeitskamera eingesetzt. Neben der DIC-Methode kommen in einzelnen Versuchen ergänzende Messverfahren wie Beschleunigungssensoren zum Einsatz. Diese werden zur Erfassung von Wellenfronten verwendet und erweitern die Möglichkeiten einer Validierung von Simulationen.

Folgende Versuchsstände wurden eingesetzt:

- Der Versuchsstand-C (*calibration*) wurde für die Prüfung bzw. Kalibrierung der DIC-Methode unter definierten Randbedingungen entwickelt. Geprüft wurden DIC-Ergebnisse zu richtungsbezogenen Verschiebungen und Dehnungen sowie Möglichkeiten zur rechnerischen Ermittlung der volumetrischen Dehnung und der maximalen Scherdehnung. Darüber hinaus wurden Einflüsse auf DIC-Ergebnisse durch unterschiedliche DIC-Konfigurationen sowie durch die Sichtebene untersucht.

- Der Versuchsstand-M (*middle*) ist der größte verwendete Versuchsstand mit einem Sichtfeld von  $1 \text{ m}^2$ . Ein Probevolumen von max.  $1,5 \text{ m}^3$  wird je Versuch über Rieselfverfahren definiert eingebaut. Die Probenhomogenität wird stichprobenartig mit einer *Panda*-Sonde kontrolliert. Der Versuchsstand wird zur Erfassung von Bodenverformungen an statischen Grundbruchkonfigurationen sowie an Fallgewichtsversuchen eingesetzt. Am Versuchsstand-M werden Merkmale von Versuchen im ebenen Verformungszustand und von Halbmodellversuchen gegenübergestellt.
- Als Teil einer Studie zur Fallgewichtsverdichtung an Halbmodellen kommt ein Versuchsstand-S (*small*) mit einem Sichtfeld von  $0,5 \text{ m}^2$  und einem Probevolumen von  $0,2 \text{ m}^3$  zum Einsatz.

Neben den methodischen Untersuchungen wird eine umfangreiche Studie zu unterschiedlichen Fallgewichtskonfigurationen an den Versuchsständen-S und -M durchgeführt. Ziel der Studie ist es, Zusammenhänge zwischen Steuergrößen und einer Einflusstiefe des Verfahrens zu analysieren.

In numerischen Nachrechnungen der Kompressionsversuche am Versuchsstand-C mit *Abaqus/Standard* werden das Setzungsverhalten sowie Bodenverformungen betrachtet. Untersucht werden u.a. Einflüsse von einer Simulation des Einbauvorganges, von Wandreibungen sowie von Verformungen des Acrylglases. Mit der *CEL* Methode werden an einfachen Modellen in *Abaqus/Explicit* ausgewählte Grundbruchversuche und Fallgewichtsversuche mit Fokus auf das Verformungsverhalten simuliert.

#### Allgemeine Erkenntnisse aus den Versuchen

Für eine Validierung numerischer Berechnungen müssen wesentliche Randbedingungen eines Versuches im Anfangszustand bekannt sein und relevante Bereiche messtechnisch überwacht werden. Für die eigenen Untersuchungen von Bodenverformungen mit der DIC-Methode wird dabei idealisiert von einer Beschreibung des Probeninneren unterhalb der Lasteinleitung ausgegangen. Dies stellt besondere Anforderungen an den experimentellen Aufbau sowie an Kamera- und Beleuchtungstechnologie. Störende Einflüsse können sich vor allem aus ungewollten Verformungen der Sichtebeine sowie optischen Effekten durch die Sichtebeine ergeben.

Die DIC-Methode ist in der Lage, eine sehr hohe Anzahl von messbaren Punkten (Patches) in einer Sichtebene zu erfassen und zu verfolgen. Da auf störende Einflüsse durch Messeinbauten verzichtet wird, ist die Methode grundsätzlich zur quantitativen Validierung numerischer Nachrechnungen geeignet.

Besonderheiten zeigen sich bei der Ermittlung von Dehnungen am granularen Versuchsmaterial. Eine Verwendung der DIC-Methode ist möglich und zeigt an statischen Versuchen zur Kompression plausible Ergebnisse. Bei komplexerem Verformungsverhalten mit lokalen Scherungen wird die Auswertung und Interpretation durch sehr un stetige Messwertverläufe deutlich erschwert. Methoden zur Glättung sind nur bedingt geeignet.

Vergleiche zwischen Versuchen in ebenem Verformungszustand und als Halbmodell weisen große Ähnlichkeiten im Verformungsverhalten auf. Unterschiede zeigen sich erwartungsgemäß für Verformungen seitlich der Lasteinleitung. In Versuchen im ebenen Verformungszustand sind seitliche Scherzonen stärker und weitreichender ausgeprägt als im Halbmodell.

Eine Erfassung des Verformungsverhaltens bei der Fallgewichtsverdichtung ist mit der DIC-Methode durch Verwendung einer Hochgeschwindigkeitskamera bei entsprechender Ausleuchtung sehr gut möglich. Neben einer Erfassung bleibender Verformungen kann eine Ausbreitung von Wellenfronten mit der DIC-Methode verfolgt und durch Messungen mit Beschleunigungssensoren im Boden bestätigt werden.

In allen Versuchen wurden Verformungen der Sichtebene gemessen. Für die Versuchsdurchführung sind diese Verformungen unproblematisch, müssen aber streng genommen auch in numerischen Nachrechnungen berücksichtigt werden.

#### Erkenntnisse zur Fallgewichtsverdichtung

Das Verformungsverhalten des Bodens weist bei Fallgewichtsversuchen große Ähnlichkeiten zu Grundbruchversuchen auf. In beiden Lastmodellen deuten die Messergebnisse auf erfolgreiche Verdichtungsarbeit im Umfeld der Lasteinleitung. Unterschiede zeigen sich in einem seitlichen Verdrängen am Rand und neben der Lasteinleitung. Dies ist im statischen Versuch stärker ausgeprägt. In Fallgewichtsversuchen sind vertikale Dehnungen in größeren Tiefen deutlicher nachweisbar. Hingegen treten im Vergleich weniger horizontale Verformungen auf.

DIC-Ergebnisse zu Verschiebungen  $u_y$  und volumetrischer Dehnungen  $\varepsilon_{vol}$  lassen sich im Hinblick auf Einfluss- bzw. Wirtktiefen sehr gut entlang von vertikalen Pfaden bewerten. Dabei lassen Messergebnisse für den Fallgewichtsversuch am Halbmodell auf Zusammenhänge beider Ergebnisgrößen schließen.

Ergebnisse einer Studie zur Fallgewichtsverdichtung zeigen Zusammenhänge zwischen Steuergrößen der Fallgewichtsverdichtung auf eine Einflusstiefe auf. Die Studie verdeutlicht, dass die in der Baupraxis verbreitete Größe der Fallenergie  $E$  nur begrenzt für eine Klassifizierung von Fallgewichtskonfigurationen geeignet ist. Ein Grund ist, dass bei einer Verwendung einer Kabelführung oder von Führungsschienen der Fallvorgang in Abhängigkeit der Masse des Fallgewichtes unterschiedlich stark abgebremst wird. Darüber hinaus hat sich gezeigt, dass sich trotz gleicher Fallenergie bei Variation von Masse des Fallgewichtes und der Fallhöhe sehr unterschiedliche Einflusstiefen einstellen. Grundsätzlich wird empfohlen, die Geschwindigkeit beim Aufprall neben der Masse eines Fallgewichtes für eine Vordimensionierung oder eine Klassifizierung von Verdichterverfahren zu verwenden. Werden in einem Verfahren wie bei den Versuchen am Versuchsstand-M Freifallbedingungen nachgewiesen, lässt sich auch die Fallhöhe als Steuergröße berücksichtigen.

Durch eine Anpassung der Geometrie der Fallgewichtsunterseite wurden keine Vorteile im Hinblick auf eine Verbesserung der Verdichtungswirkung im Versuchssand nachgewiesen. Vergleiche unterschiedlicher Abfolgen von Impulsen nebeneinander deuten am größeren Versuchsstand-M darauf hin, dass eine Arbeit mit mehreren Wiederholungen an einer Position und anschließendem Umsetzen zu ähnlichen Gesamtwirtktiefen führt, wie eine Arbeit mit Umsetzen nach jedem einzelnen Impuls. Die Variante mit Umsetzen nach jedem Impuls wurde fahrenden oder schreitenden Verdichterverfahren nachempfunden und war besser geeignet, eine Mindesteinwirtktiefe zuverlässig und effizient an mehreren Positionen gleichzeitig bei gleichmäßiger Verdichtung zu erreichen.

### Erkenntnisse aus den numerischen Berechnungen

Die Nachrechnung einzelner Versuche wurde mit einem Parametersatz für das verwendete hypoplastische Stoffmodell durchgeführt. Die Kalibrierung des Parametersatzes erfolgte mit Hilfe von Standardlaborversuchen und Elementversuchen.

Aus den Simulationen von Versuchen zur eindimensionalen Kompression am Versuchsstand-C in *Abaqus/Standard* lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Die Setzung der Probe konnte für die verschiedenen Laststufen näherungsweise beschrieben werden. Es konnte gezeigt werden, dass eine Berücksichtigung von Verformungen der Acrylglasscheibe, Kontakt zwischen Sandprobe und Behälterwandungen sowie auch eine Simulation des Einrieselvorgangs zur präzisen Beschreibung dieses Versuches erforderlich sind.
- Das Verformungsverhalten innerhalb der Bodenprobe konnte entlang einer vertikalen Schnittlinie erfolgreich an DIC-Ergebnissen validiert werden. Die Verschiebungsergebnisse zeigen eine sehr gute Übereinstimmung und lassen zudem Rückschlüsse auf experimentelle Einflüsse der Acrylglasscheibe auf DIC-Messungen zu. Eine Validierung an volumetrischen Dehnungen aus experimentellen Daten war nur begrenzt möglich. Ein Vergleich der mittleren vertikalen Dehnung der Probe zeigt jedoch eine gute Übereinstimmung.

Folgende wesentlichen Erkenntnisse konnten aus der Simulation von Grundbruchversuchen mit der *CEL* Methode gewonnen werden:

- Das Verformungsverhalten in den Simulationen kann über richtungsbezogene Geschwindigkeiten abgebildet werden. Es bestätigt typische Grundbruchfiguren mit Ausbildung eines Setzungskeils sowie Bodenbewegungen zur Seite und nach oben. Dieses Verformungsverhalten wurde auch durch die DIC-Ergebnisse belegt.
- Die Simulationsergebnisse der Porenzahl  $e$  deuten eine Verdichtungswirkung unterhalb des Setzungskraters an. Seitlich des Setzungskraters zeigt sich entlang einer seitlichen Scherzone ein differenziertes Bild mit einer leichten Verdichtung unterhalb und einer leichten Auflockerung oberhalb der Scherzone.

Die Simulationen der Fallgewichtsverdichtung mit *CEL*-Methode lassen sich für den ebenen Verformungszustand und den vergleichbaren Halbmodell-Versuch wie folgt interpretieren:

- Darstellungen der Porenzahlen  $e$  zeigen eine deutliche Verdichtungswirkung unterhalb des Fallgewichtes, die bei weiteren Impulsen verstärkt und in größere Tiefen erweitert wird. Dies entspricht auch den

experimentellen Ergebnissen sowie den baupraktisch bekannten Zusammenhängen.

- Das Verformungsverhalten ist den Grundbruchversuchen sehr ähnlich und lässt auf ähnliche Mechanismen schließen. Seitlich des Verdichtungskraters wird Boden aufgelockert. Die Unterschiede im Verlauf einer seitlichen Scherzone deuten hingegen auf den dynamischen Einfluss des Verfahrens. Die Scherzone verläuft im Fallgewichtsversuch deutlich steiler.
- Unterschiede zwischen den Fallgewichtsversuchen im ebenen Verformungszustand und im Halbmodell zeigen sich in der Ausdehnung der seitlichen Scherzone. Die Bereiche mit Auflockerungen im Halbmodell-Versuch sind größer ausgeprägt und bestätigen somit die Hinweise aus den DIC-Messungen. Auch hier wurden seitlich des Verdichtungskraters mehr Dehnungsanteile im Versuch im ebenen Verformungszustand festgestellt.
- Über eine Erfassung von Wellenfronten in der Simulation werden mit Ausbreitgeschwindigkeiten von 94 m/s im oberen Bereich und 125 m/s im unteren Probenbereich die experimentellen Ergebnisse bestätigt. Die Zusammenhänge für eine Änderung der Wellengeschwindigkeiten sowie Extremwerte von Beschleunigungen im Boden weisen hingegen Unterschiede zwischen Simulation und Experiment auf und deuten somit auf Grenzen der gewählten Modellvariante hin.

# 11 Ausblick

Die vorgestellte Herangehensweise zur Durchführung von Modellversuchen für eine Validierung numerischer Berechnungen und Bewertung von Verdichterverfahren am Beispiel der Fallgewichtsverdichtung wird insgesamt als sehr sinnvoll und geeignet eingeschätzt. Nach diesem Prinzip können Verdichterverfahren im Modell detailliert untersucht, bewertet und bei Bedarf optimiert werden.

Die bisherigen numerischen Berechnungen belegen eine Eignung für die Simulation des Verformungsverhaltens bei der Verdichtung mit impulsförmigem Energieeintrag. Die Validierung sollte unter weiteren Aspekten fortgeführt werden. Für zukünftige Simulationen zur Verdichtung sollten dabei in Untersuchungen an den Versuchsständen-S und -M folgende Fragestellungen berücksichtigt werden:

- Wie lässt sich das Kontaktverhalten zwischen Versuchssand und Behälterwand, Verdichter und Sichtfenster beschreiben und im numerischen Modelle abbilden? Welche messtechnischen Lösungen bieten sich an?
- Lässt sich das Verformungsverhalten von Behälterwand und Sichtfenster in dynamischen Versuchen korrekt im numerischen Modell abbilden? Welcher Einfluss ergibt sich aus diesen Verformungen?

Numerische Nachrechnung mit Berücksichtigung der genannten Fragestellungen stehen aus und sind wünschenswert für die Zukunft, um weiterführende aufschlussreiche Vergleiche numerischer und experimenteller Ergebnisse zu ermöglichen.

Als experimentelle Herausforderung wird in diesem Zusammenhang auch eine genaue Erfassung des Bewegungsverhaltens eines Verdichterverfahrens gesehen. Dies ist wichtig für eine weitere Validierung von Modellen und bspw. der Diskussion um Steuergrößen für die Einfluss- bzw. Wirtktiefen. Am Beispiel der Fallgewichtsverdichtung sollte eine konsequente Erfassung der Aufprallgeschwindigkeit z.B. über zeitlich hochauflösende Lasertriangulations-Wegsensoren unmittelbar über der Bodenoberfläche erfolgen.

Die Simulationsergebnisse zur Kinematik im Boden deuten auf die Erfordernis für ergänzende Studien mit Modellen mit höherer Netzfeinheit hin.

Die bisherige Validierung der Modelle lässt keine Grenzen aus Maßstabs- oder versuchstechnischer Sicht erkennen. Dennoch ist ein Feldversuch unter geeigneten Randbedingungen mit höherem Spannungsniveau immer wünschenswert. Ggf. sollten auch Versuche in Kalibrierzellen bzw. in Zentrifugen berücksichtigt werden.

Bei fahrenden Verdichtern oder Verfahren mit Anregung durch eine Unwucht ist von geringeren Energieeinträgen auszugehen. Dies stellt höhere Anforderung an eine messtechnische Erfassung für eine anschließende quantitative Validierung numerischer Modelle. Für weiterführende Ergebnisse zu diesen Themen wird auch auf laufende Arbeiten und Veröffentlichungen der G<sup>2</sup> Gruppe Geotechnik wie bspw. von Knut [KNU18] verwiesen.

# Literaturverzeichnis

- [ADA07] Adam, D. et al.: Heavy tamping integrated dynamic compaction control. In Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement, 2007, 11; S. 237–243.
- [AFN00] AFNOR: Ground: Investigation and testing - Measuring compaction quality. French Standards Association (AFNOR), Paris, 2000.
- [AKE05] Akel, S.: Beitrag zur Berechnung von eingespannten starren Stützkonstruktionen in kohäsionslosem Boden. Inst. für Geotechnik, 2005.
- [AUB14] Aubram, D.: An arbitrary Lagrangian-Eulerian method for penetration into sand at finite deformation. Shaker, 2014.
- [AUB15] Aubram, D.: Development and experimental validation of an arbitrary Lagrangian-Eulerian (ALE) method for soil mechanics. In geotechnik, 2015, 38; S. 193–204.
- [BAU92] Bauer, E.: Zum mechanischen Verhalten granularer Stoffe unter vorwiegend ödometrischer Beanspruchung. Graz, Tech. Univ., Diss, Karlsruhe, 1992.
- [BER01] Berry, A. D.: Development of a volumetric strain influence ground improvement prediction model with special reference to impact compaction. Master thesis, Pretoria, 2001.
- [BER17] Bergholz, K.; Herle, I.: Experimentelle Bestimmung der Nicht-linearität von Spannungsgrenzbedingungen im Bereich geringer Spannungen. In geotechnik, 2017, 40; S. 119–125.
- [BLU08] Blume, U.; Reichenbach, H.: Leichte Rammsonde mit variabler Rammenergie zur Baugrunduntersuchung und zur Verdichtungskontrolle. In Strasse und Autobahn, 2008, 59; S. 5–11.

- [CHO10] Choi, S.-K. et al.: Preparation of a Large Size Granular Specimen Using a Rainer System with a Porous Plate. In Geotechnical Testing Journal, 2010, 33; S. 101634.
- [CRE99] Cresswell, A.; Barton, M. E.; Brown, R.: Determining the Maximum Density of Sands by Pluviation. In Geotechnical Testing Journal, 1999, 22; S. 324.
- [DAN12] Dantec Dynamics: ISTRA 4D Software Manual Q-400 system, 2012.
- [DIN18124] DIN 18124: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Korndichte - Kapillarpyknometer, Weithalspyknometer, Gaspyknometer. Beuth, Berlin, 2007.
- [DIN18126] DIN 18126: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben. Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung. Beuth, Berlin, 1996.
- [DIN18135] DIN 18135: Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Eindimensionaler Kompressionsversuch. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN, Berlin, 2012.
- [DIN18137-2] DIN 18137-2: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Scherfestigkeit – Teil 2: Triaxialversuch, 2011.
- [DIN18137-3] DIN 18137-3: Baugrund, Untersuchung von Bodenproben Bestimmung der Scherfestigkeit Teil 3: Direkter Scherversuch. Normenausschuss Bauwesen (NABau) im DIN Deutsches Institut für Normung e.V., 2002.
- [DUM88] Dumas, J. C.; Beaton, N. F.: Discussion of “ Practical Problems from Surprising Soil Behavior ” by James K. Mitchell (March, 1986, Vol. 112, No. 3). In Journal of Geotechnical Engineering, 1988, 114; S. 367–368.
- [FAI97] Faisal, V.; Yee, I. K.; Varaksin, S.: Treatment of highly compressible soils: Proceedings, Conference on Recent Advances in Soft Soil Engineering, Kuching, 1997.

- [GAM85] Gambin, M.: Dix ans de consolidation dynamique: Annales de L'Institute technique du bâtiment st des travaux publics, 1985; S. 11–30.
- [GRA09] Graf, S.: Kamerakalibrierung mit radialer Verzeichnung. Die radiale essentielle Matrix. Suedwestdeutscher Verlag fuer Hochschulschriften, Saarbrücken, 2009.
- [GRA17] Grabe, J.: Workshop on Numerical Methods in Geotechnics 2017. Technische Universität Hamburg-Harburg Geotechn. u. Baubetrieb, Hamburg, 2017.
- [GUN96] Gunaratne, M. et al.: Study of pore pressures induced in laboratory dynamic consolidation. In Computers and Geotechnics, 1996, 18; S. 127–143.
- [HAJ11] Hajialilue-Bonab, M.; Azarnya-Shahgoli, H.; Sojoudi, Y.: Soil deformation pattern around laterally loaded piles. In International Journal of Physical Modelling in Geotechnics, 2011, 11; S. 116–125.
- [HAM11] Hamann, T.; Henke, S.; Grabe, J.: Numerische Modellierung der Verdichtung rolliger Böden mittels Impulsverdichter, Rütteldruckverfahren und Rüttelbohle. In (Adam, D.; Herrmann, R. Hrsg.): Baugrundverbesserung in der Geotechnik, 2011; S. 161–176.
- [JAF06] Jafarzadeh, F.: Dynamic Compaction Method in Physical Model Tests. In Scientia Iranica, 2006, Vol. 13; S. 187–192.
- [JES81] Jessberger, H. L.; Beine, R. A.: Heavy Tamping: Theoretical and Practical Aspects: Proc. 10th International Conf. Soil Mech. Found. Engineering, Stockholm, 1981.
- [KÉR93] Kérisel, J.: The history of geotechnical engineering up until 1700: Golden Jubilee Volume, San Francisco, 1993; S. 3–93.
- [KIR12] Kirstein, J.: General Report - Session 1: Vibro and Impact Compaction. ISSMGE - TC 211: International Symposium on Ground Improvement, 2012.

- [KIR16] Kirstein, J.; Grabe, J.; Chmelnizkij, A.: Numerische Berechnungen und messtechnische Begleitung zur Dynamischen Intensivverdichtung: 34. Baugrundtagung. Vorträge, 2016; 297–304.
- [KNU17] Knut, A. et al.: Modellversuche zur Eingrenzung von Verdichtungsindikatoren bei impulsartig wirkender Bodenverdichtungstechnologien: 11. Österreichische Geotechniktagung, 2017; S. 251–261.
- [KNU18] Knut, A. et al.: Measuring soil compaction on dynamic compaction technologies - Field tests and laboratory investigations using the PIV method: Anniversary Symposium – 40 Years of Roller Integrated Continuous Compaction Control (CCC), 2018.
- [KOL48a] Kolbuszewski, J. J.: An Experimental Study of the Maximum and Minimum Porosities of Sand: Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, 1948; S. 158–165.
- [KOL48b] Kolbuszewski, J. J.: General investigation of the fundamental factors controlling loose packing of sands: Proceedings of the Second International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Rotterdam, 1948; S. 47–79.
- [KOP10] Kopf, F.; Paulmichl, I.; Adam, D.: Modelling and Simulation of Heavy Tamping Dynamic Response of the Ground: From Research to Design in European Pract, Bratislava, 2010.
- [LAM73] Lambe, T. W.: Predictions in soil engineering. In *Géotechnique*, 1973, 23; S. 151–202.
- [LEO80] Leonards, G. A.; Cutter, W. A.; Holtz, R. D.: Dynamic Compaction of Granular Soils: Journal of the Geotechnical Engineering Division. Proc. Paper 15144, 1980; S. 35–44.
- [LIC17] Lichtenberger, R.: Theorie und Anwendungsbeispiele DIC: Q400 – Ortsaufgelöste Deformationsanalyse mittels Digitaler Bildkorrelation (DIC). 20.09.2017, Halle, 2017.
- [LIU92] Liu, C.-h.; Nagel, S. R.: Sound in sand. In *Physical Review Letters*, 1992, 68; S. 2301–2304.

- [LMB98] LMBV: Beurteilung der Setzungsfließgefahr und Schutz von Kippen gegen Setzungsfließen. LMBV, Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft mbH, Senftenberg, 1998.
- [LUK80] Lukas, R. G.: Densification of loose deposits by pounding: *Journal of Geotechnical Engineering*, 1980; S. 435–446.
- [LUK86] Lukas, R. G.: Dynamic compaction for highway construction vol. 1. Design and construction guidelines: FHWA report No RD-86/133, Washington DC, 1986.
- [LUK95] Lukas, R. G.: Dynamic Compaction. U.S. Department of Transportation, Federal Highway Administration, Office of Engineering, 1995.
- [MAY84] Mayne, P. W.; Jones, J. S.; Dumas, J. C.: Ground Response to Dynamic Compaction. In *Journal of Geotechnical Engineering*, 1984, 110; S. 757–774.
- [MÉN75] Ménard, L.; Broise, Y.: Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation. In *Géotechnique*, 1975, 25; S. 3–18.
- [MIC03] Michalowski, R. L.; Shi, L.: Deformation Patterns of Reinforced Foundation Sand at Failure. In *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2003, 129; S. 439–449.
- [MOS10] Mostafa, K. F.; Liang, R. Y.: Numerical Modeling of Dynamic Compaction in Cohesive Soils. Dissertation, Akron, USA, 2010.
- [MUH71] Muhs, H.: Untersuchung von Grenztragfähigkeit und Setzungsverhalten flachgegründeter Einzelfundamente im ungleichförmigen nichtbindigen Boden. Ernst & Sohn, Berlin, München, Düsseldorf, 1971.
- [NAS06] Nashed, R.: Liquefaction mitigation of silty soils using dynamic compaction, 2006.
- [NAZ13] Nazhat, Y.: Behaviour of sandy Soil subjected to dynamic Loading. Dissertation, Sydney, 2013.

- [NAZ15] Nazhat, Y.; Airey, D.: The kinematics of granular soils subjected to rapid impact loading. In *Granular Matter*, 2015, 17; S. 1–20.
- [NIE97] Niemunis, A.; Herle, I.: Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range. In *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 1997, 2; S. 279–299.
- [OCA16] Ocaña Atencio, R. E.: Implementierung des hypoplastischen Stoffgesetzes in ABAQUS/Explicit zur Verwendung für dynamische Bodenverdichtung durch transiente Systeme an regionalem Sand. Masterarbeit, Leipzig, 2016.
- [OSH94] Oshima, A.; Takada, N.: Effect of ram momentum on compaction by heavy tamping: *Int. Conf. SoilMech. Found. Eng.*, 1994; S. 1141–1144.
- [OSH97] Oshima, A.; Takada, N.: Relation between compacted area and ram momentum by heavy tamping.: *Proceedings of the 14th International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*, 1997; S. 1641–1644.
- [OSH98] Oshima, A.; Takada, N.: Evaluation of compacted area of heavy tamping by cone point resistance. In (Kimura, T. Hrsg.): *Centrifuge 98. Proceedings of the International Conference Centrifuge 98, Tokyo, Japan, 23-25 September 1998*. Balkema, Rotterdam u.a., 1998; S. 813–818.
- [PAN13] Paniagua, P. et al.: Soil deformation around a penetrating cone in silt. In *Géotechnique Letters*, 2013, 3; S. 185–191.
- [POR92] a Poran, C. J.; Heh, K.; Rodriguez, J. A.: Impact behavior of sand. In *SOILS AND FOUNDATIONS*, 1992, 32; S. 81–92.
- [POR92] b PORAN, C. J.; HEH, K.; RODRIGUEZ, J. A.: Impact behavior of sand. In *SOILS AND FOUNDATIONS*, 1992, 32; S. 81–92.
- [POR92] c Poran, C. J.; Rodriguez, J. A.: Design of dynamic compaction. In *Canadian Geotechnical Journal*, 1992, 29; S. 796–802.
- [PRA20] Prandtl, L.: Über die Härte plastischer Körper: *Nachrichten der Kgl. Gesellschaft, Göttingen*, 1920; S. 74–85.

- [QIA87] Qian, J. H.: Dynamic consolidation: from practice to theory' proceedings: 8th Asian Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Kyoto, 1987; S. 213–217.
- [QIU11] Qiu, G.; Henke, S.; Grabe, J.: Application of a Coupled Eulerian–Lagrangian approach on geomechanical problems involving large deformations. In *Computers and Geotechnics*, 2011, 38; S. 30–39.
- [RAS12] Rastogi, P.K.; Hack, E. Hrsg.: Optical methods for solid mechanics. A full-field approach. Wiley-VCH, Weinheim, 2012.
- [RIC70] Richart, F. E.; HALL, J. R.; Woods, R. D.: Vibrations of soils and foundations: Prentice-Hall, 1970.
- [ROS70] Roscoe, K. H.: The Influence of Strains in Soil Mechanics. In *Géotechnique*, 1970, 20; S. 129–170.
- [SCH86] Schmertmann, J. H. et al.: CPT/DMT Quality control of ground modification at a power plant: Proceedings In situ '86 ASCE Special Conference on 'Use of In Situ Tests in Geotechnical Engineering', Blacksburg, VA, 1986; S. 985–1001.
- [SIM17] Simulia: ABAQUS. Abaqus Users Manual, 2017.
- [SLO93] Slocombe, B. C.: Dynamic Compaction. Chapter 2: Ground Improvement, Florida, 1993; S. 57–86.
- [SMO83] Smolczyk, U.: Deep compaction- General report: Proceedings, 8th European Regional Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering, Helsinki, 1983.
- [SOL] a SOL SOLUTION: PANDA 2 HANDBOOK. Version 1.05.
- [SOL] b SOL SOLUTION: PANDA 2 HANDBOOK. Version 1.05.
- [UYA10] Uyanik, O.: Compressional and shear-wave velocity measurements in unconsolidated top-soil and comparison of the results: *Int. J. Phys. Sci.*, 2010; S. 1034–1039.
- [VAN89] van Impe, W. F.: Soil improvement techniques and their evolution. Balkema, Rotterdam, 1989.
- [VOG17] Vogelsang, J.: Untersuchungen zu den Mechanismen der Pfahlrammung. Dissertation, Karlsruhe, 2017.

- [WAL06] Walz, B.: Möglichkeiten und Grenzen bodenmechanischer 1g-Modellversuche. In (Rackwitz, F. Hrsg.): *Entwicklungen in der Bodenmechanik, Bodendynamik und Geotechnik*. Springer-Verlag, s.l., 2006; S. 63–78.
- [WHI03] White, D. J.; Take, W. A.; Bolton, M. D.: Soil deformation measurement using particle image velocimetry (PIV) and photogrammetry. In *Géotechnique*, 2003, 53; S. 619–631.
- [WHI04] White, D. J.; Bolton, M. D.: Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand: *Géotechnique*, 2004; S. 375–397.
- [WHI08] White, D. J.: Contributions to *Géotechnique* 1948–2008. Physical modelling. In *Géotechnique*, 2008, 58; S. 413–421.
- [WIC16] Wichtmann, T.: Soil behaviour under cyclic loading. Experimental Observations, Constitutive Description and Applications. Habilitationsschrift, Karlsruhe, 2016.
- [WOL01] Wolffersdorff, P.-A. von; Schwab, R.: Schleuse Uelzen I - Hypoplastische Finite-Elemente-Analyse von zyklischen Vorgängen. In *Bautechnik*, 2001, 78; S. 771–782.
- [WOL96] Wolffersdorff, P.-A. von: A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface. In *Mechanics of Cohesive-frictional Materials*, 1996, 1; S. 251–271.
- [WOL97] Wolffersdorff, P.-A. von: Verformungsprognosen für Stützkonstruktionen. Habilitation. Karlsruhe, Univ., Habil.-Schr, Karlsruhe, 1997.
- [YEE99] Yee, I. K.: Upgrading of Existing Landfills by Dynamic Compaction - A geotechnical aspect: *Master Builders Journal*, Malaysia, 1999; 21-29 und 210-215.
- [ZER02] Zerwer, A.; Cascante, G.; Hutchinson, J.: Parameter Estimation in Finite Element Simulations of Rayleigh Waves. In *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, 2002, 128; S. 250–261.

# Anhang A

## Versuchsstudie zur Fallgewichtsverdichtung

Nachfolgend werden Ergebnisse ausgewählter Konfigurationen der Versuchsstudie zur Fallgewichtsverdichtung zusammengestellt. Die Ergebnisse werden in der zusammenfassenden Bewertung in Kap. 7.7 berücksichtigt. Wurden einzelne Konfigurationen mehrfach durchgeführt, werden die Standardabweichungen der Ergebnisse zur Einwirktiefe z.B. jeweils zwischen allen 4 Wiederholungen (je 2 links und 2 rechts) bzw. zwischen den 2 Wiederholungen auf der linken Seite innerhalb einer Konfiguration angegeben.

### A.1 Einzelversuche am Versuchsstand-S

Innerhalb eines gleichen Niveaus der Fallenergie von ca. 37 Nm sollten an 3 Konfigurationen der Einfluss aus dem Verhältnis Fallmasse zu Fallhöhe geprüft werden. Dabei wurden im Versuchsstand-S je Konfiguration 4 Versuche mit jeweils 12 Impulsen durchgeführt. Dabei wurden zunächst 12 Impulse im linken Bereich und später 12 Impulse im rechten Bereich des ROI durchgeführt. Anschließend wurde der Versuchssand neu eingebaut und die 24 Impulse der Konfiguration erneut durchgeführt. Für folgende Konfigurationen am Versuchsstand-S werden nachfolgend Ergebnisse zur Einflusstiefe zusammengestellt:

- m4\_80-h0\_80-D100
- m5-95-h0\_64-D100
- m7-09-h0-53-D100
- m4\_80-h1\_00-D100
- m4\_80-h1\_20-D100

Tabelle A.1 Einflusstiefen je Impuls mit Angabe der Standardabweichungen, Versuch m4\_8-h0\_8-D100

Impuls	Mittel	$\sigma_{1-4}$	Mittel	$\sigma_{1/3}$
	101-412	%	1XX/3XX	%
-	mm	%	mm	%
1	-165,77	9,8 %	-177,3	0,6 %
2	-198,37	6,0 %	-206,8	0,4 %
3	-219,43	5,1 %	-227,4	0,8 %
4	-234,70	4,9 %	-242,9	0,2 %
5	-246,87	4,2 %	-254,2	0,1 %
6	-257,57	3,5 %	-264	0,7 %
7	-265,87	3,6 %	-272,6	1,7 %
8	-274,60	3,4 %	-281,2	2,8 %
9	-282,77	2,9 %	-288,5	2,8 %
10	-288,33	2,6 %	-293,6	3,0 %
11	-294,87	2,4 %	-299,9	3,1 %
12	-301,70	2,5 %	-307,1	3,1 %
<b>Mittel</b>	<b>-252,57</b>	<b>4,3 %</b>	<b>-259,63</b>	<b>1,6 %</b>

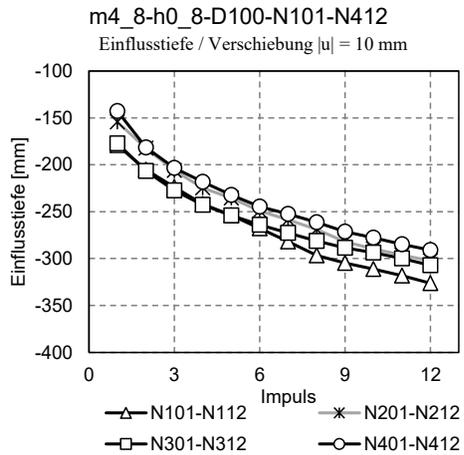


Tabelle A.2 Einflusstiefen je Impuls mit Angabe der Standardabweichungen, Versuch m5\_95-h0\_64-D100

Impuls	Mittel	$\sigma_{1-4}$	Mittel	$\sigma_{1/3}$
	101-412	%	1XX/3XX	%
-	mm	%	mm	%
1	-167,20	5,4 %	-173,6	0,7 %
2	-196,23	3,8 %	-201,45	0,2 %
3	-216,20	3,0 %	-220,75	0,8 %
4	-234,30	2,5 %	-237,85	1,6 %
5	-247,93	2,0 %	-250,55	1,7 %
6	-259,13	1,0 %	-259,65	1,2 %
7	-268,67	1,3 %	-268,8	1,6 %
8	-275,93	0,7 %	-275,7	0,9 %
9	-283,67	0,5 %	-283,1	0,6 %
10	-290,80	0,3 %	-290,75	0,3 %
11	-297,53	0,6 %	-298,75	0,3 %
12	-302,53	0,8 %	-303,9	0,6 %
<b>Mittel</b>	<b>-253,34</b>	<b>1,8 %</b>	<b>-255,40</b>	<b>0,9 %</b>

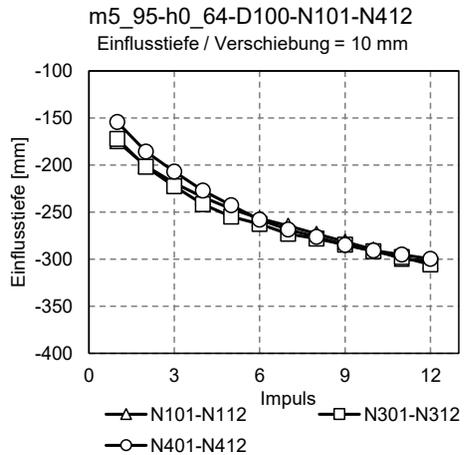
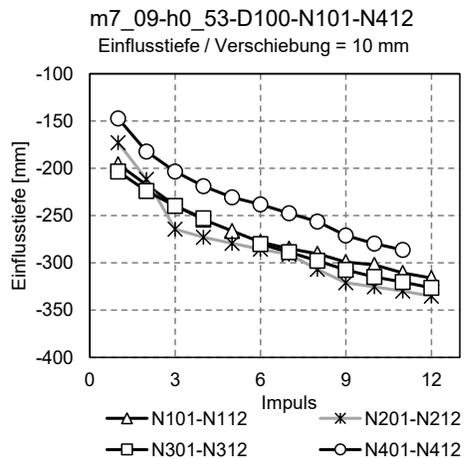


Tabelle A.3 Einflusstiefen je Impuls mit Angabe der Standardabweichungen, Versuch m7\_09-h0\_53-D100

Impuls	Mittel 101- 412	$\sigma_{1-4}$ %	Mittel 1XX/ 3XX	$\sigma_{1/3}$ %
-	mm	%	mm	%
1	-180,03	12,1	-199,7	2,0
2	-209,08	7,6	-220,95	1,4
3	-236,88	9,2	-239,75	0,1
4	-249,95	7,8	-253,8	0,3
5	-258,97	8,0	-266,5	0,0
6	-270,60	6,9	-279,2	0,4
7	-278,33	6,4	-287,1	0,7
8	-288,03	6,6	-294,25	1,3
9	-299,85	6,1	-303,5	1,4
10	-305,60	5,6	-308,6	2,1
11	-311,98	5,2	-315,65	1,5
12	-326,00	2,4	-321,35	1,6
<b>Mittel</b>	<b>-267,94</b>	<b>7,0</b>	<b>-274,20</b>	<b>1,1</b>



Die Zusammenstellungen zeigen bei Berücksichtigung aller 4 Anordnungen Standardabweichungen von i. M. bis zu 7 %. Bei ausschließlicher Berücksichtigung der jeweils ersten Versuchsanordnungen auf der linken Seite (N101-N112 bzw. N301-N312 = rechte Spalten) ergeben sich Standardabweichungen kleiner 2 %.

In Tabelle A.4 und Tabelle A.5 werden die Ergebnisse weiterer Versuche vorgestellt, bei denen bei konstanter Masse von  $m_H = 4,8$  kg und konstantem Durchmesser des Fallgewichtes  $d_H = 100$  mm die Fallhöhe auf  $h_0 = 1,0$  m (Versuch m4\_80-h1\_00-D100) sowie auf  $h_0 = 1,2$  m (Versuch m4\_80-h1\_20-D100) erhöht wird.

Tabelle A.4 Einflusstiefen je Impuls mit Angabe der Standardabweichungen, Versuch m4\_80-h1\_00-D100

Impuls	Mittel 101- 412	$\sigma_{1-4}$ %	Mittel 1XX/ 3XX	$\sigma_{1/3}$ %
-	mm	%	mm	%
1	-185,2	11,4	-202,8	5,9 %
2	-217,9	6,9 %	-227,8	5,3 %
3	-240,4	5,9 %	-249,9	4,5 %
4	-259,0	6,3 %	-270,4	4,9 %
5	-271,8	5,2 %	-279,7	5,0 %
6	-281,6	6,0 %	-290,5	5,8 %
7	-293,5	5,4 %	-302,2	5,4 %
8	-303,5	5,4 %	-311,8	5,7 %
9	-313,3	5,0 %	-322,1	4,9 %
10	-323,0	4,4 %	-329,4	4,9 %
11	-328,5	4,4 %	-334,2	5,4 %
12	-334,3	4,7 %	-341,0	5,6 %
<b>Mittel</b>	<b>-279,3</b>	<b>5,9 %</b>	<b>-288,5</b>	<b>5,3 %</b>

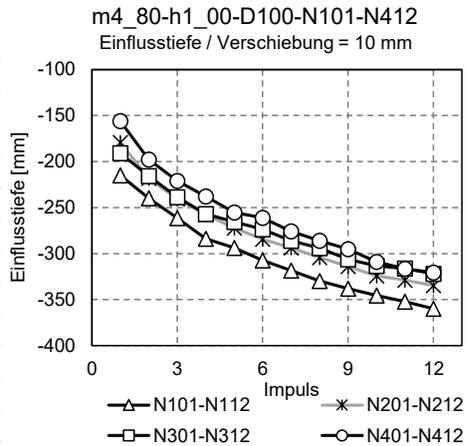
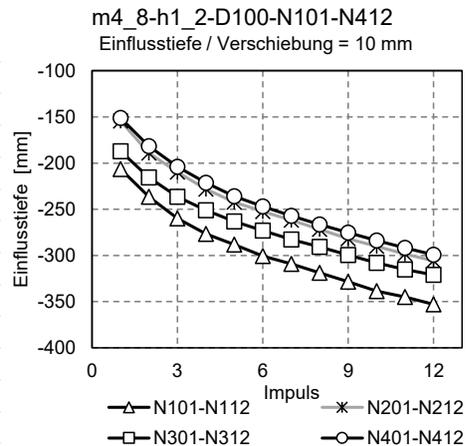


Tabelle A.5 Einflusstiefen je Impuls mit Angabe der Standardabweichungen, Versuch m4\_80-h1\_20-D100

Impuls	Mittel 101- 412	$\sigma_{1-4}$ %	Mittel 1XX/ 3XX	$\sigma_{1/3}$ %
-	mm	%	mm	%
1	-174,9	13,2 %	-197,0	4,9 %
2	-205,7	10,6 %	-226,0	4,6 %
3	-227,5	9,8 %	-248,2	4,7 %
4	-244,4	8,9 %	-263,9	4,8 %
5	-257,5	8,0 %	-275,8	4,5 %
6	-268,2	7,8 %	-286,8	4,8 %
7	-277,7	7,4 %	-296,1	4,5 %
8	-286,9	7,1 %	-304,7	4,6 %
9	-296,2	6,9 %	-313,9	4,6 %
10	-305,2	7,0 %	-323,4	4,7 %
11	-312,7	6,6 %	-330,2	4,5 %
12	-319,8	6,5 %	-337,0	4,7 %
<b>Mittel</b>	<b>-264,7</b>	<b>8,3 %</b>	<b>-283,6</b>	<b>4,7 %</b>



Die Standardabweichungen dieser Versuche lagen innerhalb der 4 Wiederholungen der Konfigurationen bei i. M. 5,9 % (Versuch m4\_80-h1\_00-D100) und 8,3 % (Versuch m4\_80-h1\_20-D100). Durch Berücksichtigung nur der jeweils ersten Anordnung (linke Seite) konnten die Standardabweichungen leicht auf 5,3 % (Versuch m4\_80-h1\_00-D100) bzw. auf 4,7 % (Versuch m4\_80-h1\_20-D100) gesenkt werden. Die genauen Gründe für diese erhöhte Ergebnisstreuung sind nicht bekannt. Ein Fehler in der Auswertung konnte nicht festgestellt werden. Denkbar ist, dass es durch die erhöhte Fallenergie zu ungewollten Interaktionen mit dem Versuchsstand kam.

## A.2 Einzelversuche am Versuchsstand-M

Für folgende Konfigurationen zur Fallgewichtsverdichtung am Versuchsstand-M werden nachfolgende Ergebnisse zur Einflusstiefe zusammengestellt:

- m35\_88-h0\_45-D200
- m47\_38-h0\_34-D300
- m47\_38-h0\_46-D300
- m47\_38-h0\_91-D300
- m47\_38-h0\_34-D435
- m48\_10-h0\_34-D435
- m33\_44-h0\_48-D435
- m80\_73\_h0\_20\_D550

Der kleinste untersuchte Durchmesser für Fallgewichtsmodelle am Versuchsstand-M beträgt 200 mm. Die Konfiguration m35\_88-h0\_45-D200 wurde mittig der Sichtebene angeordnet. Die Ergebnisse zur Einflusstiefe werden in Tabelle A.6 zusammengestellt.

Mit einem Durchmesser von 300 mm wurden 3 Versuchsreihen mit konstanter Fallmasse bei unterschiedlichen Fallhöhen bzw. Fallenergien von 160 Nm (m47\_38-h0\_34-D300), 211 Nm (m47\_38-h0\_46-D300) und 424 Nm (m47\_38-h0\_91-D300) getestet, jeweils mit einer Anordnung im Versuchsstand-M zunächst rechts (N101-N112) und anschließend links (N201-N212). Die Ergebnisse zur Einflusstiefe werden in Tabelle A.7, Tabelle A.8 und

Tabelle A.9 zusammengestellt. Für die 3 unterschiedlichen Konfigurationen wurden i.M. Standardabweichungen von maximal 3,0 % erzielt. Die Versuche zeigen trotz deutlich unterschiedlicher Fallenergie ähnliche Ergebnisse im

Hinblick auf die Einflusstiefen.

Tabelle A.6 Einflusstiefen je Impuls mit Angabe der Standardabweichungen, Versuch m35\_88-h0\_45-D200

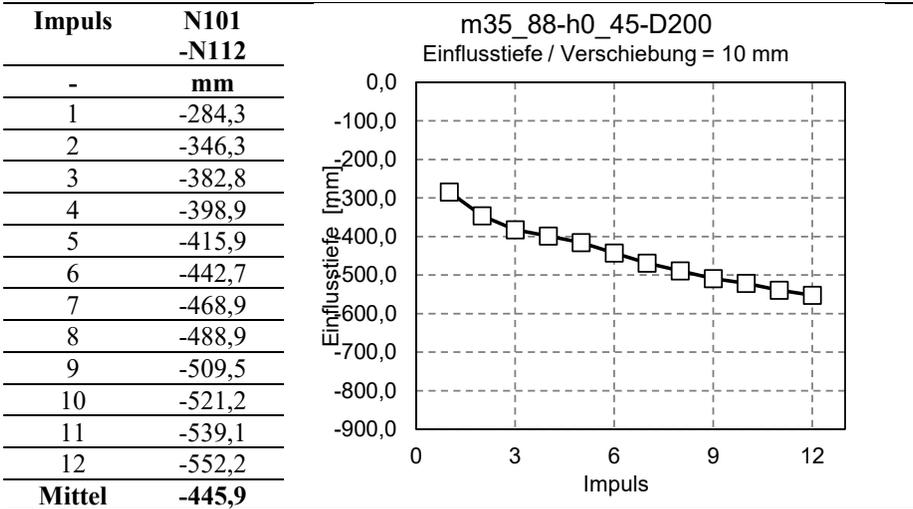


Tabelle A.7 Einflusstiefen je Impuls mit Angabe der Standardabweichungen, Versuch m47\_38-h0\_34-D300

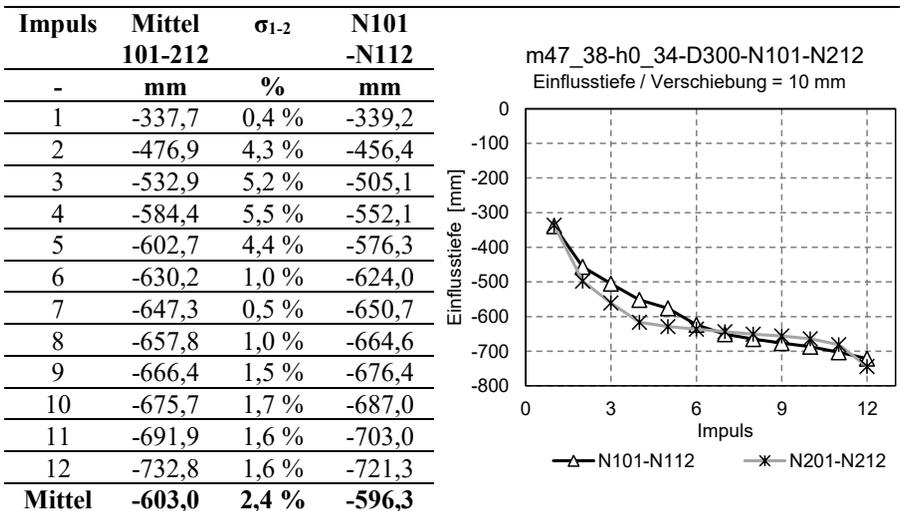


Tabelle A.8 Einflusstiefen je Impuls mit Angabe der Standardabweichungen, Versuch m47\_38-h0\_46-D300

Impuls	Mittel	$\sigma_{1-2}$	N101
	101-212		-N112
-	mm	%	mm
1	-356,3	4,0 %	-342,1
2	-481,0	1,3 %	-487,0
3	-537,7	3,1 %	-554,1
4	-625,1	2,3 %	-610,6
5	-654,7	0,3 %	-652,5
6	-677,8	0,8 %	-683,1
7	-693,5	1,8 %	-705,9
8	-707,0	2,0 %	-721,2
9	-721,9	2,2 %	-737,9
10	-754,3	0,5 %	-750,4
11	-767,9	0,7 %	-762,6
12	-777,8	0,7 %	-772,1
<b>Mittel</b>	<b>-646,2</b>	<b>1,6 %</b>	<b>-648,3</b>

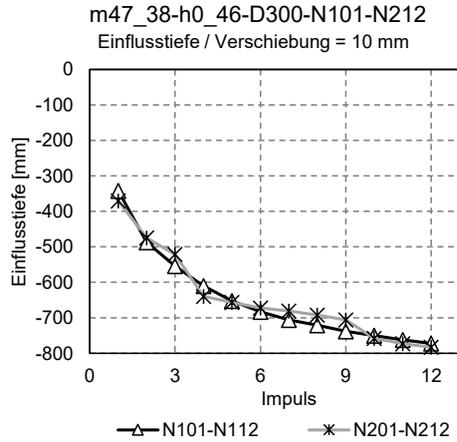
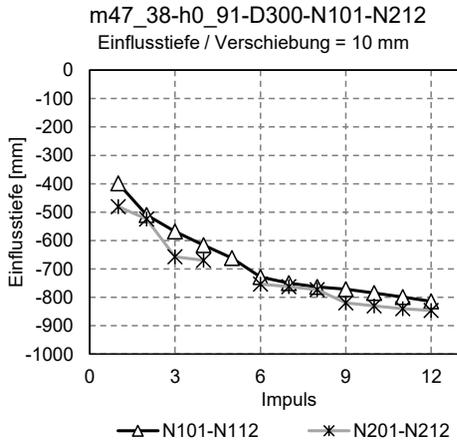


Tabelle A.9 Einflusstiefen je Impuls mit Angabe der Standardabweichungen, Versuch m47\_38-h0\_91-D300

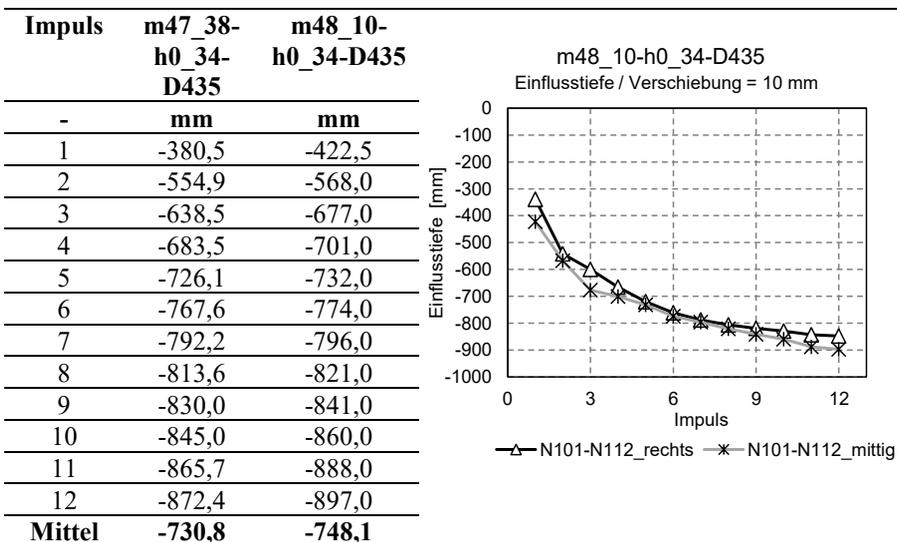
Impuls	Mittel	$\sigma_{1-2}$	N101
	101-212		-N112
-	mm	%	mm
1	-439,6	9,4 %	-398,4
2	-517,1	1,4 %	-509,7
3	-612,6	7,3 %	-568,1
4	-643,2	4,2 %	-616,3
5	-661,4	0,0 %	-661,4
6	-741,1	1,7 %	-728,7
7	-756,6	0,8 %	-750,4
8	-768,3	0,7 %	-763,2
9	-795,8	3,0 %	-771,7
10	-807,7	2,8 %	-785,2
11	-819,7	2,5 %	-799,3
12	-830,3	1,9 %	-814,6
<b>Mittel</b>	<b>-699,4</b>	<b>3,0 %</b>	<b>-680,6</b>



Die Versuche m47\_38-h0\_34-D435 sowie m48\_1-h0\_34-D435 wurden näherungsweise mit identischen Werten für Fallmasse und Fallhöhe durchgeführt.

Im Versuch m47\_38-h0\_34-D435 wurden jeweils 12 Impulse auf der rechten Seite und 12 Impulse auf der linken Seite der Sichtebene angeordnet. Im Versuch m48\_10-h0\_34-D435 wurde das Fallgewicht mittig hinter der Sichtebene positioniert. Nachfolgend werden nur die Ergebnisse für m47\_38-h0\_34-D435 auf der rechten Seite sowie für den Versuch m48\_1-h0\_34-D435 angegeben. Bei den Versuchen auf der linken Seite wurde die Wirkweise des Fallgewichts mit einem Durchmesser  $d_H = 435$  mm durch die vorangegangenen Versuche auf der rechten Seite deutlich beeinflusst.

Tabelle A.10 Einflusstiefen je Impuls, Versuche m47\_38-h0\_34-D435 und Versuch m48\_10-h0\_34-D435



Die Ergebnisse zur Wirktiefe zeigen für beide Versuchsanordnungen ein sehr ähnliches Ergebnisniveau.

In Tabelle A.11 wurden die Ergebnisse zur Einflusstiefe für den Versuch m33\_44-h0\_48-D435 zusammengestellt.

Tabelle A.12 veranschaulicht die Ergebnisse der Einflusstiefen für den Versuch m80\_73\_h0\_20\_D550 mit dem größten verwendeten Fallgewichtsdurchmesser von 550 mm. Zudem wurde in diesem Versuch mit 80,7 kg auch die schwerste Fallmasse aller Versuche eingesetzt.

Tabelle A.11 Einflusstiefen je Impuls mit Angabe der Standardabweichungen, Versuch m33\_44-h0\_48-D435

<b>Impuls</b>	<b>N101</b>
	<b>-N112</b>
	<b>mm</b>
1	-323,6
2	-425,7
3	-474,2
4	-529,4
5	-551,8
6	-585,4
7	-613,0
8	-638,3
9	-653,3
10	-664,5
11	-681,7
12	-700,3
<b>Mittel</b>	<b>-570,1</b>

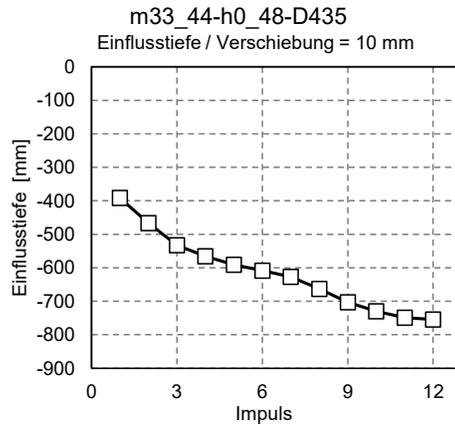
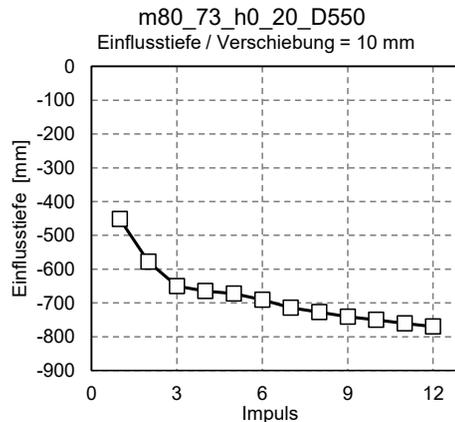


Tabelle A.12 Einflusstiefen je Impuls mit Angabe der Standardabweichungen, Versuch m80\_73\_h0\_20\_D550

<b>Impuls</b>	<b>N101</b>
	<b>-N112</b>
	<b>mm</b>
1	-451,6
2	-578,2
3	-650,4
4	-664,7
5	-672,8
6	-690,9
7	-714,6
8	-727,5
9	-741,3
10	-749,9
11	-760,7
12	-770,1
<b>Mittel</b>	<b>-681,1</b>



# Anhang B

## DIC-Studien an idealisiertem Versuchsaufbau

Im Rahmen dieser Studie sollten Einflüsse einer Acrylglasscheibe auf DIC-Ergebnisse von Verschiebungen und Dehnungen geprüft werden. In diesem Zusammenhang wurden Einflüsse unterschiedlicher Kalibriermethoden auf die Messergebnisse geprüft. Ergänzend wurde der Einfluss des Gridabstands auf die Ermittlung von Dehnungen mit der DIC-Methode geprüft.

Folgende Herangehensweise wurde gewählt:

- Es ist ein idealisierter Versuchsaufbau zu entwickeln, an dem die zu bewertenden Messgrößen bekannt sind bzw. nicht auftreten.
- Gewählt wird ein Versuchsaufbau bei dem eine Verschiebung definiert durch eine Prüfpresse erzeugt wird. Gemessen wird an einem starren Probekörper. Im Versuch wird eine rein vertikale Verschiebung erzeugt. Verformungen des Messobjektes sind nicht zu erwarten.
- Bewertet werden die DIC-Ergebnisgrößen Verschiebungen und Dehnungen.

Zur Anwendung kommen 3 Kalibriermethoden. In *ISTR44D* ist eine automatisierte Kalibrierung mit einer standardisierten Kalibriertafel vorgesehen. Aufnahmen der Kalibriertafel am Messobjekt werden in der späteren Auswertung für die Kalibrierung der Kameraaufnahmen der eigentlichen Messung berücksichtigt. Geprüft werden am idealisierten Aufbau mögliche Positionen der Kalibriertafel:

- 01: vor PMMA Scheibe (25 mm vor Messobjekt)
- 02: hinter PMMA Scheibe (in Ebene Messobjekt)
- 03: oberhalb PMMA Scheibe (in Ebene Messobjekt)

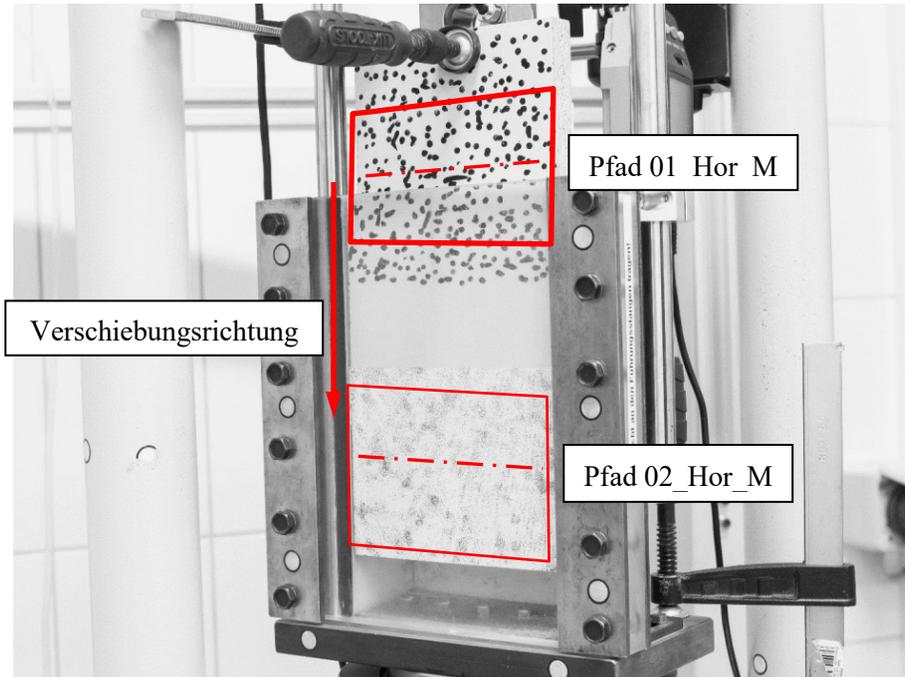


Abbildung B.1: idealisierter Versuchsaufbau zur Überprüfung von DIC Messungen am Versuchsstand-C

Eine Bewertung der DIC-Ergebnisse aus dem Versuch erfolgt an horizontalen Pfaden auf 2 Teilflächen (ROI). Die Lage der horizontalen Pfade und der Teilflächen ist in Abbildung B.1 gekennzeichnet. Die Pfade wurden wie folgt bezeichnet:

- Pfad „01\_Hor\_M“ (zu Messbeginn oberhalb der Acrylglasplatte)
- Pfad „02\_Hor\_M“ (zu Messbeginn hinter der Acrylglasplatte)

Durch die Prüfpresse werden vertikale Verschiebungen in Schritten von ca. 5 mm bis auf max. 138,4 mm gefahren. Je Schritt wird der Versuchsaufbau mit der *Olympus* Systemkamera für die spätere DIC-Auswertung fotografiert.

Nachfolgende Diagramme veranschaulichen die DIC-Messungen zur **Verschiebung** im Vergleich mit den physischen Messungen der Prüfpresse. Ausgewertet werden Mittelwerte der Verschiebung entlang der Pfade 01\_Hor\_M und 02\_Hor\_M (Lage der Pfade s. Schema in Abbildung B.1).

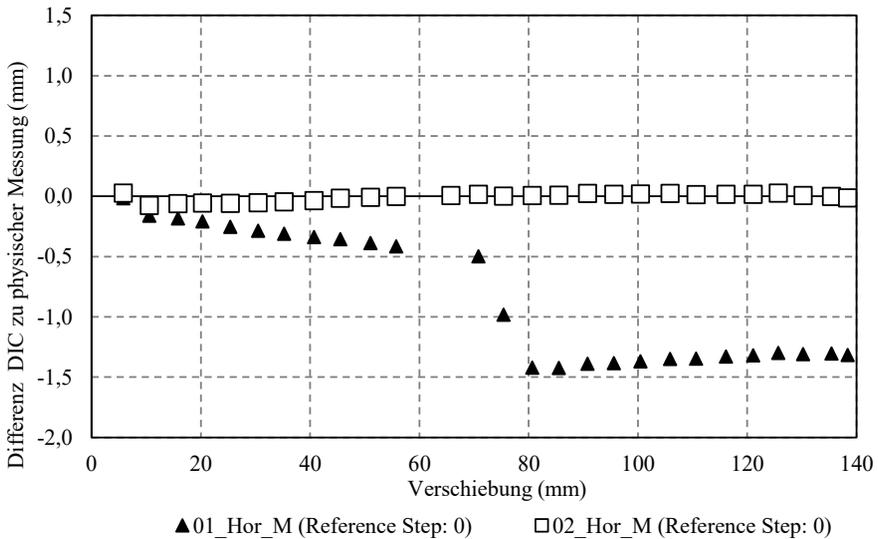


Abbildung B.2 Differenz von DIC Messung zu physischer Messung für Verschiebung von Pfad 01\_Hor\_M und 02\_Hor\_M, Kalibriermethode 02 hinter PMMA Scheibe

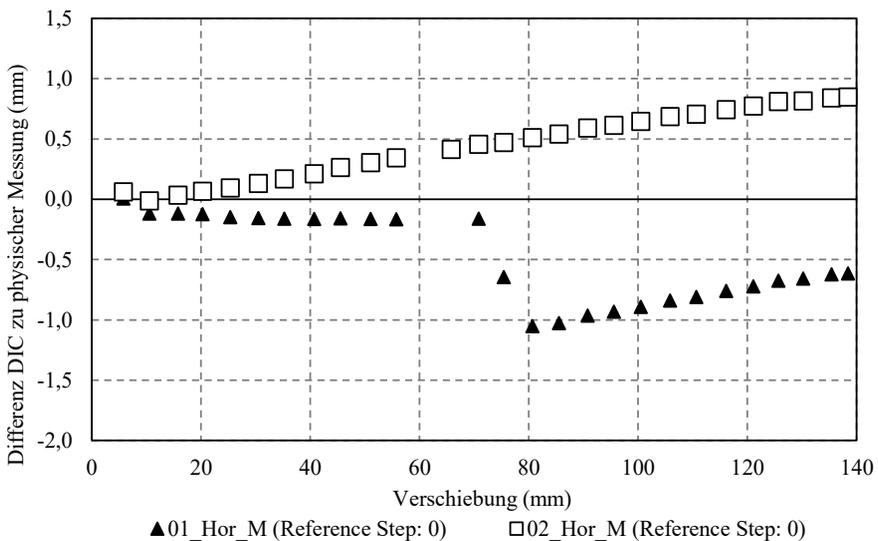


Abbildung B.3 Differenz von DIC Messung zu physischer Messung für Verschiebung von Pfad 01\_Hor\_M und 02\_Hor\_M, Kalibriermethode 01 vor PMMA Scheibe

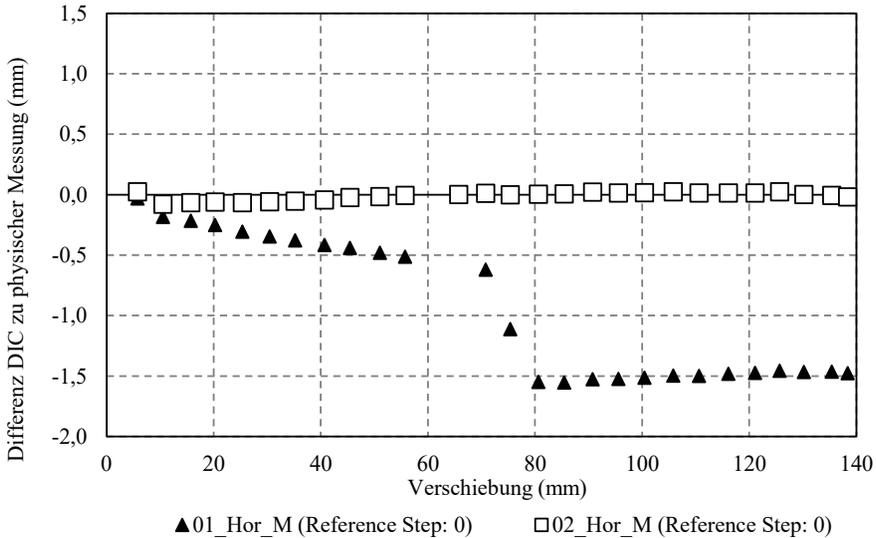


Abbildung B.4 Differenz von DIC Messung zu physischer Messung für Verschiebung von Pfad 01\_Hor\_M und 02\_Hor\_M, Kalibriermethode 03 oberhalb PMMA Scheibe

Die Ergebnisse dieser Messung können wie folgt zusammengefasst werden:

- Abbildung B.2 zeigt durch die Messungen am Pfad 02\_Hor-M, dass mit Kalibriermethode 02 Verschiebungen hinter der Scheibe sehr gut erfasst werden können. Bei einer in den Versuchen üblichen Kalibriermethode 01 ist für Pfad 02\_Hor\_M hingegen tendenziell eine Zunahme der Differenz zwischen DIC Messung und physischer Messung erkennbar. Zum Zeitpunkt der maximalen Verschiebung von 139,24 mm betrug für den Pfad 02\_Hor\_M die Differenz zur physischen Messung 0,848 mm (Fehler i.M. bei 0,61 %).
- Abbildung B.4 veranschaulicht, dass eine weitere Korrektur der Kalibrierparameter möglich ist. Diese konnte im Rahmen dieses Versuchsaufbaus über eine Anpassung der Kalibrierdatei für *ISTRA 4D* erfolgen. Ein Aufsummieren des Fehlers bei großen Verschiebungen kann so verhindert werden (hier: Differenz zur physischen Messung +/- 0,1 mm).

Nachfolgende Diagramme veranschaulichen die DIC-Ergebnisse zu vertikalen Dehnungen auf logarithmischer Basis. Ausgewertet werden Mittelwerte entlang der Pfade 01\_Hor\_M und 02\_Hor\_M.

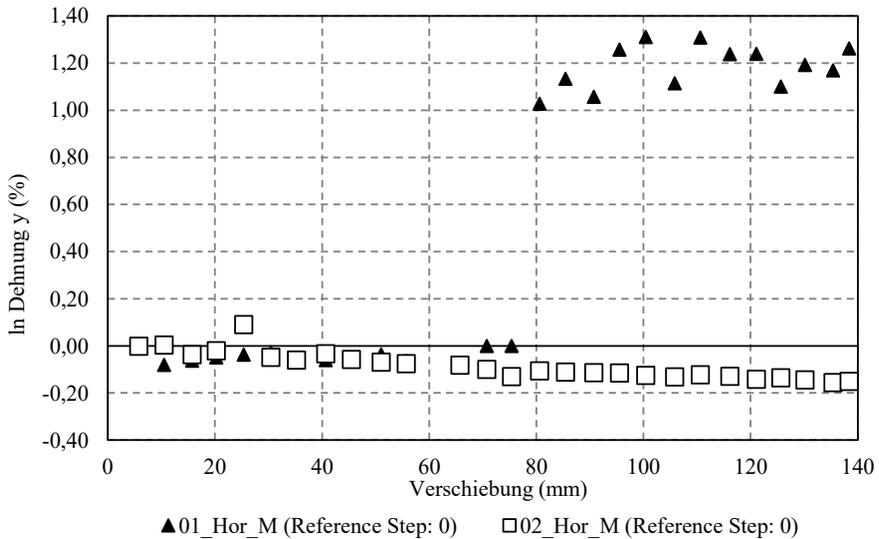


Abbildung B.5 DIC Ergebnisse zu vertikalen Dehnungen auf logarithmischer Basis von Pfaden 01\_Hor\_M und 02\_Hor\_M, Kalibriermethode 02 vor PMMA Scheibe

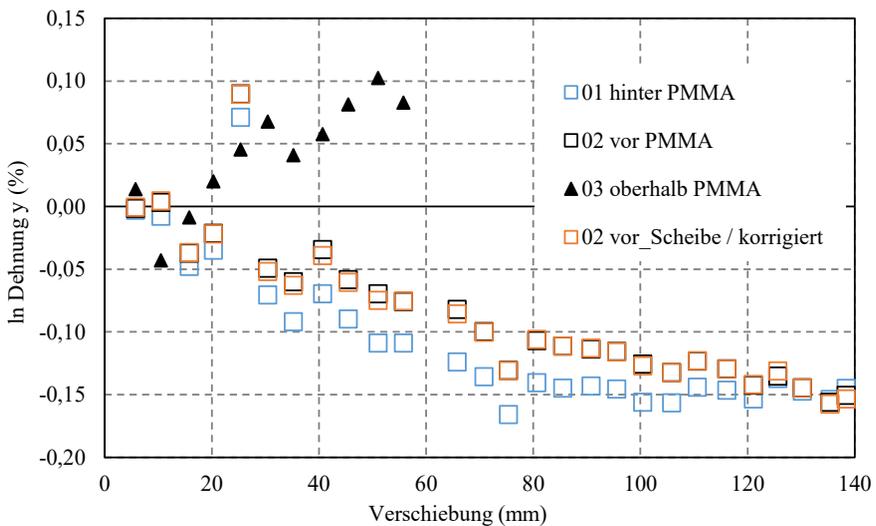


Abbildung B.6 DIC Ergebnisse zu vertikalen Dehnungen auf logarithmischer Basis von Pfaden 01\_Hor\_M bzw. 02\_Hor\_M, Kalibriermethode 01, 02, 03 sowie einer Korrektur auf Basis 02 nach Abbildung B.4

Die Gegenüberstellung von Ergebnissen zur Dehnung in y-Richtung zeigt, dass unabhängig vom Kalibrierverfahren ein Fehler erkennbar ist, der sich mit Zunahme der Verschiebungen des Messobjektes tendenziell vergrößert. Für die versuchstypische Kalibriermethode 02 betrug zum Zeitpunkt der maximalen Verschiebung von 139,24 mm der Fehler 0,15 %. An dem idealisierten Versuchsaufbau konnte somit eine ergänzende Prüfung der angewandten Kalibriermethode 02 an Messgrößen der Verschiebung und Dehnung erfolgen. Ein Fehler der Verschiebungen war erkennbar. Dieser kann bei Berücksichtigung im Versuchsablauf aber minimiert werden. Ein Fehler bei den Dehnungen tritt unabhängig von der verwendeten Kalibriermethode auf und wird im Rahmen der weiteren Auswertung bei Angaben zur Genauigkeit der Dehnungen berücksichtigt.

Für die ergänzende Betrachtung zu Einflüssen des Gridabstands auf Dehnungsergebnisse werden in nachfolgender Abbildung B.6 die DIC-Ergebnisse für  $\varepsilon_y$  für den Pfad 02\_Hor\_M zum Zeitpunkt der maximalen vertikalen Verschiebung des Messobjektes von ca. 140 mm betrachtet. Dabei werden die drei DIC-Korrelationen mit unterschiedlichen Gridabständen entsprechend Tabelle 6.3 in Kap.6.2.4 verwendet.

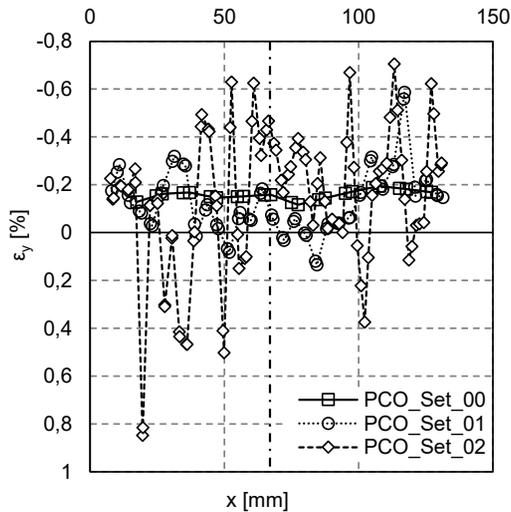


Abbildung B.7 Dehnung des Bodens in y-Richtung am Versuch UC\_003 entlang des horizontalen Pfades 02\_Hor\_M aus DIC-Auswertungen mit einer Kamera bei Variation des Gridabstands (DIC Korrelationen gemäß Tabelle 6.3)

In Analogie zu den Versuchen am Versuchssand in Kap. 6.2.4 zeigt Abbildung B.6 einen deutlichen Einfluss des Gridabstands auf die Dehnungsergebnisse. Die Standardabweichungen  $\sigma$  der drei Ergebnisreihen liegen bei 0,02 für PCO\_Set\_00, bei 0,14 für PCO\_Set\_01 und bei 0,31 für PCO\_Set\_02. Im Mittel weisen alle drei DIC-Korrelationen für den gesamten Pfad einen Dehnungsbetrag zwischen 0,13 % und 0,15 % aus.

# Anhang C

## Studie zu Zwischenbezugsschritten in ISTR4D

Eine Auswertung der Einzelbilder (*steps*) bezieht sich zunächst immer nur auf ein Bezugsbild (i.d.R. erstes Bild der Messreihe = *reference step*). Bei großen Verschiebungen nimmt die Genauigkeit des Berechnungsalgorithmus jedoch ab. Zudem kann es bei Änderung der optischen Oberfläche z.B. bei Dehnung/Stauchung notwendig werden, Zwischenbezugsschritte (*rung steps*) zu verwenden. Die Folgebilder beziehen sich dann auf den *reference step* und auf einen *rung step*. [DAN12] gibt dazu an, dass statistische Fehler bzw. Ungenauigkeiten sich durch die Verwendung von *rung steps* verstärken können und eine Anwendung von *rung steps* auf ein Minimum zu begrenzen ist.

Im Hinblick auf eine Messung großer Verformungen am Sand werden an den DIC-Messungen am Kompressionsversuch K\_012 die Auswirkung von Zwischenschritten (*rung steps*) in ISTR4D in dieser Studie analysiert. Die nachfolgende Betrachtung der DIC-Messergebnisse erfolgt für einen Punkt auf der linken Seite der Lasteinheit. Verglichen werden DIC-Auswertungen zur Setzung der Lasteinheit mit einem Referenzschritt („ohne *rung step*“), eine DIC-Auswertung mit *rung steps* für jedes 50. Bild („*rung step\_50*“) sowie *rung steps* für jedes Bild („*rung step\_01*“).

Das Diagramm zeigt, dass eine Verwendung von Zwischenschritten zu Abweichungen der Verschiebungsergebnisse führt. Als maximale Setzung der Lasteinheit wurden Messwerte zwischen - 5,46 mm (ohne *rung step*), - 5,31 mm (97,3 %, jedes 50. Bild ist *rung step*) bzw. - 4,41 mm (80,7 %, jedes Bild ist *rung step*) ermittelt. In nachfolgender Tabelle wurden die Setzungswerte der 3 DIC-Konfigurationen je Laststufe zusammengestellt. Die tabellarische Gegenüberstellung der Ergebnisse zeigt, dass der Fehler v.a. für kleine Verschiebungen unter 1 mm stark variiert. Bei höheren Verschiebungen schwankt dieser Fehler um einen Grenzwert von ca. 97 % (+/- 1 %) für „*rung step\_50*“ bzw. um 81 % (+/- 1 %) für „*rung step\_01*“.

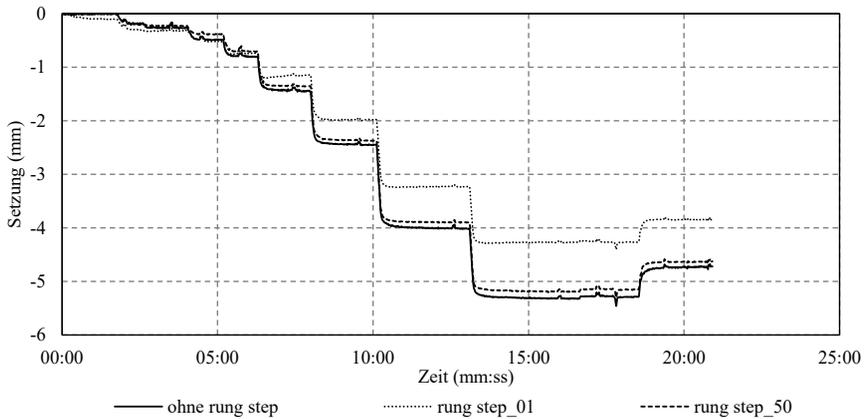


Abbildung C.1: DIC-Ergebnisse zur Setzung der Lasteinheit im Versuch K\_012, Variation der Anzahl zusätzlicher Zwischenschritte (*rung steps*)

Tabelle C.1 Setzungen der Lasteinheit gemäß DIC-Auswertung ohne zusätzlichen Rung Step („ohne RS“), jeder Step = Rung Step (RS\_01), bzw. jeder 50. Step ist ein Rung Step („RS\_50“)

Zeitpunkt	2:30	5:00	7:30	10:00	12:30	15:00	20:00
<b>(1) ohne rung steps</b>	-0,20	-0,49	-1,41	-2,46	-4,01	-5,30	-4,72
<b>(2) rung step_50</b>	-0,19	-0,39	-1,34	-2,38	-3,90	-5,18	-4,63
(2)/(1)	96%	79%	95%	97%	97%	98%	98%
<b>(3) rung step_01</b>	-0,31	-0,52	-1,15	-1,99	-3,23	-4,27	-3,84
(3)/(1)	153%	107%	81%	81%	81%	80%	81%

Für eine Bewertung großer Verformungen z.B. im Nahbereich dynamischer Verdichtung ist die Verwendung zusätzlicher *rung steps* jedoch notwendig, da sonst eine Korrelation zur Ausgangssituation nicht möglich ist. In ISTRA4D führt dies jedoch nicht zum Abbruch einer DIC-Auswertung insgesamt. Entsprechende Facetten (ZOI) werden lediglich aus der Berechnung und Ergebnisdarstellung herausgenommen. Nachfolgende Darstellung zeigt die vertikalen Verschiebungen entlang eines vertikalen Schnittes in der Mitte der Sichtebeine für DIC-Berechnungen der Konfigurationen „ohne rung step“ und „rung step\_01“.

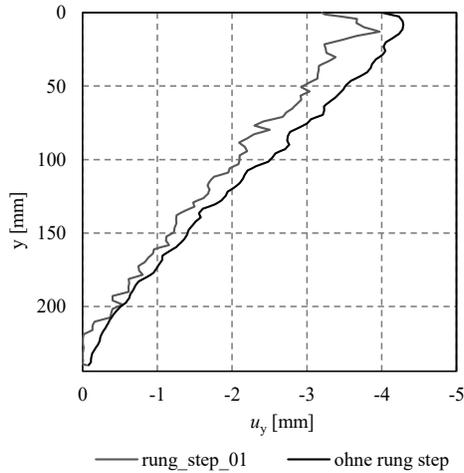


Abbildung C.2 Darstellung der Vertikalverschiebungen entlang eines vertikalen Schnittes mit und ohne Berücksichtigung von *rung steps*, Lage des Schnittes gemäß Abbildung 6.2 a)

Die beiden Verläufe weisen maximale Verschiebungen am oberen Ende des Pfades auf. Am unteren Ende des Pfades tendieren die Verschiebungen gegen den Wert 0,0 mm. Der Maximalwert wurde für beide Berechnungen ca. 10 bis 20 mm unter dem oberen Pfadende ermittelt. Gründe für diese Besonderheit liegen in der optischen Brechung (s. Studie in Anhang C) sowie in einer Ungenauigkeit im Probenbau in der Serie K der Versuche zur Kompression. Diese Ungenauigkeit wurde in der UC Serie behoben (s. auch Kap. 6.1). Die Darstellung zeigt zudem eine deutliche Differenz zwischen den Graphen und belegt somit analog zur Bewertung der Lasteinheit die Beeinflussung der Verschiebungsergebnisse bei Verwendung vieler *rung steps*. Zudem wird deutlich, dass bei Verwendung vieler *rung steps* ein stetiger Verlauf fehlerhaft verändert wird. Dies hat einen deutlichen Einfluss auf lokale Ergebnisse bspw. zur volumetrischen Dehnung.

# Anhang D

## Studie zur Ermittlung von Dehnungen in ISTR44D

Im Rahmen dieser Studie wurden an Ergebnissen aus dem Kompressionsversuch K\_012 am Versuchstand-C exemplarisch im Zusammenhang mit der Ermittlung von Dehnungen in *ISTR44D* folgende Teilaspekte veranschaulicht:

- Berechnungsverfahren zu Ermittlung von Dehnungen
- Auswirkung von Glättungsmethoden auf DIC-Ergebnisse der Dehnungen

Betrachtet werden ausschließlich Ergebnisse entlang eines vertikalen Schnittes bzw. Pfades in der Mitte der Sichtebene am Versuchstand-C gemäß Abbildung D.1. Der Pfad beginnt an der Oberseite der Bodenprobe und besitzt entsprechend der Höhe der Bodenprobe eine Länge von 244 mm.

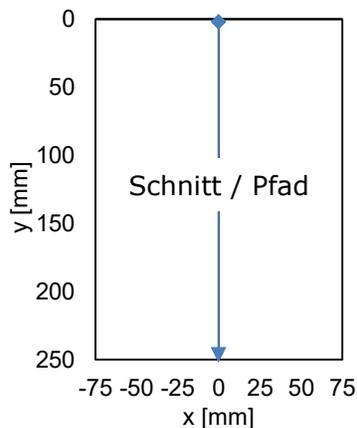


Abbildung D.1 Lage des vertikalen Schnittes / Pfades in der Mitte der Sichtebene am Versuchstand-C

In Kap. 4.5 werden 3 wesentliche Ansätze zur Berechnung von Dehnungen vorgestellt:

- Green-Lagrange Dehnung gem. Gl. 4.3
- Ingenieurtechnische Dehnung nach Gl. 4.4
- Logarithmische Dehnung nach Gl. 4.5

Entlang des vertikalen Pfades wurden Dehnungen in y-Richtung aus den Verschiebungen der Stützstellen händisch berechnet (Bezugslänge = Gridabstand = 26 Px) und u.a. den *ISTR44D* Ergebnissen für die vertikale Dehnung der Facetten ( $\epsilon_y$ , Bezugsfläche = Facette = 39 Pixel x 39 Pixel) gegenübergestellt. Die Ergebnisse entsprechen dem Versuchszeitpunkt bei maximaler Auflast von 1.000 kN/m<sup>2</sup>. Die Setzung der Lasteinheit betrug zu diesem Versuchszeitpunkt ca. 5,5 mm im Versuch K\_012. Unter Berücksichtigung einer Probenhöhe von 244 mm entspricht dies einer mittleren Dehnung in y-Richtung von 2,25 %.

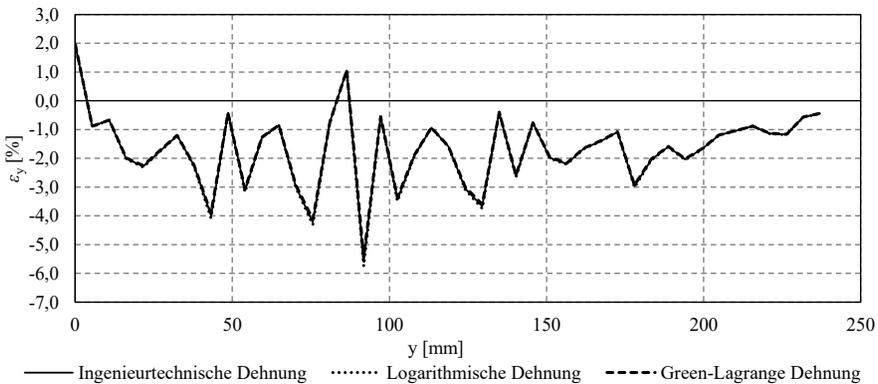


Abbildung D.2 Kompressionsversuch K\_012, Dehnungen in y-Richtung nach 3 Berechnungsverfahren, Ergebnisdarstellung entlang eines Schnittes gemäß Abbildung D.1

Die Abbildungen belegen, dass sich bei den ermittelten Dehnungen zwischen + 2 % und – 6 % keine nennenswerten Unterschiede bei den unterschiedlichen Berechnungsverfahren ergeben. Exemplarische Berechnungen zeigten nennenswerte Unterschiede erst für Dehnungen > 10 %. *ISTR44D* bietet grundsätzlich mehrere Algorithmen zur Glättung von DIC-Ergebnissen an. Nachfolgend soll die Wirkweise des Glättungsalgorithmus *Displacement Smoothing* in der Konfiguration *Smoothing Spline* an Ergebnissen des Versuche K\_012 geprüft werden. Dabei werden folgende Bezeichnungen verwendet („0“ bedeutet: ohne Verwendung von Glättungsalgorithmen):

1. Zahl: *Grid reduction factor*
2. Zahl: *Smoothness factor*

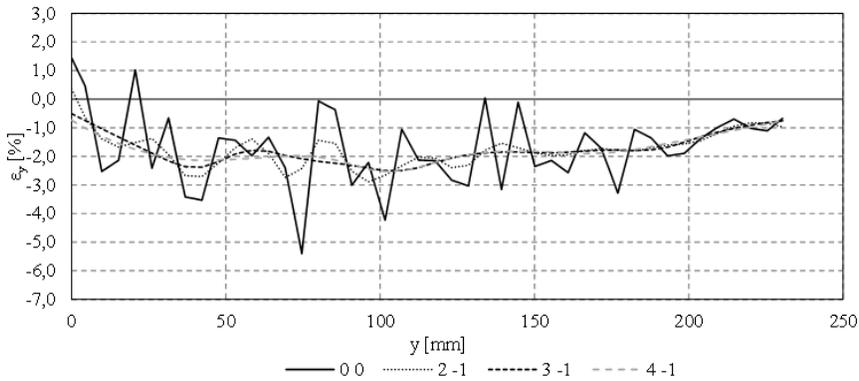


Abbildung D.3 Kompressionsversuch K\_012, Dehnungen in y-Richtung, Glättungsalgorithmus *Displacement Smoothing* in der Konfiguration *Smoothing Spline*, Variation von *Grid reduction factor* und *Smoothness factor*

Nachfolgende Darstellung veranschaulicht Ergebnisse aus einer ergänzenden Berechnung, in der gezielt über eine Funktion *MEDIAN* in MS Excel, Ergebnisse einzelner Facetten entlang der Schnittlinie zusammengefasst wurden:

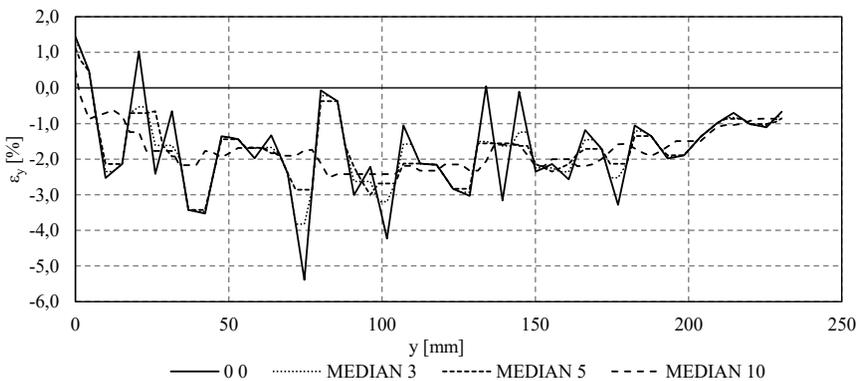


Abbildung D.4 Kompressionsversuch K\_012, Dehnungen in y-Richtung, Berechnungen mit der Funktion *MEDIAN* in MS Excel, Ergebnisdarstellung entlang eines Schnittes gemäß Abbildung D.1

Die Zusammenstellungen zeigen, dass der Grad der Glättung lokale Ergebnisse sehr stark beeinflusst. Die Verfahren zur Glättung oder Mittelung von Ergebnissen führen in Abhängigkeit des gewählten Grades der jeweiligen

Funktion zu ähnlichen Ergebnissen. Im Mittel tendieren die Ergebnisse v.a. für den mittleren Pfadabschnitt gegen eine Dehnung von -2 % bis -2,5 % und bestätigen somit die mittlere Dehnung der Bodenprobe von ca. 2,25 %. Die relativ geringen Dehnungen im oberen Pfadabschnitt sind mit Effekten aus der optischen Brechung zu erklären.

Eine Interpretation der weiteren Versuchsarten unter Verwendung der Dehnungsergebnisse ist denkbar, muss aber unter Berücksichtigung der Einflussfaktoren Bildauflösung sowie Größe der Facetten/Grid bewertet werden.

# Anhang E

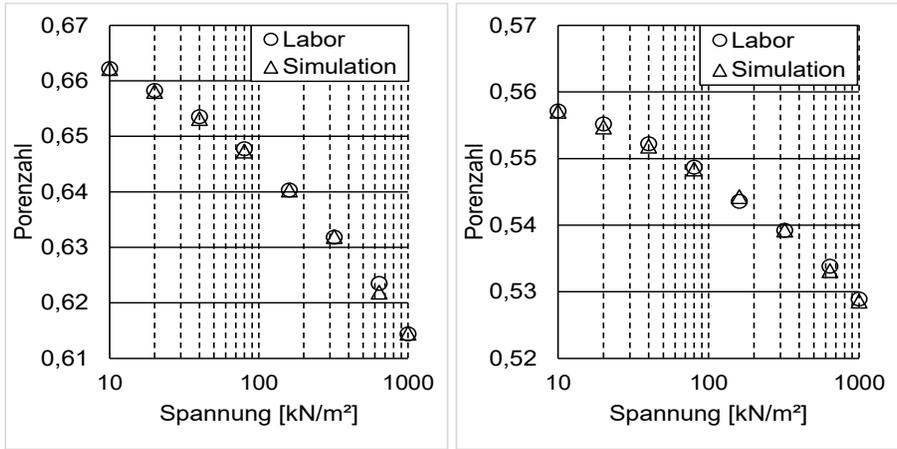
## Kalibrierung der Stoffmodellparameter in Abaqus

Wesentliche Angaben zur Kalibrierung der Stoffparameter wurden in Kap. 9.2 zusammengestellt. Nachfolgend wird ergänzend auf Ergebnisse der Bestimmung und Kalibrierung der Stoffmodellparameter eingegangen.

Alle drei Elementversuche wurden anhand eines einzigen CAX4-Elements in *Abaqus/Standard* simuliert. Elementversuche können zu Konvergenzproblemen in *Abaqus* führen. Grund dafür ist die Verwendung eines einzigen Elementes mit einer geringen Anzahl an Integrationspunkten.

Um die Berechnung zu stabilisieren wird bei den Ödometerversuchen empfohlen, die erste Laststufe als Ausgangszustand zu nehmen. So wird außerdem der Einfluss der intergranularen Dehnungen ausgeschlossen, da diese nach der ersten Belastung ihr Maximum erreicht haben und somit in der Subroutine ausgeschaltet werden. Die Ergebnisse beider Ödometerversuche können Abbildung E.1 entnommen werden.

Abbildung E.2 zeigt Ergebnisse eines monotonen CD-Triaxialversuchs nach [DIN18137-2] mit relativer Lagerungsdichte  $I_{D,0} = 0,65$  und einem Seitendruck  $\sigma'_3 = 100 \text{ kN/m}^2$ . Das Versuchsmaterial zeigt bei der Scherbeanspruchung ein für Sande übliches volumetrisches Verhalten. Für die Simulation des Triaxialversuchs wird als Ausgangszustand der aufgebrachte Druck zur Sättigung der Probe und die Gravitationskraft berücksichtigt. Die Simulation erfolgte in zwei Berechnungsschritten: Konsolidierung und Schervorgang. Die Ergebnisse nach der Kalibrierung können Abbildung E.2 entnommen werden.



a)

b)

Abbildung E.1 Ergebnisse von Ödometerversuchen aus Laborversuch und Simulation nach der Kalibrierung: a) Versuch in lockerer Lagerung zur Kalibrierung der Parameter  $h_s$  und  $n$  sowie b) Versuch in dichter Lagerung zur Kalibrierung des Parameters  $\beta$

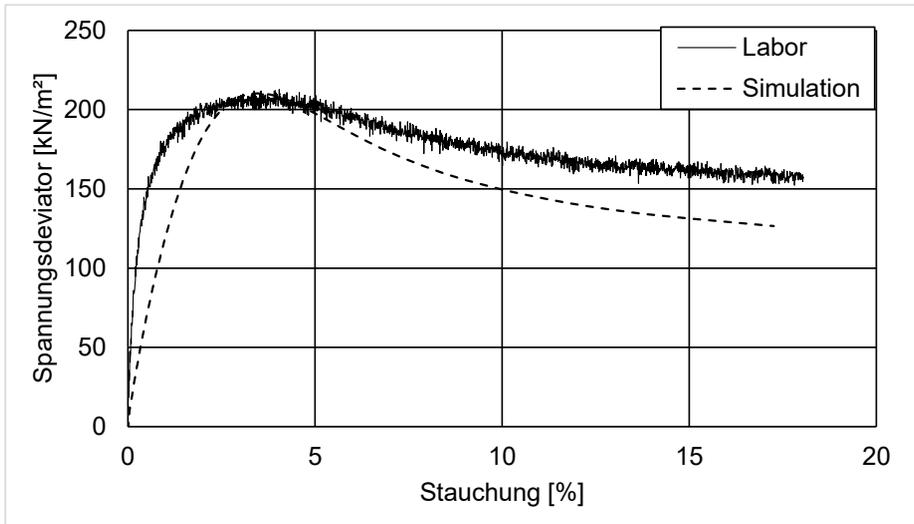


Abbildung E.2: Ergebnisse CD-Triaxialversuches am Versuchssand mit einer Anfangslagerungsdichte  $I_{D,0} = 0,65$ , Ergebnisse vom Laborversuch und von der Simulation nach der Kalibrierung von  $\alpha$

# Anhang F

## Hypoplastisches Stoffmodell ohne intergranulare Dehnung

Die nachfolgende Beschreibung wurde übernommen nach von Wolffersdorff [WOL01]:

Für die kurze Übersicht über das hypoplastische Stoffgesetz werden folgende Schreibweisen verwendet: fette Symbole für Tensoren 2. Stufe (z.B.  $\mathbf{D}$ ,  $\mathbf{T}$ ,  $\mathbf{N}$ ,  $\mathbf{1}$ ), kalligrafische Symbole für Tensoren 4. Stufe (z.B.  $\mathbf{L}$ ,  $\mathbf{M}$ ,  $\mathbf{1}$ ).

Folgende Darstellungen für tensorielle Multiplikationen bzw. Operationen werden verwendet:  $\mathbf{L}:\mathbf{D} = L_{ijkl}D_{kl}$ ,  $\mathbf{T}^2 = T_{ij}T_{kl}$ ,  $\text{tr}\mathbf{T} = T_{ij}$ ,  $\text{tr}(\mathbf{T}^2) = T_{ij}T_{ij}$ ,  $\text{tr}(\mathbf{T}^3) = T_{ij}T_{jk}T_{kl}$ . Die Euklidische Norm des Tensors  $\mathbf{D}$  ist  $\|\mathbf{D}\| = \sqrt{D_{ij}D_{ij}}$ . Die Einheitstensoren 2. und 4. Stufe sind wie folgt definiert  $\mathbf{1} = \delta_{ij}$  und  $\mathbf{1} = \delta_{ik}\delta_{jl}$ , wobei  $\delta_{ij} = \{1 \text{ für } i = j, 0 \text{ für } i \neq j\}$  das KRONECKER-Symbol ist.

Das hypoplastische Stoffgesetz kann in einer einzigen tensoriellen Gleichung dargestellt werden. Nach Niemuns und Herle [NIE97] gilt für die Klasse der hypoplastischen Stoffgesetze folgende konstitutive Gleichung

$$\overset{\circ}{\mathbf{T}} = \mathbf{L}(\mathbf{T}, e) : \mathbf{D} + \mathbf{N}(\mathbf{T}, e) \|\mathbf{D}\| \quad (\text{F.1})$$

d.h. die objektive Spannungsrate  $\overset{\circ}{\mathbf{T}}$  (JAUMANNsche Spannungsrate) ist eine Funktion der aktuellen Korngerüstspannung  $\mathbf{T}$  (CAUCHY-Spannungstensor), der Deformationsrate  $\mathbf{D}$  (Verzerrungsgeschwindigkeitstensor) und der Porenzahl  $e$ . Da das Stoffgesetz außer der aktuellen Korngerüstspannung  $\mathbf{T}$  die weitere Zustandsvariable  $e$  enthält, ist hierfür sinngemäß zu Gl. F.1 eine zweite Entwicklungsgleichung erforderlich. Es gilt unter der Voraussetzung volumenkonstanter Körner

$$\dot{e} = (1 + e) \cdot \text{tr} \mathbf{D} \quad (\text{F.2})$$

wobei  $\dot{e}$  die Porenzahländerung und  $\text{tr} \mathbf{D}$  die Volumenänderung ist.

In Gl. F.1 ist der Operator  $\mathbf{L} : \mathbf{D}$  linear in  $\mathbf{D}$  und der Ausdruck  $\mathbf{N} \|\mathbf{D}\|$  ist nicht-linear in  $\mathbf{D}$ . Demzufolge ist das hypoplastische Stoffgesetz nichtlinear in  $\mathbf{D}$ .

Nach dem Vorschlag von Wolffersdorff [WOL96], [WOL97], der mathematische Formulierungen für das Stoffgesetz auf der Grundlage der Grenzbedingung von MATSUOKA-NAKAI für kritische Zustände entwickelte, können die Tensorfunktionen  $\mathbf{L}$  und  $\mathbf{N}$  wie folgt dargestellt werden:

$$\mathbf{L} = f_s \cdot \frac{1}{\text{tr}(\hat{\mathbf{T}}^2)} \cdot (F^2 \mathbf{1} + a^2 \hat{\mathbf{T}}^2) \quad (\text{F.3})$$

$$\mathbf{N} = f_s \cdot f_d \cdot \frac{a \cdot F}{\text{tr}(\hat{\mathbf{T}}^2)} \cdot (\hat{\mathbf{T}} + \hat{\mathbf{T}}^*) \quad (\text{F.4})$$

mit dem auf das Druckniveau bezogenen Spannungstensor  $\hat{\mathbf{T}} = \mathbf{T} / \text{tr} \mathbf{T}$  und dessen Deviator  $\hat{\mathbf{T}}^* = \hat{\mathbf{T}} - \frac{1}{3} \mathbf{1}$ . Die skalare Spannungsfunktion  $F$  ergibt sich aus der Grenzbedingung nach MATSUOKA-NAKAI als

$$F = \sqrt{\frac{1}{8} \tan^2 \psi + \frac{2 - \tan^2 \psi}{2 + \sqrt{2} \tan \psi \cos 3\vartheta}} - \frac{1}{2\sqrt{2}} \tan \psi \quad (\text{F.5})$$

mit  $\tan \psi = \sqrt{3} \|\hat{\mathbf{T}}^*\|$  und  $\cos 3\vartheta = -\sqrt{6} \frac{\text{tr}(\hat{\mathbf{T}}^3)}{[\text{tr}(\hat{\mathbf{T}}^2)]^{\frac{3}{2}}}$ .

Die beiden Faktoren  $f_d$  und  $f_s$  beschreiben die Druckabhängigkeit und die Dichteabhängigkeit des Stoffgesetzes. Sie sind wie folgt definiert:

$$f_d = \left( \frac{e - e_d}{e_c - e_d} \right)^\alpha \quad (\text{F.6})$$

$$f_s = \frac{h_s}{n} \cdot \left( \frac{e_i}{e} \right)^\beta \cdot \frac{1 + e_i}{e_i} \cdot \left( \frac{-\text{tr}\mathbf{T}}{h_s} \right)^{1-n} \cdot \left[ 3 + a^2 - a \cdot \sqrt{3} \cdot \left( \frac{e_{i0} - e_{d0}}{e_{c0} - e_{d0}} \right)^\alpha \right] \quad (\text{F.7})$$

$e_c$ ,  $e_d$  und  $e_i$  sind charakteristische Porenzahlen. Nach Bauer [BAU92] sie hängen wie folgt von folgendem Kompressionsgesetz ab.

$$\frac{e_c}{e_{c0}} = \frac{e_d}{e_{d0}} = \frac{e_i}{e_{i0}} = \exp \left[ - \left( \frac{-\text{tr}\mathbf{T}}{h_s} \right)^n \right] \quad (\text{F.8})$$

Bis auf den Hilfsparameter  $a$  sind alle Größen und Funktionen des Stoffgesetzes definiert. Der Parameter  $a$  ist eine einfache Beziehung zum kritischen Reibungswinkel  $\varphi_c$ :

$$a = \frac{\sqrt{3} \cdot (3 - \sin \varphi_c)}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \sin \varphi_c} \quad (\text{F.9})$$

Das hypoplastische Stoffgesetz enthält insgesamt 8 Stoffparameter. Die 4 Basiskonstanten sind:

- Granulatsteifigkeit  $h_s$  [MPa],
- Kritischer Reibungswinkel  $\varphi_c$  [°],
- Kritische Porenzahl  $e_{c0}$  [-] bei  $\text{tr}\mathbf{T} = 0$ ,
- Porenzahl bei maximaler Scherverdichtung  $e_{d0}$  [-] bei  $\text{tr}\mathbf{T} = 0$ .

Die zusätzlichen Stoffkonstanten sind:

- Kompressionsexponent  $n$  [-],
- Pyknotropieexponent  $\alpha$  [-],
- Pyknotropieexponent  $\beta$  [-],
- Porenzahl bei lockerster Lagerung  $e_{i0}$  [-] bei  $\text{tr}\mathbf{T} = 0$ .

# Anhang G

## Hypoplastisches Stoffmodell mit intergranularer Dehnung

Die nachfolgende Beschreibung wurde übernommen nach von Wolffersdorff [WOL01]:

In Ergänzung zu den Darstellungen von Anhang F werden in Verbindung mit dem Tensor der intergranularen Dehnung  $\mathbf{S}$  folgende Schreibweisen für tensorielle Multiplikationen bzw. Operationen verwendet:  $\mathbf{L} : \hat{\mathbf{S}}^2 = L_{ijkl} \hat{S}_{kl} \hat{S}_{mn}$ ,  $\hat{\mathbf{S}}^2 = \hat{S}_{ij} \hat{S}_{kl}$ ,  $\hat{\mathbf{S}}^2 : \mathbf{D} = \hat{S}_{ij} \hat{S}_{kl} D_{kl}$ ,  $\mathbf{N} \hat{\mathbf{S}} = N_{ij} \hat{S}_{kl}$ ,  $\text{tr}(\hat{\mathbf{S}} \mathbf{D}) = \hat{S}_{ij} D_{ij}$ . Die Euklidische Norm des Tensors  $\mathbf{S}$  ist  $\|\mathbf{S}\| = \sqrt{S_{ij} S_{ij}}$ .

Für das hypoplastische Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung  $\mathbf{S}$  gilt nach [NIE97] [NIE97] folgende erweiterte konstitutive Beziehung

$$\overset{\circ}{\mathbf{T}} = \mathbf{M}(\mathbf{T}, \mathbf{S}, e) : \mathbf{D} \quad (\text{G.1})$$

Durch die dritte Zustandsvariable  $\mathbf{S}$ , in der vorangegangene Deformationsrichtungen gespeichert werden, ist es nicht mehr in einer einzigen tensoriellen Gleichung darstellbar.

Für die 3D-Formulierung des erweiterten hypoplastischen Stoffgesetzes wird die normalisierte Länge von  $\mathbf{S}$  eingeführt

$$\rho = \frac{\|\mathbf{S}\|}{R} \quad (\text{G.2})$$

wobei der Materialparameter  $R$  der Größtwert des Betrages der intergranularen Dehnung ist. Die Richtung von  $\mathbf{S}$  ist wie folgt definiert

$$\hat{\mathbf{S}} = \begin{cases} \mathbf{S}/\|\mathbf{S}\| & \text{für } \mathbf{S} \neq \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \text{für } \mathbf{S} = \mathbf{0} \end{cases} \quad (\text{G.3})$$

Die Entwicklungsgleichung für die dritte Zustandsvariable  $\mathbf{S}$  ist von den Richtungen der aktuellen Deformation  $\mathbf{D}$  und der intergranularen Dehnung  $\hat{\mathbf{S}}$  zueinander abhängig. Diese Abhängigkeit wird durch das Skalarprodukt  $\text{tr}(\hat{\mathbf{S}}\mathbf{D})$  berücksichtigt. Es gilt folgender Ansatz

$$\dot{\hat{\mathbf{S}}} = \begin{cases} \mathbf{D} - \rho^{\beta_r} \cdot \hat{\mathbf{S}}^2 : \mathbf{D} & \text{für } \text{tr}(\hat{\mathbf{S}}\mathbf{D}) > 0 \\ \mathbf{D} & \text{für } \text{tr}(\hat{\mathbf{S}}\mathbf{D}) \leq 0 \end{cases} \quad (\text{G.4})$$

wobei nach [NIE97] [NIE97]  $\dot{\hat{\mathbf{S}}}$  die objektive Rate der intergranularen Dehnung ist. Der Exponent  $\beta_r$  ist eine weitere Materialkonstante.

Im allgemeinen Fall ergibt sich für beliebige Größen der intergranularen Dehnung, d.h.  $0 \leq \rho \leq 1$  und beliebige Richtungen von  $\mathbf{D}$  und  $\hat{\mathbf{S}}$  die folgende modifizierte inkrementelle Steifigkeit

$$\mathbf{M} = \left[ m_T \cdot \rho^\chi + m_R \cdot (1 - \rho^\chi) \right] + \begin{cases} (1 - m_T) \cdot \rho^\chi \cdot \mathbf{L} : \hat{\mathbf{S}}^2 + \rho^\chi \cdot \mathbf{N} \hat{\mathbf{S}} & \text{für } \text{tr}(\hat{\mathbf{S}}\mathbf{D}) > 0 \\ (m_R - m_T) \cdot \rho^\chi \cdot \mathbf{L} : \hat{\mathbf{S}}^2 & \text{für } \text{tr}(\hat{\mathbf{S}}\mathbf{D}) \leq 0 \end{cases} \quad (\text{G.5})$$

aus den hypoplastischen tensoriellen Anteilen  $\mathbf{L}(\mathbf{T}, e)$  und  $\mathbf{N}(\mathbf{T}, e)$ . In Gl. G.5 sind  $m_R$ ,  $m_T$  und  $\chi$  die restlichen drei Stoffparameter. Die Wirkungsweise von Gl. G.5 ist im allgemeinen Fall komplex und beruht nach Niemuns und Herle [NIE97] auf einer Interpolation von unterschiedlichen Steifigkeitsgrenzfällen.

Zu Erläuterung dieser charakteristischen Steifigkeiten werden zunächst die beiden Fälle  $\rho = 1$ , d.h. maximale intergranulare Dehnung, und  $\rho = 0$ , d.h. keine intergranulare Dehnung, unterschieden.

Im Fall 1,  $\rho = 1$ , gibt es 3 charakteristische Steifigkeiten:

- a) Bei fortlaufender monotoner Deformation mit  $\mathbf{D} \sim \hat{\mathbf{S}}$  vereinfacht sich Gl. G.5 zu

$$\mathbf{M} = \mathbf{L} + \mathbf{N}\hat{\mathbf{S}}$$

Da in diesem Fall  $\mathbf{N}\hat{\mathbf{S}} : \mathbf{D} = \mathbf{N} \|\mathbf{D}\|$  ist, erhält man Gl. F.1, d.h. es gilt hypoplastisches Verhalten ohne intergranulare Dehnung.

- b) Bei einer Deformationsumkehr, d.h.  $\mathbf{D} \sim -\hat{\mathbf{S}}$ , vereinfacht sich Gl. G.5 zu

$$\mathbf{M} = m_R \cdot \mathbf{L}$$

Da in diesem Fall der zweite hypoplastische Term  $\mathbf{N}(\mathbf{T}, \epsilon)$  in Gl. G.5 verschwindet, gilt elastisches Verhalten mit einer Steifigkeitserhöhung von  $\mathbf{L}$ , d.h. die Stoffkonstante ist  $m_R > 1$ .

- c) Bei einem Richtungswechsel der Deformationsrate um  $90^\circ$ , d.h.  $\text{tr}(\hat{\mathbf{S}}\mathbf{D}) = 0$  vereinfacht sich Gl. G.5 zu

$$\mathbf{M} = m_T \cdot \mathbf{L}$$

Es gilt wie in b) elastisches Verhalten, jedoch mit einer geringeren Steifigkeitserhöhung von  $\mathbf{L}$  als in b), d.h. die Stoffkonstante  $m_T$  liegt im Bereich  $m_R > m_T > 1$ .

Im Fall 2,  $\rho = 0$ , gilt unabhängig von der Richtung von  $\mathbf{D}$  elastisches Verhalten mit erhöhter Steifigkeit

$$\mathbf{M} = m_R \cdot \mathbf{L}$$

Es sei angemerkt, dass der Referenzzustand für ein Material mit „reiner“ Hypoplastizität im Fall 1 a) vorliegt, und nicht im Fall 2.

Das erweiterte hypoplastische Stoffgesetz mit intergranularer Dehnung enthält 5 zusätzliche Stoffparameter:

- Maximalwert der intergranularen Dehnung  $R [-]$ ,
- Erhöhungsfaktor bei  $180^\circ$  Richtungswechsel  $m_R [-]$ ,

- Erhöhungsfaktor bei 90° Richtungswechsel  $m_T [-]$ ,
- Exponent  $\beta_r [-]$ ,
- Exponent  $\chi [-]$ .



## Mitteilungen - Institut für Geotechnik, Technische Universität Dresden

ISSN 1434-3053

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Franke

- |         |                       |      |  |
|---------|-----------------------|------|--|
| Heft 1  | Franke, D.<br>(Hrsg.) | 1992 | Das Institut für Geotechnik an der TU Dresden<br>+ Die Veröffentlichungen Johann Ohdes   |
| Heft 2  | Franke, D.<br>(Hrsg.) | 1995 | OHDE-Kolloquium 1993   |
| Heft 3  | Franke, D.<br>(Hrsg.) | 1995 | Festschrift zum 60. Geburtstag von<br>Prof. Dr.-Ing. habil. Dietrich Franke  |
| Heft 4  | Franke, D.<br>(Hrsg.) | 1997 | OHDE-Kolloquium 1997   |
| Heft 5  | Engel, J.             | 1998 | Entwicklung von Datenstrukturen<br>für bodenmechanische Anwendungen  |
| Heft 6  | Vogt, L.              | 1998 | Untersuchungen zum Tragverhalten und<br>zur Verbesserung der Standsicherheit<br>von Stützmauern                                      |
| Heft 7  | al Diban, I.          | 2000 | Das Tragverhalten horizontal belasteter, in<br>nichtbindigem Boden eingespannter starrer<br>Träger, in ebenem und geböschtem Gelände |
| Heft 8  | Winkler, A.           | 2001 | Ermittlung des Erddrucks im Bruchzustand bei<br>Drehung einer Wand um den Kopfpunkt  |
| Heft 9  | Franke, D.<br>(Hrsg.) | 2001 | OHDE-Kolloquium 2001   |
| Heft 10 | Engel, J.             | 2002 | Verfahren zur Festlegung von Kennwerten für<br>bodenmechanische Nachweise  |
| Heft 11 | Neuberg, C.           | 2002 | Ein Verfahren zur Berechnung des räumlichen<br>passiven Erddrucks vor parallel verschobenen<br>Trägern                               |

Herausgeber: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Ivo Herle

- |         |                      |      |   |
|---------|----------------------|------|---|
| Heft 12 | Bartl, U.            | 2004 | Zur Mobilisierung des passiven Erddrucks in kohäsionslosem Boden  |
| Heft 13 | Arnold, M.           | 2004 | Zur Berechnung des Erd- und Auflastdrucks auf Winkelstützwände im Gebrauchszustand                        |
| Heft 14 | Al-Akel, S.          | 2005 | Beitrag zur Berechnung von eingespannten starren Stützkonstruktionen in kohäsionslosem Boden              |
| Heft 15 | Herle, I.<br>(Hrsg.) | 2005 | OHDE-Kolloquium 2005  |
| Heft 16 | Herle, I.<br>(Hrsg.) | 2009 | OHDE-Kolloquium 2009  |
| Heft 17 | Wegener, D.          | 2013 | Ermittlung bleibender Bodenverformungen infolge dynamischer Belastung mittels numerischer Verfahren       |
| Heft 18 | Gajári, G.           | 2013 | Modellierung bleibender Verformungen des Asphalts mit einem hypoplastischen Stoffmodell der Bodenmechanik |
| Heft 19 | Herle, I.<br>(Hrsg.) | 2014 | OHDE-Kolloquium 2014  |
| Heft 20 | Shi, X.              | 2016 | Verformungsverhalten von Kippenböden mit Multiporosität   |
| Heft 21 | Nitzsche, K.         | 2016 | Verschiebungsmuster in Böschungen während Aushubvorgängen   |
| Heft 22 | Hleibieh, J.         | 2017 | Anwendung der Hypoplastizität bei numerischen Berechnungen von bodendynamischen Problemen                 |
| Heft 23 | Schwiteilo, E.       | 2018 | Bestimmung bodenmechanischer Parameter nach fortgeschrittenen Methoden                                    |
| Heft 24 | Herle, I.<br>(Hrsg.) | 2018 | OHDE-Kolloquium 2018  |
| Heft 25 | Pankrath, H.         | 2019 | Beitrag zur Fallgewichtsverdichtung in sandigem Boden   |

