

Zum hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten teilgesättigter granularer  
Geomaterialien infolge hydraulischer und mechanischer Beanspruchungen

Vom Promotionsausschuss der  
Technischen Universität Hamburg  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)  
genehmigte Dissertation

von  
Tom Törzs

aus  
Hamburg

2022

1. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grabe
2. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Markus Oeser
3. Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Alexander Düster

Tag der mündlichen Prüfung: 09.09.2022

# Zum hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhalten teilgesättigter granularer Geomaterialien infolge hydraulischer und mechanischer Beanspruchungen

von

**Tom Törzs**

Herausgegeben von

**J. Grabe**

Technische Universität Hamburg  
Institut für Geotechnik und Baubetrieb


**Creative Commons Lizenzvertrag:**

Dieses Werk ist unter einer Creative Commons Lizenz vom Typ Namensnennung-Nichtkommerziell 4.0 International zugänglich. Um eine Kopie dieser Lizenz einzusehen, konsultieren Sie <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/> oder wenden Sie sich brieflich an Creative Commons, Postfach 1866, Mountain View, California, 94042, USA.

**DOI (Digital Object Identifier):**

doi:10.15480/882.4611

**ORCID iD (Open Researcher & Contributor ID):**

 <https://orcid.org/0000-0001-6395-8126>

Veröffentlichungen des Instituts für  
Geotechnik und Baubetrieb

**55**

Herausgeber:

Univ.-Prof. Dr.-Ing. Jürgen Grabe  
Technische Universität Hamburg  
Institut für Geotechnik und Baubetrieb  
Harburger Schloßstraße 36  
D – 21079 Hamburg  
E-Mail: [grabe@tuhh.de](mailto:grabe@tuhh.de)

**ISBN-13: 978-3-936310-57-3 (Erstausgabe)**

Druckerei:

Druckzentrum Neumünster GmbH  
Rungestraße 4  
24537 Neumünster

In derselben Reihe erschienen:

1. J. Grabe (Hrsg.), 2000: Verbrennungsrückstände. Tagungsband, ISBN 3-936310-00-9
2. J. Grabe (Hrsg.), 2001: Schaden- und Risikomanagement im Tiefbau. Tagungsband, ISBN 3-936310-01-7
3. J. Grabe, 2003. Bodenmechanik und Grundbau. ISBN 3-936310-03-3
4. J. Grabe (Hrsg.), 2003: Euronormen in der Geotechnik – Was ändert sich? Tagungsband, ISBN 3-936310-04-1
5. J. Grabe (Hrsg.), 2003: Bodenverdichtung, Experimente - Modellierung - Geräteentwicklung - Baustellenberichte - F+E-Bedarf. Tagungsband, ISBN 3-936310-05-X
6. M. Kelm, 2004: Numerische Simulation der Verdichtung rolliger Böden mittels Vibrationswalzen. Promotion, ISBN 3-936310-06-8
7. J. Grabe (Hrsg.), 2004: Kaimauern - Messungen und Numerik. Tagungsband, ISBN 3-936310-07-6
8. J. Stein, 2005. Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Düsenstrahlverfahren. Promotion, ISBN 3-936310-09-2
9. J. Grabe (Hrsg.), 2005: Grenzsicht Wasser und Boden - Phänomene und Ansätze. Tagungsband, ISBN 3-936310-10-6
10. J. Grabe (Hrsg.), 2005: FEM in der Geotechnik - Qualität, Prüfung, Fallbeispiele - Tagungsband, ISBN 3-936310-11-4
11. B. Mardfeldt, 2006: Zum Tragverhalten von Kaikonstruktionen im Gebrauchszustand. Promotion, ISBN 3-936310-12-2
12. J. Grabe (Hrsg.), 2006: Optimierung in der Geotechnik - Strategien und Fallbeispiele. Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-13-9
13. T. Bierer, 2007: Bodenschwingungen aus Straßenverkehr auf unebener Fahrbahn im Zeitbereich - experimentelle und theoretische Untersuchungen. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-14-6
14. J. Grabe (Hrsg.), 2007: Bemessen mit Finite-Elemente-Methoden. Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-15-3
15. K.-P. Mahutka, 2008: Zur Verdichtung von rolligen Böden infolge dynamischer Pfahleinbringung und durch Oberflächenrüttler. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-16-0
16. J. Grabe (Hrsg.), 2008: Seehäfen für Containerschiffe zukünftiger Generationen. Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-17-7
17. F. König, 2008: Zur zeitlichen Traglastentwicklung von Pfählen und der nachträglichen Erweiterung bestehender Pfahlgründungen. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-18-4
18. S. Henke, 2008: Herstellungseinflüsse aus Pfahlrammung im Kaimauerbau. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-19-1

19. J. Grabe (Hrsg.), 2009: Spundwände – Profile, Tragverhalten, Bemessung, Einbringung und Wiedergewinnung. Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-20-7
20. J. Dührkop, 2009: Zum Einfluss von Aufweitungen und zyklischen Lasten auf das Verformungsverhalten lateral beanspruchter Pfähle in Sand. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-21-4
21. O. Möller, 2009: Zum Langzeit-Kompressionsverhalten weicher organischer Sedimente. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-22-1
22. J. Grabe (Hrsg.), 2011: Ports of container ships of future generations. Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-23-8
23. S. Kinzler, 2011: Zur Parameteridentifikation, Entwurfs- und Strukturoptimierung in der Geotechnik mittels numerischer Verfahren. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-24-5
24. G. Qiu, 2012: Coupled Eulerian Lagrangian Simulations of Selected Soil-Structure Problems. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-25-2
25. X. Ma, 2013: Nutzung der oberflächennahen Geothermie mittels Energiepfählen und Erdwärmesonden. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-26-9
26. J. Grabe (Hrsg.), 2013: Proceedings of the Conference on Maritime Energy COME 2013. Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-28-3
27. J. Grabe (Hrsg.), 2013: Bemessen mit numerischen Methoden. Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-29-0
28. T. Pucker, 2013: Stoffmodell zur Modellierung von stetigen Materialübergängen im Rahmen der Optimierung geotechnischer Strukturen. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-30-6
29. S. Henke, 2013: Untersuchungen zur Pfropfenbildung infolge der Installation offener Profile in granularen Böden. Habilitation, ISBN-13: 978-3-936310-31-3
30. J. Grabe (Hrsg.), 2014: Ports for Container Ships of Future Generations. Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-32-0
31. J. Grabe (Hrsg.), 2014: Offshore Basishäfen, Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-33-7
32. C. Rudolph, 2015. Untersuchungen zur Drift von Pfählen unter zyklischer, lateraler Last aus veränderlicher Richtung, Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-34-4
33. J. Grabe (Hrsg.), 2015: Morphodynamics 2015, Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-35-1
34. T. Hamann, 2015: Zur Modellierung wassergesättigter Böden unter dynamischer Belastung und großen Bodenverformungen am Beispiel der Pfahleinbringung, Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-36-8
35. B. Schümann, 2015: Beitrag zum dynamischen Dreiphasenmodell für Boden auf Basis der Finite-Elemente-Methode, Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-37-5

36. M. Milatz, 2015: Untersuchungen zum Einfluss der Kapillarität auf das hydraulisch-mechanische Verhalten von granularer Tragschichten für Verkehrswege, Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-38-2
37. H. Kaya, 2016: Bodenverschleppung und Spaltbildung infolge der Einbringung von Profilen in Dichtungsschichten aus Ton, Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-39-9
38. J. Grabe (Hrsg.), 2017: Proceedings of the Conference on Maritime Energy COME 2017. Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-40-5
39. B. Kocak, 2017: Zur numerischen Modellierung von hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozessen in gesättigten granularen Böden mittels Smoothed Particle Hydrodynamics, Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-41-2
40. K. Siegl, 2017: Zur Pfahldynamik von geramnten Großrohrpfählen und der daraus resultierenden Wellenausbreitung in Wasser und im Meeresboden, Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-42-9
41. J. Grabe (Hrsg.), 2017: Numerical Methods in Geotechnics, Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-43-6
42. J. Grabe (Hrsg.), 2018: Digitale Infrastruktur und Geotechnik (DIG 2018), Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-44-3
43. D. Osthoff, 2018: Zur Ursache von Schlosssprengungen und zu einbringbedingten Lageabweichungen von Spundwänden, Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-45-0
44. E. Heins, 2018: Numerical based identification of the pile-soil interaction in terms of the axial pile bearing capacity, Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-46-7
45. K.-F. Seitz, 2021: Zur Topologieoptimierung von geotechnischen Strukturen und zur Tragfähigkeitssteigerung des Baugrunds durch Scherfugenverfestigung. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-47-4
46. D. Plenker, 2021: Physical and numerical investigations of the dynamic interaction of saturated granulates and fluid. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-48-1
47. J. Grabe, J. O. Backhaus, P. Vogel 2021: Bauprojektmanagement. Skriptum, ISBN-13: 978-3-936310-49-8
48. M. Kanitz, 2021: Experimental and numerical investigations of particle-fluid systems in geotechnical engineering. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-50-4
49. J. O. Backhaus, 2021: A methodology for the numeric time-cost Forecast and pareto optimisation of large injection projects in tunneling. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-50-4
50. S. S. Nagula, 2021: Optimisation of deep compaction as liquefaction mitigation measure. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-52-8
51. J. Bubel, 2021: Zum Versagen von Unterwasserböschungen im Seegang. Promotion, ISBN-13: 978-3-936310-53-5
52. J. Grabe (Hrsg.), 2022: Adaptive Structures At Shore 2022 , Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-54-2

53. J. Grabe (Hrsg.), 2022: Numerische Methoden in der Geotechnik, Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-55-9
54. J. Grabe (Hrsg.), 2022: Processes in natural and technical Particle-Fluid Systems (PintPFS), Tagungsband, ISBN-13: 978-3-936310-56-6



## Vorwort des Herausgebers

Zusammen mit dem Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen, Prof. Oeser, wurde im Rahmen eines von der DFG geförderten Forschungsprojektes das mechanisch-hydraulische Verhalten von granularen Tragschichten unter offenporigen Polyurethan-gebundenen Deckschichten untersucht. Offenporige Deckschichten vermeiden die Versiegelung von Flächen, sie sind in der Regel bei Überfahrten geräuschärmer und sie nehmen zu einem gewissen Grad auch Feinstpartikel, beispielsweise aus Reifenabrieb, auf. Es stellt sich dabei die Frage, ob die in der Regel teilgesättigten Tragschichten durch die Bewässerung und der mechanischen Beanspruchung aus Radüberfahrten nachgeben. So ein Nachgeben der granularen Tragschichten kann zu unerwünschten Hohllagen und Schäden der Deckschicht führen. Dies war der Ausgangspunkt und der Rahmen für die nun vorliegende Dissertation von Herrn Törzs. Herr Törzs hat die Fragestellung verallgemeinert und somit Grundlagen geschaffen, die zur Beschreibung des hydraulisch-mechanischen gekoppelten Verhaltens teilgesättigter granularer Materialien unter Berücksichtigung einer Verdichtung genutzt werden können. Seine Arbeit hat damit große Relevanz für die Bodenmechanik teilgesättigter Böden und im Besonderen von offenporigen Deckschichten im Verkehrswegbau.

Die Zielsetzung der Arbeit von Herrn Törzs gemäß Kapitel 3 lautet:

1. Bestimmung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung verschiedener granularer geomaterialien mit dem Fokus der hydraulischen Hysterese und der Abhängigkeit von dem Verdichtungsgrad.
2. Analytische Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese sowie der Abhängigkeit von der Lagerungsdichte.
3. Implementierung sowie Validierung des analytischen Modells in eine FE-Umgebung im Rahmen einer dynamischen Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung zur Modellierung poröser Medien.
4. Bewertung der Entwässerungseigenschaften, d. h. die Saugspannungs- und Sättigungsänderung, bei Entwässerung einer wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion.
5. Untersuchung der Änderung der hydraulisch-mechanischen Zustände einer wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion bei zyklisch-mechanischer Belastung.
6. Charakterisierung des Einflusses der Kapillareffekte granularer Tragschichten unter mechanischer Belastung bei verschiedenen Randbedingungen.

Herr Törzs hat zur Klärung der Fragestellungen Labor-, Modell- und Feldversuche zum mechanisch-hydraulischen Verhalten eines wasserdurchlässigen Straßenaufbaus unter bewegter Radlast durchgeführt. Letzteres erfolgte in enger Kooperation mit dem Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen der RWTH Aachen, Prof. Oeser, im Rahmen des von der DFG geförderten Forschungsprojektes.

In Kapitel 1 führt er in die Thematik und Motivation seiner Arbeit ein. Die Bedeutung der Forschung auf dem Gebiet teilgesättigten Granulate bzw. Böden wird deutlich. In Abb. 1.6 belegt er die Relevanz der Fragestellung anhand von eigenen Messungen der

hydraulisch-mechanischen Kenngrößen in der Schottertragschicht einer wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion infolge Radüberfahrten.

Das Kapitel 2 gibt den Stand der Wissenschaft wieder. Es werden wesentliche Beziehungen erläutert, die im Späteren verwendet werden. Abb. 2.8 zeigt Verläufe der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung bei Be- und Entwässerung aus der Literatur ergänzt um eigene Messungen. Der Einfluss der Lagerungsdichte auf die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung wird in Abb. 2.9 deutlich.

In Kapitel 3 stellt er, wie bereits geschrieben, die Zielsetzung seiner Arbeit dar und erläutert den methodischen Ansatz seiner Arbeit.

In Kapitel 4 untersucht Herr Törzs das Kapillardruck-Sättigungs-Verhalten des PU-gebundenen Deckschichtmaterials und der granularen Tragschichten. Ein hierzu von ihm entwickelter Versuchsaufbau ist in Abb. 4.8 dargestellt. Die Versuchsergebnisse finden sich in Abschnitt 4.3.2. Das zyklische Verhalten wird in den Abb. 4.16ff verdeutlicht. Abb. 4.19f belegen den Einfluss der Lagerungsdichte. Es handelt sich somit um eine hydraulisch-mechanische Kopplung, die das Verhalten teilgesättigter Tragschichten unter offenporigen Deckschichten beeinflusst. Allerdings sind die Kapillareffekte in der PU-gebundenen Deckschicht und in den grobkörnigen Tragschichten erwartungsgemäß in einer geringen Größenordnung. Die von Herrn Törzs entwickelte Methode ist übertragbar und anwendbar auf feinkörnige Böden, bei denen Kapillareffekte das Tragverhalten wesentlich beeinflussen.

Herr Törzs beschreibt das von ihm gemessene, nicht lineare hydraulisch-mechanische Verhalten von teilgesättigten Granulaten anhand des Ansatzes von Pedroso und Williams (2020). Abb. 5.1ff und die Gleichungen 5.5ff stellen den Ansatz dar. Dieser Ansatz wird von Herrn Törzs in eine dynamische Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung zur Modellierung des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Bodenverhaltens, erstmals vorgelegt von Schümann (2015), implementiert. In Kapitel 5.4 validiert Herr Törzs seine Programmierung und gibt in Tab. 5.1 die Parameter der von ihm untersuchten Böden an. Abb. 5.7f zeigen den Vergleich der gemessenen und mit MATLAB sowie mit der FEM simulierten Verläufe. In Abschnitt 5.5. wird das Modell um den Einfluss der Lagerungsdichte erweitert, siehe Abb. 5.9.

In Kapitel 6 untersucht Herr Törzs das Entwässerungsverhalten einer wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion unter eindimensionalen Bedingungen. Abb. 6.2 zeigt den von ihm genutzten Versuchsaufbau. Abb. 6.5f belegen, dass der Einfluss der Kapillarität in den grobkörnigen Schichten eher klein ist.

An der RWTH Aachen konnten in Kooperation mit dem Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen Überfahrten über offenporige Straßenverkehrswege untersucht werden. Hierzu wurde eine circa 10 m lange und 3 m breite Fahrbahn mit Druckaufnehmern instrumentiert, siehe Abb. 7.1f. Ein MLS30 der Bundesanstalt für Straßenwesen diente als Lastsimulator. Die Messungen zeigen den Einfluss der dynamischen Radlasten auf die totale Spannung, den Porenwasserdruck und den Porenluftdruck. Eine Wasserzugabe bzw. höherer Wasserstand führt zu einem merklichen Anstieg der Porenwasserüberdrücke vor bzw. unterhalb der dynamischen Radlast.

In Kapitel 8 simuliert Herr Törzs eine bewegte Radlast auf teilgesättigten Tragschichten mittels FEM unter Verwendung des von ihm implementierten nicht linearen Kapillardruck-Sättigungs-Modells. Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die Radüberfahrten die Kapillardrücke insbesondere in feinkörnigeren Schichten und damit das Verformungs- und Tragverhalten maßgeblich beeinflussen.

In Kapitel 9 stellt Herr Törzs die wesentlichen Erkenntnisse seiner Arbeit dar und gibt einen Ausblick. Die Schlussfolgerungen sind nachvollziehbar und sind für das Verständnis der hydraulisch-mechanisch gekoppelten Prozesse in teilgesättigten Böden sehr hilfreich.

Die von Herrn Törzs vorgelegte Arbeit liefert wesentliche Erkenntnisse zum besseren Verständnis des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhaltens von teilgesättigten Granulaten. Mit der von ihm vorgenommenen, durch Messungen abgesicherten Erweiterung und Implementierung in die FEM besteht nun die Möglichkeit die gezielte und unbeabsichtigte Verdichtung von teilgesättigten Böden infolge zyklischer Belastung modellieren zu können. So besteht gerade im Erdbau noch viel Unkenntnis darüber, was bei der Verdichtung von teilgesättigten Böden im Boden passiert.

Herr Törzs hat mit seinen Untersuchungen einen wesentlichen Beitrag zum Stand der Wissenschaft in der Bodenmechanik geleistet.

Für seinen weiteren Lebensweg wünsche ich Herrn Törzs alles Gute. Es war stets eine große Freude mit Herrn Törzs zusammenzuarbeiten.

Hamburg, 4. Oktober 2022

Jürgen Grabe



## Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit ist vorwiegend während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Geotechnik und Baubetrieb der Technischen Universität Hamburg entstanden.

Das Verfassen dieser Arbeit war für mich eine Herausforderung und eine wertvolle Erfahrung. Ich möchte mich an dieser Stelle ganz herzlich bei den Menschen bedanken, die mich auf dem Weg meiner Promotion begleitet und unterstützt haben.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Professor Dr. Jürgen Grabe für seine Unterstützung, sein Engagement bei der Betreuung dieser Arbeit und die Übernahme der Rolle als Erstgutachter. Ebenfalls herzlich bedanken möchte ich mich bei Herrn Professor Dr. Markus Oeser und Herrn Professor Dr. Alexander Düster für die freundliche Übernahme der Korreferate sowie bei Herrn Professor Dr. Fröhle für sein Mitwirken in der Prüfungskommission.

Meinen ehemaligen Kolleginnen und Kollegen am Institut für Geotechnik und Baubetrieb, besonders Frau Dr. Manuela Kanitz, Frau Anne Stark, Herrn Dr. Jan Onne Backhaus, Herrn Jannik Beuße, Herrn Alexander Chmelnizkij und Herrn Dr. Marc Stapelfeldt, danke ich für die gute Zusammenarbeit und das angenehme Arbeitsklima. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Marius Milatz, der durch motivierende Unterstützung, ständige Hilfsbereitschaft, fachliche Diskussionen und konstruktive Vorschläge wesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat.

Außerdem danke ich Frau Göta Bürkner, Herrn Markus „Marek“ Banduch und Herrn Patrick Mayanja für ihre Hilfsbereitschaft und Unterstützung bei der Planung und Durchführung experimenteller Untersuchungen im bodenmechanischen Forschungslabor.

Auch die studentischen Hilfskräfte und Abschlussarbeitschreibenden haben durch ihre Rechercharbeit und die Durchführung von Laborversuchen ihren Teil zum Gelingen dieser Arbeit beigetragen, wofür ich mich herzlich bedanke.

Besonderer Dank gilt außerdem Herrn Dr. Jörg Franke, der mich 2016 zur Durchführung der Promotion ermutigte und mich 2021 mit offenen Armen bei der IGB Ingenieurgesellschaft mbH erneut willkommen hieß.

Weiterhin bedanke ich mich bei der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG) für die Förderung des Forschungsvorhabens, in dessen Rahmen diese Arbeit am Institut für Geotechnik und Baubetrieb entstehen konnte.

Mein größter Dank gilt meiner Familie. Meine Eltern, meine Großeltern und meine Brüder wussten mich jederzeit zu motivieren.

Schließlich möchte ich meiner Frau Daniela von ganzem Herzen für ihre uneingeschränkte Unterstützung auf meinem bisherigen Lebensweg danken. Ihr Verständnis und ihre enorme Geduld haben maßgeblich zum Gelingen der vorliegenden Arbeit beigetragen. Vielen Dank.

Hamburg, 29. Oktober 2022

Tom Törzs



## **Schlagwörter:**

Dimensionierung im Straßenbau, FEM, Hydraulische Eigenschaften, Hydraulische Hysterese, Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung, Mehrphasen-Modellierung, Permeabilität, Polyurethan, Poröse Deckschichten, Teilgesättigte Böden, Versuche im Realmaßstab, Wasserdurchlässige Straßen, Wasserrückhalteverhalten, Zeitraffende Belastungsversuche, Zyklische Verkehrsbelastungen

## **Keywords:**

Accelerated pavement testing, Cyclic Traffic loads, FEA, Full scale testing, Hydraulic hysteresis, Hydraulic properties, Multiphase modeling, Permeability, Polyurethane, Porous pavement, Road design, Soil-water characteristic curve, Unsaturated soils, Water permeable roads, Water retention behavior



# Inhaltsverzeichnis

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Stand der Wissenschaft</b>	<b>7</b>
2.1	Grundlagen . . . . .	8
2.1.1	Boden als Dreiphasenmedium . . . . .	8
2.1.2	Physikalisches Verhalten teilgesättigter Böden . . . . .	10
2.2	Beanspruchungen des Untergrundes bei Radüberfahrt . . . . .	21
2.3	Versickerungsfähige Verkehrsflächen . . . . .	22
2.4	Fazit . . . . .	25
<b>3</b>	<b>Zielsetzung und Methoden</b>	<b>27</b>
3.1	Zielsetzung . . . . .	27
3.2	Methoden . . . . .	27
<b>4</b>	<b>Experimentelle Untersuchungen granularer Geomaterialien</b>	<b>29</b>
4.1	Bodenmechanische Klassifizierung der Sande . . . . .	31
4.1.1	Granulometrische und grundlegende bodenmechanische Eigenschaften	31
4.1.2	Mechanisches Verhalten der untersuchten Sande . . . . .	31
4.1.3	Hydraulische Leitfähigkeit im wassergesättigten Zustand . . . . .	31
4.2	Klassifizierung des PU-gebundenen Deckschichtmaterials (PUPM) . . . . .	33
4.3	Experimentelle Untersuchungen zum Kapillardruck-Sättigungs-Verhalten .	35
4.3.1	Methoden zur experimentellen Bestimmung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung . . . . .	36
4.3.2	Ergebnisse der Laborversuche zur statischen Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung . . . . .	41
4.3.3	Ergebnisse der Laborversuche zum zyklischen Verhalten der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung . . . . .	45
4.3.4	Abhängigkeit der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung von dem Verdichtungsgrad . . . . .	48
4.4	Fazit . . . . .	54
<b>5</b>	<b>Modellierung teilgesättigter granularer Geomaterialien</b>	<b>55</b>
5.1	Modellierung des mechanischen Verhaltens . . . . .	55
5.2	Modellierung des hydraulischen Verhaltens . . . . .	56
5.2.1	Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung . . . . .	56
5.2.2	Modellierung der Durchlässigkeit im teilgesättigten Zustand . . . . .	61
5.3	Modellierung der hydraulisch-mechanischen Kopplung . . . . .	64
5.3.1	Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung . . . . .	64

5.3.2	Erweiterungen der dynamischen Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung . . . . .	67
5.4	Validierung . . . . .	68
5.4.1	Validierung des analytischen Modells . . . . .	68
5.4.2	Verifizierung der Implementierung in die dynamische Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung . . . . .	71
5.5	Erweiterung des analytischen Modells . . . . .	73
5.6	Teilgesättigte Ödometerversuche mit zyklischer mechanischer Belastung . . . . .	74
5.6.1	Beschreibung . . . . .	74
5.6.2	Simulation . . . . .	75
5.6.3	Ergebnisse . . . . .	77
5.7	Implementierung bewegter Flächenlasten . . . . .	79
5.8	Zusammenfassung . . . . .	82
<b>6</b>	<b>Entwässerungsverhalten einer wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion</b>	<b>83</b>
6.1	Material in der Straßenkonstruktion . . . . .	83
6.2	Experimentelle und numerische Untersuchungen . . . . .	86
6.2.1	Experimentelle Untersuchungen . . . . .	86
6.2.2	Numerische Untersuchungen . . . . .	87
6.3	Ergebnisse . . . . .	90
6.3.1	Experimentelle Untersuchungen . . . . .	90
6.3.2	Numerische Untersuchungen . . . . .	92
6.4	Fazit . . . . .	92
<b>7</b>	<b>Zyklische Belastungsversuche einer teilgesättigten Straßenkonstruktion</b>	<b>95</b>
7.1	Material, Teststrecke und Instrumentierung . . . . .	96
7.2	Mobiler Lastsimulator MLS30 . . . . .	98
7.3	Belastungsszenario . . . . .	98
7.4	Ergebnisse der Feldversuche . . . . .	99
7.5	Fazit . . . . .	104
<b>8</b>	<b>Simulation von Radüberfahrten teilgesättigter Straßenunterbauten</b>	<b>107</b>
8.1	Belastungsszenarien . . . . .	107
8.2	Numerische Modellbildung und Materialkennwerte . . . . .	108
8.2.1	Numerisches Modell . . . . .	108
8.2.2	Simulation . . . . .	109
8.2.3	Modellparameter . . . . .	111
8.3	Ergebnisse . . . . .	112
8.3.1	Hamburger Sand . . . . .	113
8.3.2	ISS-0 Sand . . . . .	114
8.4	Fazit . . . . .	119
<b>9</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>123</b>
9.1	Zusammenfassung . . . . .	123
9.2	Ausblick . . . . .	125

---

<b>Literatur</b>	<b>127</b>
<b>Anhang A: Notation</b>	<b>141</b>
<b>Anhang B: Modellierung des Verformungsverhaltens granularer Böden</b>	<b>149</b>
<b>Anhang C: Optimierung des Versuchsstands mit der hängenden Wassersäule</b>	<b>159</b>
<b>Anhang D: Implementierung des SWCC-Modells in MATLAB®</b>	<b>163</b>



# 1 Einleitung

Die zunehmende Bodenversiegelung der befestigten Flächen in urbanen Räumen beeinträchtigt die Grundwasserneubildung, vermindert das natürliche Wasserrückhaltevermögen eines Gebiets und erhöht damit das Überflutungspotenzial. Zudem können sich die stadtklimatischen Bedingungen durch den beeinträchtigten Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre verändern. Innerhalb von Städten kommt es so vermehrt zu Luftverschmutzung, erhöhten Luft- und Oberflächentemperaturen sowie zu veränderten Wind- und Niederschlagsverhältnissen, was wiederum die Lebensqualität der Bevölkerung mindern kann. Der Bodenversiegelungsgrad der Stadt Hamburg nimmt stetig zu, vgl. Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie (2018). Der aktuelle Stand (2017) des Versiegelungsgrads Hamburgs eingeteilt in zehn Klassen ist in Abbildung 1.1 dargestellt. Neben der Störung des Bodengefüges, dem Verbleib von Fremdstoffen im Boden und der Beeinträchtigung der Bodenfruchtbarkeit, gehen mit dem Rückbau von versiegelten Flächen zudem hohe Kosten einher, vgl. Umweltbundesamt (2021).

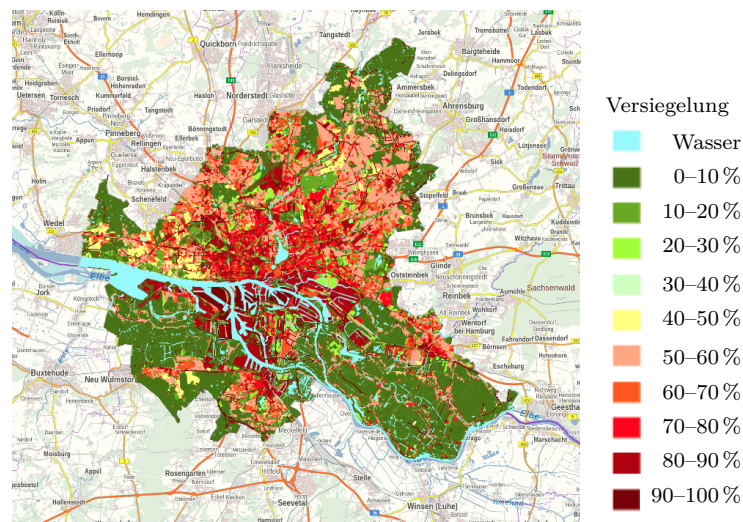


Abbildung 1.1: Bodenversiegelung der Stadt Hamburg, vgl. Ergebnisbericht zur Bodenversiegelung in Hamburg 2017, Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie (2018).

Mit dem fortschreitendem Klimawandel ist zukünftig vermehrt mit außergewöhnlichen Starkregenereignissen, Überflutungen und daraus resultierenden Schäden an Infrastrukturobjekten zu rechnen, vgl. Abbildung 1.2. Durch die klimatischen Veränderungen kommt es u. a. zu übersättigten Böden, zu rapiden Änderungen des Sättigungs- und damit des effektiven Spannungszustandes, zu Unterspülungen etc.



Abbildung 1.2: Straßenschäden nach einem Starkregenereignis und damit einhergehender Überschwemmung im Rocky Mountain Arsenal National Wildlife Refuge, 2013. C St. - Rocky Mountain Arsenal NWR von „USFWS Mountain-Prairie“, Lizenz: CC BY 2.0.

Um dem zunehmenden Versiegelungsgrad der befestigten Flächen entgegenzuwirken, werden vermehrt energieeffiziente Bauweisen eingesetzt. Eine Möglichkeit stellen wasserdurchlässige Straßenkonstruktionen dar. Im Rahmen eines von der Deutsche Forschungsgemeinschaft (DFG) geförderten Projekts „Hydraulisch-mechanische Wechselwirkung in wasserdurchlässigen Fahrbahnaufbauten unter Berücksichtigung teilgesättigter Zustände“ wurden in Kooperation mit dem Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule Aachen (RWTH) Untersuchungen zum grundlegenden hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verformungsverhalten versickerungsfähiger Straßenkonstruktionen durchgeführt. Inwiefern teilgesättigte Zustände derartige Konstruktionen beeinflussen, ist weitgehend unklar. Die Ziele des Projekts waren u. a. die Charakterisierung eines neuartigen porösen Deckschichtmaterials sowie die Identifizierung des Einflusses teilgesättigter Zustände auf das Verformungsverhalten wasserdurchlässiger Straßenkonstruktionen.

Boden besteht aus einzelnen Partikeln, die in Wechselwirkung zueinander stehen. Je nach Beschaffenheit der Einzelkörner, d. h. ihrer Größe, ihrer Form, ihrer Rauheit oder ihrer mineralogischen Zusammensetzung, weisen Böden verschiedene mechanische Eigenschaften auf. Belastungen von Böden resultieren in Verformungen, vgl. Abbildung 1.3 (a). Zum einen können sich Böden bei Belastung unter bestimmten Bedingungen näherungsweise elastisch verhalten, zum anderen jedoch auch sehr große Verformungen erleiden, die nicht reversibel sind. Aufgrund der nicht reversiblen plastischen Verformungen, hängt das Verformungsverhalten zudem von der Belastungsgeschichte ab. Diese Eigenschaft wird auch als „Erinnerungsvermögen“ bzw. „Gedächtnis“ von Böden bezeichnet.

Der Porenraum eines Bodens, der sich aus der räumlichen Anordnung der Einzelkörner ergibt, ist im Regelfall – unter Vernachlässigung von Bodenverunreinigungen, gelöster Stoffe oder sonstiger Phasen – mit den Fluidphasen Wasser oder Gasgemischen gefüllt. Bei

Sättigung des Porenraumes mit einem der beiden Fluide ist ein Boden demnach vollständig wassergesättigt oder vollständig gasgesättigt, d. h. trocken.

Bei teilgesättigten Böden ist der Porenraum eines Bodens zu einem Teil mit Wasser und zu einem Teil mit Gasgemischen, im Regelfall Luft, gefüllt. Das mechanische Verhalten eines teilgesättigten Bodens unterscheidet sich durch verschiedene Effekte von dem eines vollständig wassergesättigten oder trockenen Bodens. Die Kapillarität in teilgesättigten Böden hat einen Einfluss auf die Scherfestigkeit und verleiht dem Korngerüst zusammenhaltende, d. h. kohäsive Eigenschaften. Dieser Zusammenhalt der Einzelkörner ermöglicht es z. B., Sandburgen zu bauen, vgl. Abbildung 1.3 (b).



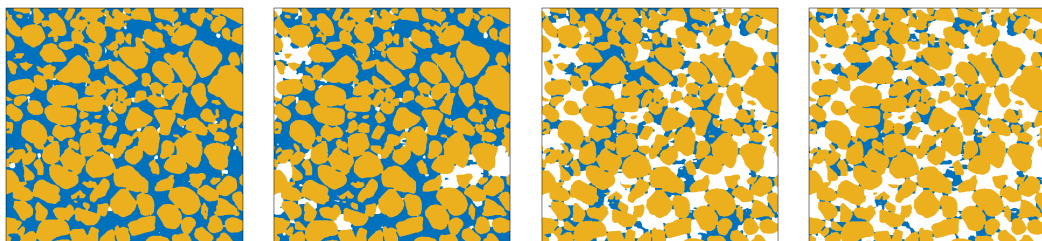
(a) First Footprints On Another World, NASA.



(b) Mini Sand Castle von „drpavloff“, Lizenz: CC BY-NC 2.0.

Abbildung 1.3: (a) Buzz Aldrins Stiefelabdruck von der Apollo-11-Mission, 1969. (b) Eine Sandburg, 2012.

In Abbildung 1.4 ist ein granularer Boden, ein Sand, bei Entwässerung dargestellt. Es sind verschiedene effektive Sättigungsgrade  $S_e$  zwischen nahezu vollständig wassergesättigten und residuellen Bedingungen abgebildet. Die komplexe Verteilung der Fluidphasen im Korngerüst, die maßgeblich von äußeren Einflüssen, wie z. B. der Belastungshistorie, und weiteren Randbedingungen abhängt, verdeutlicht die Schwierigkeit, allgemeingültige Aussagen über teilgesättigte Böden zu formulieren.

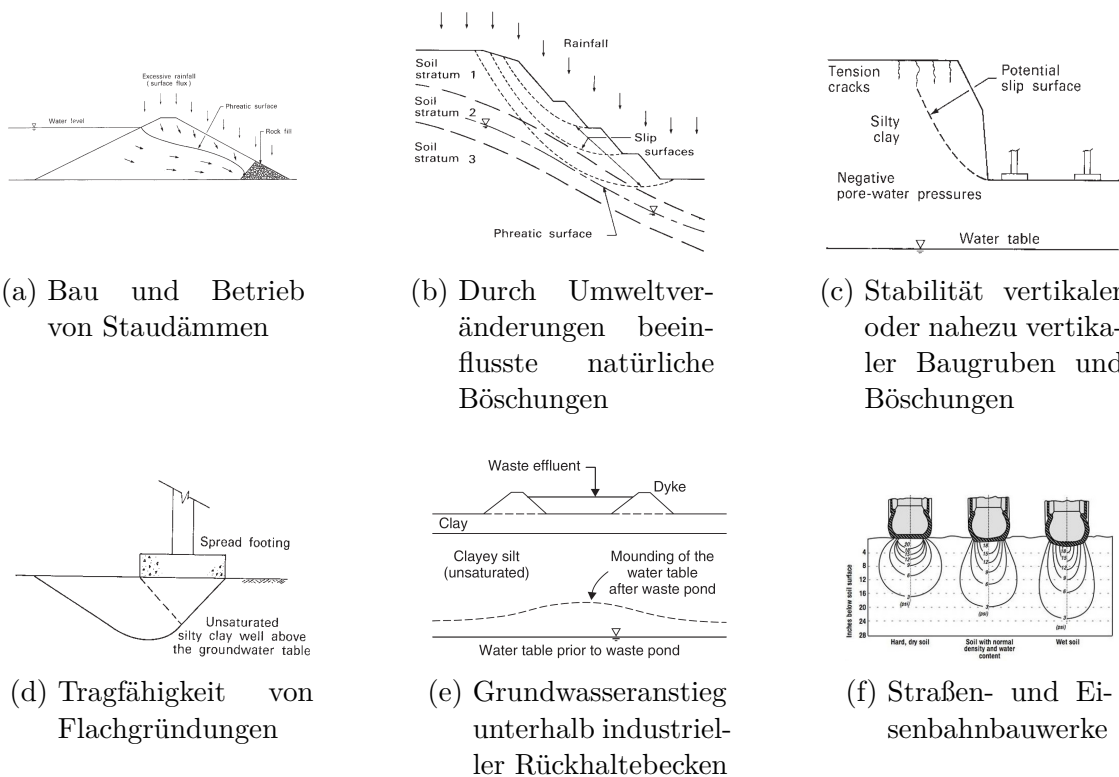


(a)  $S_e \approx 99,0\%$       (b)  $S_e \approx 85,0\%$       (c)  $S_e \approx 38,0\%$       (d)  $S_e \approx 25,0\%$

Abbildung 1.4: Visualisierung eines teilgesättigten Bodens (Hamburger Sand) während der initialen Entwässerung rekonstruiert aus CT-Aufnahmen. Eigene Rekonstruktion mit Daten aus Milatz, Hüsener u. a. (2021).

Unter natürlichen Bedingungen sind Böden, Erdbauwerke oder Tragkonstruktionen von Verkehrswegen zumeist in einem teilgesättigten Zustand. Durch Niederschlag und durch Verdunstung werden den porösen Geomaterialien Wasser zu- und abgeführt. Zudem kann sich Bodenwasser durch natürliche Schwankungen des Grundwasserspiegels kontinuierlich in Bewegung befinden. Kapillareffekte sind hierbei maßgebend für die vertikale Verteilung des Bodenwassers.

Typische Fragestellungen aus der Geotechnik, in denen teilgesättigte Böden einen Einfluss auf das Verformungsverhalten bzw. die Standsicherheit haben, sind in Abbildung 1.5 zusammengefasst. Einige Fragestellungen betreffen Wasserbewegungen in geotechnischen Konstruktionen, was z. B. für die Bestimmung von Sickerlinien in Staudämmen relevant ist, vgl. Abbildung 1.5 (a). Teilgesättigte Zustände haben einen Einfluss auf die Standsicherheit geotechnischer Konstruktionen oder von Erdbauwerken, vgl. Abbildung 1.5 (b), (c) und (d). Abbildung 1.5 (e) verdeutlicht, dass die mit Auflasten einhergehende setzungsinduzierte Verringerung des Porenraums einen Einfluss auf die Kapillarität hat, was einen Grundwasseranstieg zur Folge hat. In diesem Zusammenhang sind zudem Fragestellungen des Teilchentransports gelöster Schadstoffe relevant. Die Darstellung in Abbildung 1.5 (f) zielt auf das Thema dieser Arbeit ab. Die Abbildung zeigt den Einfluss von Radüberfahrten auf die sich im Untergrund einstellende Spannungsverteilung bei verschiedenen Sättigungsgraden.



(a) Bau und Betrieb von Staudämmen

(b) Durch Umweltveränderungen beeinflusste natürliche Böschungen

(c) Stabilität vertikaler oder nahezu vertikaler Baugruben und Böschungen

(d) Tragfähigkeit von Flachgründungen

(e) Grundwasseranstieg unterhalb industrieller Rückhaltebecken

(f) Straßen- und Eisenbahnbauwerke

Abbildung 1.5: Typische Anwendungsbereiche für teilgesättigte Bodenmechanik. (a) bis (e) entnommen aus D. G. Fredlund, Rahardjo und M. D. Fredlund (2012), (f) entnommen aus Söhne (1958).

Böden bzw. geotechnische Konstruktionen, wie Verkehrswege, sind sowohl statischen, als auch wiederkehrenden zyklischen Belastungen ausgesetzt. Hierbei treten einwirkende Belastungen in Form von hydraulischen und/oder mechanischen Lasten auf. Je nach Sättigungszustand werden die Belastungen zunächst direkt von dem Korngerüst und/oder von den im Porenraum befindlichen Fluiden getragen. In einem teilgesättigten Zustand haben die Porenfluide einen direkten Einfluss auf die Korn-zu-Korn-, d. h. die effektive, Spannung, was wiederum das Verformungsverhalten beeinflusst.

Die bei der Radüberfahrt in Straßenkonstruktionen eingetragenen Spannungen resultieren in Verformungen, die durch die hydraulischen Zustände der Trag- und Deckschichten beeinflusst werden. In Abbildung 1.6 sind ausgewählte Ergebnissen zeitraffender Feldversuche zum Verformungs- und Ermüdungsverhalten einer wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion bei Verwendung eines neuartigen porösen Deckschichtmaterials unter zyklischer Belastung dargestellt. Abgebildet sind die Änderungen der hydraulisch-mechanischen Kenngrößen in der die poröse Deckschicht unterlagernden teilgesättigten Schottertragschicht.

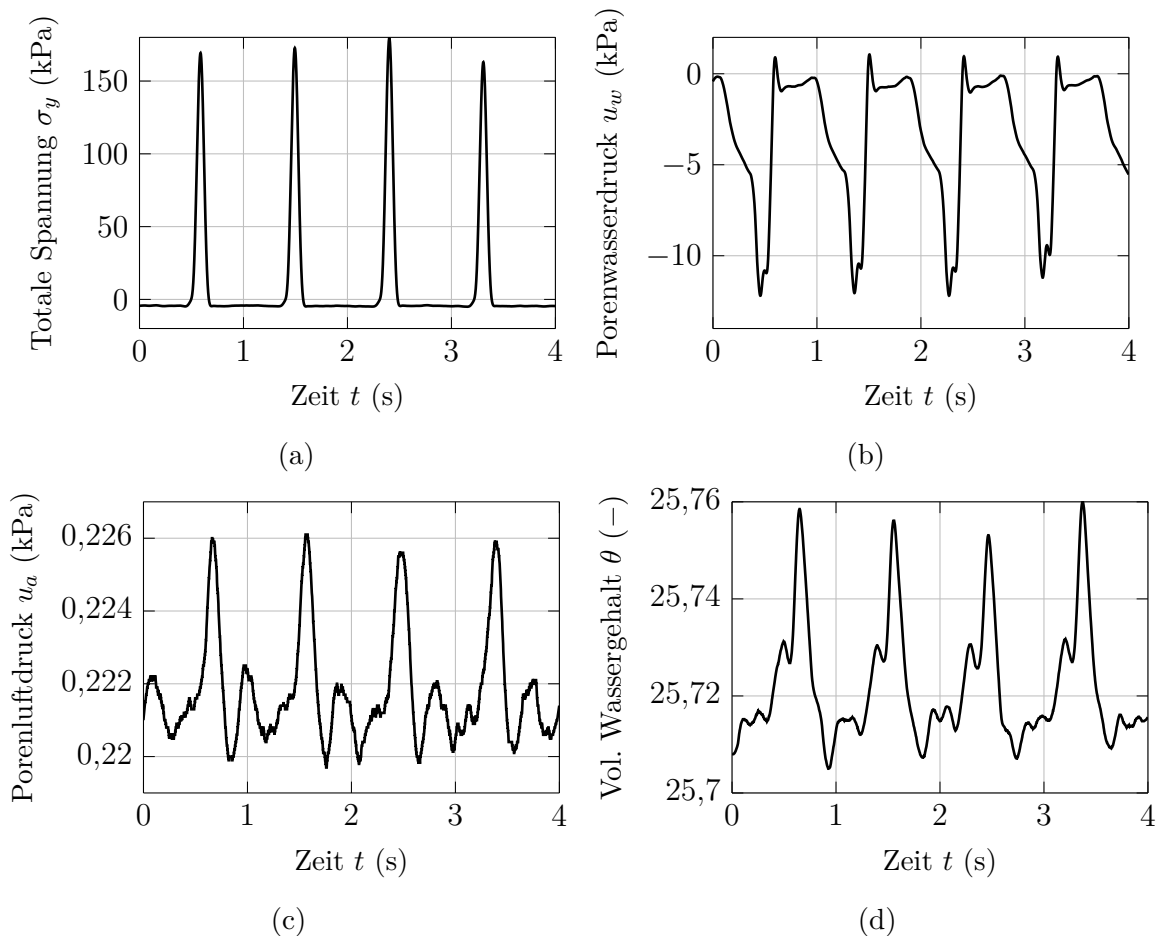


Abbildung 1.6: Änderung der hydraulisch-mechanischen Kenngrößen bei Radüberfahrten einer wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion in der Schottertragschicht, vgl. Kapitel 7.

In Abbildung 1.6 (a) sind die in die Tragschicht eingetragenen Belastungen dargestellt. Diese beeinflussen die Porenfluiddrücke, vgl. Abbildung 1.6 (a) und Abbildung 1.6 (b), sowie die Verteilung des Porenwassers, hier in Form des vol. Wassergehalts, vgl. Abbildung 1.6 (d). Die Porenwasserdrücke erfahren vergleichsweise große, die Porenluftdrücke vergleichsweise geringe Schwankungen. Der volumetrische Wassergehalt steigt bei der mit der Belastung einhergehenden Verringerung des Porenraums an. Die dargestellten Messgrößen stehen in einer Wechselwirkung, deren Bedeutung unklar und nicht ausreichend erforscht ist.

Die Veränderungen der hydraulischen Zustände können signifikante Auswirkungen auf das mechanische Verhalten der entsprechenden Geomaterialien haben. So kann es bei Belastungen mit hoher Zyklenzahl außerdem zu Akkumulationen von Porenwasserdrücken und/oder Verformungen kommen. Für baupraktische Zwecke sowie für den Betrieb von Infrastrukturobjekten ist die Kenntnis über die hydraulischen Zustände sowie die Entwässerungsfähigkeit von hoher Wichtigkeit. Mit entsprechenden Prognoseinstrumenten lassen sich Entwässerungskonzepte beurteilen und die daraus resultierende Leistung der Straßeninfrastruktur bewerten. Außerdem lassen sich Sanierungsstrategien vergleichen oder Langzeitprognosen zum Straßenmaterial- und Bodenverhalten erstellen, vgl. Dawson (2009).

Mit der vorliegenden Arbeit wird ein Beitrag zum grundlegenden Verständnis des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verformungsverhaltens granularer Geomaterialien geleistet. Der Fokus liegt hierbei auf dem nichtlinearen Be- und Entwässerungsverhalten der porösen Materialien, das durch hydraulische und/oder mechanische Beanspruchungen beeinflusst wird. In Form neuer Modellierungsansätze – speziell für die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung, der maßgebenden Kenngröße teilgesättigter Böden – werden neue Methoden entwickelt, die u. a. für die Prognose des Verformungsverhaltens teilgesättigter Tragschichten unter zyklischer Belastung herangezogen werden.

Die entwickelten und hiermit zur Verfügung stehenden Modellierungsansätze lassen sich darüber hinaus auf zahlreiche weitere Fragestellungen, wie u. a. die oben genannten, übertragen. So wird durch diese Arbeit eine realistischere Prognose der hydraulisch-mechanischen Wechselwirkungen im Rahmen zahlreicher weiterer Fragestellungen ermöglicht.

## 2 Stand der Wissenschaft

Die „Bodenmechanik“ ist eine junge angewandte Wissenschaft. Terzaghi veröffentlichte 1943 sein Werk *Theoretical Soil Mechanics*, das die Grundlagen des mechanischen Verhaltens gesättigter Böden zusammenfasst. Die der Bodenmechanik zugehörige noch jüngere Teildisziplin „Teilgesättigte Böden“ – auch „ungesättigte“ oder „quasi-gesättigte Böden“ – fand hierin nur am Rande Berücksichtigung. In den letzten Jahrzehnten wurden die experimentelle Forschung und die Weiterentwicklung numerischer Methoden in dieser Teildisziplin stetig vorangetrieben. Deutlich wird dies anhand der Zahl der Publikationen und Zitierungen mit dem Stichwort „unsaturated soils“ dargestellt in Abbildung 2.1. Ein Meilenstein ist die Publikation des Buches *Soil Mechanics for Unsaturated Soils* von D. G. Fredlund und Rahardjo im Jahr 1993, was mit einem deutlichen Anstieg der Zahl der Publikationen ab Beginn der 1990er-Jahre einhergeht.

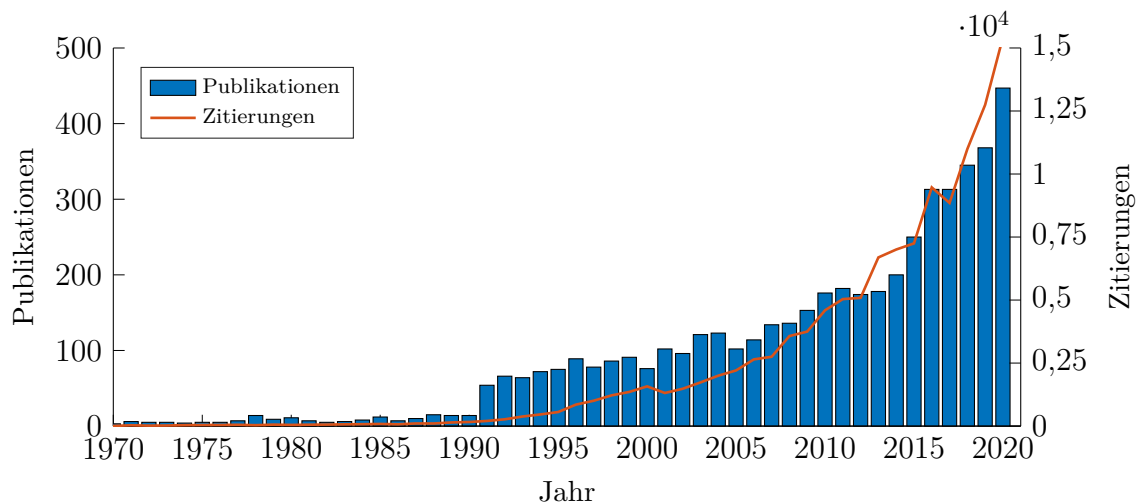


Abbildung 2.1: Anzahl von Publikationen und Zitierungen mit dem Stichwort „unsaturated soils“ zwischen 1970 und 2020. Daten aus dem Citation report from Web of Science Core Collection (1950–2020).

Die Forschungsbereiche und Anwendungsfälle, in denen Teilsättigung von Relevanz ist, sind zahlreich. Dazu zählen Entwicklungen in der Mess- und Labortechnik, Forschung in dem Bereich der Sensorik, dem Datenmanagement sowie dem Monitoring, die experimentelle Ermittlung von (teilgesättigten) Materialkennwerten, Forschung in den Bereichen geophysikalisch-chemischer Prozesse sowie nachhaltiger und biologischer Geotechnik. Auch führen variable Kapillardruck-Sättigungs-Zustände zu einer höheren Unschärfe der Bodeneigenschaften, d. h. zu einer breiteren Streuung von Materialkennwerten, was Gegenstand der aktuellen Forschung ist. Viele Forscher widmen sich der multiskaligen und

der multiphysikalischen Modellierung, gekoppelten Durchflussanalysen sowie der Simulation gekoppelter thermo-hydro-mechanischer Prozesse. Prognoseberechnungen des Wasserhaushalts, das Wassermanagement sowie die Risikobewertung von Hangversagen aber auch der in Atommüllendlagern als abdichtendes Material eingesetzte quellfähige Böden sind Bestandteile aktueller Forschung im Fachbereich teilgesättigte Böden, vgl. u. a. N. Lu und Mitchell (2019), Tan u. a. (2017), D. G. Fredlund, Rahardjo und M. D. Fredlund (2012) und N. Lu, Hoyos u. a. (2006).

Im Folgenden werden die dem Verständnis dieser Arbeit dienenden und allgemeingültigen dem Stand der Wissenschaft entsprechenden Grundlagen präsentiert sowie der thematische Rahmen gesetzt.

## 2.1 Grundlagen

### 2.1.1 Boden als Dreiphasenmedium

Der mit einer Mächtigkeit von wenigen Zentimetern bis zu mehreren Metern anstehende belebte Teil der obersten Erdkruste wird als Boden bezeichnet. Boden besteht aus verschiedensten Mineralen, die sich in Art und Größe unterscheiden, sowie einem organischen Anteil. Daneben weist Boden ein Porensystem bestehend aus Poren unterschiedlicher Größe und Form auf, das mit Wasser, darin gelöster Stoffe sowie Bodenluft gefüllt sein kann. Die festen, flüssigen und gasförmigen Phasen stehen dabei unter ständiger chemischer und physikalischer Wechselwirkungen, vgl. Amelung u. a. (2018).

Die Realität vereinfachend lässt sich ein komplexes Bodensystem auf drei Phasen reduzieren: das Korngerüst, die Wasserphase und die Luftphase. Ein derartiges dreiphasiges Bodenelement ist in Abbildung 2.2 (a) dargestellt.

Entsprechend eines kontinuumsmechanischen Ansatzes – der Theorie poröser Medien – lässt sich diese Dreiphasenmischung nach dem Konzept der Volumenanteile der Einzelphasen über das Gesamtvolumen des betrachteten Bodenelements homogenisiert annehmen, vgl. de Boer (2000). Das Phasendiagramm eines teilgesättigten Bodens ist in Abbildung 2.2 (b) dargestellt. Eine übersichtliche Zusammenfassung über den historischen Entwicklungsprozess der Theorie poröser Medien findet sich u. a. in Schümann (2015).

Die in dem Kontrollvolumen eines Bodenelements – auch representative elementary volume (REV) – vorhandenen Volumina der drei Phasen Feststoff  $V_s$  (Index  $s$  für solid), Wasser  $V_w$  (Index  $w$  für water) und Luft  $V_a$  (Index  $a$  für air) werden homogen und nicht vermischbar auf das Gesamtvolumen  $V$  verteilt. Die Teilvolumina der Phasen Wasser  $V_w$  und Luft  $V_a$  werden dem Teilvolumen  $V_v$  (Index  $v$  für void) zugeordnet.

Das in Abbildung 2.2 (a) dargestellte Bodenelement lässt sich entsprechend dem Konzept der Volumenanteile – vgl. Abbildung 2.2 (b) – demnach mittels Gleichungen 2.1 und 2.2 beschreiben.

$$V = V_s + V_v \quad (2.1)$$

$$V = V_s + V_w + V_a \quad (2.2)$$

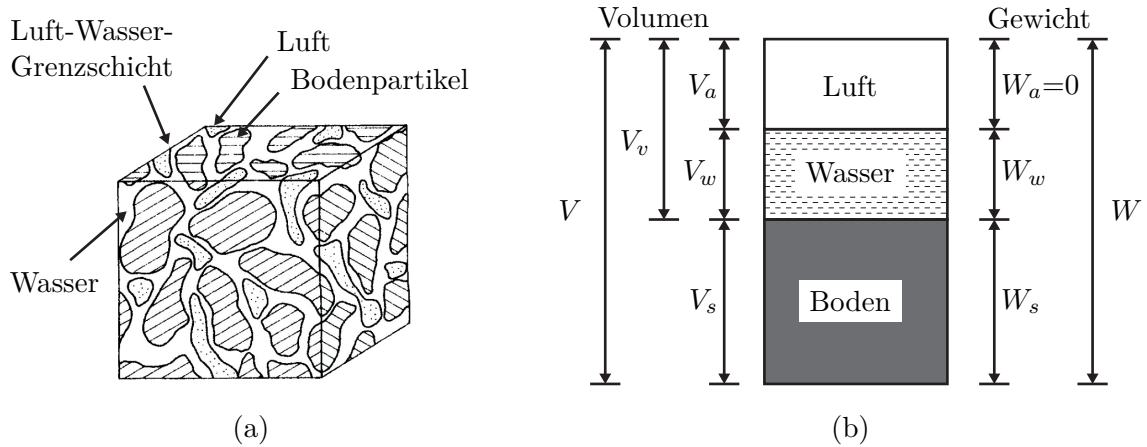


Abbildung 2.2: (a) Ein teilgesättigtes Bodenelement mit kontinuierlicher Luftphase. (b) Phasendiagramm eines teilgesättigten Bodens. Abbildungen in Anlehnung an Bear (1979).

Wird das Porenvolumen  $V_v$  auf das Gesamtvolumen  $V$  bezogen, ergibt sich die Porosität  $n$ , die in der Bodenmechanik auch als Porenanteil bezeichnet wird, vgl. Gleichung 2.3.

$$n = \frac{V_v}{V} \quad (2.3)$$

Die Porenzahl  $e$  ergibt sich aus dem Verhältnis des Porenvolumens  $V_v$  und dem Feststoffvolumen  $V_s$ , vgl. Gleichung 2.4.

$$e = \frac{V_v}{V_s} \quad (2.4)$$

Das in dieser Arbeit öfter verwendete Maß für den Verdichtungsgrad eines Bodens ist die bezogene Dichte  $I_n$ . Andere Autoren bezeichnen diese Größe auch als Lagerungsdichte  $D$ , vgl. Soos und Engel (2017). Diese Kenngröße nimmt bei lockerster Lagerung den Wert 0 bzw. 0% und bei dichtester Lagerung den Wert 1 bzw. 100% an.

$$I_n = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}} (= D) \quad (2.5)$$

Hierin sind die Porositäten  $n_{\max}$  und  $n_{\min}$  diejenigen Grenzwerte, die sich bei lockerster bzw. dichtester Lagerung einstellen. Unabhängig von der Korngrößenverteilung oder Ungleichförmigkeitszahl eines Bodens sind die bezogenen Dichten  $I_n = 0,25$ ,  $I_n = 0,50$  und  $I_n = 0,75$  nach Soos und Engel (2017) lockerer, mitteldichter bzw. dichter Lagerung zuzuordnen. Die Grenzwerte  $I_n = 0$  und  $I_n = 1$  werden unter natürlichen Bedingungen nur sehr selten erreicht.

Um den Anteil des Wassers in einem Bodenelement zu bestimmen, stehen volumenbezogene und gewichtsbezogene Größen zur Verfügung. Im Rahmen dieser Arbeit wird stets von volumenbezogenen Größen ausgegangen. Der volumetrische Wassergehalt  $\theta$  bestimmt sich aus dem Anteil des Wasservolumens  $V_w$  an dem Gesamtvolumen  $V$ , vgl. Gleichung 2.6.

$$\theta = \frac{V_w}{V} \quad (2.6)$$

Wird das Volumen des Wassers  $V_w$  auf das verfügbare Porenvolumen  $V_v$  bezogen, ergibt sich der Sättigungsgrad der Wasserphase  $S_{r,w}$ , vgl. Gleichung 2.7.

$$S_{r,w} = \frac{V_w}{V_v} \quad (2.7)$$

Auf der anderen Seite lässt sich der Sättigungsgrad der Gasphase  $S_{r,a}$  aus dem Anteil des Volumens der Luft  $V_a$  an dem Porenvolumen  $V_v$  bestimmen, vgl. Gleichung 2.8.

$$S_{r,a} = \frac{V_a}{V_v} \quad (2.8)$$

Es gilt, dass die Summe der Sättigungsgrade  $S_{r,w}$  und  $S_{r,a}$  stets 1 beträgt. Weiterhin gilt im Rahmen dieser Arbeit, dass – sofern nicht anders angegeben – mit dem Term Sättigungsgrad der Sättigungsgrad  $S_{r,w}$  gemeint ist, der vereinfachend, im Einklang mit der Fachliteratur als  $S_r$  bezeichnet wird.

Die homogenisierte Dichte des aus drei über das betrachtete Bodenelement verteilten Phasen beschreibt die Feuchtdichte  $\rho$ , vgl. Gleichung 2.9.

$$\rho = \rho_s(1 - n) + (\rho_w S_{r,w} + \rho_a S_{r,a})n \quad (2.9)$$

Hierin sind  $\rho_s$  die Korndichte des Feststoffs und  $\rho_w$  und  $\rho_a$  die Partialdichten des Wassers bzw. der Luft.

Eine Zusammenstellung weiterer in der Geotechnik gängiger bzw. speziell für die teilgesättigte Bodenmechanik eingeführter Größen, die sich aus den vorangegangenen errechnen lassen oder als Hilfsmittel dienen können, finden sich z. B. in Kolymbas (2016) und D. G. Fredlund und Rahardjo (1993).

## 2.1.2 Physikalisches Verhalten teilgesättigter Böden

### 2.1.2.1 Hydraulisches Verhalten teilgesättigter Böden

Das unterhalb der Geländeoberkante vorhandene Wasser lässt sich in vertikale Zonen einteilen. Es ergeben sich eine auch als Grundwasserzone bezeichnete gesättigte Zone, deren Porenraum vollständig mit Wasser gefüllt ist, und eine auch als Grundwasserüberdeckung bezeichnete teilgesättigte Zone, in deren Porenraum sowohl Wasser als auch Gase – hauptsächlich Luft und Wasserdampf – enthalten sein können. Die gesättigte Zone formt sich oberhalb einer undurchlässigen Schicht und ist durch den Wasserspiegel von der teilgesättigten Zone getrennt. Dabei entspricht der auf dem Wasserspiegel herrschende Luftdruck dem der Atmosphäre. Die teilgesättigte Zone oberhalb des Wasserspiegels lässt sich in drei Unterzonen einteilen: die Bodenwasserzone, eine Zwischenzone und den Kapillarsaum. Der Sättigungsgrad der Bodenwasserzone hängt weitestgehend mit dem saisonalen und täglichen Wechsel von Niederschlag, sonstiger Bewässerung, Lufttemperatur und der Luftfeuchte zusammen. Einerseits kann sich Wasser auf der Geländeoberkante aufstauen und zu voller Sättigung der Bodenwasserzone führen. Andererseits können lange Trockenphasen auch zu Bodenwasserzonen mit sehr geringem Sättigungsgrad führen. Die

Zwischenzone verbindet die Bodenwasserzone und den Kapillarsaum. In der Zwischenzone ist der Porenraum nur temporär mit versickerndem Niederschlagswasser gefüllt. Oberhalb des Wasserspiegels bildet sich der Kapillarsaum. In diesem Bereich kommt es aufgrund kapillarer Effekte zu einem Aufstieg des Grundwassers. Hierbei ist die aufsteigende Höhe des Wassers stark von den granulometrischen Eigenschaften des Bodens abhängig. Die kapillare Aufstiegshöhe variiert je nach Bodenart zwischen null und bis zu mehreren Metern. Mit zunehmendem Feinkornanteil eines Bodens erhöht sich die kapillare Steighöhe, vgl. Bear (1979). Die beschriebenen Bodenzonen sind in Abbildung 2.3 (b) dargestellt. Daneben ist in Abbildung 2.3 (a) die idealisierte Porenwasserdruckverteilung – positives Vorzeichen unterhalb, negatives Vorzeichen oberhalb des Grundwasserspiegels – in der gesättigten bzw. der teilgesättigten Bodenzone dargestellt.

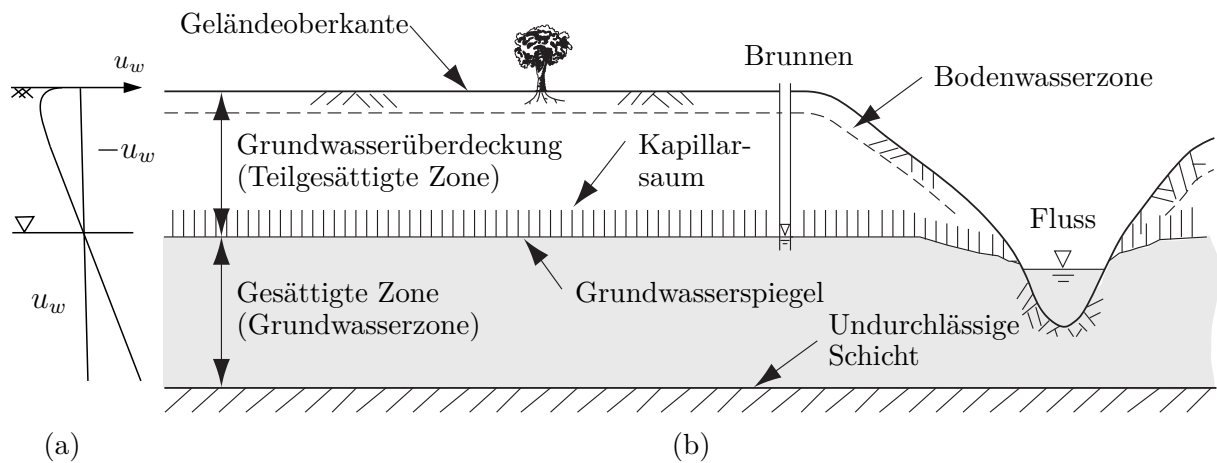


Abbildung 2.3: (a) Porenwasserdruckverteilung in Anlehnung an Murray und Sivakumar (2010) und (b) Verteilung des Untergrundwassers in Anlehnung an Bear (1979).

Der Boden in der teilgesättigten Zone ist ein komplexes Mehrphasensystem, dessen hydraulische und mechanische Eigenschaften sich von denen eines trockenen oder vollständig gesättigten Bodens unterscheiden. Maßgebend für die Beschreibung der teilgesättigten Bodeneigenschaften ist die sog. Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung. Diese beschreibt den fundamentalen Zusammenhang zwischen dem volumenbezogenen Sättigungsgrad und der in diesem Volumen herrschenden Saugspannung.

**2.1.2.1.1 Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung** Das hydraulische sowie das mechanische Verhalten teilgesättigter Böden hängt direkt von der im Boden herrschenden Saugspannung ab. Nach Murray und Sivakumar (2010) setzt sich die sog. totale Saugspannung  $\Psi$  aus zwei Komponenten zusammen: dem Matrixpotenzial  $\psi_m$  und dem osmotischen Potenzial  $\psi_o$ , vgl. Gleichung 2.10.

$$\Psi = \psi_m + \psi_o \quad (2.10)$$

Das Matrixpotenzial  $\psi_m$  ist die Differenz zwischen Porenluftdruck  $u_a$  und Porenwasserdruck  $u_w$ . Die Differenz des chemischen Ungleichgewichts zwischen Porenwasser und externem Wasser wird als das sog. osmotische Potenzial  $\psi_o$  bezeichnet. Diese Differenz in der

Salzkonzentration eines betrachteten Systems und des umliegenden Wassers kann einen Einfluss auf die hydraulischen und mechanischen Eigenschaften eines Bodens haben, vgl. Kelly und Selker (2001). Vereinfachend wird das osmotische Potenzial im Rahmen dieser Arbeit vernachlässigt.

Das Matrixpotenzial  $\psi_m$  vereint alle durch die Bodenmatrix auf das Wasser ausgeübten Einwirkungen und ist demnach maßgeblich durch die Kapillarität der Poren beeinflusst. Zusätzlich haben Oberflächenadsorptionseffekte der Körner einen Einfluss auf die Saugspannung  $s$ , wie das Matrixpotenzial  $\psi_m$  auch bezeichnet wird. Es besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Oberflächenspannung des Wassers und der Kapillarität. An der Grenzfläche zwischen Wasser und Luft bilden sich sog. Menisken, vgl. Abbildung 2.4. Bei Gleichgewicht gilt Gleichung 2.11.

$$s = (u_a - u_w) = \frac{2T_c}{R} \quad (2.11)$$

Hierin sind  $(u_a - u_w) = \rho_w g h_c$ , mit der Dichte des Wassers  $\rho_w$ , der Erdbeschleunigung  $g$  und der kapillaren Steighöhe  $h_c$ ,  $T_c$  die Oberflächenspannung und  $R = r_t / \cos(\theta)$  der Radius der Krümmung des Meniskus, mit dem Radius des kapillaren Röhrchens  $r_t$  sowie dem Winkel zwischen der Grenzfläche Luft/Wasser und der Wand des kapillaren Röhrchens  $\theta$ .

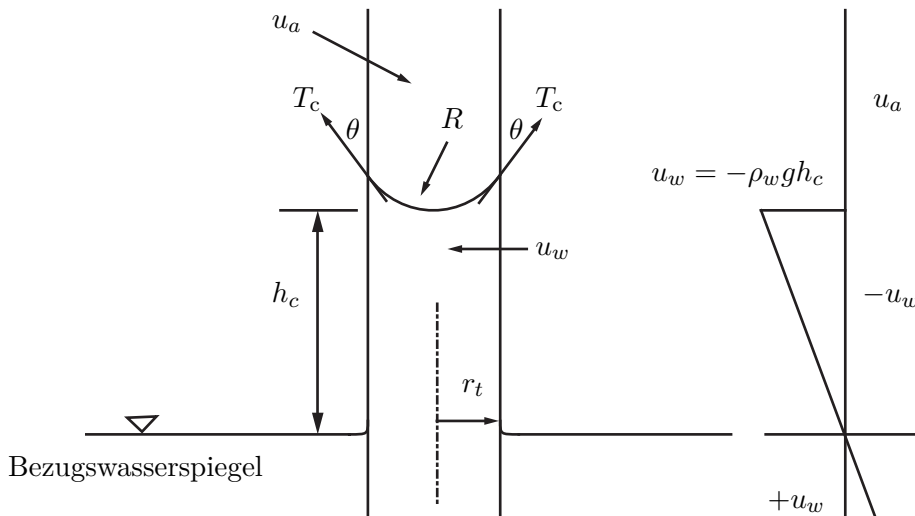


Abbildung 2.4: Physikalisches Modell der Kapillarität in Anlehnung an Murray und Sivakumar (2010) und D. G. Fredlund und Rahardjo (1993).

Die Beziehung zwischen dem Sättigungsgrad und der Saugspannung wird als Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung bezeichnet. Auf der Abszissenachse wird üblicherweise die Saugspannung  $s$  aufgetragen. Alternativen sind logarithmierte Formen der Saugspannung, wie z. B.  $\ln(1 + s)$  oder der pF-Wert, oder andere Druckeinheiten, wie z. B. die negative Wassersäule ( $-\text{cmH}_2\text{O}$ ). Auf der Ordinatenachse wird üblicherweise der tatsächliche Sättigungsgrad  $S_r = \theta / \theta_{\max}$  aufgetragen. Gängige Alternativen sind z. B. der effektive Sättigungsgrad  $S_e$ , der volumetrische Wassergehalt  $\theta$  oder der gravimetrische Wassergehalt  $w$ .

Die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung wird u. a. herangezogen, um die hydraulische Leitfähigkeit, die Scherfestigkeit, die Volumenänderung und die Wasserdiffusionsfunktionen teilgesättigter Böden zu prognostizieren, vgl. D. G. Fredlund und Rahardjo (1993), Vanapalli u. a. (1996), Barbour (1998), Pham u. a. (2005) und D. G. Fredlund, Rahardjo und M. D. Fredlund (2012).

In der Bodenkunde wird die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung auch als Wassergehaltskurve oder der pF-Kurve bezeichnet. Der pF-Wert entspricht dem dekadischen Logarithmus des Betrages des Matrixpotenzials:  $pF = \log_{10}|\psi_m| \approx \log_{10}|\text{cmH}_2\text{O}|$ . Ein höherer pF-Wert beschreibt einen trockeneren Boden, d. h. einen Boden mit geringerem Sättigungsgrad. In der englischsprachigen Literatur finden sich die Begriffe „soil-water characteristic curve“ (SWCC) oder „water-retention curve“ (WRC). In Anlehnung an den englischsprachigen Begriff wird die Abkürzung SWCC an einigen Stellen in dieser Arbeit abkürzend für den Begriff Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung verwendet.

In Abbildung 2.5 sind die Verläufe der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung für typische Bodenarten dargestellt. Die zugrunde liegenden Daten wurden aus einer Datenbank entnommen bzw. selbst erhoben. Ton: Datensatz UNSODA 2362, Lehm: Datensatz UNSODA 4800, Sand: eigene Datenerhebung (Hamburger Sand). UNSODA 2.0 ist eine Datenbank des US Salinity Laboratory für teilgesättigte hydraulische Eigenschaften und andere Bodeninformationen für eine Vielzahl von Böden, vgl. Nemes u. a. (2015). Die verschiedenen Kurvenverläufe begründen sich durch die unterschiedliche Porengrößenverteilung und damit verbunden mit den verschiedenen Lufttrittspunkten der Böden, vgl. hierzu Abbildung 2.7. Wesentlichen Einfluss auf die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung haben im Allgemeinen die Korngrößenverteilung und das Bodengefüge, d. h. die räumliche Anordnung der festen Bodenbestandteile sowie relativen Gewichtsanteile verschiedener Korngrößen.

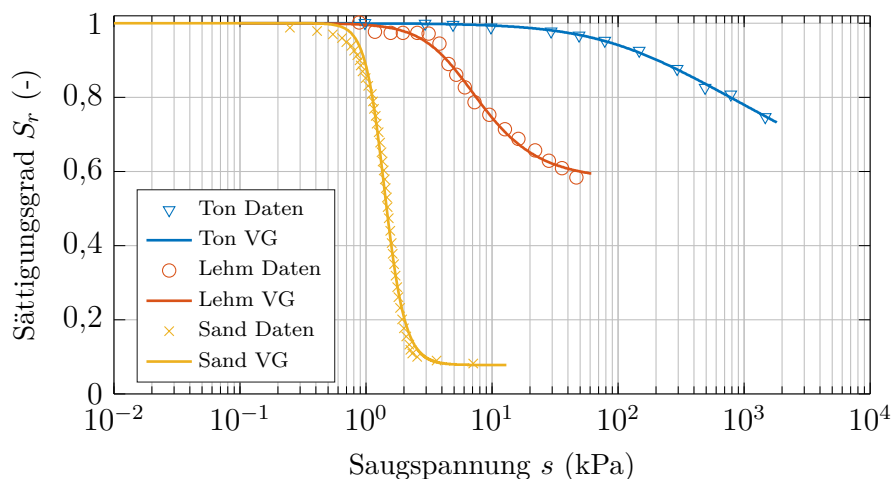


Abbildung 2.5: Verläufe der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung (SWCC) für typische Bodenarten mit Kurvenanpassungen nach van Genuchten (1980).

Weiterhin wird in Abbildung 2.5 deutlich, dass sich bei gleicher Saugspannung der herrschende Sättigungsgrad der Böden unterscheiden kann. So fühlen sich bei einer Saugspannung von  $s = 10$  kPa Sand nass, Lehm feucht und Ton trocken an. Die unterschiedliche

Bindungsstärke des Wassers in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung beruht auf der Zunahme der adsorbierenden Oberfläche und der Abnahme des mittleren Porendurchmessers, vgl. Amelung u. a. (2018).

**2.1.2.1.2 Hydraulische Hysterese der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung** Eine Eigenschaft teilgesättigter Böden ist die Abhängigkeit des Retentionsverhaltens von dem Vorzeichen der Änderung des Wassergehalts bzw. der Saugspannung. Wird einem Bodenelement Wasser zu- oder abgeführt, beeinflusst dies den sich einstellenden Kapillardruck-Sättigungs-Zustand. Je nach Bewegungsrichtung des Fluids beschreibt die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung Entwässerungskurven – auch Desorptionskurven – und Bewässerungskurven – auch Sorptionskurven. Zwischen diesen beiden Hauptkurven treten z. B. bei Richtungswechsel der hydraulischen Belastung schleifenartige Übergänge zwischen den Hauptkurven – sog. Scanning-Kurven – auf, vgl. Haines (1930), Jaynes (1984), Pham u. a. (2005) und Han u. a. (2019). Es wird weiterhin zwischen Scanning ausgehend von einem Entwässerungspfad – Drying Scanning – und Scanning ausgehend von einem Bewässerungspfad – Wetting Scanning – unterschieden. Dieses nichtlineare Verhalten wird als hydraulische Hysterese bezeichnet. Als Ursache der hydraulischen Hysterese lassen sich die folgenden Phänomene identifizieren:

- Der sog. Tintenfasseneffekt – ink-bottle effect – entsteht dadurch, dass bei Bewässerung, d. h. bei Abnahme der Saugspannung, schmaler Porenkanäle der Radius der Krümmung der Wasser/Luft-Grenzfläche größer ist, als bei einer vorangegangenen Entwässerung. Bei Überschreiten eines schmaleren Hohlraumbereiches wird die Saugspannung aufgrund des kleineren Krümmungsradius lokal wieder zunehmen, vgl. Bear (1979). Dieser Effekt ist in Abbildung 2.6 (a) illustriert.
- Der sog. Regentropfeneffekt – raindrop effect – begründet sich dadurch, dass sich der Kontaktwinkel zwischen einem Bodenpartikel und der fortschreitenden Wasser/Luft-Grenzfläche bei Bewässerung von dem Kontaktwinkel zwischen Bodenpartikel und der rückschreitenden Wasser/Luft-Grenzfläche bei Entwässerung unterscheidet, vgl. Bear (1979) und Haines (1930). Die zugehörigen Kontaktwinkel  $\theta_{c,max}$  für Bewässerung und  $\theta_{c,min}$  für Entwässerung sind in Abbildung 2.6 (b) dargestellt.
- Lufteinschlüsse im Porenraum vermeintlich vollständig mit Wasser gesättigter Böden führen zu maximalen Sättigungsgraden unter 100%. Die im Boden eingeschlossene Luft kann nach Brooks und Corey (1964) sehr langsam aus dem Boden diffundieren, sodass der Sättigungsgrad des Bodens wieder den maximalen Sättigungsgrad von 100% anstrebt. Laut Bear (1979) kann die Luft auch durch Grundwasserströmungen wieder aus dem Boden hinaus gespült werden. Das Phänomen ist in Abbildung 2.6 (c) abgebildet.
- Die thixotrope Rückbildung oder Alterung – überwiegend bindiger Böden – aufgrund der hydraulischen Belastungsgeschichte, vgl. Klausner (1991).

In Abbildung 2.7 ist der typische Verlauf der durch die hydraulische Hysterese geprägten Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Bezeichnung der jeweiligen hydraulischen Pfade dargestellt. Zu erkennen sind die primären Hauptpfade für Ent- und Bewässerung. Diese Pfade begrenzen mögliche Saugspannungs-Sättigungs-Zustände. Zudem sind der maxima-

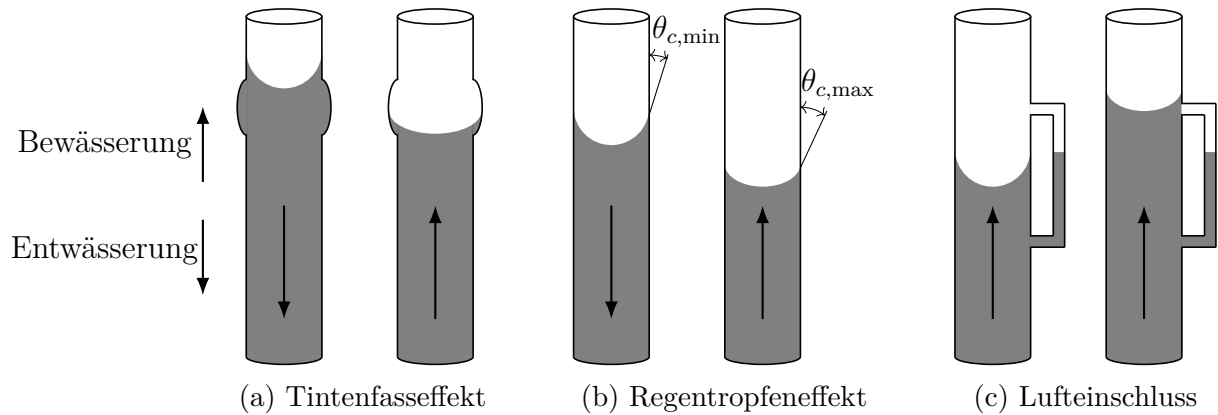


Abbildung 2.6: Der hydraulischen Hysterese zugrunde liegende Phänomene. Abbildung in Anlehnung an Caicedo (2018).

le Sättigungsgrad  $S_{r,max}$ , der sich durch den Lufteinschluss einstellende Sättigungsgrad  $S_{r,entrap}$ , der sich bei residuellen Bedingungen einstellende Sättigungsgrad  $S_{r,min}$  sowie der Sättigungsgrad  $S_{r,0}$ , der sich bei vollständig trockenen Bedingungen einstellt, gekennzeichnet. Die zwischen diesen hydraulischen Pfaden liegenden, sich bei Änderung der hydraulischen Belastungsrichtung einstellenden Scanning-Pfade sind ebenfalls dargestellt.

Weitere Eigenschaften der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung sind der Lufteintrittspunkt  $s_{AEV}$  (Index AEV für air entry value) und der Wassereintrittspunkt  $s_{WEV}$  (Index WEV für water entry value). Der Lufteintrittspunkt hängt von der Größe der Pore mit dem maximalen Durchmesser ab, der Wassereintrittspunkt, der mit der residuellen Saugspannung korrespondiert, liegt bei einer kontinuierlichen Wasserphase vor, vgl. Caicedo (2018).

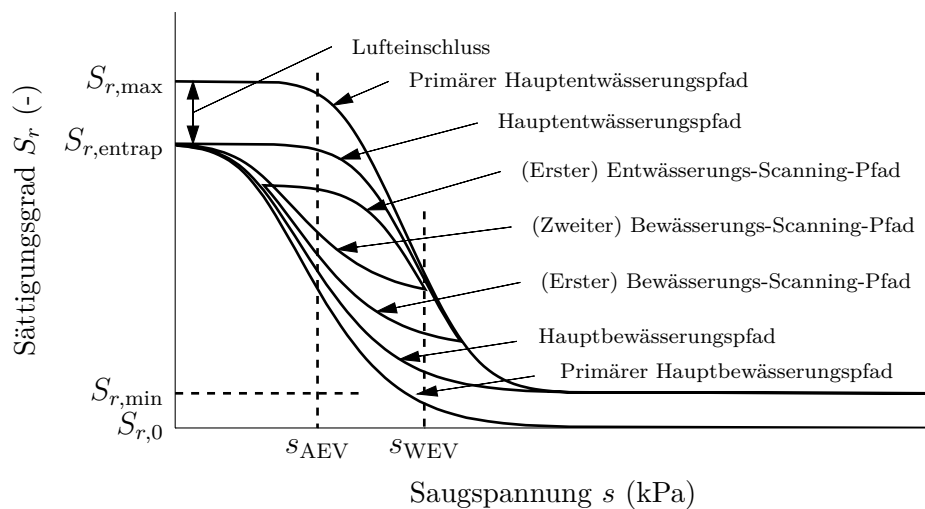


Abbildung 2.7: Bezeichnungen der hydraulischen Pfade der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese. Abbildung in Anlehnung an Pham u. a. (2005).

Der hysteretische Charakter der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung ist seit langem bekannt. Dennoch mangelt es in den angewandten Wissenschaften aufgrund des komplexen hydraulischen Verhaltens an Routineanwendungen. In Fragestellungen des Ingenieurwesens oder in der Landwirtschaft in denen die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung Berücksichtigung findet, bleibt die hydraulische Hysterese oft vereinfachend unberücksichtigt, wobei zumeist der Entwässerungspfad stellvertretend für die gesamte Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung angesetzt wird. Die Messungen eines kompletten Datensatzes inklusive Scanningpfaden sind zudem zeit- und kostenintensiv. Außerdem ist die Überführung der Ergebnisse in eine praktikable mathematische Form für die weitere Verwendung komplex, da keine komfortablen Methoden zur Verfügung stehen, vgl. Pham u. a. (2005).

In Abbildung 2.8 werden beispielhafte Verläufe der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit hydraulischer Hysterese ausgewählter granularer Böden präsentiert. Bei den Daten in Abbildung 2.8 (a) und (b) handelt es sich um punktuell erhobene Daten, bei den Daten in Abbildung 2.8 (c) und (d) um kontinuierlich ermittelte Daten. Die Böden weisen unterschiedliche Lufteintrittspunkte, unterschiedliche Anteile eingeschlossener Luft sowie unterschiedliche residuelle Sättigungszustände auf. Als Gemeinsamkeit lässt sich das ausgeprägt nichtlineare hydraulische Materialverhalten identifizieren.

Darüber hinaus hat die Volumenänderung des Porenraums eines Bodens, z. B. aus Kompression oder Auflockerung des Korngerüsts, einen direkten Einfluss auf die Kapillarität. Dies resultiert somit in einem weiteren Einflussfaktor auf die Nichtlinearität der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung, vgl. Han u. a. (2019). Die sich hieraus ergebenden Zusammenhänge im Kapillardruck-Sättigungs-Porenzahl-Raum werden auch als „soil-water characteristic surfaces“ (SWCS) bezeichnet, vgl. u. a. Gallipoli u. a. (2003), Mbonimpa u. a. (2006), Tarantino (2009), Tsiampousi u. a. (2013) und Milatz (2016). Für die Darstellung bzw. Modellierung der SWCS finden sich für die dritte, dem Porenvolumen zugehörige Dimension in der Literatur u. a. die Porosität  $n$ , die Porenzahl  $e$  oder das spezifische Volumen  $\nu$ . Theoretisch lässt sich die SWCS über jede volumenbezogene Größe zur Beschreibung des Verdichtungsgrads auftragen. Zur Verdeutlichung der SWCS ist die in Han u. a. (2019) präsentierte Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese aufgetragen über gemessene Porenzahlen  $e$  beispielhaft in Abbildung 2.9 dargestellt. Zu erkennen sind drei hydraulische Pfade: der primäre Hauptentwässerungspfad, ein Bewässerungs-Scanning-Pfad und ein Entwässerungs-Scanning-Pfad.

**2.1.2.1.3 Wasserdurchlässigkeit im teilgesättigten Zustand** Gemäß Darcy ist die Strömung im wassergesättigten Zustand durch ein poröses Medium proportional zur Differenz der hydraulischen Höhe  $\Delta h$  entlang des Wegs  $\Delta l$ , vgl. Darcy (1856). Die Proportionalitätskonstante in dem eindimensionalen Gesetz nach Darcy ist die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit  $k_f$ . Sie wird auch als Durchlässigkeitsbeiwert oder -koeffizient bezeichnet. Die hydraulische Leitfähigkeit ist abhängig von dem Bodengefüge, der Korngrößenverteilung, der Kontinuität der Poren, im Boden befindlichen Rissen, von dem Organikanteil sowie dem Anteil eingeschlossener Luft. Allgemein weisen granulare Böden eine höhere Durchlässigkeit auf als bindige Böden. Hierbei kann der Durchlässigkeitsbeiwert für verschiedene

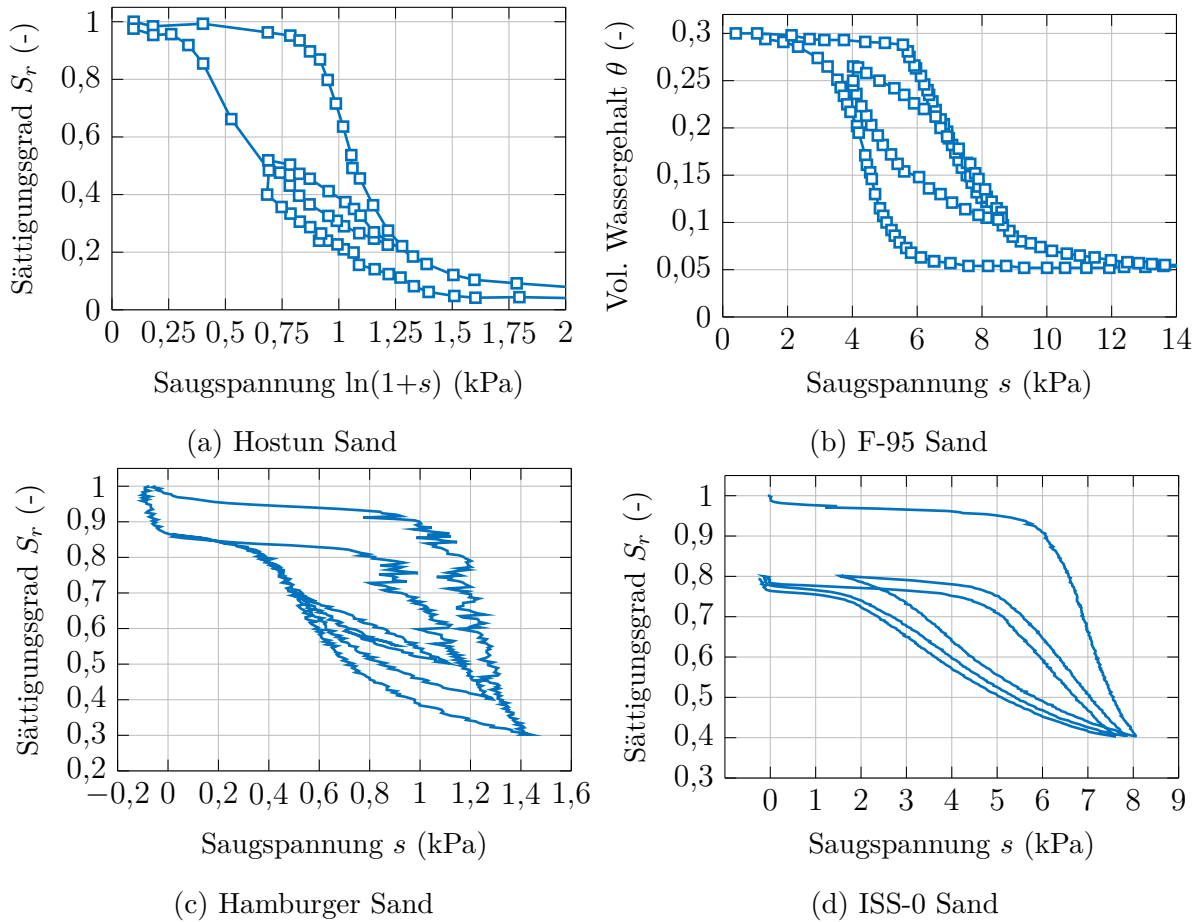


Abbildung 2.8: Verläufe der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit hydraulischer Hysterese ausgewählter granularer Böden: (a) Hostun Sand aus Lins u. a. (2007), (b) US Silica F-95 Sand aus Muraleetharan u. a. (2009), (c) Hamburger Sand (eigene Daten) und (d) ISS-0 Sand (eigene Daten).

Bodenarten um mehrere Zehnerpotenzen variieren vgl. Amelung u. a. (2018). Das Gesetz nach Darcy ist in Gleichung 2.12 zusammengefasst.

$$\frac{Q}{A} = q = v_f = -k_f \frac{\Delta h}{\Delta l} = -k_f i \quad (2.12)$$

Hierin sind  $Q$  ( $\text{cm}^3/\text{s}$ ) die Durchflussrate,  $A$  ( $\text{cm}^2$ ) die Querschnittsfläche,  $q$  ( $\text{m}/\text{s}$ ) der flächenbezogene Durchfluss – auch Filtergeschwindigkeit  $v_f = k_f$  ( $\text{cm}/\text{s}$ ) die gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit,  $\Delta h$  ( $\text{cm}$ ) die Differenz der hydraulischen Höhe,  $\Delta l$  ( $\text{cm}$ ) die Fließlänge und  $i$  ( $-$ ) der hydraulische Gradient.

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit  $k_f$  kann auch als intrinsische Permeabilität  $K$  ausgedrückt werden, vgl. Gleichung 2.13.

$$K = k_f \frac{\mu}{\rho_w g} \quad (2.13)$$

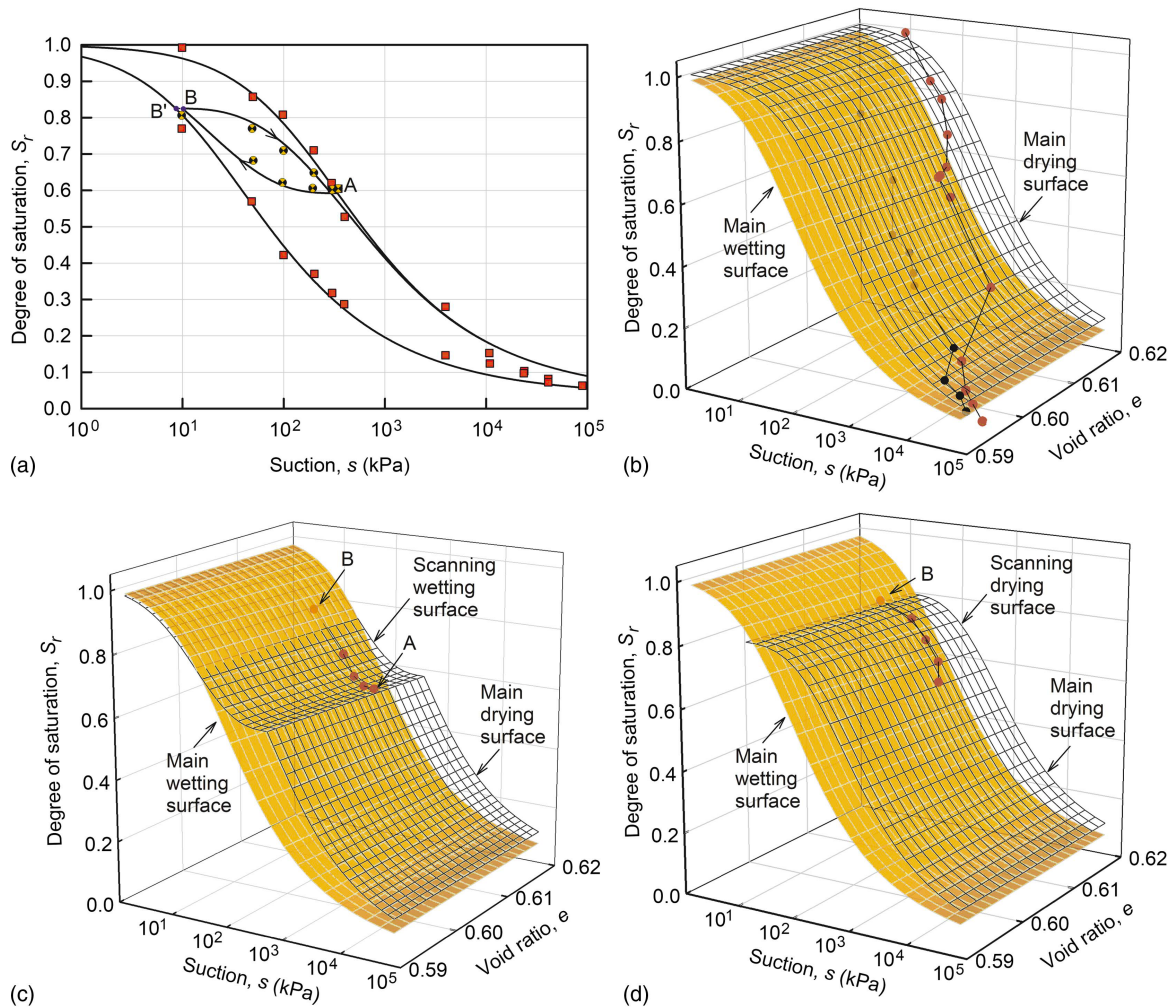


Abbildung 2.9: Auf Viadana-Schluff aufgebrachter hydraulischer Belastungspfad, vgl. Azizi u. a. (2017). (a) SWCC, (b) primäre Haupt-SWCS, (c) Bewässerungs-Scanning-SWCS und (d) Entwässerungs-Scanning-SWCS. Modifizierte Abbildung entnommen aus Han u. a. (2019).

Hierin sind  $K$  ( $\text{m}^2$ ) die intrinsische Permeabilität,  $k_f$  ( $\text{m/s}$ ) die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit,  $\mu$  ( $\text{kg}/(\text{ms})$ ) die dynamische Viskosität des Fluids,  $\rho_w$  ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) die Dichte des Fluids sowie  $g$  ( $\text{m}/\text{s}^2$ ) die Erdbeschleunigung.

Hierdurch werden der Einfluss der Dichte und der Viskosität des Fluids auf die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit  $k_f$  deutlich. Die intrinsische Permeabilität  $K$  eines Bodens ist von den Eigenschaften des Fluids unabhängig und steht lediglich mit den Eigenschaften des durchströmten porösen Mediums in Zusammenhang, vgl. D. G. Fredlund und Rahardjo (1993).

Die hydraulische Leitfähigkeit eines teilgesättigten Bodens weicht je nach Spannungszustand oder Sättigungsgrad des Bodens von der hydraulischen Leitfähigkeit eines gesättigten Bodens ab. Teilgesättigte Zustände haben einen Einfluss auf die Durchlässigkeiten der im Porenraum befindlichen Fluide. So beeinflussen die partiellen Sättigungsgrade der

Porenfluide  $S_{r,w}$  (Index w für water) und  $S_{r,a}$  (Index w für air) die Strömungen der beiden Fluidphasen. Dieser Einfluss lässt sich in Form von Funktionen des Sättigungsgrads oder der Saugspannung ausdrücken. Zur Bestimmung der teilgesättigten hydraulischen Leitfähigkeit  $k_u$  wird die relative Durchlässigkeit  $k_r$  eingeführt, die einen Gewichtungsfaktor zwischen 0 und 1 darstellt. Dieser wird zur Gewichtung der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit  $k_f$  herangezogen, vgl. D. G. Fredlund, Rahardjo und M. D. Fredlund (2012) und Schümann (2015). Ansätze zur Modellierung der hydraulischen Leitfähigkeiten finden sich in Kapitel 5.2.2.

### 2.1.2.2 Mechanisches Verhalten teilgesättigter Böden

Die Scherfestigkeit bestimmt die Stabilität geotechnischer Konstruktionen. So hängt die Stabilität einer Böschung z. B. von der Scherfestigkeit des Erdbaumaterials ab, vgl. Kolymbas (2016). Teilgesättigte Zustände können durch Scherfestigkeitssteigerungen einen Beitrag zur Langlebigkeit geotechnischer Konstruktionen beitragen, vgl. Caicedo (2018).

Die Steigerungen der Scherfestigkeit teilgesättigter Böden resultiert aus den oben beschriebenen Wassermensiken zwischen den einzelnen Körnern. Diese bewirken durch die Oberflächenspannung einen zusammenhaltenden Effekt, der wiederum in einer Normalkraft zwischen den Einzelkörnern resultiert. Über Reibung wird so eine Scherfestigkeit erzeugt, die als Kapillarkohäsion bezeichnet wird. Da dieser Effekt für vollständig gesättigte bzw. trockene Böden verschwindet, wird sie auch als scheinbare Kohäsion betitelt, vgl. Kolymbas (2016) sowie DIN 18137-1:2010-07. Gemäß den Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ (EAB) (2021) sowie den Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen EAU (2020) darf die Kapillarkohäsion granularer Böden bei der Bemessung von Baugruben bzw. Ufereinfassungen für Bauzustände angesetzt werden, sofern ein Austrocknen oder Überfluten des Baugrundes bauzeitlich ausgeschlossen werden kann. Für die Baupraxis sind hierzu Erfahrungswerte angegeben.

Das Prinzip der effektiven Spannungen nach Terzaghi (1936) besagt, dass für die Festigkeit eines Bodens lediglich die effektive Spannung und nicht der Porenwasserdruck maßgebend ist. Eine auf ein wassergesättigtes Korngerüst aufgebrachte äußere Belastung ( $\sigma =$  totale Spannung) teilt sich, den Drainagebedingungen entsprechend, anteilig auf das Korngerüst ( $\sigma' =$  effektive Spannung) und den Porenwasserdruck  $u_w$  auf.

$$\sigma' = \sigma - u_w \quad (2.14)$$

Um die beschriebenen zusammenhaltenden Effekte teilgesättigter granularer Böden in der Formulierung der effektiven Spannungen zu berücksichtigen, wird in Bishop (1959) ein entsprechender Ansatz vorgelegt. Hierbei wird der Porenwasserdruck  $u_w$  in Gleichung 2.14 durch den mit einem Skalierungsfaktor  $\chi$  versehenen Kapillardruck  $u_a - u_w$  ersetzt. Der dimensionslose Skalierungsfaktor wird auch als Bishop-Parameter bezeichnet. Weiterhin werden in der effektiven Spannung nach Bishop die totale Spannung und der Porenluftdruck berücksichtigt, vgl. Gleichung 2.15.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) + \chi(u_a - u_w) \quad (2.15)$$

Eine Eigenschaft der Gleichung 2.15 ist, dass sie auf die Form der effektiven Spannung von Terzaghi, vgl. Gleichung 2.14, reduziert werden kann und damit mit dem ursprünglichen Ansatz der effektiven Spannungen kompatibel ist. Hierzu ist der Skalierungsfaktor für gesättigten Boden mit  $\chi = 1$  bzw. für trockene Böden mit  $\chi = 0$  anzusetzen. Für teilgesättigte Zustände zwischen diesen Grenzen wird von Bishop kein funktionaler Zusammenhang für  $\chi$  definiert. Dieser ist Teil aktueller Forschung, vgl. Khalili und Khabbaz (1998), Khalili, Geiser u. a. (2004), N. Lu, Godt u. a. (2010), Milatz (2016) und N. Lu (2020), und steht oftmals in Zusammenhang mit dem Sättigungsgrad  $S_r$ .

Gemäß N. Lu und C. Zhang (2019) und C. Zhang und N. Lu (2019) bleibt in der effektiven Spannungsformulierung nach Bishop die durch Adsorptionskräfte verursachte Spannung zwischen den Bodenpartikeln unberücksichtigt, da diese nicht in Form des Kapillardrucks  $u_a - u_w$  ausgedrückt werden kann.

Das in N. Lu und Likos (2004) und N. Lu und Likos (2006) beschriebene sog. Suction-Stress-Konzept verfolgt das Ziel, sämtliche das Korngerüst zusammenhaltende Effekte, die auf teilgesättigte Zustände zurückzuführen sind, in einer Spannungsgröße, der sog. Suction-Stress  $\sigma_s$ , zusammenzufassen. Durch Modifikation des Beitrags des Sättigungsgrads zur effektiven Spannung, wird diese im Rahmen des Suction-Stress-Konzepts mit Gleichungen 2.16, 2.17 und 2.18 beschrieben.

$$\sigma' = (\sigma - u_a) - [-S_e(u_a - u_w)] \quad (2.16)$$

$$= (\sigma - u_a) - \left[ -\frac{S_r - S_{r,\min}}{S_{r,\max} - S_{r,\min}}(u_a - u_w) \right] \quad (2.17)$$

$$= (\sigma - u_a) - \sigma_s \quad (2.18)$$

Die in Abbildung 2.10 für drei Bodenarten abgebildeten Kapillardruck-Sättigungs-Beziehungen lassen sich über den Zusammenhang  $\sigma_s = -S_e(u_a - u_w)$  in die Suction-Stress-Characteristic-Curve überführen. Hierbei ist die mit einem negativen Vorzeichen angegebene Spannungseinheit  $-kPa$  zu beachten. Die Suction-Stress  $\sigma_s$  lässt sich über die Saugspannung oder über den effektiven Sättigungsgrad darstellen, vgl. Abbildung 2.5. Der bereits für die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung demonstrierte Einfluss der granulometrischen Eigenschaften auf das hydraulische Verhalten verdeutlicht sich hier für die Suction-Stress  $\sigma_s$ . So lassen sich die charakteristischen Verläufe der dargestellten Kurven als Einflüsse teilgesättigter Zustände auf die effektiven Spannungen interpretieren. Für den dargestellten Sand liegen die Einflüsse hier im Bereich weniger  $kPa$ , für den Lehm Boden bei rd.  $10 kPa$ . Für den dargestellten Ton wächst die Suction-Stress bis zu mehrere Zehnerpotenzen an, wobei diese keinen ausgeprägten Extremwert aufweist. So ist bei Saugspannung  $s = 0 kPa$  die Suction-Stress, wie bei den anderen beiden Böden,  $\sigma_s = 0$ . Bei Zunahme der Saugspannung nimmt die Suction-Stress hingegen stetig zu, vgl. N. Lu, Godt u. a. (2010).

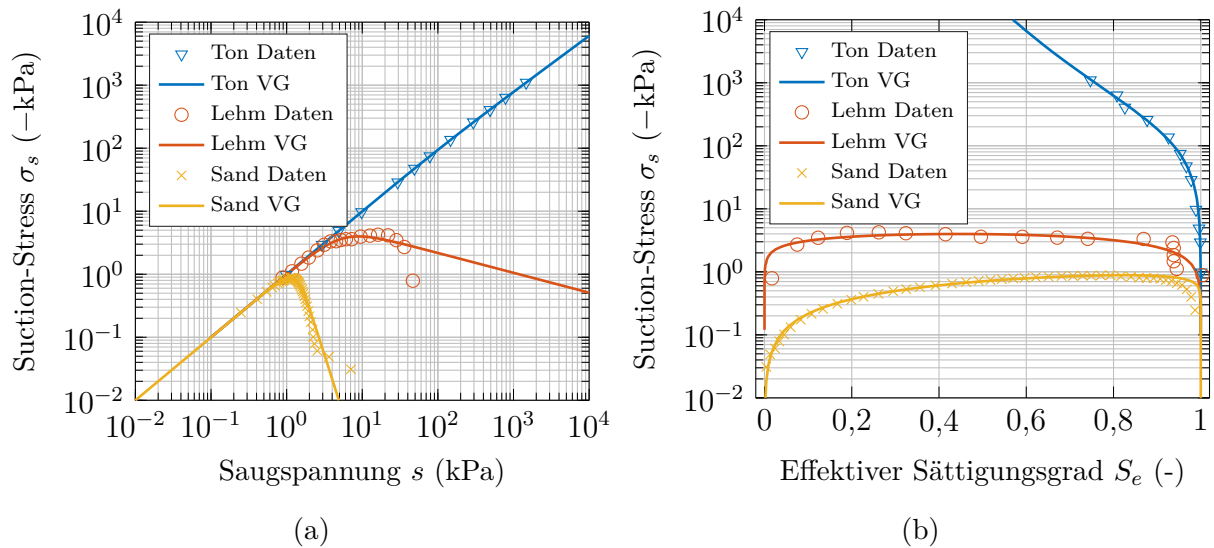


Abbildung 2.10: Suction-Stress-Characteristic-Curves (SSCC) für typische Bodenarten (a) bezogen auf die Saugspannung  $s$  und (b) bezogen auf den effektiven Sättigungsgrad  $S_e$ . Grundlage sind die Daten in Abbildung 2.5.

## 2.2 Beanspruchungen des Untergrundes bei Radüberfahrt

Bei Radüberfahrten von Verkehrsflächen werden der Oberbau und der anstehende Untergrund durch mechanische Belastungen beansprucht. Das Verformungsverhalten granularer Böden unter Verkehrsbelastung ist in der Regel durch eine resiliente, elastische Verformung und eine bleibende, plastische Verformung gekennzeichnet. Die in gebundene Deckschichten und unterlagernde Tragschichten eingetragenen Belastungen resultieren in komplexen zeitlich und örtlich veränderlichen Spannungszuständen.

In Abbildung 2.11 sind die auf ein Bodenelement in einer Fahrbahnkonstruktion wirkenden Spannungen bei Radüberfahrt dargestellt. Diese bestehen aus vertikalen und horizontalen Komponenten sowie Anteilen aus Scherung und erfahren bei Überfahrt eine Rotation der Hauptspannungsrichtungen, vgl. Lekarp u. a. (2000). Für direkt befahrene Tragschichten, wie z. B. temporäre Baustraßen oder ländliche Straßen, sind die eingetragenen Scherspannungen im Vergleich zu Straßenkonstruktionen mit steifen Deckschichten größer. Dies kann zu ausgeprägten Setzungsmulden führen, vgl. Dawson (1997). Aufgrund der Lastverteilung resultierend aus der hohen Steifigkeit der Deckschichten und der damit einhergehenden verringerten Beanspruchung der unterlagernden Schichten nehmen die Scherdehnungen ab, vgl. Vollmert (2017).

Lekarp u. a. (2000) fasst Einflüsse auf das resiliente, d. h. elastische, Materialverhalten von Straßenkonstruktionen zusammen und benennt u. a. Abhängigkeiten des Sättigungsgrads bzw. der Saugspannung. So wird erläutert, dass zunehmende, insbesondere hohe Sättigungsgrade, auf eine deutliche Verringerung des Elastizitätsmoduls und der Poissonzahl granularer Tragschichten führen können.

Die Quantifizierung der Einflüsse teilgesättigter Zustände auf das Verformungsverhalten von Deck- und Tragschichten bei zyklischer Belastungen ist Gegenstand aktueller Forschung. So erfolgt z. B. in Milatz (2016) die dreidimensionale Modellierung von Radlasten auf teilgesättigten Straßenkonstruktionen. Hierbei konnten die Einflüsse der Belastungsgeschwindigkeit und der Steifigkeit der Deckschichten auf das hydraulisch-mechanische Materialverhalten sandiger Tragschichten identifiziert werden. Unklar bleibt, inwiefern die hydraulische Hysterese das hydraulisch-mechanische Materialverhalten beeinflusst.

In Lenhof u. a. (2008) werden numerische Simulationen der Wasserströmung in gesättigten porösen Straßendeckschichten vorgestellt, die durch Radlasten verursacht werden. Basierend hierauf wird in Kettl u. a. (2005) der Einfluss der Steifigkeit der Deckschicht auf mögliche Aufsättigungseffekte untersucht und ein 3D-Modell vorgeschlagen.

Der Einfluss teilgesättigter Initialzustände einer versickerungsfähigen Straßenkonstruktion auf das Spannungs-Dehnungs-Verhalten wird in G. Lu, Liu, Törzs u. a. (2020) numerisch untersucht. Hierbei können u. a. Reduzierungen der in die Konstruktion eingetragenen Spannungen mit zunehmender Radgeschwindigkeit und abnehmendem Sättigungsgrad identifiziert werden.

In Chu (2020) wird der Einfluss hydraulischer Zustände von Straßenbaumaterialien auf den Resilient Modulus  $M_R$ , ein Maß für die Steifigkeit des Unterbaus unter zyklischer Radlast, vgl. AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993, untersucht. Hierbei werden die Auswirkung jahreszeitlicher Schwankungen der Kapillardruck-Sättigungszustände, die durch die hydraulischen Hysterese gekennzeichnet sind, auf den Resilient Modulus beschrieben und bestehende Modellierungsansätze bewertet.

Weiterhin wird der Einfluss zyklischer Belastungen eines teilgesättigten Sands in Pedroso, Y. Zhang u. a. (2017) numerisch untersucht. Im Rahmen der FE-Modellierung werden u. a. die hydraulischen Hysterese der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung berücksichtigt und die Wahl des Materialmodells für die Feststoffphase diskutiert. Hierbei werden komplexe Kapillardruck-Sättigungszustände modelliert, die auch für Straßenober- und Unterbauten relevant sind.

## 2.3 Versickerungsfähige Verkehrsflächen

Die Dimensionierung von Straßenkonstruktionen beruht größtenteils auf empirischen Beobachtungen. Entsprechende Methoden zur empirischen Dimensionierung werden u. a. in dem AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993 bzw. den Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12) beschrieben. Viele Aspekte die Langlebigkeit einer Straßenkonstruktion betreffend sind noch nicht hinreichend verstanden und stehen in Zusammenhang mit den teilgesättigten Zuständen der Einzelkomponenten der Bauwerke.

Verschiedene Autoren stellen Zusammenhänge zwischen den Kapillardruck-Sättigungszuständen verschiedener Böden und dem Verformungsverhalten bzw. der Langlebigkeit von Straßen- bzw. Schienenbauwerken her, vgl. Khogali u. a. (1991), Marjerison u. a. (2001), Zapata u. a. (2009) und Milatz (2016). So führen die Jahreszeit oder andere periodenarti-

ger Wetterphänomene auf variable teilgesättigte Zustände in granularen Geomaterialien, vgl. D. G. Fredlund, Rahardjo und M. D. Fredlund (2012). Der Einbezug der teilgesättigten Scherfestigkeit von Unterbaumaterialien in die Dimensionierung von Straßen- und Schienenbauwerken wird in Sattler u. a. (1989) vorgeschlagen.

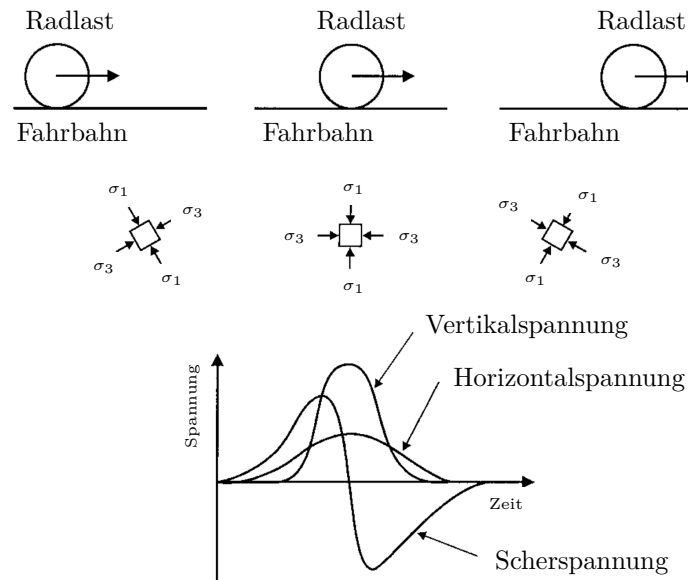


Abbildung 2.11: Rotation der Hauptspannungsrichtung und zeitlicher Verlauf der Spannungen bei Radüberfahrt. Abbildung in Anlehnung an Lekarp u. a. (2000).

Verbunden mit dem ständigen Wachstum der Städte und Infrastruktur ist die zunehmende Oberflächenversiegelung. Das Niveau der versiegelten Flächen in Deutschland kann bereichsweise bis zu rd. 50% ansteigen. Versiegelte Flächen beeinträchtigen das natürliche Wasserrückhaltevermögen eines Gebietes, was zu signifikanten Veränderungen des natürlichen Wasserkreislaufs und somit des gesamten natürlichen Ökosystems führen kann. Die durch hohe Versiegelungsgrade begünstigte Lärmentwicklung, Luftverschmutzung, die erhöhten Luft- und Oberflächentemperaturen sowie veränderte Wind- und Niederschlagsverhältnisse können zudem die urbane Lebensqualität beeinträchtigen, vgl. Umweltbundesamt (2021).

Darüber hinaus führt die globale Ressourcenverknappung auf einen Bedarf an innovativen und umweltfreundlichen Baumaterialien und Technologien. Die Konstruktion wasserdurchlässiger Straßenkonstruktionen in Verbindung mit der Verwendung innovativer synthetischer Bindemittel für Deckschichtmaterialien kann eine leistungsfähige Alternative zu den allgegenwärtigen traditionellen versiegelten Bauweise mit bitumen-basierten Deckschichtmaterialien darstellen. Die Verwendung versickerungsfähiger Verkehrsflächen verfolgt die Ziele, anfallendes Niederschlagswasser in die darunter liegenden Schichten bis in den Untergrund abzuführen sowie einen Gasaustausch zwischen Boden und Atmosphäre zu gewährleisten. Neben den oben genannten Aspekten hinsichtlich einer Entsiegelung befestigter Flächen, wird durch den Einsatz versickerungsfähiger Verkehrsflächen mit neu-

artigen synthetischen Bindemitteln die Nutzung nachwachsender Rohstoffe im Verkehrswegebau gefördert, vgl. Renken (2019).

Üblicherweise wird Bitumen, das raffinerietechnisch durch Destillation des fossilen Energieträgers Rohöl gewonnen wird, im Straßenbau als Bindemittel eingesetzt. Eine Alternative stellt die Verwendung eines Substituts auf Basis von Polyurethan (PU) dar. Polyurethan entsteht aus der Polyadditionsreaktion von Polyolen mit Polyisocyanaten, vgl. Ionescu (2016). Hierbei kann die Polyolkomponente des Polyurethans aus erneuerbaren Ressourcen, wie z. B. Pflanzenölen, gewonnen werden, vgl. Renken (2019). Darüber hinaus können Bindemittel auf Basis von Polyurethan im Vergleich zum Heißmischverfahren mit herkömmlichen auf Bitumen basierenden Bindemitteln durch das Kaltmischverfahren Energie einsparen und so die Treibhausgas-Emissionen senken, vgl. G. Lu, Renken u. a. (2019). Die erfolgreiche Substitution eines bituminösen Bindemittels in Asphalt durch ein synthetisches Produkt auf Basis von Polyurethan (PU) wurde bereits in mehreren Studien nachgewiesen, vgl. Renken und Oeser (2015), Renken, Kreischer u. a. (2015), D. Wang u. a. (2017), G. Lu, Liu, Y. Wang u. a. (2019) und Törzs, G. Lu u. a. (2019). Die Forschungsergebnisse zeigen, dass eine Substitution von bitumen-basierten Bindemitteln durch Bindemittel auf Basis von PU die hydraulische und mechanische Performanz einer Verkehrsfläche deutlich verbessern kann. Das Material zeigte eine höhere Ermüdungs- und Verformungsbeständigkeit gegenüber Verkehrsbelastungen im Vergleich zu herkömmlichem bituminösem offenporigem Asphalt für wasserdurchlässige Straßenkonstruktionen. Darüber hinaus zeigten Renken und Oeser (2014), G. Lu, Liu, Y. Wang u. a. (2019) und Renken (2019), dass die Festigkeit des Materials über einen breiten Betriebstemperaturbereich erhalten bleibt.

Durch die Infiltration von Niederschlag, Schwankungen des Grundwasserspiegels und die durch den Kapillareffekt begründete Aufwärtsbewegung des Untergrundwassers befinden sich Straßenkonstruktionen, speziell versickerungsfähige Verkehrsflächen, zumeist in einem teilgesättigten Zustand, vgl. Törzs, G. Lu u. a. (2019). Bei dynamischer Fahrzeugbelastungen versickerungsfähiger Verkehrsflächen werden die mechanischen und/oder hydraulischen Belastungen auf das Dreiphasensystem – Gesteinskörnung, Wasser, Luft – übertragen. Zu den multiphysikalischen Prozessen in einem Straßenbauwerk zählen neben Setzungen und Hebungen u. a. Effekte aus kapillarem Wasseraufstieg sowie die gleichmäßige Infiltration von Wasser durch die Deckschicht bzw. die örtlich begrenzte Infiltration durch Risse. Daneben ist die Evaporation ein Prozess, der die Wasserbewegungen innerhalb einer Straßenkonstruktion beeinflusst, vgl. Caicedo (2018). In Abbildung 2.12 sind hydraulische Phänomene im Nahbereich einer Straßenkonstruktion zusammengefasst.

Weitere Phänomene sind u. a. der Einfluss von Frost-Tau-Zyklen auf das Korngerüst oder mit Austrocknungen einhergehendes Schrumpfen bindiger Geomaterialien. Jeder dieser Prozesse verursacht eine komplexe Verteilung der Feststoff- und Fluidphasen, die das hydraulisch-mechanisch gekoppelte Verhalten versickerungsfähiger Straßenkonstruktionen maßgeblich beeinflussen kann, vgl. Coussy (2005), Dawson (2009), D. G. Fredlund, Rahardjo und M. D. Fredlund (2012) und Caicedo (2018).

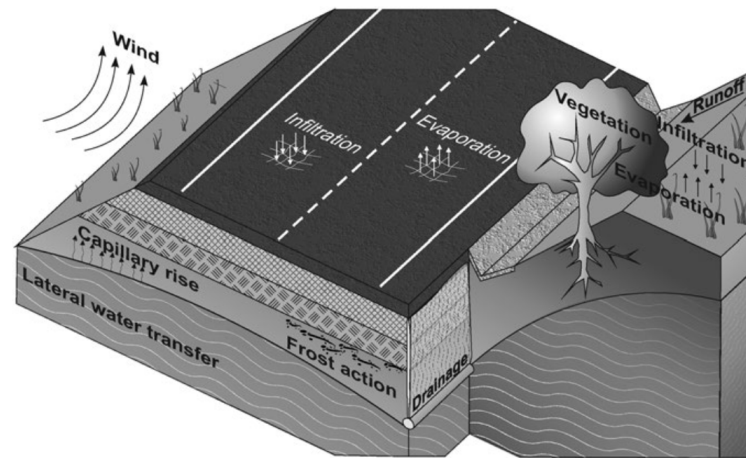


Abbildung 2.12: Hydrologische Prozesse des Wassertransports im Nahbereich eines Straßebauwerks. Abbildung entnommen aus Caicedo (2018).

## 2.4 Fazit

Das dreiphasige System teilgesättigter Böden weist ein komplexes hydraulisch-mechanisch gekoppeltes Materialverhalten auf. Maßgebende Kenngröße zur Beschreibung des teilgesättigten Verhaltens ist die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung. Diese hat aufgrund verschiedener physikalischer Phänomene einen nichtlinearen Charakter und weist eine von dem Verdichtungsgrad abhängige Hysterese auf. Die Messung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Scanning-Pfaden und in Abhängigkeit des Verdichtungsgrads ist komplex und zeitaufwändig. Dementsprechend ist die zur Verfügung stehende Datengrundlage gering. Die Zahl verfügbarer Modellierungsansätze bzw. Simulationsinstrumente, die die o. g. nichtlinearen Eigenschaften der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung berücksichtigen, ist ebenfalls gering. Aufgrund der relativ kleinen Kapillareffekte innerhalb granularer Geomaterialien, ist hiermit zusammenhängenden Fragestellungen bisher vergleichsweise wenig Forschung gewidmet.

Aus den Folgen des Klimawandels resultiert ein globales Umdenkens, was wiederum die Nachfrage nach innovativen, umweltfreundlichen Baumaterialien und Technologien vergrößert. Die Konstruktion versickerungsfähiger Verkehrsflächen in Kombination mit innovativen synthetischen Bindemitteln für die Deckschichtmaterialien wird als Alternative zur herkömmlichen versiegelten Bauweise mit bitumen-basierten Deckschichtmaterialien eingesetzt. Versickerungsfähige Verkehrsflächen befinden sich nahezu dauerhaft in teilgesättigten Zuständen. Welchen Einfluss diese Zustände auf das Verformungsverhalten haben, ist weitgehend unklar. Aus Radüberfahrten teilgesättigter Böden bzw. teilgesättigter Straßenkonstruktionen resultieren Verformungen und Änderungen der Kapillardruck-Sättigungs-Zustände. Der Einfluss, den die hydraulische Hysterese der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung hierbei auf das Verformungsverhalten der Tragkonstruktionen ausübt, ist bisher ungeklärt.



# 3 Zielsetzung und Methoden

## 3.1 Zielsetzung

Mit Anfertigung dieser Arbeit wird das Ziel verfolgt, einen Beitrag zum grundlegenden Verständnis des Verhaltens teilgesättigter granularer Geomaterialien infolge hydraulischer und mechanischer Beanspruchungen zu schaffen. Hierbei werden granulare Geomaterialien untersucht, denen zum aktuellen Kenntnisstand – aufgrund der geringen Kapillareffekte – in der Forschung vergleichsweise wenig Aufmerksamkeit zugekommen ist. Der Erkenntnisgewinn erfolgt hierbei über die im Folgenden zusammengestellten Ziele.

- Bestimmung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung verschiedener granularer Geomaterialien mit dem Fokus der hydraulischen Hysterese und der Abhängigkeit von dem Verdichtungsgrad. Hinzu kommt das Zusammentragen sämtlicher für die numerischen Untersuchungen benötigten Materialparameter.
- Analytische Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese sowie der Abhängigkeit von der Lagerungsdichte.
- Implementierung sowie Validierung des analytischen Modells in eine FE-Umgebung im Rahmen einer dynamischen Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung zur Modellierung poröser Medien.
- Bewertung der Entwässerungseigenschaften, d. h. die Saugspannungs- und Sättigungsänderung, bei Entwässerung einer wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion.
- Untersuchung der Änderung der hydraulisch-mechanischen Zustände einer wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion bei zyklischer mechanischer Belastung.
- Charakterisierung des Einflusses der Kapillareffekte granularer Tragschichten unter mechanischer Belastung bei verschiedenen Randbedingungen.

## 3.2 Methoden

Zur Erreichung der o. g. Ziele werden experimentelle Untersuchungen auf verschiedenen Skalen herangezogen sowie eine dynamische Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung zur Berechnung des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhaltens teilgesättigter Böden (Lewis und Schrefler, 1998) weiterentwickelt.

Das durchgeführte experimentelle Versuchsprogramm besteht 1. aus Laborversuchen zur Bestimmung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung verschiedener granularer Geomaterialien. Es werden 2. ein Modellversuch zum Entwässerungsverhalten einer mehrschichti-

gen wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion und 3. Feldversuche im Realmaßstab zum hydraulisch-mechanischen Verhalten einer wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion unter zyklischer Radlast durchgeführt.

Mit dem Ziel das zyklisch-hydraulische Verhalten realitätsnäher abzubilden, als es derzeit möglich ist, wird der am Institut für Geotechnik und Baubetrieb eingesetzte Finite-Elemente-Code weiterentwickelt. Aufbauend auf den am Institut für Geotechnik und Baubetrieb entstandenen Dissertationen Schümann (2015) und Milatz (2016) erfolgt dies durch die Implementierung eines analytischen Modells zur Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung. Zusätzlich wird eine Erweiterung ergänzt, die die hysteretische Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung in Abhängigkeit des aktuellen Verdichtungsgrads beschreibt.

Im Folgenden ist jeweils angegeben, mit welchem Kapitel dieser Arbeit zur Erreichung des jeweiligen Ziels beigetragen wird.

- Die Ergebnisse umfangreicher experimenteller Untersuchungen werden in Kapitel 4 *Experimentelle Untersuchungen granularer Geomaterialien* zusammengefasst.
- Der Modellierung des hydraulischen Verhaltens granularer Geomaterialien ist Kapitel 5 *Modellierung teilgesättigter granularer Geomaterialien* gewidmet. Hierin erfolgt außerdem die Validierung der Modelle gegen experimentelle erhobene Daten. Außerdem erfolgt die Verifizierung der Implementierung des Kapillardruck-Sättigungs-Modells in den o. g. FE-Code.
- Die Ergebnisse des Modellversuchs sowie die darauf aufbauende numerische Abbildung des Entwässerungsverhaltens werden in Kapitel 6 *Entwässerungsverhalten einer wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion* präsentiert.
- Die im Rahmen eines Feldversuchs gewonnenen Erkenntnisse werden in Kapitel 7 *Zyklische Belastungsversuche einer teilgesättigten Straßenkonstruktion* ausgewertet.
- Die im Vorangegangenen entwickelten Methoden und Erweiterungen an dem o. g. FE-Code werden in Kapitel 8 zur *Simulation von Radüberfahrten teilgesättigter Straßenunterbauten* angewendet.

## 4 Experimentelle Untersuchungen granularer Geomaterialien

Für die Modellierung des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhaltens teilgesättigter Böden werden Materialparameter benötigt. Für die untersuchten Geomaterialien werden Parameter für die Kalibrierung der mechanischen sowie der hydraulischen Materialmodelle erforderlich.

Im Zuge dieser Arbeit werden granulare Geomaterialien untersucht. Es handelt sich dabei um zwei Modellsande, die am Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TUHH regelmäßig für Modellversuche eingesetzt werden und bereits im Rahmen zahlreicher Untersuchungen beprobt wurden, vgl. Kanitz (2021), Milatz, Törzs u. a. (2018), Osthoff (2018), Kaya (2016) und Qiu (2012).

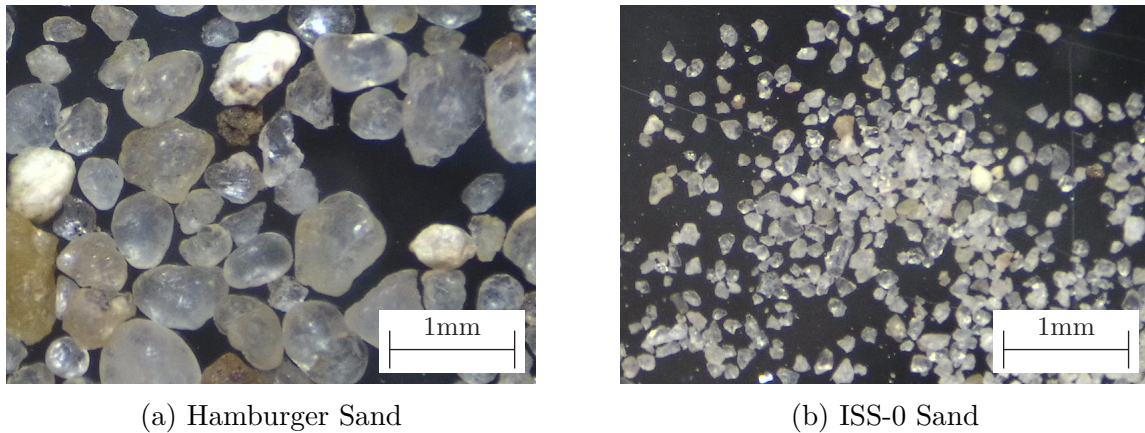
Weiterhin liegt der Fokus auf der Ermittlung der Materialparameter eines neuartigen wasserundurchlässigen Deckschichtmaterials, das in versickerungsfähigen Verkehrsflächen eingesetzt wird und Gegenstand aktueller Forschung ist, vgl. Renken (2019), G. Lu (2019), G. Lu, Renken u. a. (2019) und Törzs, G. Lu u. a. (2019).

Der erste Modellsand ist ein mittelsandiger Grobsand, bezeichnet als Hamburger Sand – abgekürzt HH Sand. Dieser besteht größtenteils aus Quarz und aus einem geringen Anteil von Feldspaten. Außerdem weist er visuell Kalkbrocken und Schwerminerale auf. Hamburger Sand – Herstellerbezeichnung Quarzsand K4 – ist ein feuergetrockneter, gewaschener Sand der *Wika Sand und Kies GmbH und Co. KG* aus 21684 Stade-Wiepenkathen.

Der zweite Modellsand ist ein feiner Quarzsand, bezeichnet als ISS-0 Sand. Es ist ein gewaschener und gesiebter Industrie-Spezialsand der *Gebr. Willersinn GmbH und Co. KG* aus Scharrau, 67240 Bobenheim-Roxheim.

Mikroskopaufnahmen beider Sande sind in Abbildung 4.1 dargestellt. Die verschiedenen mineralischen Bestandteile des Hamburger Sands lassen sich erkennen. Außerdem lässt sich die Kornform der Sandkörner nach DIN EN ISO 14688-1:2018-05 visuell abschätzen. Diese wird durch die Parameter „Eckigkeit“, „Form“ und „Oberflächenstruktur“ bestimmt, welche für die Quarzanteile beider Sande mit „sehr wenig gerundet“ bis „gerundet“, „kubisch“ und „glatt“ abgeschätzt werden können.

Daneben werden zwei Rezepturen eines wasserundurchlässigen, im Straßenbau verwendeten Deckschichtmaterials hinsichtlich der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung untersucht. Auf Untersuchungen zum hydraulischen und mechanischen Materialverhalten dieses neuartigen Deckschichtmaterials liegt ein Schwerpunkt in dem in Kapitel 2.3 beschriebenen kooperativen Forschungsprojekt der Technischen Universität Hamburg und der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen. Die Rezeptur vom Typ A besteht aus Ge-



(a) Hamburger Sand

(b) ISS-0 Sand

Abbildung 4.1: Mikroskopaufnahmen von (a) Hamburger Sand und (b) ISS-0 Sand. Bildquellen: Datenbank des Labors des Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TUHH.

steinskörnungen der Kornfraktionen von 0 mm bis 8 mm, die Rezeptur vom Typ B von 0 mm bis 5,6 mm. Aufgrund eines neuartigen auf Polyurethan – Kurzzeichen: PUR, hier: PU – basierenden Binders, der konventionelles Bitumen in der Asphaltherstellung ersetzt, werden die zwei Rezepturen des PU-gebundenen Deckschichtmaterials vom Typ A und Typ B im Folgenden als PUPM Typ A und PUPM Typ B abgekürzt. PUPM steht hierbei für „polyurethane-bound pervious mixture“ – deutsch: polyurethanegebundene (wasser)durchlässige Mischung. Einige Probekörper und die ungebundene Gesteinskörnung, feiner Diabaskies und ein Kalksteinfüller, sind in Abbildung 4.2 dargestellt.



Abbildung 4.2: Probekörper des PU-gebundenen Deckschichtmaterials PUPM Typ A mit  $h/d = 10\text{ mm}/50\text{ mm}$  (links) und ungebundene Gesteinskörnung (rechts). Abbildung aus Törzs, G. Lu u. a. (2019).

## 4.1 Bodenmechanische Klassifizierung der Sande

### 4.1.1 Granulometrische und grundlegende bodenmechanische Eigenschaften

Die den beiden Sanden zugehörigen Korngrößenverteilungen sind in Abbildung 4.3 und grundlegende bodenmechanische Kennwerte in Tabelle 4.1 dargestellt. Die zugrunde liegenden Daten wurden der Datenbank des Labors des Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TUHH entnommen.

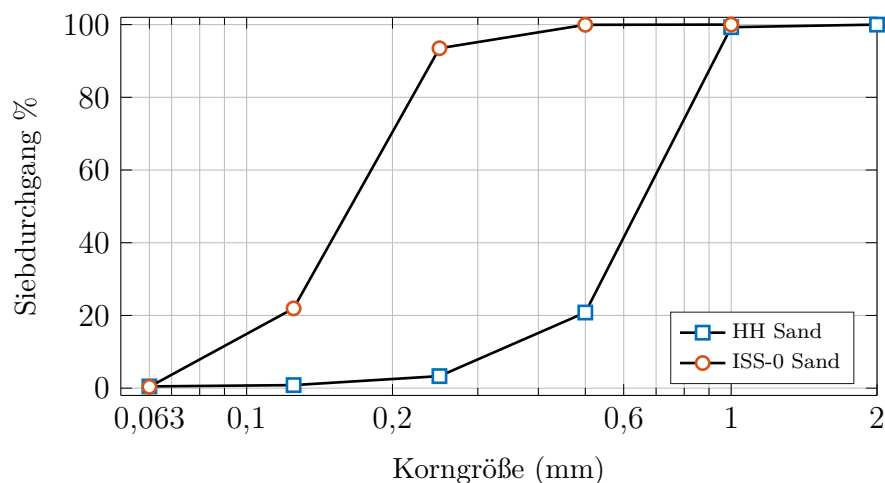


Abbildung 4.3: Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4:2017-04 von Hamburger Sand und ISS-0 Sand. Dargestellt ist der Teil der Sandfraktion: 0,036 mm bis 2,0 mm. Die verwendeten Modellsande wurden durch Siebung und Wäscherung auf diese Fraktion konditioniert.

### 4.1.2 Mechanisches Verhalten der untersuchten Sande

Untersuchungen des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der Modellsande – größtenteils ohne Berücksichtigung der Teilsättigung – finden sich in den vorgenannten Publikationen. In Anhang B dieser Arbeit sind die Ergebnisse von Laborversuchen zum mechanischen Verformungsverhalten ohne Berücksichtigung teilgesättigter Effekte dargestellt. Es sind die Ergebnisse von Ödometerversuchen nach DIN EN ISO 17892-5:2017-08 sowie die Ergebnisse von CD-Triaxialversuchen nach DIN EN ISO 17892-9:2018-07 zusammengetragen.

### 4.1.3 Hydraulische Leitfähigkeit im wassergesättigten Zustand

Die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit ist die maximale Wasserdurchflussrate, die ein Boden zulässt. Der zugehörige bodenspezifische Koeffizient – der Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  – entspricht nach dem Fließgesetz von Darcy für laminare Strömung dem Quotienten aus der Filtergeschwindigkeit  $v_f$  und dem hydraulischen Gefälle  $i$ . Hierbei sind die

Tabelle 4.1: Bodenmechanische Kennwerte von Hamburger Sand und ISS-0 Sand. Hierbei sind  $C_U = D_{60}/D_{10}$  und  $C_C = D_{30}^2/D_{10} \times D_{60}$ .  $D_{60}$ ,  $D_{30}$  und  $D_{10}$  sind die Korndurchmesser, die den Ordinaten 60%, 30% und 10% Massenanteil der Korngrößensummenkurve entsprechen, vgl. Abbildung 4.3. Für Hamburger Sand ergeben sich  $D_{60} = 0,697$  mm,  $D_{30} = 0,561$  mm und  $D_{10} = 0,366$  mm, für ISS-0 Sand ergeben sich  $D_{60} = 0,178$  mm,  $D_{30} = 0,137$  mm und  $D_{10} = 0,103$  mm.

Bezeichnung	Kennwert	Einheit	HH Sand	ISS-0 Sand
Kornrohddichte	$\rho_s$	g/cm <sup>3</sup>	2,640	2,650
Min. Lagerungsdichte	$\rho_{d,\min}$	g/cm <sup>3</sup>	1,462	1,312
Max. Lagerungsdichte	$\rho_{d,\max}$	g/cm <sup>3</sup>	1,736	1,657
Min. Porosität	$n_{\min}$	–	0,342	0,375
Max. Porosität	$n_{\max}$	–	0,446	1,020
Ungleichförmigkeitszahl	$C_U$	–	1,900	1,700
Krümmungszahl	$C_C$	–	1,200	1,000
Mittlere Korngröße	$D_{50}$	mm	0,653	0,164

Filtergeschwindigkeit die Wasserdurchflussrate je Querschnittsfläche des Probekörpers in Fließrichtung und das hydraulische Gefälle der Quotient aus hydraulischem Höhenunterschied zwischen zwei Punkten und der durchströmten Länge des Probekörpers, vgl. DIN EN ISO 17892-11:2021-03. Für Hamburger Sand liegen dichteabhängige Daten für den Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f$  vor, vgl. Abbildung 4.4. Diese wurden mittels Kurvenanpassung inter- bzw. extrapoliert, um für die in Tabelle 4.2 angegebenen Lagerungsdichten bzw. Porositäten  $k_f$ -Werte abzuleiten. Diese Werte sind in Abbildung 4.4 als „Auswahl“ markiert.

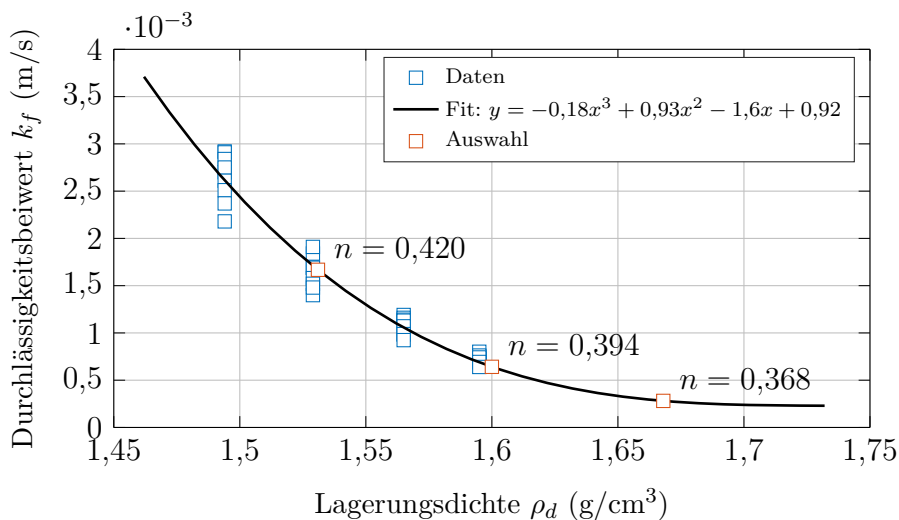


Abbildung 4.4: Durchlässigkeitsbeiwerte  $k_f$  von Hamburger Sand nach DIN EN ISO 17892-11:2021-03 in Abhängigkeit der Lagerungsdichte  $\rho_d$ .

Tabelle 4.2: Aus Abbildung 4.4 ausgelesene Durchlässigkeitsbeiwerte  $k_f$  von Hamburger Sand in Abhängigkeit der Lagerungsdichte  $\rho_d$ .

$\rho_d$	$n$	$I_n$	$k_f$
g/cm <sup>3</sup>	–	–	m/s
1,668	0,368	0,75	$2,811 \times 10^{-4}$
1,600	0,394	0,50	$6,414 \times 10^{-4}$
1,531	0,420	0,25	$1,668 \times 10^{-3}$

Für ISS-0 Sand gilt für eine Lagerungsdichte von  $\rho_d = 1,518 \text{ g/cm}^3$ , entsprechend  $I_n = 0,599$ , ein gemittelter Durchlässigkeitsbeiwert  $k_f = 1,473 \times 10^{-4} \text{ m/s}$ .

Gemäß DIN 18130-1:1998-05 sind die untersuchten granularen Böden demnach als „stark durchlässig“ zu bezeichnen.

## 4.2 Klassifizierung des PU-gebundenen Deckschichtmaterials (PUPM)

Die auf einem Polyurethan-Binder basierenden Rezepturen – PUPM Typ A und PUPM Typ B – unterscheiden sich hinsichtlich der Massenanteile an den Kornfraktionen sowie hinsichtlich des Größtkorns. Die entsprechenden Korngrößenverteilungen sind in Abbildung 4.5 dargestellt. Diese Rezepturen wurden während der gesamten Laufzeit des kooperativen Forschungsprojektes verwendet, vgl. Törzs, G. Lu u. a. (2019). Ähnliche Mischungen wurden bereits in anderen Studien verwendet, vgl. G. Lu, Renken u. a. (2019), G. Lu, Liu, Y. Wang u. a. (2019), Cong, T. Wang u. a. (2018) und Chen u. a. (2018).

Das in den porösen Deckschichtmaterialien verwendete Polyurethan ist ein multifunktionales Material, das in vielen verschiedenen Bereichen, z. B. als Bau- und Konstruktionsmaterialien, als Bestandteil von Möbeln und Textilien oder in der Automobil- und Elektrobranche, weit verbreitet ist. Es besteht in erster Linie aus verschiedenen Polymeren, die durch die Poly-Additionsreaktion eines polymeren Isocyanats mit einem Polyol hergestellt werden. Die Synthese basiert auf der Verbindung von Isocyanaten und Hydroxylgruppen, die zur Bildung einer Urethangruppe führen, vgl. Cong, F. Yang u. a. (2019) und Prisacariu (2011). Das auf den zwei Komponenten Polyol und Isocyanat basierende verwendete Polyurethan wurde durch die *BASF Polyurethanes GmbH* zur Verfügung gestellt.

Bei der Herstellung des PU-gebundenen Straßendeckenmaterials werden die ungebundenen Gesteinskörner mit dem Füller vermischt, woraufhin das noch flüssige aus zwei Komponenten bestehende PU mit einer Rohdichte von  $\rho_s = 1,09 \text{ g/cm}^3$  dem Gemisch in einem Verhältnis Gestein zu PU von 94,0 M-% zu 6,0 M-% hinzugefügt wird. Bei dem Mischvorgang entsteht eine dünne PU-Beschichtung, die die Zuschlagstoffe bedeckt. Anschließend kann das Deckschichtmaterial eingebaut und verdichtet werden. Sobald das PU aushärtet, werden die PU-beschichteten Körner miteinander verbunden und bilden eine stabile und stark durchlässige Deckschicht. Der Herstellungsprozess ist in Abbildung 4.6 dargestellt.

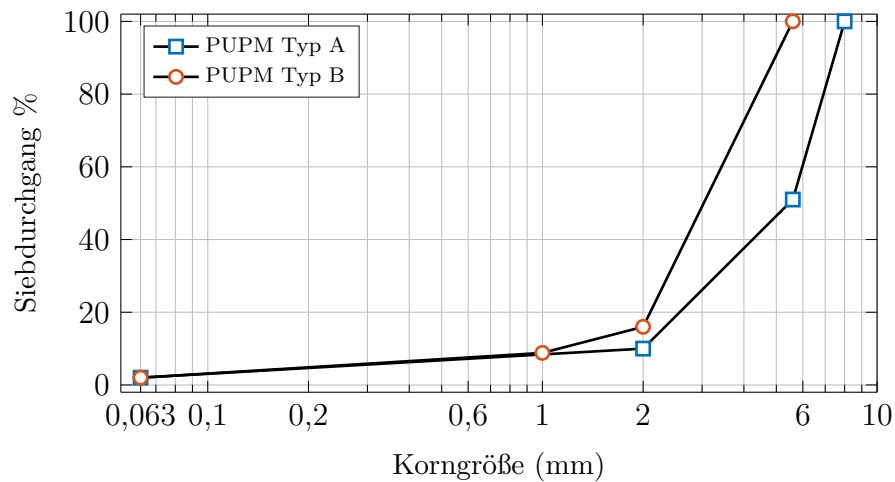


Abbildung 4.5: Korngrößenverteilung nach DIN EN ISO 17892-4:2017-04 der Gesteinskörnungen verwendet zur Herstellung von PUPM Typ A und PUPM Typ B.



Abbildung 4.6: Herstellungsprozess von PUPM, nach G. Lu, Törzs u. a. (2020).

Die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Untersuchungen fokussieren das hydraulische Verhalten von PU-gebundenen Deckschichtmaterialien. Im Rahmen des genannten, kooperativen Forschungsprojekts wurden an der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule Aachen umfangreiche Laborversuche zum mechanischen Materialverhalten durchgeführt. Diese sowie grundlegende Materialeigenschaften sind in Tabelle 4.3 zusammengefasst, wobei die Erhebung der Daten u. a. in G. Lu, Renken u. a. (2019) beschrieben ist.

Die im Labor ermittelte mittleren Durchlässigkeitsbeiwerte im wassergesättigten Zustand sind aus geotechnischer Sicht und entsprechend DIN 18130-1:1998-05 als „stark durchlässig“ einzustufen. Dies steht in guter Übereinstimmung mit den in dem M VV genannten Anforderungen an wasserdurchlässige Straßenbauten. Hierin wird ein Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_f \geq 5,4 \times 10^{-5}$  m/s empfohlen.

Tabelle 4.3: Ergebnisse der Untersuchungen zum Verformungs- und Festigkeitsverhalten der Deckschichtmaterialien vom Typ A und B nach G. Lu, Renken u. a. (2019) sowie grundlegende Parameter.

Eigenschaft	Einheit	PUPM A	PUPM B
Druckfestigkeit	MPa	18,63 ± 1,390	16,98 ± 0,900
Zugfestigkeit	MPa	3,360 ± 0,380	2,180 ± 0,290
Elastizitätsmodul $E$	GPa	6,640 ± 0,080	3,310 ± 0,290
Querdehnzahl $\nu$	–	0,210 ± 0,032	0,164 ± 0,024
Schubmodul $G$	GPa	2,750 ± 0,080	1,420 ± 0,150
Kornrohddichte $\rho_s$	g/cm <sup>3</sup>	2,850	2,850
Lagerungsdichte $\rho_d$	g/cm <sup>3</sup>	1,877	1,849
Porosität $n$	–	0,278	0,289
Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$	m/s	$5,25 \times 10^{-3}$	$3,67 \times 10^{-3}$

### 4.3 Experimentelle Untersuchungen zum Kapillardruck-Sättigungsverhalten

Die wesentliche Kenngröße teilgesättigter Böden – die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung – wurde für die genannten Geomaterialien bestimmt. Hierzu wurde auf verschiedene Laborverfahren zurückgegriffen, die sich für die entsprechenden Materialien als am geeignetsten erwiesen haben. Neben der Bestimmung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung der Materialien wurde überprüft, ob die Böden zu hydraulisch hysteretischem Verhalten tendieren. Die Abhängigkeit der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung von der Lagerungsdichte steht ebenso im Fokus der Untersuchungen.

Aufgrund der hohen Elastizitätsmoduln der elastischen Deckschichtmaterialien wird angenommen, dass eine mit einer Belastung – z. B. bei Radüberfahrt – einhergehende Kompression – und die wiederum damit einhergehende Verringerung des Porenraumes – einen untergeordneten Einfluss auf das Wasserretentionsverhalten des Deckschichtmaterials hat. Demnach wurden diese nicht hinsichtlich einer Abhängigkeit der Lagerungsdichte untersucht.

Sofern im Folgenden von „statischen“ Versuchen zur Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung die Rede ist, sind Versuche zur Erfassung Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung unter Gleichgewichtsbedingungen gemeint. D. h. während der Erfassung des Kapillardruck-Sättigungs-Zustandes fließt im Probekörper kein Wasser. Das Fluid im Porenraum befindet sich im statischen Gleichgewicht mit der Luftphase und den Gesteinskörnern.

Weitere Versuche werden unter „transienten“ Bedingungen durchgeführt, d. h. das im Porenraum einer Probe befindliche Wasser ist während der Messung in Bewegung. Transiente dynamische Randbedingungen haben einen Einfluss auf die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung, vgl. Hassanizadeh u. a. (2002) und Milatz, Törzs u. a. (2018). Mit abnehmender Be- bzw. Entwässerungsgeschwindigkeit nähert sich der Verlauf der transienten Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung dem der statischen an. Die im Rahmen dieser Arbeit durch-

geführten Laborversuche zur Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung unter transienten Bedingungen wurden mit so geringer Be- bzw. Entwässerungsgeschwindigkeit durchgeführt, dass der dynamische Effekt gegen null geht. Diese Herangehensweise bietet den Vorteil der kontinuierlichen Erfassung des Kapillardruck-Sättigungs-Zustandes.

### 4.3.1 Methoden zur experimentellen Bestimmung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden experimentelle Methoden zur Bestimmung der statischen und der transienten Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung angewendet. Die entwickelten und angewendeten Methoden werden im Folgenden zusammenfassend erläutert.

#### 4.3.1.1 Verdunstungsmethode nach Schindler (1980)

Zur Durchführung der vereinfachten Verdunstungsmethode nach Schindler (1980) wird das kommerzielle Laborgerät HYPROP – HYdraulic PROProperty analyser – verwendet (METER Group AG, 2018). Zur Ermittlung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung werden anfangs gesättigte im Labor präparierte Bodenproben in einem Ausstechzylinder – Durchmesser: 80 mm, Höhe: 50 mm – an der Oberkante der freien Verdunstung ausgesetzt. Der Ausstechzylinder ist auf der Sensoreinheit fixiert. Diese wiederum ist mit einem Computer zur kontinuierlichen Datenerfassung verbunden. Die in der Probe herrschende Saugspannung wird auf zwei verschiedenen Messhöhen – 125 mm und 375 mm unter Oberkante – über in die Sensoreinheit eingeschraubte Tensiometer erfasst. Tensiometer sind spezielle Druckmessgeber, die in teilgesättigten Böden zur Messung der Saugspannung eingesetzt werden, vgl. D. G. Fredlund und Rahardjo (1993). Über eine poröse Keramikspitze wird ein hydrostatisches Gleichgewicht des im Tensiometerschaft und des im Porenraum des umgebenden Bodens vorhandenen Wassers hergestellt. Die mit der Verdunstung einhergehende Änderung des Sättigungsgrads in der Bodenprobe hat eine Änderung der Saugspannung zur Folge, die von einem Drucksensor am Ende des Tensiometerschafts erfasst wird. Die aus der Verdunstung resultierende Änderung des Probengewichts wird über eine Waage – Typ: Kern Präzisionswaage EG, Eichwert: 0,1 g, Ablesbarkeit: 0,01 g – kontinuierlich aufgezeichnet. In Kenntnis des Gewichts aller im Aufbau verwendeten Teile sowie der Trockenmasse der Probe, wird hieraus der in der Probe herrschende Sättigungsgrad errechnet, vgl. Schelle u. a. (2013). Die Genauigkeit des HYPROP wird in Bezerra-Coelho u. a. (2018) ausführlich beschrieben. Der Versuchsaufbau sowie eine schematische Darstellung des HYPROP sind in Abbildung 4.7 dargestellt.

Aufgrund des Verdunstungsprozesses handelt es sich um einen Versuch unter transienten Bedingungen. Da die Verdunstungsrate jedoch sehr gering ist und die Laufzeit eines Versuchs an Sand rd. drei Wochen beträgt, wird dieser Versuchstyp den statischen Versuchen zur Bestimmung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung zugeordnet.

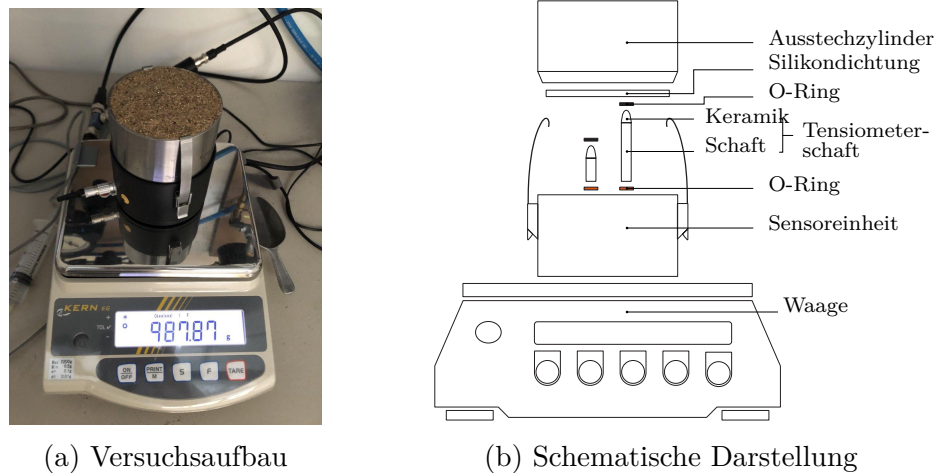


Abbildung 4.7: (a) Versuchsaufbau und (b) Schematische Darstellung des HYPROP auf einer Laborwaage zur Ermittlung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit der Verdunstungsmethode nach Schindler (1980), (b) in Teilen entnommen aus METER Group AG (2018).

#### 4.3.1.2 Methode der hängenden Wassersäule

In Renken, Oeser u. a. (2015) und Törzs, G. Lu u. a. (2019) werden geringe Einflussbereiche des Wasserretentionsverhalten  $< 1 \text{ kPa}$  für PU-gebundenes Deckschichtmaterial beschrieben. Die Beobachtungen basieren auf Laborversuchen und einer auf geotechnischen Kenngrößen basierenden Prognose nach Aubertin u. a. (2003). Um präzise Messungen der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung im Bereich geringer Saugspannungen durchzuführen, wird die Methode der hängenden Wassersäule gemäß ASTM D6836-16 verwendet. Eine schematische Zeichnung des Versuchsaufbaus zur Verwendung der Methode der hängenden Wassersäule ist in Abbildung 4.8 dargestellt. Es handelt sich um ein Untersuchungsverfahren zur Ermittlung der statischen Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung, da sich das Fluid im Porenraum zu jedem Messzeitpunkt im statischen Gleichgewicht mit der Luftphase und den Gesteinskörnern befindet.

Der Versuchsaufbau besteht aus einem Probensockel, einer Bürette mit einer Skala – Fassungsvermögen: 10 ml, Teilstriche: 0,02 ml – zur Messung der in der Probe enthaltenen Wassermenge und einem Unterdrucksystem, umgesetzt durch zwei Wasserreservoirs in verschiedenen Höhen. Die Wassermenge, die in die Probe ein- bzw. aus ihr abfließt, wird von der an den Probensockel angeschlossenen Bürette abgelesen, welche wiederum mit dem Unterdrucksystem verbunden ist. Die Bürette wird horizontal auf der gleichen Höhe, wie die Unterkante der Probe, platziert, sodass der angelegte Unterdruck mit der Saugspannung im Inneren der Probe gleichgesetzt werden kann, vgl. ASTM D6836-16. Der so ausgestattete Untersuchungsstand zur Messung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mithilfe der hängenden Wassersäule ermöglicht feine Einstellungen der relativen Höhe der Wasserreservoirs über eine Wandhalterung im Millimeterbereich.

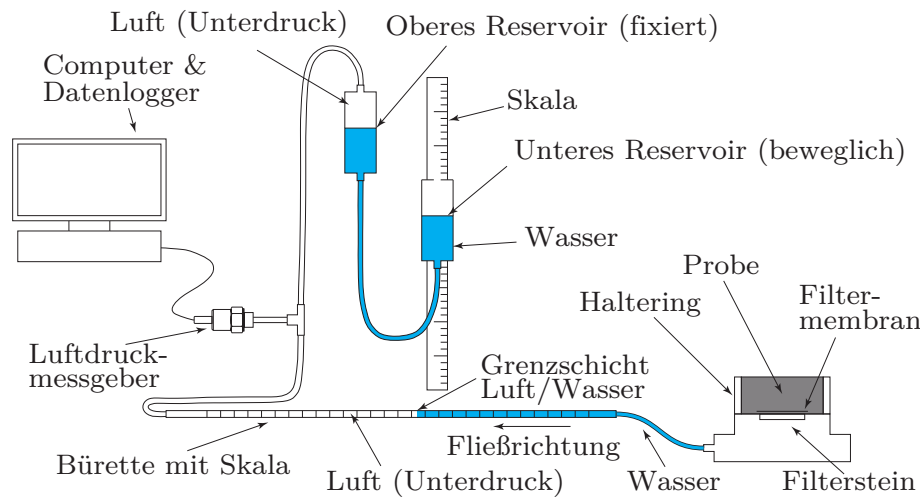
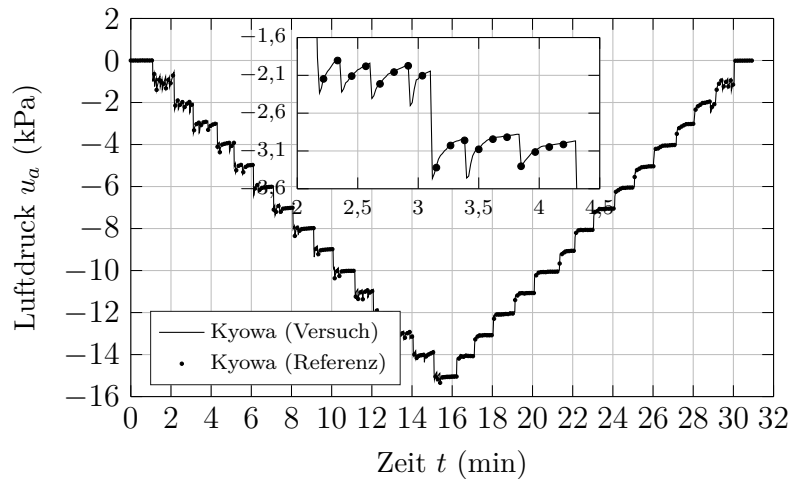


Abbildung 4.8: Schematische Zeichnung des entwickelten Versuchsstandes mit der hängenden Wassersäule zur Bestimmung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung, modifiziert nach ASTM D6836-16. Abbildung in Anlehnung an Törzs, G. Lu u. a. (2019).

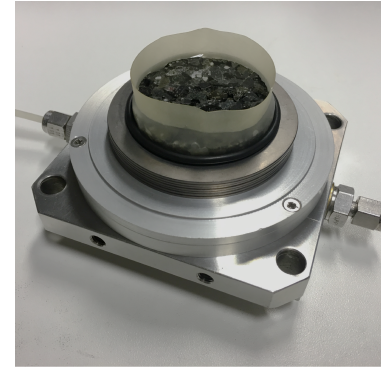
Zu Beginn des Versuchs werden die beiden Wasserreservoirs auf der gleichen relativen Höhe gehalten, was einem Unterdruck von 0,0 kPa entspricht. Der angelegte Unterdruck ist identisch mit der im Inneren der Probe herrschenden Saugspannung  $s$ . Zu diesem Zeitpunkt  $t = 0$  befinden sich das Wasser in der vollständig gesättigten Probe und das bereits in der Bürette befindliche Wasser im Gleichgewicht. Beim Absenken eines der Reservoirs führt der Höhenunterschied zu einem zunehmenden Unterdruck im System, der direkt an der Wasserphase in der Probe anliegt. Dadurch fließt das Wasser aus dem Inneren der Probe in die horizontale Bürette. Die Menge des ausgeflossenen Wassers kann nach Erreichen des Gleichgewichts – keine Wasserbewegung mehr identifizierbar – an der Bürette abgelesen werden. Der angelegte Unterdruck wird von einem an das System angeschlossenen Luftdruckmessaufnehmer – Typ: *Kyowa* PGM-02KG – erfasst. In einem zuvor durchgeführten Funktionstest wird ein weiterer Luftdruckmessaufnehmer als Referenzsensor verwendet. Das Ergebnis dieses Funktionalitätstests ist in Abbildung 4.9 (a) dargestellt. Die Schwankung der Daten resultiert aus der für die Vorversuche verwendeten Vakuumpumpe – Typ: *UMS GmbH* VS-pro. Es kann eine Übereinstimmung der Messwerte des Referenzmessaufnehmers und des für die Versuche verwendeten Messaufnehmers festgestellt werden.

Für jede Versuchsdurchführung wird eine Probe auf dem Probensockel platziert und durch eine mikroporöse Membran mit einem Porendurchmesser von  $0,8 \mu\text{m}$  der Pall Corp. durch den angelegten Unterdruck entwässert. Dieser Membrantyp wurde bereits in Nishimura u. a. (2012) verwendet und wird auf einen porösen Filterstein aus Sintermetall gelegt, der eine gleichmäßige Drainage über den Probenquerschnitt ermöglicht. Die Membran hat einen hohen Lufteintrittspunkt, um sicherzustellen, dass lediglich das aus der Probe abfließende Wasser in die horizontale Bürette eindringt. Das ausströmende Wasservolumen wird dann an der Skala auf der Bürette abgelesen. Die Funktionalität des Probensockels wurde in zahlreichen Versuchen zum Wasserretentionsverhalten von Sanden erfolgreich getestet, vgl. Törzs (2015) und Milatz (2016).

In Abbildung 4.9 (b) ist der Probensockel dargestellt auf dem vor einem Versuchslauf eine vollständig gesättigte Probe – hier: PU-gebundenes Deckschichtmaterial – platziert wurde. Während des gesamten Versuchs wird eine perforierte Frischhaltefolie über der Probe angebracht, um die Verdunstung zu minimieren und gleichzeitig den Kontakt zur atmosphärischen Luftphase sicherzustellen.



(a)



(b)

Abbildung 4.9: (a) Funktionalitätsprüfung der verwendeten Luftdruckmessgeber (*Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd.*). Abbildung in Anlehnung an Törzs, G. Lu u. a. (2019). (b) Probensockel mit gesättigter Probe, hier: PU-gebundenes Deckschichtmaterial. Abbildung aus Törzs, G. Lu u. a. (2019).

#### 4.3.1.3 Transiente Versuche mit dem UNSAT-*Pi*

Für zyklische Versuche zur Ermittlung der hydraulischen Hysterese der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung wird auf einen am Institut für Geotechnik und Baubetrieb entwickelten Versuchsstand zurückgegriffen, vgl. Milatz (2020) und Milatz und Grabe (2019). Dieser wurde speziell für die Untersuchung des hydraulischen Verhaltens von zylindrischen Sandproben mit Höhen  $< 20$  mm – ursprünglich für die Verwendung in Mikro-Computertomographen – entwickelt.

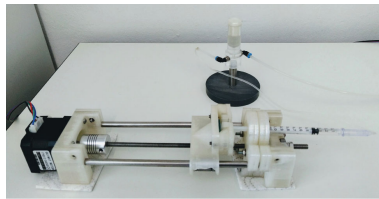
Der Versuchsaufbau besteht zum einen aus einem zylindrischen Probenbehälter mit einem Innendurchmesser von 12 mm, wobei der Zugang zum Drainagesystem über einen porösen Filterstein mit einem Durchmesser von 10 mm, der wiederum mit einer mikroporösen Membran abgedeckt ist, ermöglicht wird, vgl. Kapitel 4.3.1.2. Ein zweiter Wasseranschluss ist für die Messung der Saugspannung vorgesehen. Die einzubauenden Proben haben eine Höhe von 12 mm, vgl. Abbildung 4.10 (a). Die Sättigungsänderungen in der Probe lassen sich mithilfe einer 3D-gedruckten Spritzenpumpe aufbringen. Die Saugspannung wird mit einem Druckmessgeber – Typ: *Honeywell 26PCBFA6G* – erfasst, der an das Drainagesystem angeschlossen ist, vgl. Abbildung 4.10 (b). Zur Durchführung von zyklischen sättigungsgesteuerten Be- und Entwässerungsversuchen sowie zur Datenerfassung

wird ein Einplatinencomputer – Typ: *Raspberry Pi* Model 3 B+ – verwendet, vgl. Abbildung 4.10 (c). Hierauf basierend trägt das Steuerungs- und Messsystem den Namen *UNSAT-Pi*. Anwendungsbeispiele, die Kalibrierung der Sensoren und Spritzenpumpe, der Schaltplan sowie der Quellcode zur Steuerung der Komponenten und Datenerfassung sind in Milatz (2020) sowie Milatz und Grabe (2019) dokumentiert.

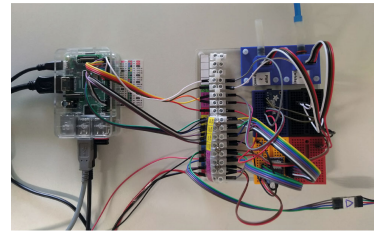
Bei den durchgeführten Versuchen wird eine konstante Be- bzw. Entwässerungsgeschwindigkeit angesetzt. Es handelt sich somit um einen Versuchsverfahren zur Bestimmung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung unter transienten Randbedingungen.



(a) Sandprobe  
( $h/d = 12\text{mm}/12\text{mm}$ )



(b) Spritzenpumpe mit Spritze (Omnifix F Solo 1 ml)



(c) *UNSAT-Pi*

Abbildung 4.10: Versuchskomponenten zur Bestimmung zyklischer Kapillardruck-Sättigungs-Beziehungs mit dem *UNSAT-Pi*. Abbildungen (b) und (c) entnommen aus Milatz (2020).

#### 4.3.1.4 Transiente Versuche im modifizierten Einfachschergerät (ADVDCSS)

In einem ursprünglich für Einfachscher- und Triaxialversuche verwendeten Laborgerät – Typ: *GDS Combined Advanced Dynamic Cyclic Simple Shear (ADVDCSS)* – wurden volumengesteuerte Ent- und Bewässerungsversuche an Sandproben durchgeführt, vgl. Milatz (2016) und Törzs (2015). Zur Steuerung des Wasservolumens wird ein Druck-/Volumensteuergerät – Typ: *GDS Standard Pressure/Volume Controller (STDDPC v2)* – eingesetzt, vgl. Abbildung 4.11 (a). Im Zuge der Versuchsvorbereitung wird eine Sandprobe mit definierter Lagerungsdichte in einen auf einer Bodenplatte befindlichen Hohlzylinder aus Aluminium eingebaut und in das Laborgerät eingesetzt. Über das Volumensteuergerät ist es möglich über die Bodenplatte definierte Wasservolumina in die bzw. aus der Probe zu pumpen. Die Probe ist durch eine Filtermembran – vgl. Kapitel 4.3.1.2 – und einen in die Bodenplatte eingelassenen Filterstein hydraulisch mit dem Steuergerät verbunden. Es handelt sich hierbei um denselben Probensockel, der bei den Versuchen mit der hängenden Wassersäule eingesetzt wurde, vgl. Abbildung 4.9 (b). Auf einem Computer werden die Messdaten mit einer vorgegebenen Abtastrate gespeichert.

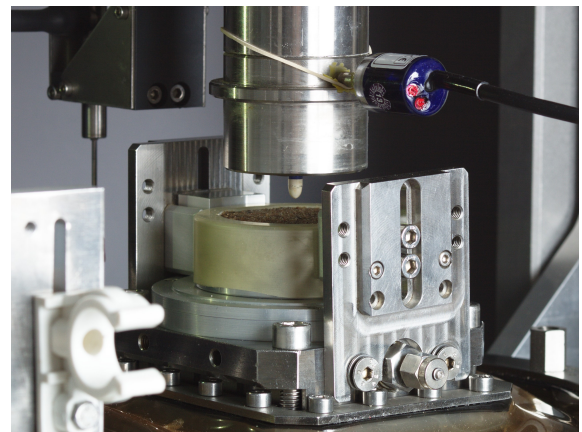
In das am Laststempel des Geräts verschraubte Kopfstück ist ein Tensiometer – Typ: *Meter Group T5* – eingebaut. Eine poröse Keramikspitze zur Messung der Saugspannung im Inneren der Probe ist in das Kopfstück eingelassen, vgl. Abbildung 4.11 (b). Über zwei Bohrungen im Kopfstück wird der hydraulisch-pneumatische Kontakt der Probenoberkante zur Erdatmosphäre gewährleistet.

Nach dem Probeneinbau und Andockvorgang des Kopfstück an die Probenoberkante bei 10 kPa folgt die Durchführung des Ent- und Bewässerungsversuchs. Zunächst wird über das Gerät die vertikale Andockspannung von 10 kPa in 240 s auf 50 kPa erhöht. Die horizontale Verschiebung der Bodenplatte wird über das Schergerät stets auf  $u_x = 0$  mm gehalten. Weiterhin wird die Probe über einen vorgegebenen Zeitraum konsolidiert. Daraufhin wird das, aus der mit der Konsolidierung einhergehenden Setzung resultierende, aktuelle Porenvolumen ausgerechnet und die dem einzustellenden Sättigungsgrad entsprechende Wassermenge kann in das Druck-/Volumensteuergerät eingegeben werden. So lassen sich verschiedene Be- und Entwässerungszyklen aufbringen.

Bei den durchgeführten Versuchen wird eine konstante Be- bzw. Entwässerungsgeschwindigkeit angesetzt. Es handelt sich somit ebenfalls um einen Versuchsverfahren zur Bestimmung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung unter transienten Randbedingungen.



(a) Versuchsstand



(b) Sandprobe

Abbildung 4.11: (a) Versuchsstand mit ADVDCSS und STDDPC. (b) Eingebaute Probe kurz vor dem Andocken mit dem Kopfstück. Abbildungen entnommen aus Törzs (2015).

### 4.3.2 Ergebnisse der Laborversuche zur statischen Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung

Zu den Versuchen zur statischen Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung zählen die Verdunstungsversuche mit dem HYPROP sowie die Versuche mit der hängenden Wassersäule. Die Ergebnisse mehrerer Versuchsdurchläufe an Hamburger Sand, ISS-0 Sand und PU-gebundenem Deckschichtmaterial mit dem jeweils geeigneten Versuchsverfahren sind im Folgenden nach Material geordnet dargestellt.

Der Anschaulichkeit dienend werden die erhobenen Messdaten inklusive einer Kurvenanpassung der S-förmigen Verläufe dargestellt. Zur Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung wird auf das analytische Modell nach van Genuchten (1980) zurückgegriffen, vgl. Kapitel 5.

### 4.3.2.1 Hamburger Sand

In Abbildung 4.12 sind die Ergebnisse von drei Verdunstungsversuchen an Hamburger Sand bei verschiedener Lagerungsdichte bzw. Anfangsporosität dargestellt. In Tabelle 4.4 sind die abgeleiteten Parameter zur Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit dem Modell nach van Genuchten (1980) zusammengefasst. Die Tendenz eines höheren Lufttrittspunktes bei zunehmender Verdichtung, d. h. Verkleinerung des Porenraumes, lässt sich erkennen. Je geringer die Porosität  $n$ , desto höher die Saugspannung  $s$ , die angelegt muss, um die jeweilige Sandprobe zu entwässern. Der Effekt ist in den durch Kurvenanpassung abgeleiteten Parametern für das Modell nach van Genuchten (1980) speziell dem Parameter  $\alpha_{VG}$  zu entnehmen. Dieser hängt direkt mit dem Lufttrittspunkt eines Bodens zusammen und es gilt der folgende proportionale Zusammenhang. Je höher der Lufttrittspunkt, desto größer  $p_{eVG} = 1/\alpha_{VG}$ .

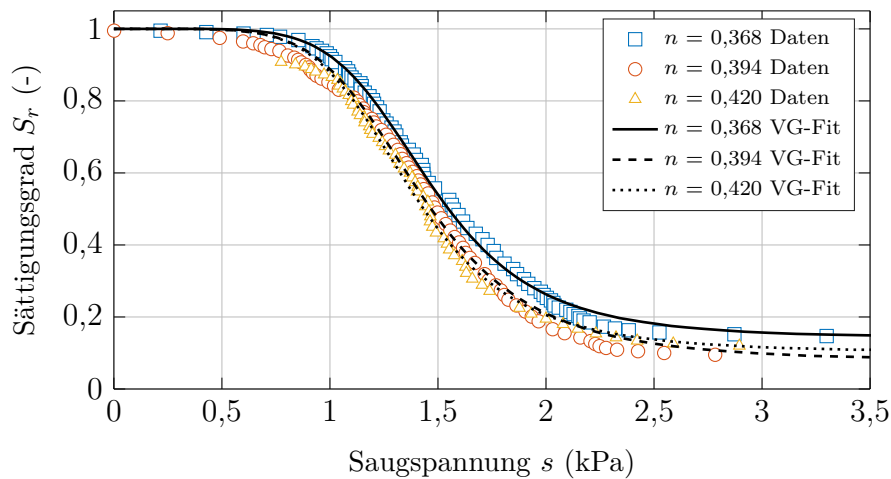


Abbildung 4.12: Ergebnisse der Verdunstungsversuche zur Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung an Hamburger Sand bei verschiedener Anfangsporosität.

Tabelle 4.4: Parameter für den empirischen Modellierungsansatz für die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung nach van Genuchten (1980) für Hamburger Sand sowie aus den Verdunstungsversuchen abgeleitete residuale Sättigungsgrade.

Parameter	Einheit	Hamburger Sand		
$n$	–	0,368	0,394	0,420
$S_{r,max}$	–	1,000	1,000	1,000
$S_{r,min}$	–	0,142	0,078	0,102
$\alpha_{VG}$	1/kPa	0,710	0,736	0,758
$p_{eVG}$	kPa	1,409	1,359	1,319
$n_{VG}$	–	6,330	5,810	6,028
$m_{VG} = 1 - 1/n_{VG}$	–	0,842	0,828	0,834

Für den Versuch mit locker gelagertem Sand bei  $n = 0,420$ , was einer bezogenen Dichte von  $I_n = 0,25$  entspricht, konnte beobachtet werden, dass sich Setzungen im 50 mm hohen

Probenzylinder von rd. 1 mm eingestellt haben. Eine Verringerung der Probenhöhe um 1 mm entspricht einer Änderung des Verdichtungsgrads von  $\Delta I_n = 0,12$ .

#### 4.3.2.2 ISS-0 Sand

Ein Verdunstungsversuch mit dem HYPROP wurde bei einer Anfangsporosität von  $n = 0,440$  durchgeführt, was einem Verdichtungsgrad von  $I_n = 0,49$  entspricht. Die Ergebnisse sind in Abbildung 4.13 dargestellt. In Tabelle 4.5 sind die abgeleiteten Parameter zur Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit dem Modell nach van Genuchten (1980) zusammengefasst. Die Lufttrittspunkt liegt bei  $s \approx 4,5$  kPa

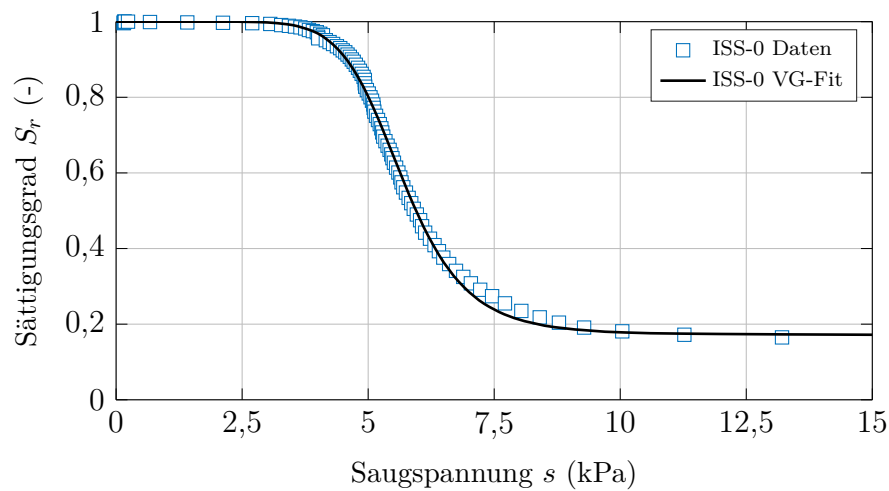


Abbildung 4.13: Ergebnis eines Verdunstungsversuchs zur Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung an ISS-0 Sand bei einer Anfangsporosität von  $n = 0,440$ .

Tabelle 4.5: Parameter für den empirischen Modellierungsansatz für die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung nach van Genuchten (1980) für ISS-0 Sand sowie aus den Verdunstungsversuchen abgeleitete residuale Sättigungsgrade.

Parameter	Einheit	ISS-0 Sand
$n$	–	0,440
$S_{r,max}$	–	1,000
$S_{r,min}$	–	0,158
$\alpha_{VG}$	1/kPa	0,179
$n_{VG}$	–	9,352
$m_{VG} = 1 - 1/n_{VG}$	–	0,893

#### 4.3.2.3 PU-gebundenes Deckschichtmaterial

In Renken, Oeser u. a. (2015) wird die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung für drei Mischungen von PU-basierten Deckschichtmaterialien mit verschiedener granulometrischer

Zusammensetzung experimentell ermittelt. Die Zusammensetzungen ähneln den in dieser Arbeit untersuchten Materialien. Der geringe Einflussbereich des Wasserretentionsverhaltens wurde hierin mit einer Methode mit einem Druckplattenextraktor (DIN EN ISO 11274:2020-04) erkundet. Es werden hohe residuale Sättigungsgrade des neuartigen Deckschichtmaterials von bis zu 30% beschrieben. Basierend auf diesen Erkenntnissen und den in Törzs, G. Lu u. a. (2019) aufgeführten Prognosen zum Wasserretentionsverhalten wird ein Verdunstungsversuch mit dem HYPROP an PUPM Typ A durchgeführt. Das Ergebnis ist in Abbildung 4.14 dargestellt, zugehörige Parameter in Tabelle 4.6 zusammengefasst. Zur Umsetzung des Versuchs wurden in einen Bohrkern des Materials – Durchmesser: 80 mm, Höhe: 50 mm – zwei Löcher gebohrt, die der Platzierung der in den Probensockel eingelassenen Tensiometern im Probeninneren dienen.

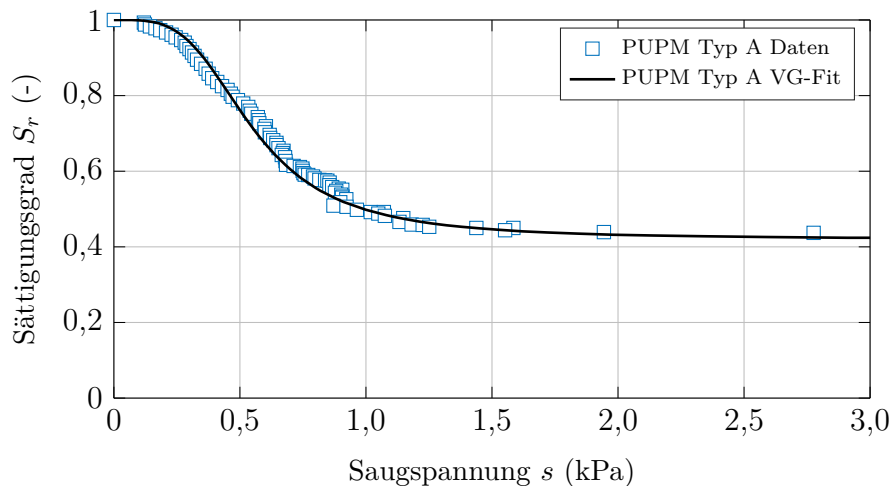


Abbildung 4.14: Ergebnis eines Verdunstungsversuchs zur Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung an PU-gebundenem Deckschichtmaterial bei einer Anfangsporosität von  $n = 0,278$ .

Es lässt sich ein im Vergleich zu den Sanden relativ hoher residualer Sättigungszustand von  $S_r \approx 0,42$  erkennen. Es wird geschlussfolgert, dass die mit dem HYPROP erhobenen Ergebnisse für Versuche an PUPM nicht abschließend aussagekräftig sind. Es kann nicht festgestellt werden, ob der hohe residuale Sättigungsgrad aus der Geometrie oder dem Herstellungsverfahren der Probe resultiert. Zum einen weist eine größere Probenhöhe mehr basinartige Poren auf, die die Wasserwegigkeit beeinträchtigen. Zum anderen könnte es durch die Bohrungen im Zuge der Probenherstellung zu Verschmierungen oder Zusetzen der Kontaktfläche Tensiometer/Probe gekommen sein.

Um ein weniger von der Probengeometrie abhängiges Verfahren zu verwenden und ohne die Notwendigkeit eines guten hydraulischen Kontaktes zwischen Tensiometer und Porenraum, wird ein umfassendes Laborprogramm mit dem Versuchsstand mit der hängenden Wassersäule durchgeführt. Es werden PUPM Typ A und PUPM Typ B untersucht.

Hierzu wurde die Probenhöhe auf 10 mm festgelegt. Es ist entscheidend, die Höhe der Probe zu minimieren, da die Sättigung  $S_r$  eine volumenbezogene Eigenschaft ist, die im teilgesättigten Zustand über die Probenhöhe variieren kann. Um einen repräsentativen Sät-

tigungsgrad für eine Probe abzuleiten, würde es daher nicht ausreichen, die Wassermenge in einer höheren Probe zu mitteln. Die Verifizierung der gewählten Probenhöhe mittels bildgebender Verfahren ist in Anhang C zusammengefasst. Um Unregelmäßigkeiten, d. h. eine inhomogene Porenverteilungen, zu berücksichtigen, wurden für jede Mischung drei verschiedene Proben jeweils dreimal getestet. Um die minimal schwankenden Porositäten der verschiedenen Proben zu berücksichtigen, wurde die am Ende eines Versuchs ausgeflossene Wassermenge verwendet, um die effektive Porosität der spezifischen Probe abzuleiten.

Die Ergebnisse aus mehreren Versuchsdurchgängen zur Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung der PU-gebundenen Deckschichtmaterials vom Typ A und B sind in Abbildung 4.15 dargestellt, vgl. Törzs, G. Lu u. a. (2019). Die Lufteintrittspunkte der Mischungen vom TYP A und TYP B liegen zwischen  $s = 0$  kPa und  $s = 0,15$  kPa. Die mittlere Steigung der Datenpunkte kann aus linearen Regressionsgeraden entnommen werden, deren zugehörige Gleichung in den Legenden der entsprechenden Abbildungen angegeben sind. Das rasche Entwässerungsverhalten der Materialien wird durch die Steigung der Kurve ersichtlich. Eine größere negative Steigung entspricht einer schnelleren Entwässerung. Durch Kurvenanpassung wurden die Parameter für das Modell nach van Genuchten (1980) ermittelt. Die entsprechenden Parameter sind in Tabelle 4.6 zusammengefasst.

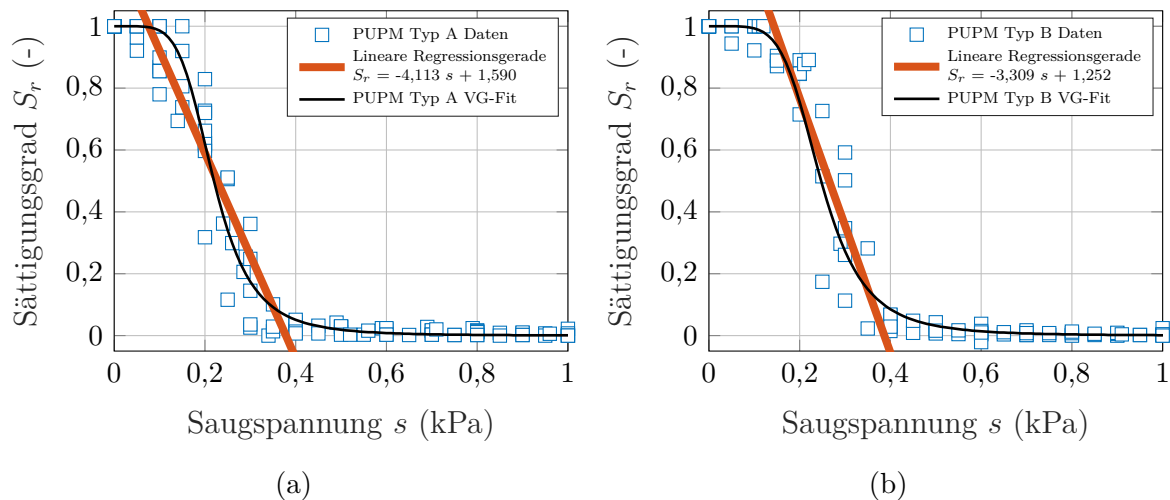


Abbildung 4.15: Ergebnisse der Laborversuche zur Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung (Entwässerung) von PU-gebundenem Deckschichtmaterial (a) des Typ A und (b) des Typ B, nach Törzs, G. Lu u. a. (2019).

### 4.3.3 Ergebnisse der Laborversuche zum zyklischen Verhalten der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung

Zu den Versuchen zur zyklischen Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung unter transienten Randbedingungen zählen die Verfahren mit dem UNSAT- $Pi$  sowie die Versuche mit dem ADVDCSS. Weitere Daten zur zyklischen Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung wurden mit der Methode der hängenden Wassersäule erhoben. Die Ergebnisse mehrerer Versuchsdurch-

Tabelle 4.6: Parameter für den empirischen Modellierungsansatz für die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung nach van Genuchten (1980) für PU-gebundenes Deckschichtmaterial.

Parameter	Einheit	Typ A <sup>1</sup>	Typ A <sup>2</sup>	Typ B <sup>2</sup>
$n$	–	0,278	0,278	0,289
$S_{r,\max}$	–	1,000	1,000	1,000
$S_{r,\min}$	–	0,420	0,000	0,000
$\alpha_{VG}$	1/kPa	2,029	4,792	4,255
$n_{VG}$	–	3,763	5,526	5,546
$m_{VG} = 1 - 1/n_{VG}$	–	0,734	0,819	0,820

<sup>1</sup> Methode: Verdunstungsmethode, Probenhöhe:  $h = 50$  mm

<sup>2</sup> Methode: Hängende Wassersäule, Probenhöhe:  $h = 10$  mm

läufe an Hamburger Sand, ISS-0 Sand und PU-gebundenem Deckschichtmaterial sind im Folgenden nach Material geordnet dargestellt.

#### 4.3.3.1 Hamburger Sand

Zur Identifizierung der hydraulischen Hysterese der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung von Hamburger Sand wurden zyklische Ent- und Bewässerungsversuche mit dem UNSAT- $Pi$  durchgeführt. In Abbildung 4.16 (a) ist der in der Probe vorgegebene Sättigungsgrad im zeitlichen Verlauf dargestellt. Hierbei wird eine konstante Änderung der in die Probe ein- bzw. abfließenden Wassermenge  $dV_w/dt$  vorgegeben. Dies resultiert in einer mittleren Änderung des Sättigungsgrads von  $dS_r/dt \approx \pm 1,1 \times 10^{-4}$  1/s.

Im ersten Entwässerungsschritt wurde der Sättigungsgrad  $S_r$  in der Probe von 1,0 auf 0,3 reduziert. Der daraufhin folgende Bewässerungsschritt wurde auf den für die jeweilige Lagerungsdichte spezifischen Sättigungsgrad  $S_{r,\text{entrap}}$  eingestellt. Dieser wurde in Vorversuchen für die jeweilige Lagerungsdichte ermittelt und resultiert aus dem Lufteinschluss bei Wiederbewässerung. Daraufhin folgte ein gezieltes Ent- und Bewässern mit dem Ziel die Amplitude der Hystereseschleifen (Scanningschleifen) bezogen auf den Sättigungsgrad sukzessive zu mindern. Am Ende des Versuchs wurde erneut der Ausgangszustand  $S_r = 1,0$  eingestellt.

Mit dem Ziel die Abhängigkeit des Wasserretentionsverhaltens von dem Verdichtungsgrad zu ermitteln, wurden Versuche an den in Tabelle 4.2 angegebenen Lagerungsdichten durchgeführt.

Die Versuchsergebnisse – d. h. die aus der vorgegebenen Sättigung resultierende gemessene Saugspannung – sind in Abbildung 4.16 (b) und in Form der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung in Abbildung 4.16 (c) dargestellt.

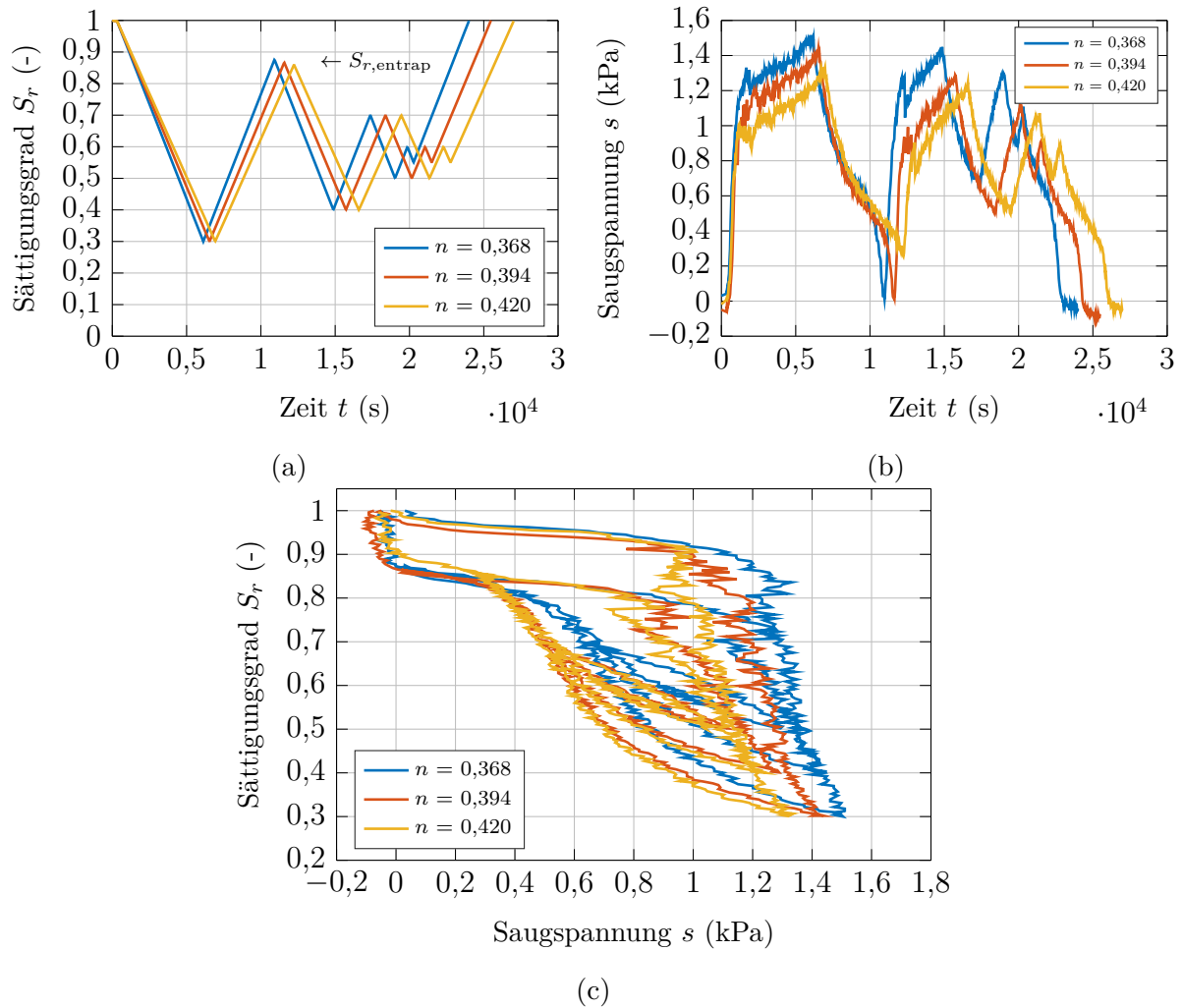


Abbildung 4.16: Zyklische Versuche mit dem UNSAT- $Pi$  durchgeführt an Hamburger Sand: (a) Vorgegebene Änderung des Sättigungsgrads, (b) zugehörige gemessene Saugspannung und (c) Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung.

#### 4.3.3.2 ISS-0 Sand

Zur Identifizierung der hydraulischen Hysterese der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung von ISS-0 Sand wurden zyklische Ent- und Bewässerungsversuche mit dem ADVDCSS durchgeführt. Der in der Probe herrschende Sättigungsgrad mit der aufbrachten konstanten Änderung des Sättigungsgrads  $dS_r/dt \approx \pm 2,8 \times 10^{-4} 1/s$  ist in Abbildung 4.17 (a) dargestellt. Im ersten Entwässerungsschritt wurde der Sättigungsgrad in der Probe von  $S_r = 1,0$  auf  $S_r = 0,4$  reduziert. Der daraufhin folgende Bewässerungsschritt wurde auf den für die jeweilige Lagerungsdichte spezifischen Sättigungsgrad  $S_{r,entrap}$  eingestellt. Für diesen Sand wurde dieser basierend auf Vorversuchen mit  $S_{r,entrap} = 0,8$  abgeschätzt. Es folgten hydraulische Be- und Entwässerungspfade mit dem Ziel die Ausprägung der Hystereseschleifen (Scanningschleifen) bezogen auf den Sättigungsgrad zu ermitteln. Im Rahmen der Versuchsdurchführung wurden jeweils drei hydraulische Schleifen abgebildet.

Mit dem Ziel die Abhängigkeit des Wasserretentionsverhaltens vom Verdichtungsgrad zu ermitteln, wurden Versuche an den in Tabelle 4.7 angegebenen Lagerungsdichten durchgeführt. Die Rohdaten wurden Kuhrt (2016) entnommen.

Tabelle 4.7: Volumenbezogene Größen der an ISS-0 Sand durchgeführten Laborversuche zur Bestimmung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung unter Verwendung des ADVDCSS.

$\rho_d$	$n$	$I_n$
g/cm <sup>3</sup>	–	–
1,532	0,422	0,639
1,481	0,441	0,492
1,410	0,468	0,284

Die Versuchsergebnisse – d. h. die aus der vorgegebenen Sättigung resultierende gemessene Saugspannung – sind in Abbildung 4.17 (b) und übereinander aufgetragen in Form der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung in Abbildung 4.17 (c) dargestellt.

Die in Abbildung 4.17 (a) teilweise vorhandenen Plateaus des Sättigungsgrads resultieren aus Wartezeiten nach den Ent- bzw. Bewässerungsschritten, da bei diesem Versuchsvorgehen die Folgeschritte händisch eingegeben werden mussten. In Abbildung 4.17 (b) lässt sich für  $n = 0,422$  nach dem ersten Entwässerungsschritt ein Drift in der Saugspannung bei einem konstanten Sättigungsgrad von  $S_r = 0,4$  erkennen. Dies deutet auf Wasserbewegungen im Inneren der Probe oder eine Folge dynamischer Effekte hin.

#### 4.3.3.3 PU-gebundenes Deckschichtmaterial

Anschließend an die durchgeführten Versuche mithilfe der Methode der hängenden Wassersäule zu der initialen Entwässerung von PUPM Typ A und PUPM Typ B, vgl. Kapitel 4.3.2.3, wurden ebenfalls Daten zu dem hydraulischen Bewässerungspfad erhoben. Die Kurven zeigen im Vergleich zu der initialen Entwässerungskurve bei Saugspannung  $s = 0$  kPa einen reduzierten maximalen Sättigungsgrad. Dieser beträgt für PUPM Typ A  $S_{r,\max} = 0,98$  und für PUPM Typ B  $S_{r,\max} = 0,72$ . Es ist zu beachten, dass der Sättigungsgrad, der nach dem Bewässerungsvorgang erreicht wird, umso geringer ist, je höher die spezifische Oberfläche der Partikel ist. D. h. je mehr Partikel in Partikelfraktionen mit geringerem Durchmesser vorhanden sind, desto geringer ist der nach dem Bewässerungsvorgang zu erreichende Sättigungsgrad. Dieses Verhalten ist mit einer größeren Menge eingeschlossener Luft im Inneren der porösen Struktur zu erklären.

#### 4.3.4 Abhängigkeit der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung von dem Verdichtungsgrad

Aus den im Vorangegangenen beschriebenen Ergebnissen zur Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung lassen sich für die Materialien mit verschieblichem Korngerüst, d. h. Ham-

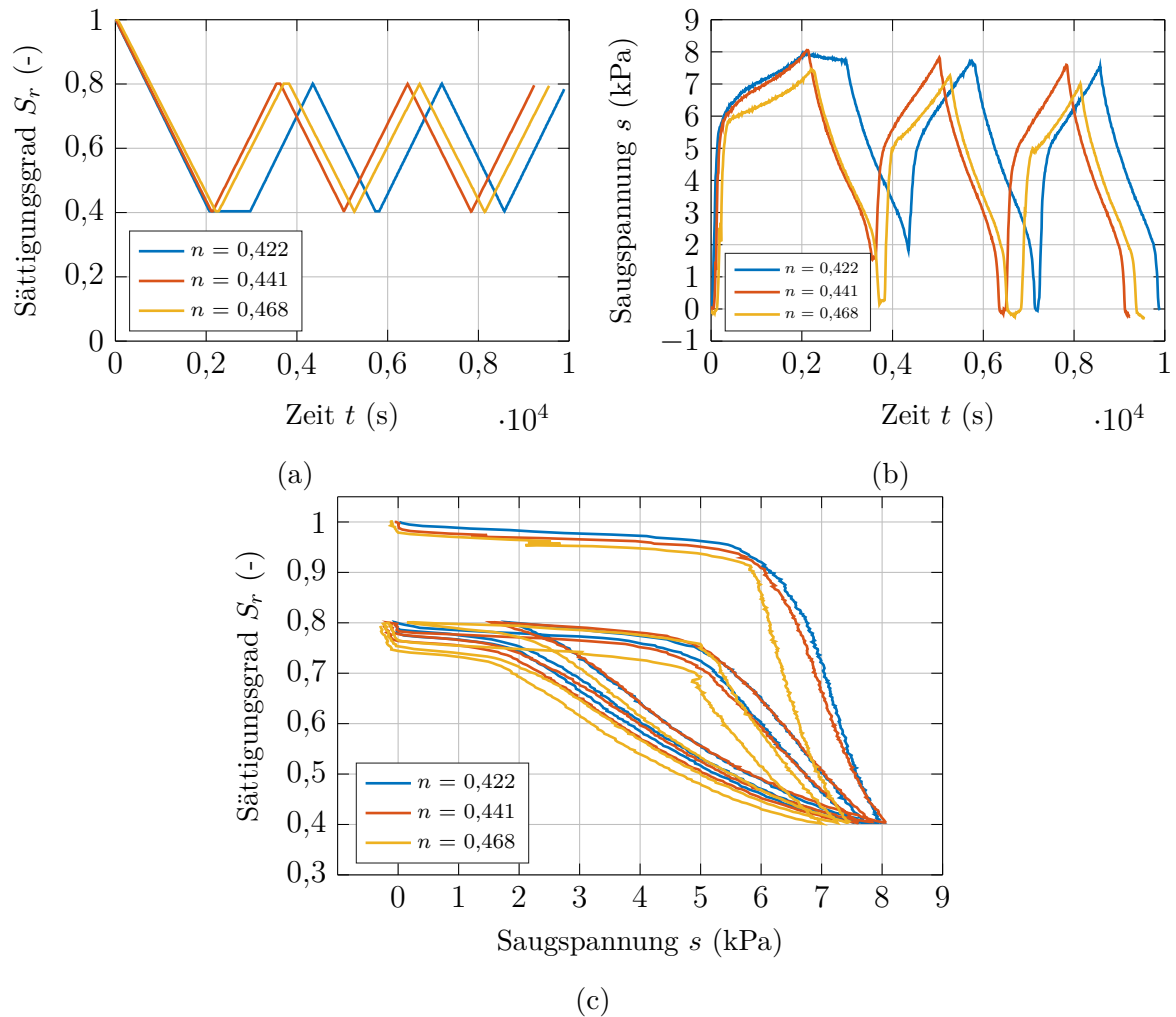


Abbildung 4.17: Zyklische Versuche mit dem ADVDCSS durchgeführt an ISS-0 Sand: (a) Vorgegebene Änderung des Sättigungsgrads, (b) zugehörige gemessene Saugspannung und (c) Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung.

burger Sand und ISS-0 Sand, von dem Verdichtungsgrad abhängige Kapillardruck-Sättigungs-Beziehungen darstellen. Es ergeben sich aus den in Abbildung 2.7 gezeigten hydraulischen Pfaden in der Saugspannungs-Sättigungs-Ebene somit gekrümmte Flächen im Saugspannungs-Sättigungs-Verdichtungsgrad-Raum. Diese werden auch als „soil-water characteristic surfaces“ (SWCS) bezeichnet, vgl. Kapitel 2.1.2.1.2. Die den untersuchten Sanden zugehörigen Ent- und Bewässerungsflächen sind in Abbildung 4.19 für Hamburger Sand und in Abbildung 4.20 für ISS-0 Sand dargestellt. Hierbei stehen die hellrote Färbung für Entwässerungsflächen und die hellblaue Färbung für Bewässerungsflächen.

#### 4.3.4.1 Rückprojektion der Ent- und Bewässerungsflächen auf die $s$ - $S_r$ -Ebene

Die dreidimensionalen Flächen lassen sich zurück auf die  $s$ - $S_r$ -Ebene projizieren, vgl. Abbildung 4.21. Hierbei wurden, neben den Messdaten, die Zustände bei Verdichtungsgrad

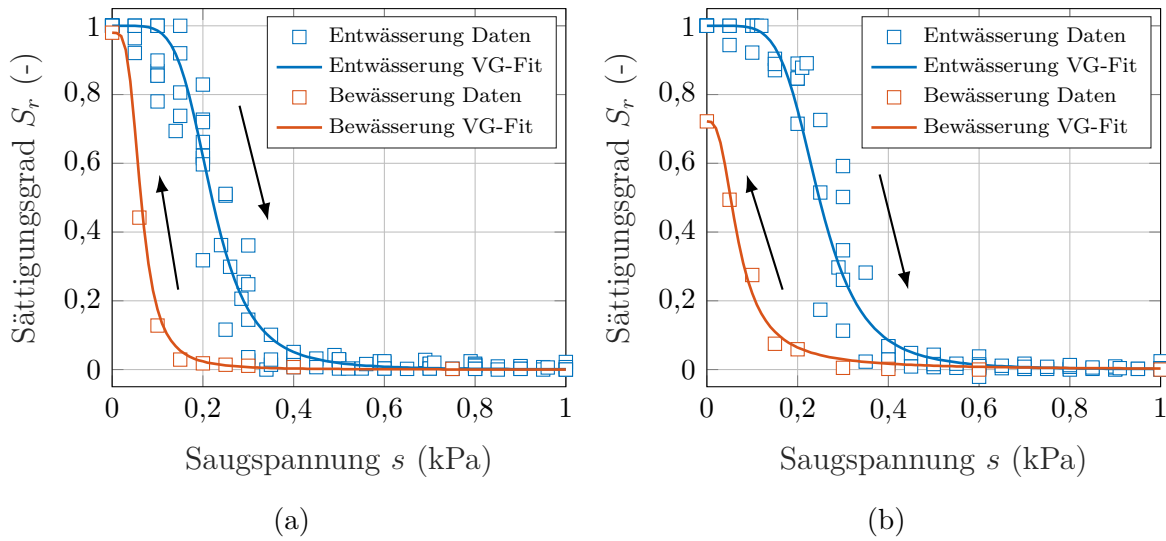


Abbildung 4.18: Ergebnisse der Laborversuche zur Ent- und Wiederbewässerung von PU-gebundenem Deckschichtmaterial (a) des Typ A und (b) des Typ B, Entwässerungsdaten nach Törzs, G. Lu u. a. (2019), vgl. Abbildung 4.15.

$I_n = 0,0$  sowie Verdichtungsgrad  $I_n = 1,0$  herangezogen. Diese Linien stellen die oberen und unteren Schranken des jeweiligen Pfades der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung dar. Sie hüllen den Bereich möglicher Saugspannungs-Sättigungs-Zustände in Abhängigkeit des Verdichtungsgrads ein.

Die maximale Differenz des Sättigungsgrads, die einer Saugspannung zuzuordnen ist, tritt bei initialer Entwässerung des Hamburger Sands auf. Sie beträgt  $\max\Delta S_r = 0,605$ . Bei Wiederbewässerung beträgt  $\max\Delta S_r = 0,244$ , bei anschließender Entwässerung  $\max\Delta S_r = 0,421$ . Der Trend eines abnehmenden  $\max\Delta S_r$  bei Wiederbewässerung sowie erneuter Entwässerung lässt sich für ISS-0 Sand bestätigen.

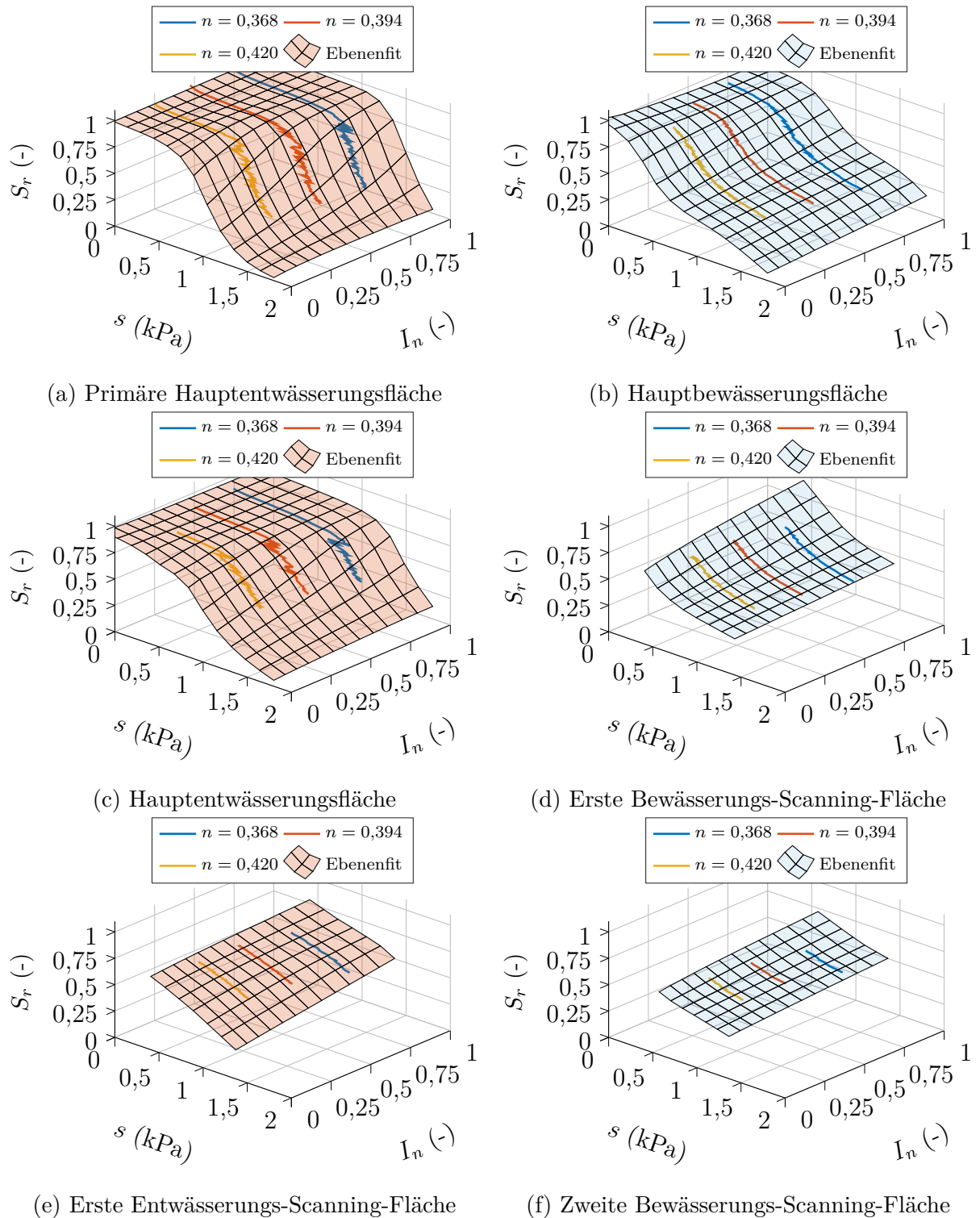


Abbildung 4.19: Experimentell ermittelte „soil-water characteristic surfaces“ (SWCS) von Hamburger Sand.

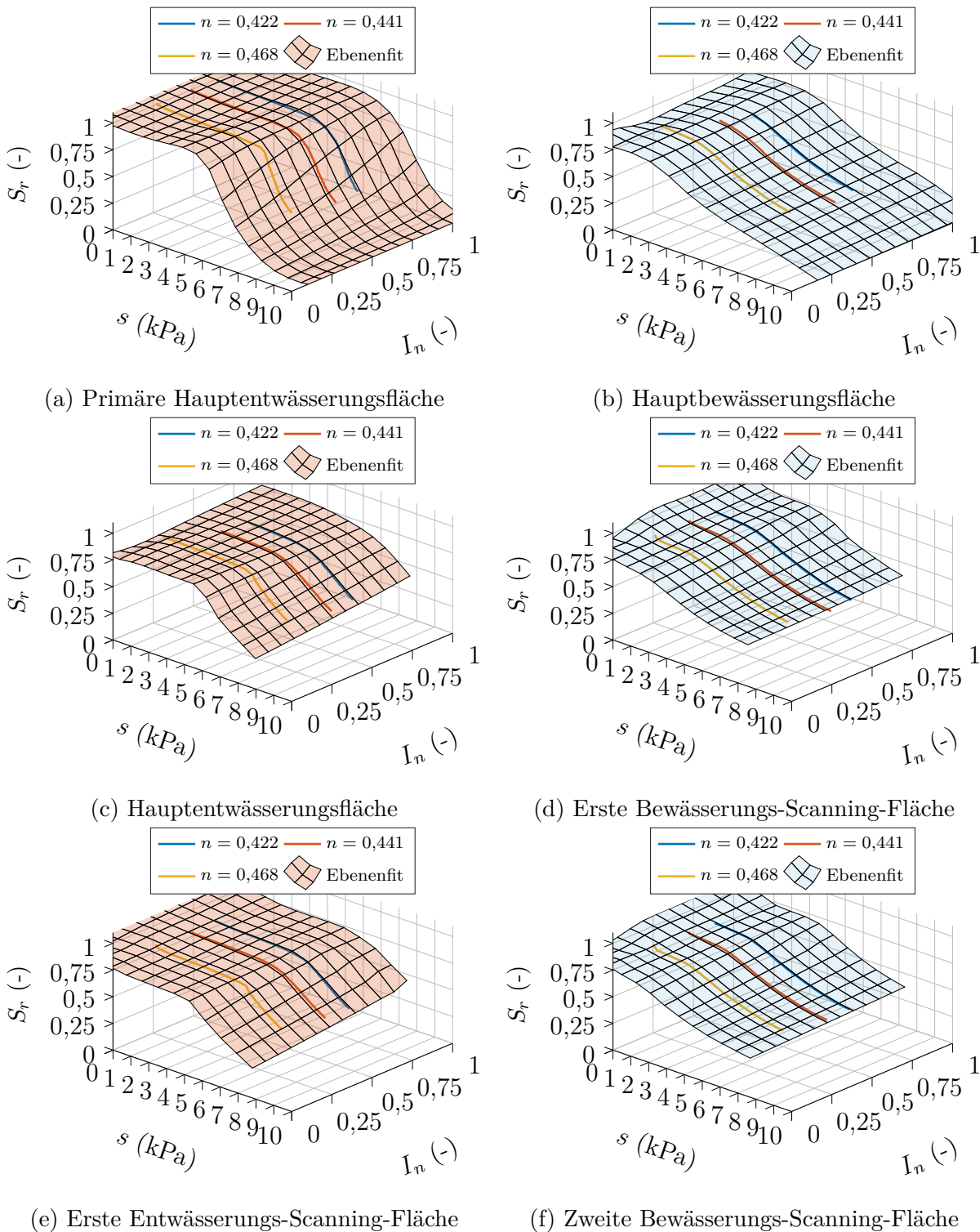
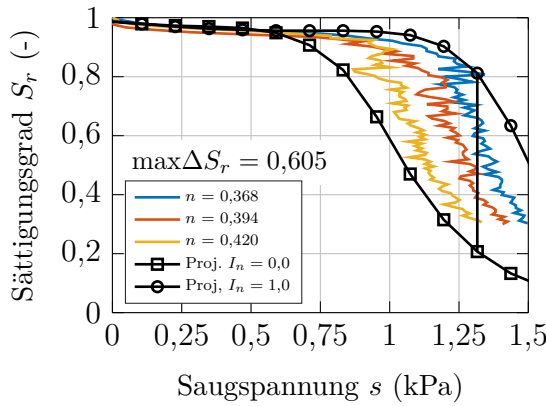
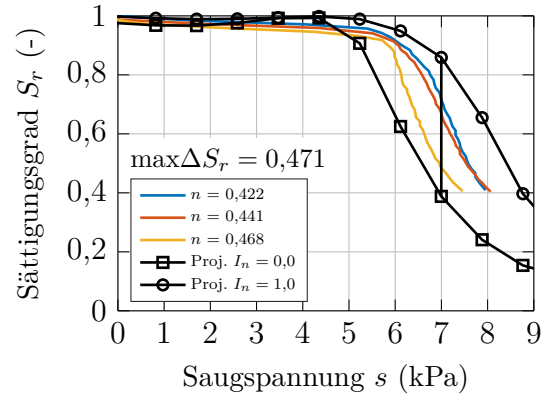


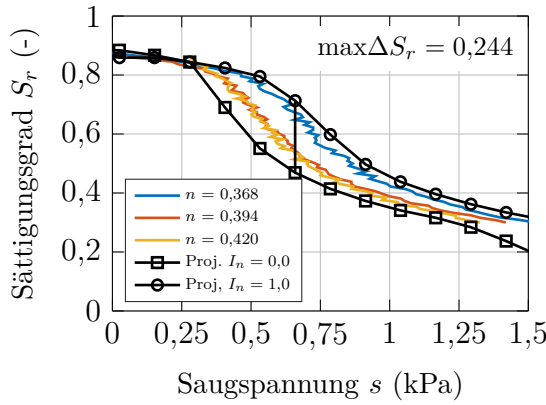
Abbildung 4.20: Experimentell ermittelte „soil-water characteristic surfaces“ (SWCS) von ISS-0 Sand.



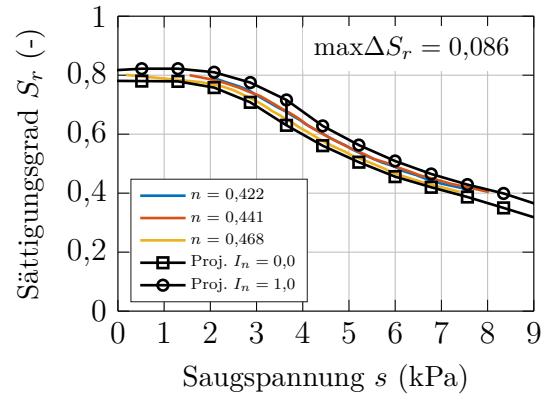
(a) Primäre Hauptentwässerungspfade



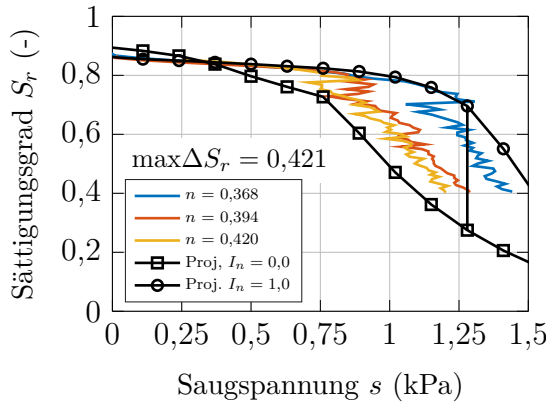
(b) Primär Hauptentwässerungspfade



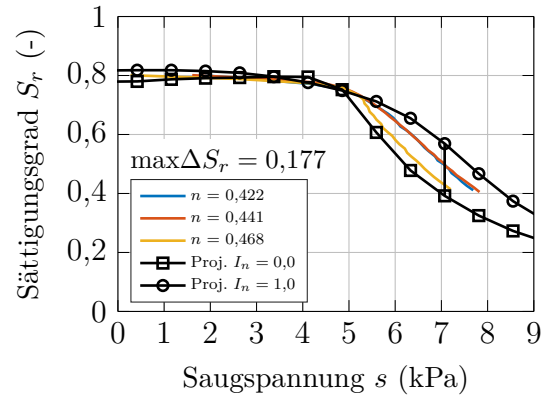
(c) Hauptbewässerungspfade



(d) Hauptbewässerungspfade



(e) Hauptentwässerungspfade



(f) Hauptentwässerungspfade

Abbildung 4.21: Zweidimensionale Visualisierung der Abhängigkeit der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung von dem Verdichtungsgrad. Verschiedene Pfade der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung von Hamburger Sand (links) und ISS-0 Sand (rechts) mit Projektion der Flächen aus Abbildung 4.19 und Abbildung 4.20 auf die auf  $s$ - $S_r$ -Ebene.

## 4.4 Fazit

Die zur Kalibrierung der mechanischen und hydraulischen Materialmodelle benötigten Eigenschaften der untersuchten Geomaterialien wurden im Vorangegangenen zusammengetragen.

Daneben wurde die messtechnische Erfassung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung von zwei Sanden und zwei Mischungen des neuartigen Deckschichtmaterials sowie die zugrunde liegende Methodik dokumentiert und erläutert. Untersuchungen von teilgesättigten Eigenschaften vergleichbarer poröser Deckschichtmaterialien sind in der Fachliteratur bisher nicht zu finden und stehen hiermit nun zur Verfügung.

Generell werden für alle Geomaterialien kleine Saugspannungsbereiche ermittelt, in denen die Kapillarität einen Einfluss auf den Sättigungsgrad hat. Die Materialien tendieren schon bei geringer Saugspannungszunahme zu einer Entwässerung. Ebenso gering ist die Minderung der Saugspannung, d. h. die Erhöhung des Porenwasserdrucks, die benötigt wird, um die porösen Medien zu wiederbewässern.

Der feine ISS-0 Sand weist einen Luftertrittspunkt von  $s \approx 6$  kPa auf, der als mittel-sandige Grobsand einzustufende Hamburger Sand einen von  $s \approx 1$  kPa, die neuartigen Deckschichtmaterialien einen von  $s \approx 0,1$  kPa.

Die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung der untersuchten Materialien zeigt ein ausgeprägt nichtlineares Verhalten. Die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung weist den typisch S-förmigen Verlauf auf. Bei Umkehr der Fließrichtung des Wassers – Ent- oder Bewässerung – stellt sich bei allen untersuchten Materialien eine hydraulische Hysterese ein.

Da das neuartige Deckschichtmaterial ein weitgehend elastisches Kompositmaterial mit hohem Elastizitätsmodul ist, dessen Korngerüst, bzw. dessen Porenraum, sich bei Belastung wenig verformt und das Material zusätzlich eine hohe Durchlässigkeit aufweist, wird ein Einfluss der Trockendichte der Mischungen auf die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung nicht untersucht.

Die Abhängigkeit der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehungen von der Lagerungsdichte, bzw. von dem Verdichtungsgrad, werden für beide Sande ersichtlich. Die größte Differenz zwischen den hydraulischen Pfaden bei Verdichtungsgrad  $I_n = 0,0$  und Verdichtungsgrad  $I_n = 1,0$  tritt bei initialer Entwässerung des Hamburger Sands auf und beträgt rd. 60%. Bei ISS-0 Sand beträgt die maximale Differenz rd. 47%. Der einer Saugspannung zugehörige Sättigungsgrad der untersuchten Sande hängt demnach von der hydraulischen Geschichte sowie maßgeblich von dem Verdichtungsgrad ab.

# 5 Modellierung teilgesättigter granularer Geomaterialien

Im Rahmen dieser Arbeit wurden Simulationen zum Verformungsverhalten teilgesättigter Böden unter verschiedenen hydraulischen und mechanischen Randbedingungen durchgeführt. Hierfür werden Materialmodelle in Form eines Kompressionsmodells für die Bodenbestandteile, ein in effektiven Spannungen formuliertes Spannungs-Dehnungs-Modell für das Korngerüst sowie ein hydraulisches Modell für gesättigte und teilgesättigte Zustände benötigt.

## 5.1 Modellierung des mechanischen Verhaltens

Das Verformungsverhalten von Böden kann durch Reduktion und Abstraktion der im bodenmechanischen Labor oder in situ gemachten Beobachtungen des realen Verhaltens in Form von mathematischen Materialmodellen abgebildet werden. Materialmodelle sind Approximationen des tatsächlichen, auf Beobachtungen basierenden Verformungsverhaltens. Die Genauigkeit der Approximation kann durch Validierung des modellierten Verformungsverhaltens gegen experimentell gewonnene Daten überprüft werden.

Spannungs-Dehnungs-Modelle für Böden beschreiben den funktionalen Zusammenhang zwischen effektiven Spannungen und Dehnungen bzw. deren Inkrementen oder Raten. In den im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Simulationen werden zwei Modelle verwendet: zum einen das linear elastische Materialmodell und zum anderen ein hypoplastisches Materialmodell.

Das auf dem Gesetz von Hooke basierende linear elastische Materialmodell ist das mathematisch einfachste Materialmodell für Feststoffe, wobei sich nur wenige Stoffe tatsächlich linear elastisch verhalten. In bestimmten Fragestellungen ist die Annahme eines linear elastischen Verformungsverhaltens für Böden gerechtfertigt, z. B. bei sehr kleinen Dehnungen, vgl. Kolymbas und Herle (2017). Verwenden lässt sich die lineare Elastizität demnach z. B. für die Berechnung von Wellenausbreitungen im Untergrund. Für die Prognose von Bodenverformungen bis zur Grenzlast ist sie ungeeignet. Da die aufgebrachten Radlasten deutlich unter der Druckfestigkeit des in Kapitel 4 beschriebenen porösen Deckschichtmaterials liegen, wird das Spannungs-Dehnungs-Verhaltens durch dieses Materialmodell modelliert. Es wurde festgestellt, dass sich das Material bei derartigen Spannungsniveaus weitgehend linear elastisch verhält.

Die hypoplastischen Materialmodelle sind komplexer, approximieren das tatsächliche Verformungsverhalten granularer Böden jedoch realistischer. Sie erfüllen die folgenden Vor-

aussetzungen: Spannungs- und dichteabhängige Steifigkeiten und Scherfestigkeit, elastische Steifigkeit bei sehr kleiner Dehnung, kritische Zustände sowie dichteabhängiges Dilatanzverhalten. Im Rahmen dieser Arbeit wird das hypoplastische Materialmodell nach Wolfersdorff (1996) mit den Erweiterungen um die intergranularen Dehnungen nach Niemunis und Herle (1997) zur Berücksichtigung des Verformungsverhaltens unter zyklischen Lasten verwendet.

Die Validierung des Spannungs-Dehnungs-Verhaltens der Modellsande sowie zugehörige Materialparameter sind in Anhang B dieser Arbeit aufgeführt. Dort sind die Ergebnisse von Ödometerversuchen nach DIN EN ISO 17892-5:2017-08 und von CD-Triaxialversuchen nach DIN EN ISO 17892-9:2018-07 für jeweils verschiedene Lagerungsdichten sowie die zugehörigen Simulationsergebnisse dargestellt.

## 5.2 Modellierung des hydraulischen Verhaltens

Der Fokus dieser Arbeit liegt auf der Modellierung des hydraulischen Verhaltens teilgesättigter Böden. Die Modellierung des in Kapitel 4 experimentell ermittelten Zusammenhangs zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad sowie die hieraus ableitbare hydraulische Leitfähigkeit im teilgesättigten Zustand werden im Folgenden erläutert.

### 5.2.1 Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung

#### 5.2.1.1 Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung ohne Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese

Die Fachliteratur beschreibt eine Vielzahl von Modellen zur Beschreibung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung ohne Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese. Bei diesen Modellen handelt sich zumeist um Formulierungen basierend auf empirischen Gleichungen. In der Wissenschaft und Baupraxis finden u. a. die Modelle von Gardner (1958), Brooks und Corey (1964), Haverkamp u. a. (1977), van Genuchten (1980), D. G. Fredlund und Xing (1994) sowie D. G. Fredlund und Pham (2006) Anwendung. Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Beschreibung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung ohne Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese das weitverbreitete Modell nach van Genuchten (1980) verwendet, vgl. Gleichung 5.1.

$$S_e(s) = \frac{1}{(1 + (\alpha_{VG} s)^{n_{VG}})^{m_{VG}}} \quad (5.1)$$

Hierin ist  $S_e$  der effektive Sättigungsgrad, der auch als normierter Sättigungsgrad bezeichnet wird. Dieser beschreibt die im Boden befindliche Wassermenge, normiert zwischen dem minimalen sich bei residuellen Bedingungen einstellenden Sättigungsgrad  $S_{r,\min}$  und dem maximalen sich bei gesättigten Bedingungen einstellenden Sättigungsgrad  $S_{r,\max}$ . Die Saugspannung ist definiert als Differenz der Porenfluiddrücke  $s = u_a - u_w$ , mit dem Porenluftdruck  $u_a$  und dem Porenluftdruck  $u_w$ . Zur Kalibrierung des Modells werden drei

Modellparameter benötigt, die sich aus empirischen Beobachtungen ableiten lassen:  $\alpha_{VG}$ ,  $n_{VG}$  und  $m_{VG}$ . Hierbei steht  $\alpha_{VG}$  in Korrelation mit dem Kehrwert des Lufteintrittspunkts und hat die Einheit  $1/\text{kPa}$ .  $n_{VG}$  steht in Zusammenhang mit der Rate mit der Wasser aus dem Boden entzogen wird, sobald der Lufteintrittspunkt überschritten wurde. Der Parameter  $m_{VG}$  wird durch den residuellen Sättigungsgrad beeinflusst.

Über Gleichung 5.2 lässt sich der effektive Sättigungsgrad  $S_e$  in den tatsächlichen Sättigungsgrad  $S_r$  umrechnen.

$$S_r = S_e (S_{r,\max} - S_{r,\min}) + S_{r,\min} \quad (5.2)$$

Üblicherweise werden zur Modellierung des S-förmigen Verlaufs der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung die drei oben genannten Parameter  $a$ ,  $n$  und  $m$  herangezogen, vgl. van Genuchten (1980), D. G. Fredlund und Xing (1994) und Durner (1994). Unter Einbuße der Flexibilität haben u. a. Burdine (1953) und Mualem (1976) bereits Vereinfachungen für dreiparametrische Modelle vorgeschlagen, um diese in zweiparametrische zu überführen. Hierfür wird der Parameter  $m$  in Abhängigkeit des Parameters  $n$  ausgedrückt. Im Rahmen dieser Arbeit wird der gängige Vorschlag von Mualem (1976) verwendet, vgl. Gleichung 5.3. Eingesetzt in Gleichung 5.1 ergibt sich Gleichung 5.4.

$$m_{VG} = 1 - \frac{1}{n_{VG}} \quad (5.3)$$

$$S_e(s) = \frac{1}{(1 + (\alpha_{VG} s)^{n_{VG}})^{1-1/n_{VG}}} \quad (5.4)$$

### 5.2.1.2 Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese

In Everett (1954) wurde bereits ein physikalisch basiertes Modell zur allgemeinen Beschreibung hysteretischen Verhaltens vorgestellt. Physikalisch basierte Modelle dominieren die Anfänge der Formulierung der hydraulischen Hysterese der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung. Auf der anderen Seite stehen empirische Modelle. Diese Modelle basieren auf der Approximation von Kurven, die durch experimentelle Untersuchungen gewonnen wurden, wobei über gewählte Parameter und geeignete Gleichungen das beobachtete hydraulische Verhalten der Böden abgebildet wird. Pham u. a. (2005) stellt eine umfassende Übersicht von Modellen zur Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese zur Verfügung, die von 1954 bis 2004 publiziert wurden. Ausgewählte Modelle nach 2004 sind u. a. die Modelle beschrieben in Li (2005), Muraleetharan u. a. (2009), Pedroso und Williams (2010), C. Yang u. a. (2012), Tsiampousi u. a. (2013), Zhou u. a. (2012) und Zhou (2013).

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Beschreibung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese das Modell nach Pedroso und Williams (2010) verwendet. Dieses Modell wird im Folgenden erläutert. Weitere Informationen zur Implementierung dieses Modells in einer in der Programmiersprache Go geschriebenen

FE-Code zur Simulation des Verformungsverhaltens zyklischer Belastungen eines Flachfundaments finden sich in Pedroso (2014).

Zur Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung werden in Pedroso und Williams (2010) sog. Referenzkurven vorgestellt. Diese ähneln den von Li (2005) beschriebenen Primärkurven und umschließen den Bereich möglicher Saugspannungs-Sättigungs-Zustände. Sie ermöglichen innerhalb der durch sie definierten Grenzen unendlich viele Kapillardruck-Sättigungs-Zustände, bzw. hydraulische Scanning-Pfade, vgl. Kapitel 2. Dieses Modell basiert auf dem Konzept der Referenzkurven, das eine einheitliche Beschreibung des makroskopisch beobachteten Verhaltens von Tonen, Sanden und anderen Materialien unter isotroper Kompression sowie des Wasserretentionsverhaltens von Böden oder Geotextilien ermöglicht, vgl. Pedroso, Sheng u. a. (2009).

In Abbildung 5.1 sind die Referenzkurven in Form eines trilinearen Modells – jeweils durch die drei Geraden  $\lambda_0$ ,  $\lambda_1$  und  $\lambda_2$  – dargestellt. Zur Fixierung der Referenzkurven in der Saugspannungs-Sättigungs-Ebene werden die vier Konstanten  $x_{Rd}$ ,  $x_{Rw}$ ,  $y_R$  sowie  $y_0$  benötigt, vgl. Abbildung 5.2. Um einen weichen Übergang von einer Geraden auf die benachbarte zu ermöglichen, werden  $\beta$ -Koeffizienten eingeführt, vgl. Abbildung 5.3. Da in der Realität die Krümmungen der Abschnitte der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung nicht gleich sind, ist es möglich für jeden Übergang, also beispielsweise von  $\lambda_0$  auf  $\lambda_1$  oder von  $\lambda_1$  auf  $\lambda_2$ , verschiedene Werte für  $\beta$  vorzugeben.

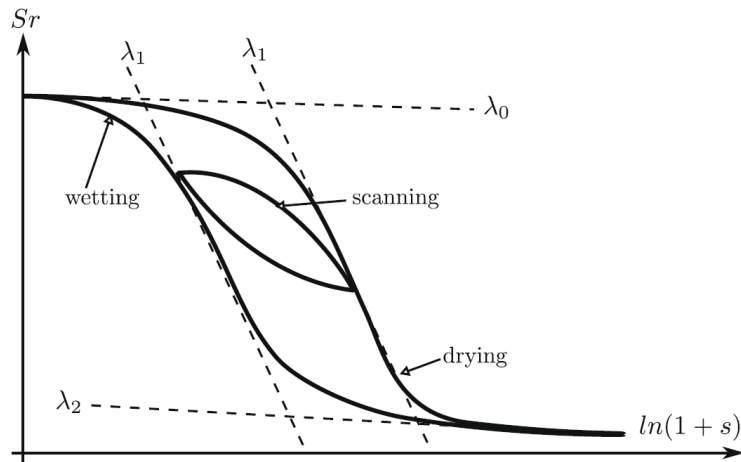


Abbildung 5.1: Typischer Verlauf der nichtlinearen Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit linearen Referenzkurven. Abbildung aus Pedroso und Williams (2010).

Zur vollständigen Kalibrierung des Modells ohne Vereinfachungen, wie z. B.  $\lambda_1 = \lambda_w = \lambda_d$  oder  $\lambda_0 = \lambda_2 = 0$ , ergeben sich 12 Modellparameter. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Modellvariante mit  $\lambda_0 = \lambda_2 = 0$  verwendet. Diese Einschränkung der Steigungen der Hauptent- bzw. Hauptbewässerungskurven bei sehr geringen Saugspannungen bzw. bei Erreichen residueller Zustände korrespondiert mit den experimentellen Untersuchungsergebnissen, vgl. Kapitel 4.3.3. Mit dieser legitimen Einschränkung weist das Modell somit 10 Modellparameter auf.

Die durch gezieltes Anpassen des Modells an Versuchsergebnisse erforderliche Parameterbestimmung wird ausführlich in Pedroso und Williams (2010) beschrieben. Für alle im

Rahmen dieser Arbeit ermittelten Parametersätze wurde das dort beschriebene Vorgehen angewendet.

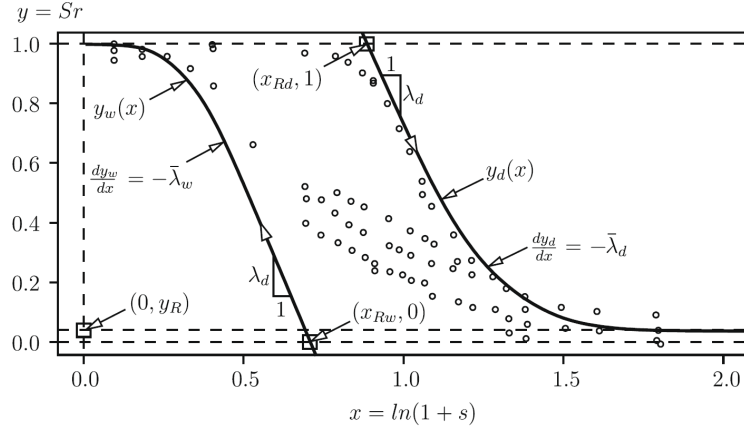


Abbildung 5.2: Definition der Referenzkurven  $y_d$  und  $y_w$  und der Parameter  $x_{Rd}$ ,  $x_{Rw}$  und  $y_R$ . Abbildung aus Pedroso und Williams (2010).

Im Rahmen des vorgestellten Modells wird die Abszisse als  $x$  bezeichnet. Der Wert  $x$  wird mit der Saugspannung  $s = u_a - u_w$  gleichgesetzt. Alternativ akzeptiert das Modell auch eine logarithmierte Saugspannung  $x = \ln(1 + s)$ . Gemäß Pedroso und Williams (2010) hat dies den Vorteil der numerische Stabilität beim Übergangsbereich zwischen teilgesättigten und gesättigten Bedingungen, d. h. bei  $s = 0$  kPa.

Die Ordinate  $y$  entspricht im Regelfall dem tatsächlichen Sättigungsgrad  $S_r = \theta/\theta_{\max}$ . Alternativ lassen sich auch weitere Größen vorgeben, wie z. B. der volumetrische Wassergehalt  $\theta$ .

In Pedroso und Williams (2010) wird die in Gleichung 5.5 zur Beschreibung der Referenzkurve für Entwässerung  $y_d$  vorgegeben. Der Index  $d$  steht hierbei für Drying.

$$y_d(x) = -\lambda_d x + \frac{1}{\beta_d} \ln \left( c_3^d + c_2^d e^{c_1^d x} \right) \quad (5.5)$$

Hierbei sind  $c_1^d$ ,  $c_2^d$  und  $c_3^d$  Konstanten in Abhängigkeit der Eingangsparameter, die gemäß Gleichungen 5.6, 5.7 und 5.8 berechnet werden.

$$c_1^d = \beta_d \lambda_d \quad (5.6)$$

$$c_2^d = e^{\beta_d y_R} \quad (5.7)$$

$$c_3^d = e^{\beta_d (y_0 + \lambda_d x_{Rd})} - c_2^d e^{c_1^d x_{Rd}} \quad (5.8)$$

Hierin ist  $y_0 = S_{r,\max} = 1$ .

Analog zu Gleichung 5.5 für die Entwässerung gilt die in Gleichung 5.9 angegebene Referenzkurve für Bewässerung  $y_w$ . Der Index  $w$  steht hierbei für Wetting.

$$y_w(x) = -\lambda_d x + \frac{1}{\beta_w} \ln \left( c_3^w + c_2^w e^{c_1^w x} \right) \quad (5.9)$$

Hierbei sind  $c_1^w$ ,  $c_2^w$  und  $c_3^w$  Konstanten in Abhängigkeit der Eingangsparameter, die gemäß Gleichungen 5.10, 5.11 und 5.12 berechnet werden.

$$c_1^w = \beta_w \lambda_d \quad (5.10)$$

$$c_2^w = e^{\beta_w y_0} \quad (5.11)$$

$$c_3^w = e^{-\beta_w \lambda_d x_{Rw}} - c_2^w e^{c_1^w x_{Rw}} \quad (5.12)$$

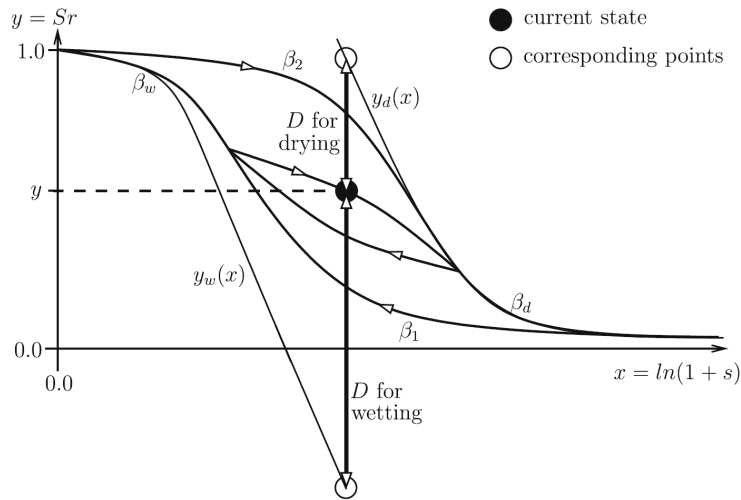


Abbildung 5.3: Definition der vertikalen Abstände  $D$  und der Koeffizienten  $\beta_d$ ,  $\beta_w$ ,  $\beta_1$  und  $\beta_2$ . Abbildung aus Pedroso und Williams (2010).

Die oben genannten Gleichungen beschreiben die Referenzkurven. Die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese ist durch eine Differentialgleichung  $\frac{dy}{dx} = -\bar{\lambda}$  definiert, die den Abstand des aktuellen Saugspannungs-Sättigungs-Zustands zu den Referenzkurven  $y_d$  und  $y_w$  beschreibt. Mit kleiner werdendem  $D$  geht  $\bar{\lambda}$  von 0 gegen  $\bar{\lambda}_d$  bzw.  $\bar{\lambda}_w$ . Die Steigungen  $\bar{\lambda}$  und Abstände  $D$  müssen durch die Wahl der entsprechenden Referenzkurve  $y_d$  bzw.  $y_w$  gewählt werden. Das Vorzeichen von  $\Delta S_r$  bzw.  $\Delta s$  erforderlich, um den Ent- oder Bewässerungszustand zu bestimmen. Zur Bestimmung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit hydraulischer Hysterese wird der vertikale Abstand  $D$ , dargestellt in Abbildung 5.3, verwendet. Für Entwässerung bzw. für Bewässerung wird dieser mittels Gleichungen 5.13 und 5.14 berechnet.

$$D = y_d(x) - y \quad (5.13)$$

$$D = y - y_w(x) \quad (5.14)$$

Die Tangentensteigung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung wird für Entwässerung entsprechend Gleichung 5.15 berechnet.

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_d e^{-\beta_w D} \quad (5.15)$$

Hierbei gelten Gleichungen 5.16 und 5.17.

$$\bar{\lambda}_d = \lambda_d(1 - e^{-\beta_d D_d}) \quad (5.16)$$

$$D_d = y - y_R \quad (5.17)$$

Analog zu Gleichung 5.15 gilt für Bewässerung Gleichung 5.18.

$$\bar{\lambda} = \bar{\lambda}_w e^{-\beta_1 D} \quad (5.18)$$

Hierbei gelten Gleichungen 5.19 und 5.20.

$$\bar{\lambda}_w = \lambda_d(1 - e^{-\beta_w D_w}) \quad (5.19)$$

$$D_w = y_0 - y \quad (5.20)$$

Die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung  $y(x)$  lässt sich nun über folgende Differenzialgleichung 5.21 ausdrücken.

$$\frac{dy}{dx} = -\bar{\lambda} \quad (5.21)$$

Das Modell wurde in Pedroso und Williams (2010) gegen die Ergebnisse experimenteller Untersuchungen zur hydraulischen Hysterese an zwei granularen Böden validiert. Die Implementierung wurde hierbei in einer Kalkulationstabelle in Microsoft Excel mittels Visual Basic for Applications (VBA) umgesetzt.

Mit dem Ziel das o. g. Kapillardruck-Sättigungs-Modell mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese vielseitiger einsetzbar zu machen, wurde es im Rahmen dieser Arbeit zunächst in MATLAB® implementiert. Der zugehörige Code ist mit dem Anhang D dieser Arbeit beigelegt. Für die weitere Nutzung in einem FE-Code wurde das Modell weiterhin in FORTRAN implementiert.

## 5.2.2 Modellierung der Durchlässigkeit im teilgesättigten Zustand

In D. G. Fredlund, Rahardjo und M. D. Fredlund (2012) wird die Beziehung zwischen der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung eines Bodens und den teilgesättigten Bodeneigenschaften beschrieben. Speziell die Wasserdurchlässigkeit teilgesättigter Böden wird durch den Saugspannungs-Sättigungs-Zustand maßgeblich beeinflusst. Die Durchlässigkeit eines teilgesättigten Bodens lässt sich u. a. durch die Verwendung des Durchlässigkeitsbeiwerts  $k_f$  im gesättigten Zustand und der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung abschätzen, vgl. Marshall (1958), Mualem (1986), van Genuchten (1980) und D. G. Fredlund, Xing und Huang (1994). Weitere Modellierungsansätze basieren auf der Korngrößenverteilung oder der Porengrößenverteilung, vgl. D. G. Fredlund, Rahardjo und M. D. Fredlund (2012). Im Zuge der Modellierung der teilgesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten, wie die Durchlässigkeit auch genannt wird, wird im Rahmen dieser Arbeit auf drei Modelle zurückgegriffen.

Die im Folgenden beschriebenen relativen Durchlässigkeiten  $k_{r,w}$  bzw.  $k_{r,g}$ , die auch als Gewichtungsfaktoren der gesättigten hydraulischen Leitfähigkeit  $k_f$  verstanden werden

können, lassen sich für die Modellierung der teilgesättigten hydraulischen Leitfähigkeiten  $k_u$  heranziehen, vgl. Kapitel 2.1.2.1.3.

Ein in Nguyen und Durso (1983) vorgestellter Ansatz beschreibt die relative Durchlässigkeit als dritte Potenz des Sättigungsgrads. Die relativen Durchlässigkeiten der Wasserphase bzw. der Luftphase sind mit Gleichung 5.22 bzw. mit Gleichung 5.23 gegeben. Dieser Ansatz ist z. B. in der in Abaqus/Standard standardmäßig implementierten Zweiphasenformulierung zur Modellierung poröser Medien enthalten, vgl. Dassault Systèmes (2019).

$$k_{r,w,\text{Abaqus}} = S_r^3 \quad (5.22)$$

$$k_{r,a,\text{Abaqus}} = (1 - S_r)^3 \quad (5.23)$$

Weiterhin wird eine Prognose der relativen Durchlässigkeiten basierend auf einem statistischen Ansatz nach Mualem (1976) sowie der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung nach van Genuchten (1980) Verwendung finden.

Für die relative Durchlässigkeit der Wasserphase gilt Gleichung 5.24.

$$k_{r,w,M/VG} = \sqrt{S_e} \left( 1 - \left( 1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{\frac{n-1}{n}} \right)^2 \quad (5.24)$$

Für die relative Durchlässigkeit der Luftphase gilt Gleichung 5.25.

$$k_{r,a,M/VG} = \sqrt{1 - S_e} \left( 1 - S_e^{\frac{n}{n-1}} \right)^{2\left(\frac{n-1}{n}\right)} \quad (5.25)$$

Der in Pedroso (2014) vorgestellte, auf dem Konzept der Referenzkurven basierende Ansatz, der für die Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung herangezogen wurde, vgl. Kapitel 5.2.1.2, kann vielseitig eingesetzt werden. Dieser Ansatz wird hier weiterhin verwendet, um die relative hydraulische Leitfähigkeit zu bestimmen, vgl. Gleichungen 5.26 und 5.27.

Die Ordinate  $y$  steht in Gleichung 5.26 stellvertretend entweder für  $k_{r,w,\text{Pedroso}}$  oder für  $k_{r,a,\text{Pedroso}}$  und die Abszisse  $x$  für die Sättigung der Wasserphase  $S_{r,w}$  bzw. der Luftphase  $S_{r,a}$ . Im vollständig gesättigten Zustand gilt  $y(x = 1) = 1$ . Der minimale  $y$ -Koordinate wird durch den Koeffizienten  $\alpha$  und die Krümmung durch  $\beta$  festgelegt.

$$y(x) = \lambda_0 x + \frac{1}{\beta b} \log(c_3 + c_2 e^{c_1 x}) \quad (5.26)$$

mit:

$$c_1 = \beta b (\lambda_1 - \lambda_0) \quad c_2 = e^{\beta b \alpha} \quad c_3 = e^{\beta b (1.0 - \lambda_0)} - c_2 e^{c_1} \quad (5.27)$$

Der Koeffizient  $b$  gibt vor, ob das Modell für die Wasser- oder Luftphase gilt. Hierbei entspricht  $b = 1$  der Modellierung der relativen Durchlässigkeit für die Luftphase und  $b = -1$  der Modellierung für die Wasserphase.

In Abbildung 5.4 sind die die relativen Durchlässigkeiten beider Phasen – Luft (Index  $a$  für „air“) und Wasser (Index  $w$  für „water“) – entsprechend der genannten Modelle für beispielhafte Parametersätze abgebildet. Es lassen sich die Charakteristiken der drei Modelle erkennen. Das Modell nach Mualem (1976) und van Genuchten (1980) (Index „M/VG“) sowie das in Abaqus/Standard implementierte Modell (Index „Abaqus“) sind durch einen exponentiellen Anstieg gekennzeichnet. Das Modell von Pedroso (2014) (Index „Pedroso“) weist – entsprechend der zwei Referenzkurven – bilineares Verhalten mit einem weichen Übergang auf.

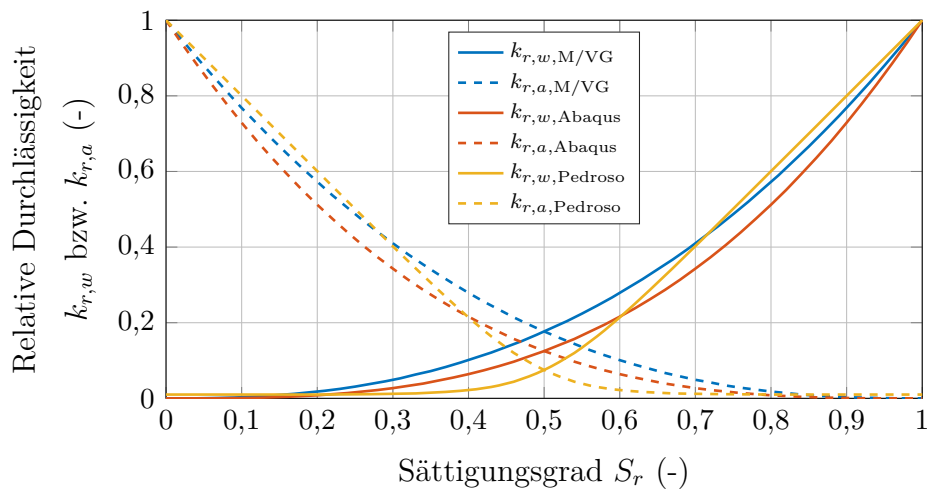


Abbildung 5.4: Relative Durchlässigkeiten  $k_{r,w}$  bzw.  $k_{r,a}$  für die Modelle nach Nguyen und Durso (1983), van Genuchten (1980), Mualem (1976) und Pedroso (2014) für beispielhafte Parametersätze.

## 5.3 Modellierung der hydraulisch-mechanischen Kopplung

### 5.3.1 Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung

Die im Rahmen dieser Arbeit verwendete auf dem Konzept der Volumenanteile basierende zweidimensionale dynamische Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung beruht auf der in Holler (2006) an der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule Aachen vorgestellten Formulierung. Diese wurde über eine FORTRAN-Programmierschnittstelle in den Finite Elemente-Code ANSYS implementiert. Mit Schümann (2015) wurde die Formulierung am Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TUHH in Abaqus/Standard implementiert. Hierzu wurde ein benutzerdefinierter Elementtyp (Subroutine UEL) bereitgestellt und anhand einer Vielzahl von Randwertproblemen validiert. Hierauf aufbauend wird in Milatz (2016) eine dreidimensionale Formulierung vorgestellt.

Die Herleitung der dynamischen Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung, deren Gesamtgleichungssystem als primäre Unbekannte die Verschiebung des Korngerüsts sowie die beiden Porenfluiddrücke aufweist, wird in Holler (2006) und Schümann (2015) detailliert erläutert. Es folgt eine Zusammenfassung der wichtigsten Eigenschaften der Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung.

Die Kompressibilität der Einzelphasen wird in der Form von zeitabhängigen Funktionen in Differentialform der jeweiligen Phasendichten vorgegeben. Diese beschreiben den Zusammenhang zwischen der Dichte und der Belastung.

Die Formulierung von Massenbilanzgleichungen für die drei Phasen lassen keine Massenproduktion oder einen Massenaustausch zwischen den einzelnen Phasen zu. Sie dienen der Erhaltung der Masse der jeweiligen Phase in dem betrachteten Gebiet.

Das verallgemeinerte Fließgesetz nach Darcy wird zur Berücksichtigung des Impulsaustauschs zwischen dem Feststoff und den Fluidphasen herangezogen. Zudem wird die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung zur Herleitung der Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung benötigt.

Es ergeben sich zwei Kontinuitätsgleichungen 5.28 und 5.29 für die beiden Fluidphasen. Diese beschreiben den Zusammenhang zwischen den zeitlichen Änderungen der Porendrücke  $\partial p_w/\partial t$  und  $\partial p_g/\partial t$  und der Verformung des Korngerüsts.

$$\begin{aligned}
 & \left[ \frac{nS_w}{K_w} + (\alpha - n) \frac{S_w}{K_s} \left( S_w + p_c \frac{\partial S_w}{\partial p_c} \right) - n \frac{\partial S_w}{\partial p_c} \right] \frac{\partial p_w}{\partial t} + \\
 & \left[ (\alpha - n) \frac{S_w}{K_s} \left( S_g - p_c \frac{\partial S_w}{\partial p_c} \right) + n \frac{\partial S_w}{\partial p_c} \right] \frac{\partial p_g}{\partial t} + \\
 & \alpha S_w \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}_s + \frac{1}{\rho_w} \nabla \cdot \left[ \rho_w \frac{\mathbf{k}k_{rw}}{\eta_w} (-\nabla p_w + \rho_w (\mathbf{g} - \ddot{\mathbf{u}}_s)) \right] = 0
 \end{aligned} \tag{5.28}$$

$$\begin{aligned}
& \left[ \frac{nS_g}{K_g} + (\alpha - n) \frac{S_g}{K_s} \left( S_g - p_c \frac{\partial S_w}{\partial p_c} \right) - n \frac{\partial S_w}{\partial p_c} \right] \frac{\partial p_g}{\partial t} + \\
& \left[ (\alpha - n) \frac{S_g}{K_s} \left( S_w + p_c \frac{\partial S_w}{\partial p_c} \right) + n \frac{\partial S_w}{\partial p_c} \right] \frac{\partial p_w}{\partial t} + \\
& \alpha S_g \nabla \cdot \dot{\mathbf{u}}_s + \frac{1}{\rho_g} \nabla \cdot \left[ \rho_g \frac{\mathbf{k}k_{rg}}{\eta_g} (-\nabla p_g + \rho_g (\mathbf{g} - \ddot{\mathbf{u}}_s)) \right] = 0
\end{aligned} \tag{5.29}$$

Hierbei sind  $K_w$  und  $K_g$  die Kompressionsmoduln und  $\rho_w$  bzw.  $\rho_g$  die Ausgangs- oder Referenzdichten des Wassers bzw. der Luft.  $K_s$  ist der Kompressionsmodul der Einzelkörner.  $\alpha = 1 - K/K_s$  ist die Biot-Konstante nach Biot und Willis (1957). Die Verschiebung der Feststoffphase ist  $\mathbf{u}_s$ , die Permeabilität im gesättigten Zustand  $\mathbf{k}$ .

Die Beschreibung des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhaltens teilgesättigter Böden wird u. a. durch diese beiden Kontinuitätsgleichungen ermöglicht. Diese sind – in Verbindung mit dem Prinzip der effektiven Spannungen für teilgesättigte Böden, vgl. Kapitel 2.1.2.2 – die Grundlage der Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung. Zusätzlich werden ein Modell für die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung sowie ein Materialmodell für die Feststoffphase – vgl. Kapitel 5.1 – benötigt, um die Verformung des Korngerüsts mit den effektiven Spannungen zu koppeln.

Für die numerische Approximation der Differentialgleichungen wird die FEM verwendet. Hierbei wird das Lösungsgebiet in eine endliche Anzahl von Teilgebieten aufgeteilt, die als finite Elemente bezeichnet werden. Die Elemente sind an Knoten miteinander verbunden, wobei die Lösungen der Differentialgleichungen nur in diesen Knoten bestimmt werden. Durch Interpolation der Freiheitsgrade der Knoten auf das Elementinnere lassen sich die Verläufe innerhalb der Elemente approximieren.

Die Grundlage der Finite-Elemente-Formulierung der dynamischen Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung bilden diskretisierte Integralformen zum einen des Prinzips der effektiven Spannungen für teilgesättigte Böden sowie zum anderen der Kontinuitätsgleichungen der beiden Fluidphasen. Für ein finites Element ergibt sich das Gesamtgleichungssystem 5.30, vgl. Schümann (2015).

$$\begin{aligned}
& \begin{bmatrix} \mathbf{M} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_w & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{M}_g & \mathbf{0} & \mathbf{0} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\mathbf{u}}_s \\ \ddot{\mathbf{p}}_w \\ \ddot{\mathbf{p}}_g \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{C} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{C}_{ws} & \mathbf{P}_{ww} & \mathbf{C}_{wg} \\ \mathbf{C}_{gs} & \mathbf{C}_{gw} & \mathbf{P}_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\mathbf{u}}_s \\ \dot{\mathbf{p}}_w \\ \dot{\mathbf{p}}_g \end{bmatrix} + \\
& \begin{bmatrix} \mathbf{0} & -\mathbf{C}_{ws}^T & -\mathbf{C}_{gs}^T \\ \mathbf{0} & \mathbf{H}_{ww} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{H}_{gg} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \bar{\mathbf{u}}_s \\ \bar{\mathbf{p}}_w \\ \bar{\mathbf{p}}_g \end{bmatrix} + \int \mathbf{B}^T \boldsymbol{\sigma}' d\Omega \begin{bmatrix} \mathbf{1} \\ \mathbf{0} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_u^\Omega \\ \mathbf{f}_{p_w}^\Omega \\ \mathbf{f}_{p_g}^\Omega \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathbf{f}_u^F \\ \mathbf{f}_{p_w}^F \\ \mathbf{f}_{p_g}^F \end{bmatrix}
\end{aligned} \tag{5.30}$$

Hierin sind  $\mathbf{M}$  die Massenmatrix,  $\mathbf{M}_w$  und  $\mathbf{M}_g$  die dynamischen Sickermatrixen,  $\mathbf{C}$  die Dämpfungsmatrix,  $\mathbf{C}_{ws}$ ,  $\mathbf{C}_{sw}$ ,  $\mathbf{C}_{gs}$ ,  $\mathbf{C}_{sg}$ ,  $\mathbf{C}_{wg}$  und  $\mathbf{C}_{ge}$  die Kopplungsmatrizen,  $\mathbf{P}$  die Kompressibilitätsmatrixen, und  $\mathbf{H}$  die Permeabilitätsmatrixen. Das Integral über die effektiven Spannungen im Gebiet  $\Omega$  mit der Verzerrungs-Verschiebungs-Matrix  $\mathbf{B}$  ermöglicht die Verwendung einer Vielzahl nichtlinearer Materialmodelle. Auf der rechten Seite des

Gleichungssystemen stehen die Vektoren der äußeren Kräfte, die in Gebiets- und Randkräften aufgeteilt sind. Die Definition der einzelnen Matrizen und Vektoren wird detailliert in Holler (2006) und Schümann (2015) beschrieben. Da die primären Unbekannten im Gleichungssystem 5.30 die Deformation des Korngerüsts  $\mathbf{u}_s$  und die Porenwasser- und Luftdrücke  $p_w$  und  $p_g$  sind, handelt es sich um eine  $\mathbf{u}-p-p$ -Formulierung, vgl. Lewis und Schrefler (1998). Die beschriebene Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung wird in Schümann (2015) in Form eines benutzerdefinierten Kontinuumslements (Subroutine UEL) über die FORTRAN-Schnittstelle für Benutzersubroutinen in das Finite-Elemente-Programm Abaqus/Standard implementiert.

Im Rahmen dieser Arbeit wurden zweidimensionale (2D) isoparametrische quadrilaterale Elemente zur Modellierung des ebenen Dehnungszustands (plane strain) sowie zur Modellierung axial- bzw. rotationssymmetrischer Bedingungen verwendet. Eingesetzt werden zwei Elementtypen U4P4 (quadrilaterales Element erster Ordnung) und U8P8 (quadrilaterales Element zweiter Ordnung), vgl. Schümann (2015). Hierbei handelt es sich um 4-Knoten- und 8-Knotenelemente, die an den Elementknoten jeweils die zwei Verschiebungsfreiheitsgrade  $u_x$  und  $u_y$  sowie die zwei Porendruckfreiheitsgrade  $p_w$  und  $p_g$  aufweisen.

Zur Visualisierung der Ergebnisse werden zusätzliche, die benutzerdefinierten Elemente überlagernde sog. Dummy-Elemente eingesetzt. Diesen wird eine Dichte von  $\rho = 0 \text{ g/cm}^3$  und mithilfe einer Benutzersubroutine vom Typ UMAT elastisches Materialverhalten mit einem Elastizitätsmodul von  $E = 0 \text{ kPa}$  vorgegeben. Die verwendeten Elementtypen samt überlagernder Dummy-Elemente sind in Abbildung 5.5 dargestellt.

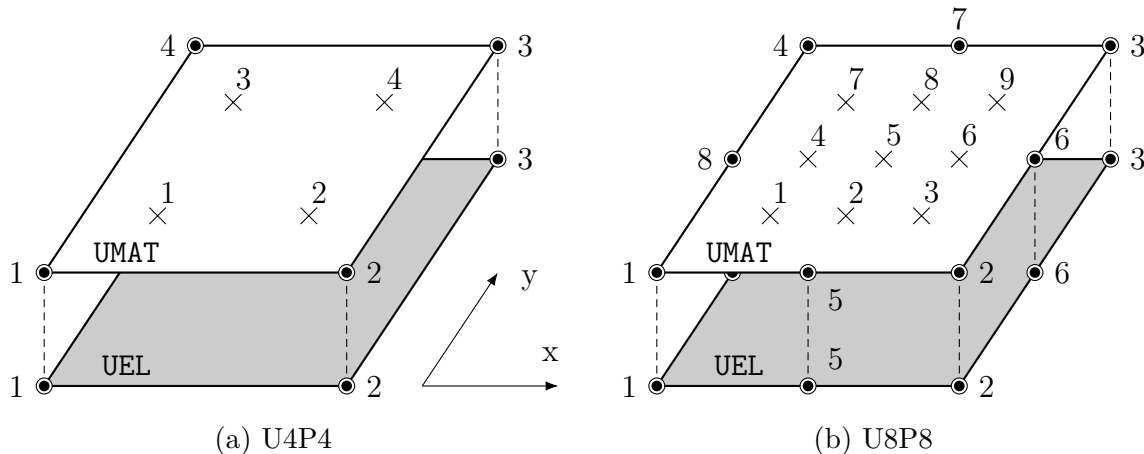


Abbildung 5.5: Schematische Illustration der verwendeten benutzerdefinierten Elemente (UEL) vom Typ U4P4 und U8P8 und der zur Visualisierung der Ergebnisse verwendeten Dummy-Elemente (UMAT).  $\bullet$  : FE-Knoten mit Verschiebungs- und Porendruckfreiheitsgraden.  $\times$  : Integrationspunkte.

Die Implementierung der vorgenannten sowie weiterer Elementtypen, die sich in der Anzahl der Knoten und somit den Freiheitsgraden unterscheiden, in Abaqus/Standard wird ausführlich in Schümann (2015) beschrieben.

### 5.3.2 Erweiterungen der dynamischen Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung

Im Rahmen dieser Arbeit wurden an der in Schümann (2015) vorgelegten Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung für den FE-Code Abaqus/Standard zahlreiche Erweiterungen vorgenommen. Das Ziel ist die realitätsnähere Abbildung des experimentell erkundeten Materialverhaltens teilgesättigter granularer Böden unter zyklischer hydraulischer oder mechanischer Belastung.

In den am Institut für Geotechnik und Baubetrieb der Technischen Universität Hamburg entwickelte FE-Code wird ein Kapillardruck-Sättigungs-Modell implementiert. Dieses berücksichtigt die in Laborversuchen an granularen Böden erkundete hydraulische Hysterese, vgl. Kapitel 4. Das verwendete hydraulische Modell basiert auf den Ausführungen in Pedroso und Williams (2010). Zudem wird das implementierte hydraulische Hysterese-Modell über einen Interpolationsansatz erweitert, um den beobachteten Einfluss der Lagerungsdichte zu berücksichtigen.

Für eine Implementierung des Modells zur Beschreibung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese ist die Kenntnis des Saugspannungs-Sättigungs-Zustandes in dem gesamten Lösungsgebiet zum Zeitpunkt des letzten konvergierten Zeitinkrements erforderlich. Die Subroutine vom Typ UEL speichert derzeit keinen Status, ob ein Zeitschritt konvergiert ist. Gelöst wird dies durch das Einführen eines booleschen Werts vom Ganzzahltyp, der den Status der Konvergenz des aktuellen Zeitinkrements repräsentiert, sowie eines COMMON-Blocks in die Subroutine vom Typ UEL. COMMON-Blocks sind ein Weg, um in FORTRAN Variablen global zu deklarieren ohne diese an die jeweiligen Subroutinen übergeben zu müssen. In dem neu eingeführten COMMON-Block werden – nach Prüfung der Konvergenz des jeweiligen Zeitinkrements – die aktuellen Werte der Porenfluiddrucke  $u_w$  und  $u_a$ , der Sättigungsgrad  $S_r$  sowie die Porenzahl  $n$  gespeichert.

Daneben wird ein Modell zur Beschreibung der partiellen Durchlässigkeiten im teilgesättigten Zustand ergänzt. Dieses beruht auf einem universellen Ansatz vorgestellt in Pedroso (2014).

Die benutzerdefinierte Subroutine vom Typ UEL erlaubt die Vorgabe von Dirichlet-, Neumann- und Cauchy-Randbedingungen. Für die Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung können Verschiebungen oder Porenwasser- bzw. Porenluftdrücke auf die Randabschnitte  $\Gamma$  aufgebracht werden. Daneben können Flächenlasten auf Randabschnitte, die Gravitationskraft sowie Durchflüsse der Fluide durch einen Rand vorgegeben werden. Zur Berücksichtigung von zeitlich veränderlichen, örtlich begrenzten Flächenlasten, wie z. B. Belastungen aus rollenden Rädern, auf teilgesättigten Böden, wird ein neuartiger Lasttyp entwickelt und ergänzt. Dieser Lasttyp wird durch eine von der Simulationszeit abhängige, örtlich durch eine Funktion gewichtete Neumann-Randbedingung umgesetzt.

## 5.4 Validierung

### 5.4.1 Validierung des analytischen Modells

Das in MATLAB<sup>®</sup> formulierte analytische Modell zur Beschreibung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung, vgl. Kapitel 5.2.1.2, wird zunächst gegen Messdaten aus der Literatur validiert, vgl. Abbildung 5.6.

Für die Validierung werden die bereits in Abbildung 2.8 präsentierten Datensätze aus (a) Lins u. a. (2007) sowie (b) Muraleetharan u. a. (2009) herangezogen. Die Ergebnisse der Validierung aus Pedroso und Williams (2010), die der o. g. Kalkulationstabelle, vgl. Kapitel 5.2.1.2, entnommen wurden, sowie die Ergebnisse der im Rahmen dieser Arbeit umgesetzten Implementierung in MATLAB<sup>®</sup> sind in Abbildung 5.6 enthalten. Das implementierte Modell lässt die Verwendung verschiedener Formen der beiden grundlegenden Messgrößen zu. Hier dargestellt sind auf der  $x$ -Achse (a) die Saugspannung  $s$  sowie (b) die logarithmierte Saugspannung  $\ln(1+s)$  bzw. auf der  $y$ -Achse (a) der volumetrische Wassergehalt  $\theta$  sowie (b) der Sättigungsgrad  $S_r$ . Es lässt sich eine gute Approximation der experimentell erhobenen Daten durch das hydraulische Modell erkennen. Weiterhin stimmen die Modellierungsergebnisse aus Pedroso und Williams (2010) und der in MATLAB<sup>®</sup> verfassten Implementierung überein.

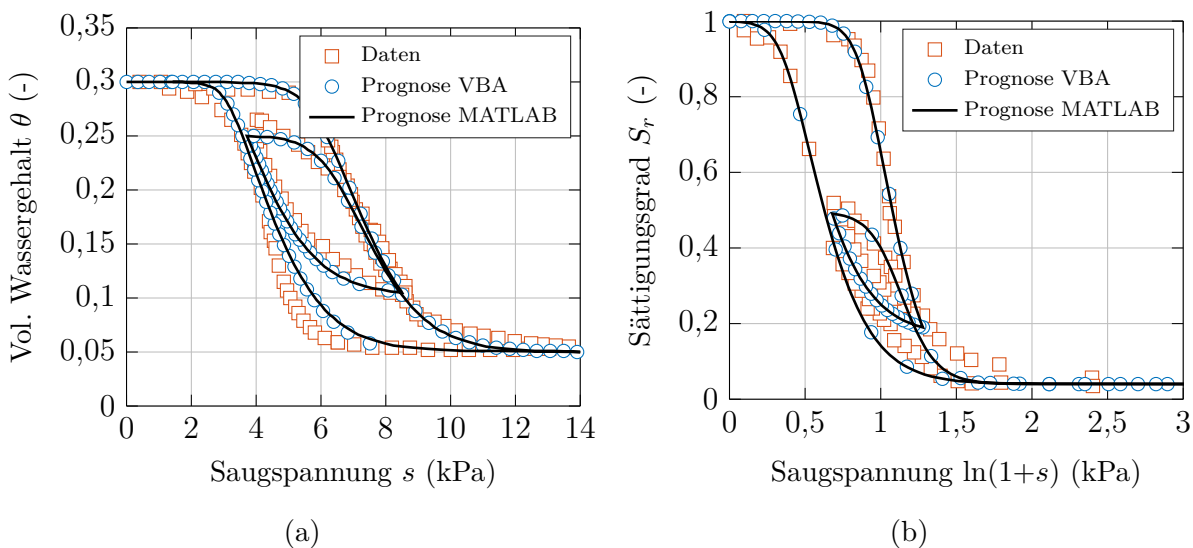


Abbildung 5.6: Validierung des Modells der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese gegen (a) US Silica F-95 Sand, Daten aus Muraleetharan u. a. (2009) und (b) Hostun Sand, Daten aus Lins u. a. (2007).

Das Modell wurde im Folgenden herangezogen, um die experimentell erhobenen Daten zur zyklischen Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung für Hamburger Sand und ISS-0 Sand abzubilden, vgl. Kapitel 4.3.3. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen sind nach der Porenzahl  $n$  geordnet und in Abbildung 5.7 dargestellt. Die Messdaten sind mit der in MATLAB<sup>®</sup> implementierten Version des Kapillardruck-Sättigungs-Beziehungsmodells

überlagert. Die Messdaten lassen sich durch das Modell unter Verwendung der durch Kurvenanpassung ermittelten Parameter in Tabelle 5.1 mit einem hohen Übereinstimmungsgrad approximieren.

Tabelle 5.1: Parameter zur Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung von Hamburger Sand und ISS-0 Sand mit dem Modell nach Pedroso

Boden		Hamburger Sand			ISS-0 Sand		
Porenanteil $n$ (-)		0,368	0,394	0,420	0,422	0,441	0,468
Verdichtungsgrad $I_n$ (-)		0,750	0,500	0,250	0,639	0,492	0,284
Parameter	Einheit						
$\lambda_d$	–	1,300	1,200	1,100	0,151	0,1535	0,156
$\lambda_w$	–	1,350	1,375	1,400	0,151	0,1535	0,156
$x_{Rd}$	kPa	1,030	0,865	0,700	5,100	5,100	4,800
$x_{Rw}$	kPa	1,040	0,970	0,900	7,100	6,800	6,500
$\beta_d$	–	5,500	5,000	4,500	9,400	9,400	9,400
$\beta_w$	–	6,200	7,200	8,200	12,500	12,500	12,500
$\beta_1$	–	2,850	2,925	3,000	4,500	4,350	4,200
$\beta_2$	–	6,200	3,850	1,500	12,500	11,250	10,000
$y_0 = S_{r,\max}$	–	0,869	0,865	0,882	0,783	0,797	0,758
$y_R = S_{r,\min}$	–	0,142	0,078	0,102	0,158	0,158	0,158

Zur Approximierung der residuellen Zustände für hohe Saugspannungswerte wurden jeweils für den Hamburger Sand sowie für den ISS-0 Sand die residuellen Sättigungsgrade aus Verdunstungsversuchen abgeleitet, vgl. Kapitel 4.3.2. Die angesetzten residuellen Sättigungsgrade finden sich in Tabelle 5.1.

Bei der Kurvenanpassung zur Ermittlung der Modellparameter wurde der primäre Hauptbewässerungspfad für beide Sande vernachlässigt. Dennoch sind die zugrunde liegenden Daten dargestellt. Für die modellierten primären hydraulischen Hauptbewässerungspfade – hier informativ für Hamburger Sand dargestellt – sind keine Übereinstimmung zu erwarten, da diese nicht mit in die Kurvenanpassung einbezogen wurden. Es ist anzumerken, dass auch dieser Pfad mit einem anderen Parametersatz problemlos abgebildet werden kann. Die Vernachlässigung dieses hydraulischen Pfades begründet sich mit der Annahme, dass die untersuchten Böden einen Zustand vollständiger Sättigung  $S_r = 1,0$  in der Natur selten erreichen. Naturgemäß liegt bei vermeintlich vollständiger Sättigung aufgrund des Lufteinschlusses eher der Sättigungsgrad  $S_{r,\text{entrap}} < 1,0$  vor. Dieser ist in Tabelle 5.1 als  $y = S_{r,\max}$  angegeben.

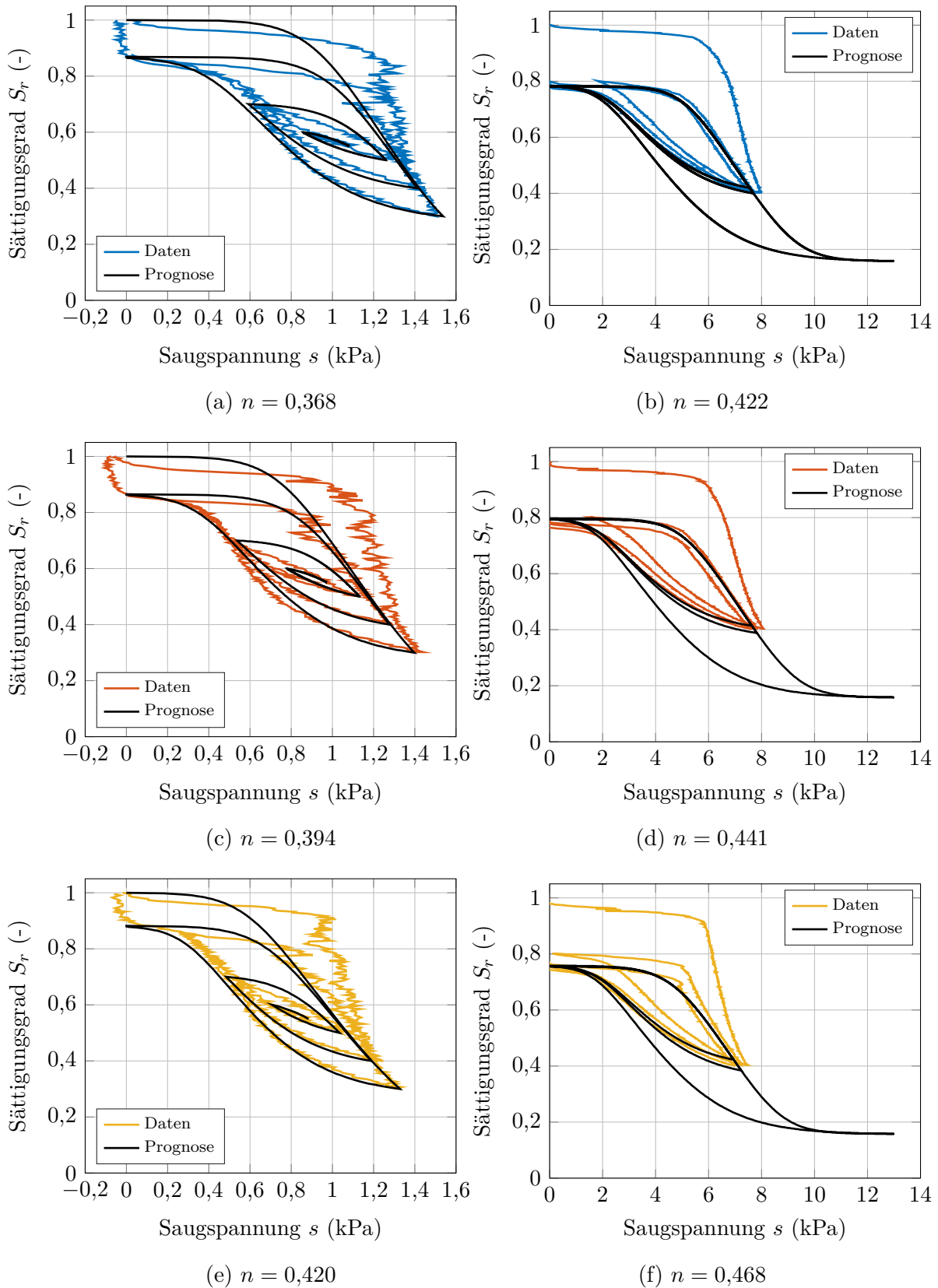


Abbildung 5.7: Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese von Hamburger Sand (links) und ISS-0 Sand (rechts).

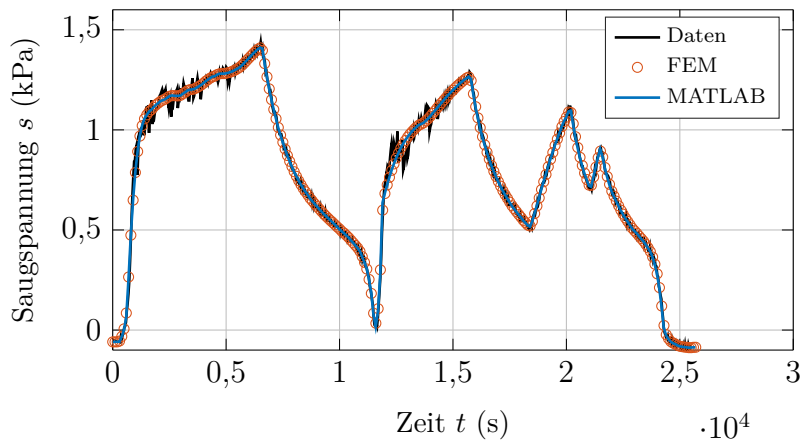
### 5.4.2 Verifizierung der Implementierung in die dynamische Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung

Im Folgenden wird die Verifizierung der Erweiterungen an der dynamischen Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung in Abaqus/Standard erläutert. Die im vorangegangenen Kapitel in MATLAB® validierte analytische Formulierung zu der Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung wurde in Fortran portiert, um diese wiederum in die Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung, in die benutzerdefinierte Subroutine vom Typ UEL, zu implementieren.

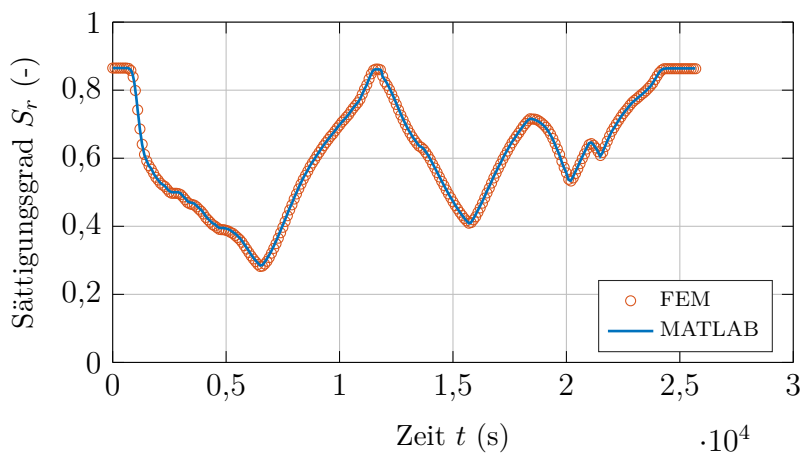
Zur Verifizierung der Implementierung wird ein Laborversuch zur zyklischen Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung herangezogen, vgl. Kapitel 4.3.3. Die aus dem sättigungssteuerten Laborversuch erhaltene Saugspannungsantwort wird als Eingangsgröße für die Verifizierung herangezogen. Es wurde der Laborversuch mit einer Porenzahl von  $n = 0,394$  – entsprechend einer mitteldichten Lagerung – gewählt, vgl. Abbildung 4.16 in Kapitel 4.3.3. Der zeitliche Verlauf der Saugspannung wird als Eingangsgröße zum einen in eine Berechnung mit dem analytischen Modell in MATLAB® vorgegeben und zum anderen in einer Simulation mit Abaqus/Standard unter Verwendung des vorgestellten benutzerdefinierten Elementtyps.

Da in der Formulierung des konstitutiven hydraulischen Materialmodells in MATLAB® dynamische Effekte und der Einfluss der Gravitation vernachlässigt werden, wird das zu verifizierende Modell in Abaqus/Standard entsprechend kalibriert. Ein finites Element vom Typ U4P4 wird in Form eines zweidimensionalen Randwertproblems herangezogen. Die Simulation kann als hydraulischer Elementversuch aufgefasst werden. Auf jeden der vier Knoten des Elements wird die Saugspannungsänderung über die Zeit in Form einer Randbedingung des Porenwasserdrucks aufgebracht. Unter Vernachlässigung dynamischer Effekte, d. h. Feststoffbeschleunigungen und sämtliche Massenträgheitseffekte, sowie des Einflusses der Gravitation wird eine statische Analyse durchgeführt. Das finite Element wird durch die Saugspannungsänderung ent- bzw. bewässert.

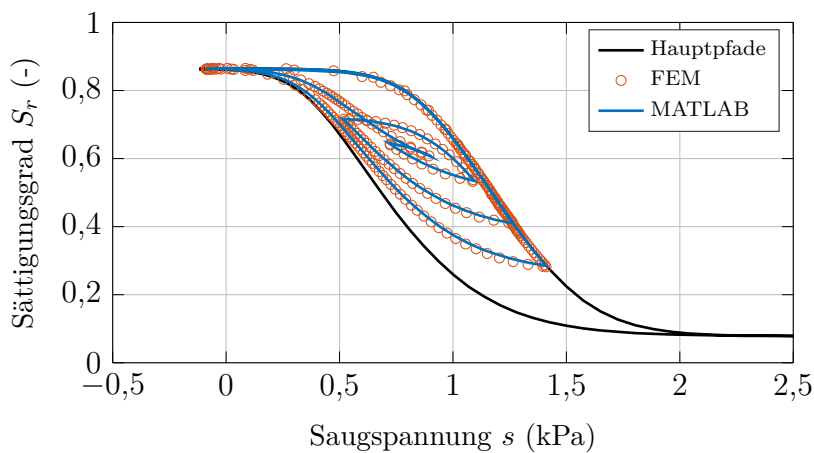
Die Simulationsergebnisse sind in Abbildung 5.8 dargestellt. Aufgrund der Vernachlässigung der Gravitation sowie dynamischer Effekte sind die Sättigungsänderungen in allen vier FE-Knoten identisch. Abbildung 5.8 (a) zeigt die als Eingangsgröße angesetzte Saugspannung im zeitlichen Verlauf. Abbildung 5.8 (b) zeigt die analytisch in MATLAB® bzw. numerisch in Abaqus/Standard errechnete Sättigungsänderung. Beide Methoden liefern ein nahezu identisches Ergebnis. Informativ sind die beiden Größen – Saugspannung und Sättigungsgrad – in Abbildung 5.8 (c) in Form der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung abgebildet. Hierin sind weiterhin die Hauptent- und Bewässerungspfade des untersuchten Sands enthalten. Der nichtlineare Verlauf der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung ist zu erkennen und die korrekte Funktionalität des implementierten Materialmodells lässt sich verifizieren.



(a) Input



(b) Output



(c) Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung

Abbildung 5.8: Vergleich der in MATLAB<sup>®</sup> und in die Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung (FEM) implementierten Versionen des Kapillardruck-Sättigungs-Modells mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese. (a) Als Randbedingung angesetzte zeitlicher Verlauf der Saugspannung, (b) berechneter zeitlicher Verlauf des Sättigungsgrads und (c) Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung.

## 5.5 Erweiterung des analytischen Modells um die Abhängigkeit des Verdichtungsgrades

Zur Berücksichtigung des in Kapitel 4.3 beschriebenen Einflusses des Verdichtungsgrades auf die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung wird das im vorangegangenen Kapitel erläuterte Modell zur zyklischen Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung um diesen Einfluss erweitert. Dieses Modell ermöglicht die Prognose des Wasserretentionsverhaltens eines teilgesättigten Bodens mit verschieblichem Korngerüst.

Die im vorangegangenen Kapitel in Tabelle 5.1 zusammengestellten Modellparameter bilden die Grundlage für die Modellierung der von dem Verdichtungsgrad abhängigen Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese. Hierzu wurden mithilfe der zu festgelegten Lagerungsdichten zugehörigen Parametersätze jeweils ein Entwässerungs- und ein Bewässerungspfad in MATLAB<sup>®</sup> modelliert. Die die Hauptbe- und Entwässerungspfade abbildenden Ergebniskurven sind in Abbildung 5.9 (a) dargestellt (2D-Datenfits). Diese wurden herangezogen um das hydraulisch-hysteretische Verhalten in den Grenzzuständen – d. h. für die Verdichtungsgrade  $I_n = 0,0$  bzw.  $I_n = 1,0$  – mittels linearer Extrapolation zu prognostizieren. Basierend auf den Parametersätzen der so ermittelten Be- und Entwässerungskurven in den Grenzzuständen lassen sich durch lineare Interpolation Zwischenzustände beschreiben, die das Kapillardrucksättigungsverhalten im dreidimensionalen Saugspannungs-Sättigungs-Verdichtungsgrad-Raum –  $s$ - $S_r$ - $I_n$  – abbilden, vgl. Gleichung 5.31 sowie Abbildung 5.9 (b). Die so ermittelten von dem Verdichtungsgrad  $I_n$  abhängigen Parameter für Hamburger Sand sind in Tabelle 5.2 zusammengefasst.

$$\text{SWCC-Parameter}(I_n) = p_1 I_n + p_2 \quad (5.31)$$

Der Einfluss des Verdichtungsgrades auf das teilgesättigte hydraulische-mechanische Verhalten des Hamburger Sands wird in einem numerischen Elementversuch untersucht und im folgenden Kapitel 5.6 dokumentiert. Hierbei kommt das o. g. Modell zur Beschreibung der von dem Verdichtungsgrad abhängigen Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese zum Einsatz.

Tabelle 5.2: Steigung  $p_1$  und Ordinatenabschnitt  $p_2$  entsprechend Gleichung 5.31 zur Bestimmung der von dem Verdichtungsgrad abhängigen Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese für Hamburger Sand.

Parameter	$\lambda_d$	$\lambda_w$	$x_{Rd}$	$x_{Rw}$	$\beta_d$	$\beta_w$	$\beta_1$	$\beta_2$	$y_0$	$y_R$
Einheit	–	–	kPa	kPa	–	–	–	–	–	–
$p_1$	0,4	–0,1	0,66	0,28	2,0	–4,0	–0,3	9,4	–0,074	0,08
$p_2$	1,0	1,425	0,535	0,83	4,0	9,2	3,075	–0,85	0,9245	0,082

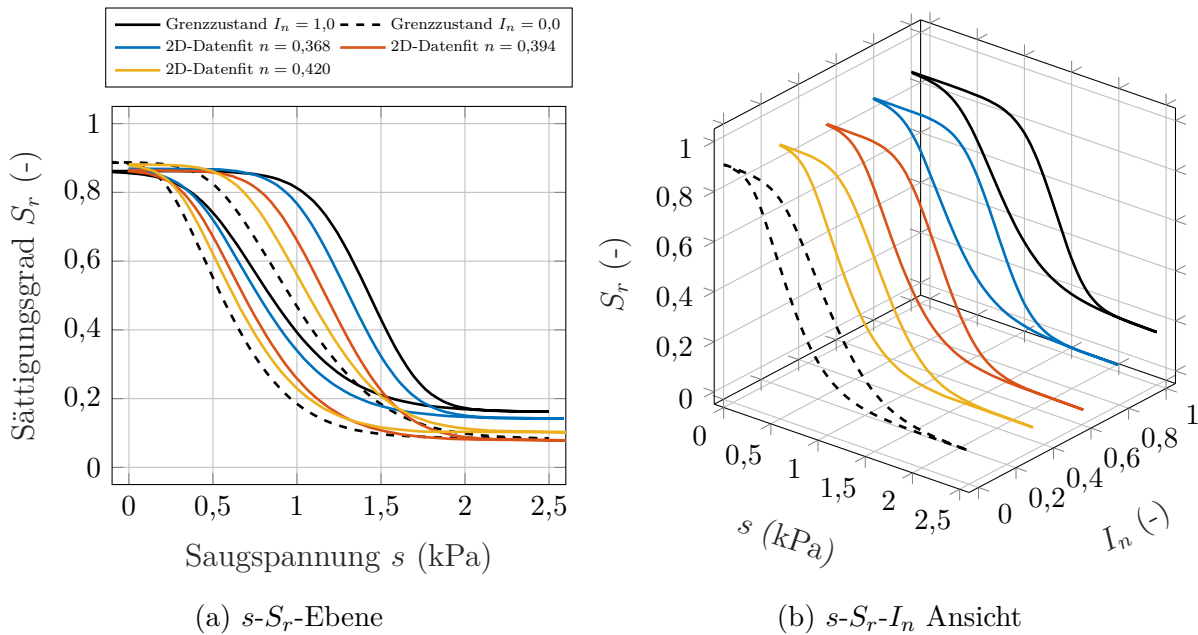


Abbildung 5.9: Modellierte Hauptent- und Hauptbewässerungspfade samt extrapolierten Grenzzustände für die Verdichtungsgrade  $I_n = 0$  bzw.  $I_n = 1$ . (a) 2D-Ansicht, (b) 3D-Ansicht. Die Legende in (a) gilt für beide Abbildungen.

## 5.6 Teilgesättigte Ödometerversuche mit zyklischer mechanischer Belastung

Die Implementierung des in Kapitel 5.2.1.2 beschriebenen, mit Kapitel 5.4 validierten und mit Kapitel 5.5 um den Einfluss des Verdichtungsgrads erweiterten Kapillardruck-Sättigungs-Modells mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese wird im Folgenden anhand eines theoretischen Beispiels untersucht. Hierzu werden FE-Simulationen von Ödometerversuchen mit zyklischer mechanischer Vertikalbelastung eines teilgesättigten Sands durchgeführt.

### 5.6.1 Beschreibung

Das eindimensionale Kompressionsverhalten von Bodenproben bei verhinderter seitlicher Ausdehnung lässt sich in Ödometern untersuchen, vgl. DIN EN ISO 17892-5:2017-08. Hierbei wird eine zylindrische Bodenprobe in einer Ödometerzelle stufenweise be- und entlastet. Aus den Ergebnissen lässt sich die Druck-Setzungs-Kurve und daraus der spannungsabhängige Steifemodul ableiten, vgl. Kolymbas (2016). In Anlehnung an die o. g. DIN, welche die Durchführung von Ödometerversuchen mit stufenweiser Belastung regelt, werden Simulationen von Ödometerversuchen an einem teilgesättigten Sand mit zyklischer Belastung durchgeführt. Um den Einfluss zyklischer Belastungen auf die hydraulischen Zustände zu untersuchen, wird das im Rahmen dieser Arbeit entwickelte hydraulische Modell der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese und

des Verdichtungsgrads verwendet. Diese Untersuchungen sind als Anwendungsbeispiel des entwickelten Modells zu verstehen. Hierzu wird ein modifizierter Laborversuch als idealisierter Elementversuch simuliert.

### 5.6.2 Simulation

Unter Verwendung eines rotationssymmetrischen Modells werden Elementversuche an einem axialsymmetrischen benutzerdefinierten finiten Element UEL vom Typ U4P4 durchgeführt. Der Ödometerversuch ist in Abbildung 5.10 schematisch für Laborbedingungen und idealisiert als axialsymmetrisches FE-Modell abgebildet. In Einklang mit der DIN EN ISO 17892-5:2017-08 wird die Geometrie des zylindrischen Probekörpers mit  $D/H \approx 3,5 > 2,5$  ( $H$  = Höhe,  $D$  = Durchmesser) modelliert.

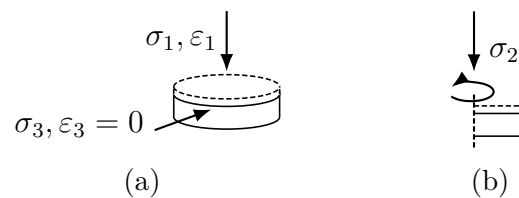


Abbildung 5.10: (a) Laborbedingung und (b) axialsymmetrisches FE-Modell des teilgesättigten Ödometerversuchs.

Für die theoretischen Untersuchungen werden zur Beschreibung des mechanischen und des hydraulischen Verhaltens die Materialkennwerte des Hamburger Sands herangezogen. Das Verformungsverhalten des Korngerüsts wird mit dem hypoplastischen Materialmodell nach von Wolffersdorff (1996) mit Erweiterungen nach Niemunis und Herle (1997) abgebildet. Zugehörige Materialparameter sind in Anhang B zusammengefasst.

Für das hydraulische Verhalten wird das in Kapitel 5.2.1.2 vorgestellte Kapillardruck-Sättigungs-Modell mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese verwendet. Zudem wird die in Kapitel 5.5 vorgestellte Erweiterung um die Abhängigkeit des Verdichtungsgrads in den Untersuchungen berücksichtigt. Für die Modellierung der Durchlässigkeiten der Porenfluide im teilgesättigten Zustand  $k_{r,w}$  und  $k_{r,a}$  wird der in Abaqus/Standard bereits implementierte Ansatz verwendet, vgl. Kapitel 5.2.2.

Für die Initialzustände der Simulationen werden Anfangsporositäten von  $e_0 = 0,420 / 0,394 / 0,368$  entsprechend Verdichtungsgraden von  $I_n = 0,25 / 0,5 / 0,75$  gewählt. In einem ersten statischen Belastungsschritt wird der hydraulische Zustand errechnet. Um den Einfluss der hydraulischen Geschichte zu untersuchen, werden hierzu zwei Simulationstypen Sim A und Sim B eingeführt. Beide Simulationstypen dienen der Einstellung eines hydraulischen Zustands, der wiederum Ausgangspunkt des folgenden zyklischen mechanischen Belastungsschrittes ist. Der über das finite Element homogen verteilte Porenwasserdruck  $u_w$  wird in den Simulationstypen über den Ansatz abschnittsweise definierter Funktionen geregelt, vgl. Dassault Systèmes (2019). Sim A sieht eine einmalige Entwässerung entsprechend einem Porenwasserdruck von  $u_w = -1,0$  kPa mit einer Simulationsschrittzeit von  $t_{\text{step}} = 1,0$  s vor, vgl. Gleichung 5.32. Sim B sieht eine Entwässerung entsprechend

einem Porenwasserdruck von  $u_w = -2,5 \text{ kPa}$  mit anschließender Wiederbewässerung auf  $u_w = -1,2 \text{ kPa}$  bei einer Simulationsschrittzeit von  $t_{\text{step}} = 2,3 \text{ s}$  vor, vgl. Gleichung 5.33. Beide Funktionen  $a(t)$  sind in Abbildung 5.11 (a) dargestellt.

$$\begin{aligned}
 a(t) &= A_0 \text{ für } t \leq t_0 \\
 &= A_0 + (A_1 - A_0) \xi^3 (10 - 15\xi + 6\xi^2) \text{ für } t_0 < t < t_1 \\
 &= A_1 \text{ für } t \geq t_1 \\
 &\text{mit } \xi = \frac{t - t_0}{t_1 - t_0}
 \end{aligned} \tag{5.32}$$

Die benutzerdefinierten Konstanten sind hierbei wie folgt definiert:  $t_0 = 0,0 \text{ s}$ ,  $t_1 = 1,0 \text{ s}$ ,  $A_0 = 1,0 \text{ kPa}$ ,  $A_1 = -1,0 \text{ kPa}$ .

$$\begin{aligned}
 a(t) &= A_0 \text{ für } t < t_0 \\
 &= A_0 + A_1 \cos(N_1 \omega (t - t_0)) \text{ für } t \geq t_0
 \end{aligned} \tag{5.33}$$

Hierin sind  $N_1 = 1,0$  und die benutzerdefinierten Konstanten definiert als:  $t_0 = 0,0 \text{ s}$ ,  $A_0 = -1,25 \text{ kPa}$ ,  $A_1 = 1,25 \text{ kPa}$  sowie  $\omega = 120,0^\circ/\text{s}$ .

Die nach dem hydraulischen, statischen Berechnungsschritt aufgebrachte, zyklische mechanische Last  $\sigma_2(t)$  wird über eine periodische Amplitudenfunktion entsprechend Gleichung 5.33 aufgebracht. Hierbei beträgt die Zeit des Simulationsschritts  $t_{\text{step}} = 12,0 \text{ s}$ , vgl. Abbildung 5.11 (b). Die benutzerdefinierten Konstanten sind als  $t_0 = 0,0 \text{ s}$ ,  $A_0 = 500,0 \text{ kPa}$ ,  $A_1 = -500,0 \text{ kPa}$  sowie  $\omega = 60,0^\circ/\text{s}$  definiert.

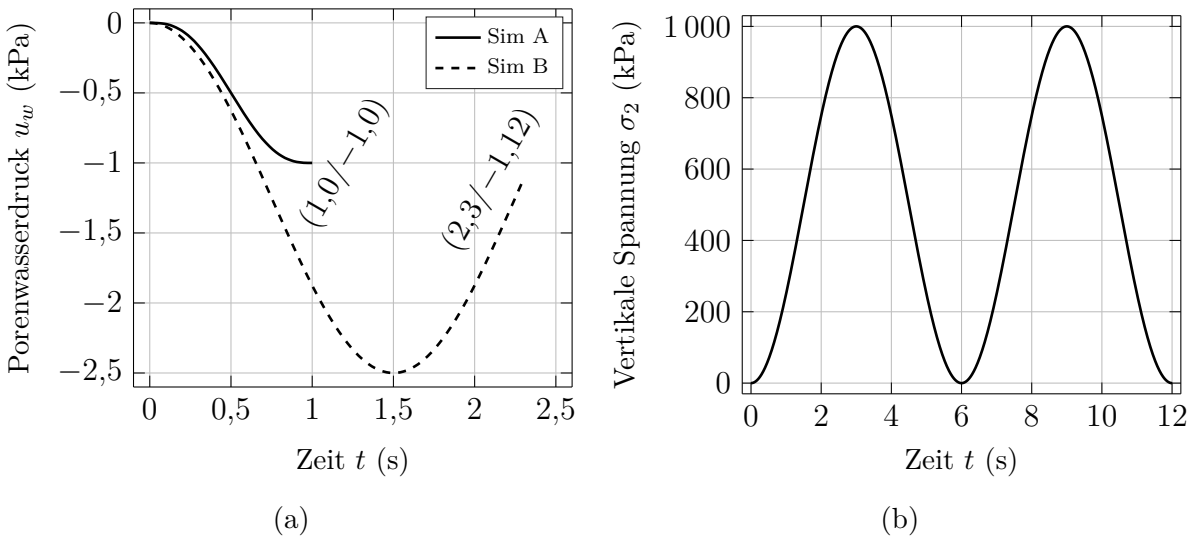


Abbildung 5.11: (a) Hydraulischer Belastungsschritt in Form einer Porenwasserdruckänderung für Sim A und Sim B. (b) Mechanischer Belastungsschritt in Form einer zyklischen Last.

Die gewählte vertikale Maximallast von  $\sigma_2 = 1000 \text{ kPa}$  ist im Rahmen von Verkehrslasten als eine vergleichsweise hohe Last einzustufen, dient in diesem theoretischen Beispiel jedoch dazu, Verformungen zu induzieren, die die Wasserphase maßgeblich beeinflussen.

### 5.6.3 Ergebnisse

Abbildung 5.12 (a) verdeutlicht die plastischen Verformungen der Sandproben, die unter Ansatz des verwendeten hypoplastischen Materialmodells aus der zyklischen Belastung resultieren. Der initiale Verdichtungsgrad hat einen Einfluss auf Verformungsverhalten. So sind nach einem Lastzyklus für Simulationstyp Sim A Steigerungen des Verdichtungsgrads in Abhängigkeit des initialen Verdichtungsgrads zu verzeichnen: 13,11% für  $I_n = 0,25$ , 11,55% für  $I_n = 0,50$  und 9,35% für  $I_n = 0,75$ . Eine Simulation vom Typ Sim A mit einem initialen Verdichtungsgrad von  $I_n = 0,85$  wurde im zweiten Lastzyklus abgebrochen, da das Korngerüst mit Erreichen von  $I_n = 1,0$  keine Verformungen mehr zulässt und es so zu hohen Porenwasserüberdrücken kam. Der dieser Simulation zugehörige Verlauf der Porenwasserüberdrücke wird in Abbildung 5.12 (c) demonstriert.

Neben dem Verdichtungsgrad hat auch der hydraulische Ausgangszustand einen Einfluss auf das Verformungsverhalten. Sim A sieht einen hydraulischen Initialzustand auf dem Hauptentwässerungspfad und Sim B auf dem Hauptbewässerungspfad vor. Die zyklische Last hat eine Verformung des Porenraumes zur Folge, welche wiederum in Wechselwirkung mit dem Sättigungsgrad und der herrschenden Saugspannung stehen. Die daraus resultierenden Scanning-Pfade zwischen den Hauptpfaden der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung sind in Abbildung 5.12 (b) dargestellt. Die Änderung des Verdichtungsgrads  $I_n$ , welche in dem verwendeten Kapillardruck-Sättigungs-Modell Berücksichtigung findet, ist u. a. in Abbildung 5.12 (c) bzw. (d) dargestellt. Zu erkennen ist, dass sich je nach Initialzustand und Verdichtungsgrad verschiedene Änderungsraten einstellen.

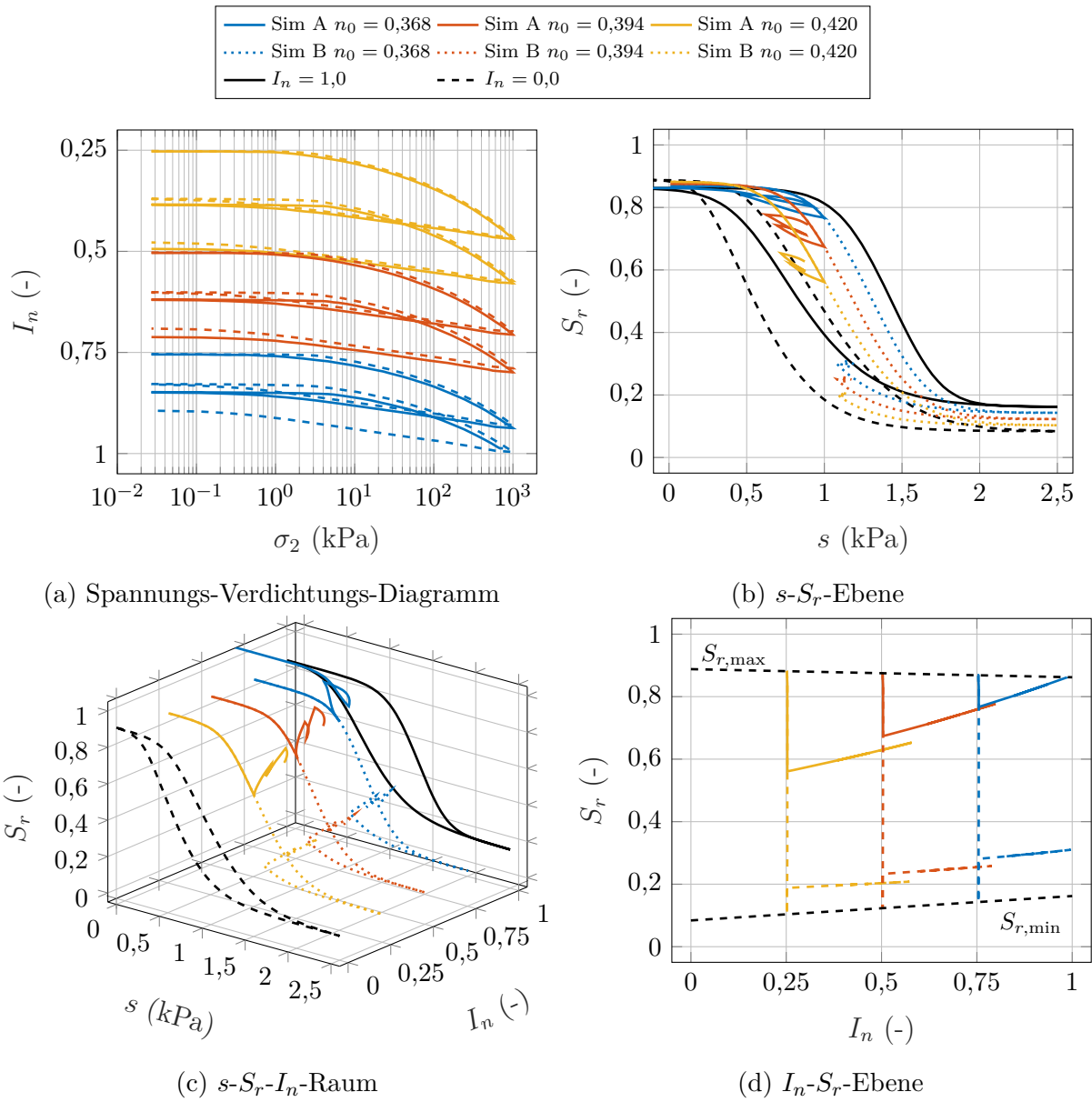


Abbildung 5.12: Ergebnisse der Simulation teilgesättigter zyklischer Ödometerversuche: (a) Verdichtungsgrad  $I_n$  über vertikale Spannung  $\sigma_2$ , (b) und (c) Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung in der  $s$ - $S_r$ -Ebene und im  $s$ - $S_r$ - $I_n$ -Raum, (d) Sättigungsgrad  $S_r$  über Verdichtungsgrad  $I_n$ .

## 5.7 Implementierung bewegter Flächenlasten

Wie in Abbildung 2.11 in Kapitel 2.2 verdeutlicht, ähnelt die bei Radüberfahrt auf die Oberkante eines Bodenkörpers oder einer Straßenkonstruktion eingetragene vertikale Lastverteilung einer glockenförmigen Funktion. Glockenförmige Funktionen haben ein globales Maximum und sind oft spiegelsymmetrisch zu der Achse des Maximums. Für  $x \rightarrow \pm\infty$  geht die Kurve asymptotisch gegen null. Zur Modellierung von glockenförmigen Flächenlasten wird die Dichtefunktion der Normalverteilung herangezogen, vgl. Gleichung 5.34 sowie Fahrmeir u. a. (2016).

$$f(x) = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}} \quad (5.34)$$

Hierbei sind  $a$  das Maximum der aufgebrachten Last und  $b$  der zugehörige Ort der Maximallast. Um Radüberfahrten in Form von bewegten Flächenlasten zu simulieren, ist dieser Ort abhängig von der Zeit:  $b(t)$ . Die Konstante  $c$  ist ein Modellparameter über den die Krümmung der glockenförmigen Funktion eingestellt wird.

Um derartige Lasttypen in Randwertproblemen mit Berücksichtigung der Teilsättigung zu verwenden, wird die dynamische Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung für Abaqus/Standard weiterentwickelt. Hierzu wird in die Subroutine vom Typ UEL eine benutzerdefinierte Subroutine vom Typ KDLOAD implementiert. So lassen sich glockenförmige bewegte Lasten auf die Ränder benutzerdefinierter Elemente aufbringen. In jedem Berechnungsschritt werden die auf die FE-Knoten wirkenden Kräfte elementweise zusammengestellt und an das Gesamtgleichungssystem übergeben. Wird dieser für die Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung entwickelte Lasttyp vorgegeben, werden die an den entsprechenden FE-Knoten angreifenden Lasten über Gleichung 5.34 berechnet und elementweise in gemittelte auf den jeweiligen Elementrand wirkende gleichförmige Streckenlasten umgerechnet. Diese werden dann in die entsprechenden Knotenkräfte umgerechnet. In der Eingabe-Datei von Abaqus (*Input-File*, Typ \*.inp) muss hierzu ein neu eingeführter Lasttyp U17 vorgegeben werden. Weiterhin ist die Maximallast vorzugeben. Die Kennwerte  $b(t)$  und  $c$  sind in der Subroutine zu definieren. Eine allgemeine Beschreibung zur Vorgabe von Lasten bzw. Randbedingungen finden sich in Schümann (2015).

Die korrekte Implementierung der Subroutine vom Typ KDLOAD wird durch die Simulation einer zeitlich veränderlichen glockenförmigen Flächenlast an einem einfachen FE-Modell gezeigt. Durch das Nullsetzen der Partialdrücke im gesamten Gebiet ( $p_w = p_g = 0$  kPa) sowie durch die Vorgabe eines konstanten Sättigungsgrads von  $S_r = 0$  wird die Fragestellung auf die Verformung der Feststoffphase reduziert. Die eingetragene Last wird daher direkt auf das Korngerüst übertragen, die totalen Spannungen entsprechen den effektiven Spannungen, d. h. es gilt  $\sigma' = \sigma$ .

Das zweidimensionale Simulationsmodell hat eine Höhe von 0,01 m und eine Breite von 1,0 m. Das Gebiet wird durch 100 nebeneinander angeordnete benutzerdefinierte Elementen des Typs U8P8 mit einer Kantenlänge von  $l = 0,01$  m diskretisiert. Zur Beschreibung des Materialverhaltens des Korngerüsts wird die lineare Elastizität eingesetzt. Verwendete Parameter sind in Tabelle 5.3 aufgeführt.

In Abbildung 5.13 ist das FE-Modell sowie die aufgebrachte Last beispielhaft zum Zeitpunkt  $t = 0,65\text{ s}$  bei  $x = vt - 0,25 = 0,075\text{ m}$  dargestellt. Diese zeigt den typischen glockenförmigen Verlauf.

Tabelle 5.3: Verwendete Parameter für die Simulation einer zeitlich veränderlichen glockenförmigen Flächenlast.

Bezeichnung	Parameter	Einheit	Wert
Elastizitätsmodul	$E$	kPa	3 000,00
Querdehnzahl	$\nu$	–	0,25
Porenanteil	$n$	–	0,10
Korndichte	$\rho_s$	$\text{g/cm}^3$	2,65
Kompressibilität der Einzelkörner	$K_s$	kPa	$\rightarrow \infty$
Maximallast	$a$	kPa	50,00
Geschwindigkeit	$v$	m/s	0,50
Ort der Maximallast	$b(t)$	m	$vt - 0,25$
Modellparameter	$c$	–	0,05

In Abbildung 5.14 ist das Ergebnis der Simulation als Konturdarstellung der effektiven Spannung  $\sigma'$  in vertikaler Richtung zu verschiedenen Berechnungszeiten abgebildet. Es lässt sich erkennen, dass die eingetragene Maximallast von 50,0 kPa direkt auf das Korngerüst übertragen wird. Da der Sättigungsgrad zu jeder Zeit 0 beträgt, der Porenraum also niemals mit Wasser gefüllt ist, entspricht die aufgebrachte totale Spannung der ausgelesenen und dargestellten effektiven Spannung. Entsprechend dem vorgegebenen von der Berechnungszeit abhängigen Ort der Maximallast bewegt sich die glockenförmige Last mit konstanter Geschwindigkeit von links nach rechts. Die mit einem Skalierungsfaktor von 1 000 dargestellte Verformung entspricht dem zu erwartenden Verhalten. Der implementierte Lasttyp wird in Kapitel 8 Anwendung finden.

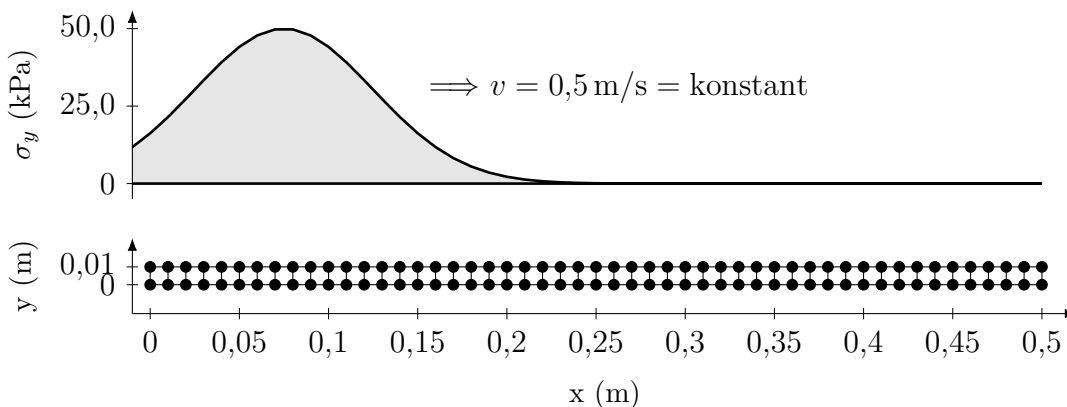


Abbildung 5.13: Die ersten 0,5 m des FE-Modells (50 Elemente) mit glockenförmiger Flächenlast beispielhaft zum Zeitpunkt  $t = 0,65\text{ s}$ .

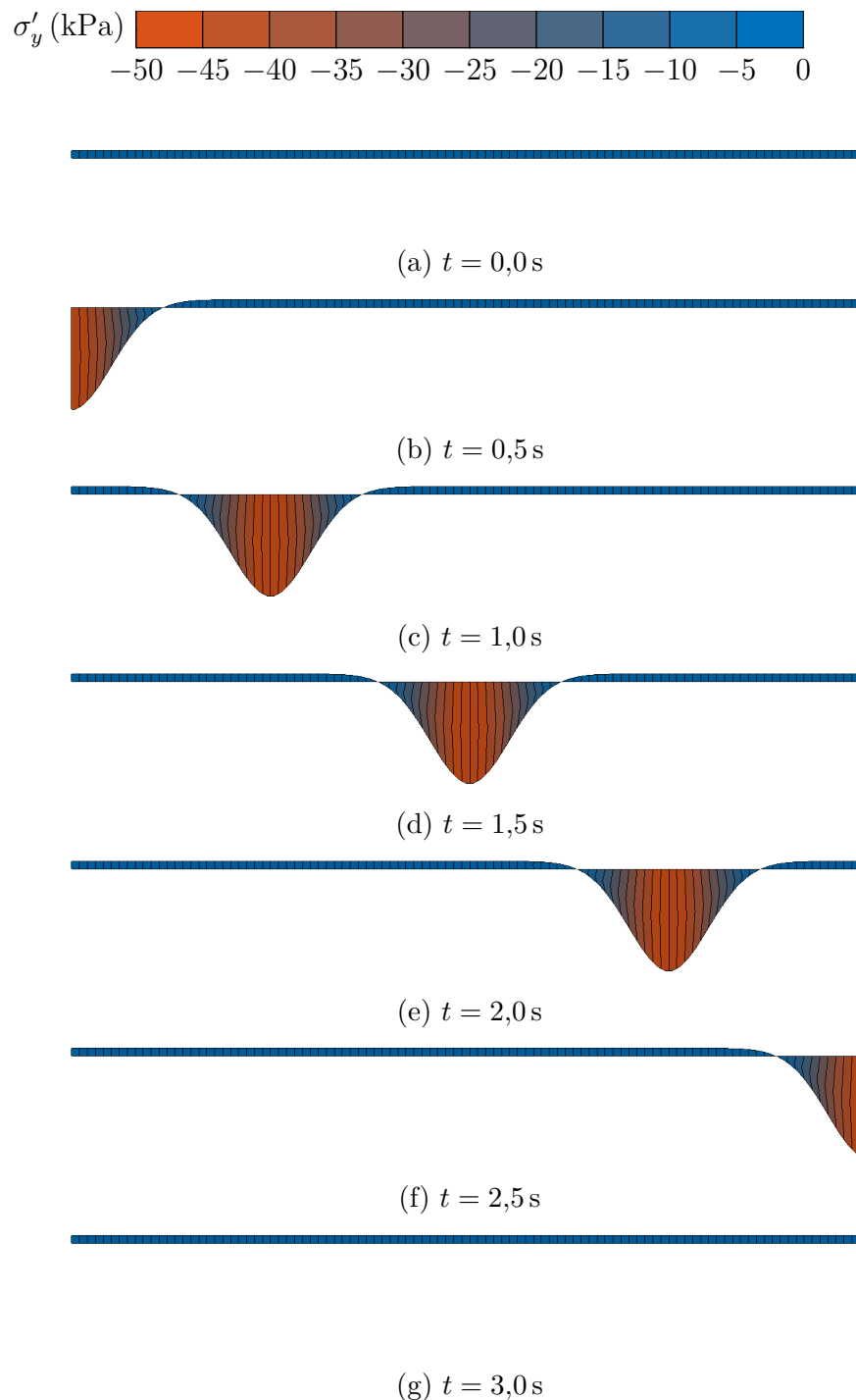


Abbildung 5.14: Zeitlicher Verlauf der als glockenförmige Funktion implementierten Flächenlast. Dargestellt sind die totale Spannung  $\sigma$  sowie die Verformung  $u_y$ . Der Anschaulichkeit dienend wird für die Verformung ein Skalierungsfaktor von 1 000 gewählt.

## 5.8 Zusammenfassung

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen zur Modellierung des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhaltens der untersuchten teilgesättigten granularen Böden präsentiert. Zum einen wurde auf die mechanischen, zum anderen auf die hydraulischen Materialmodelle eingegangen und deren Implementierung in die FEM erläutert.

Die verwendeten Spannungs-Dehnung-Modelle zur Beschreibung des Verformungsverhaltens des Korngerüsts wurde zusammengefasst. Es wird auf die Validierung in Anhang B verwiesen.

Daneben wurden die Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung der untersuchten Böden zum einen ohne und zum anderen mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese erläutert. Die Modellierung der relativen hydraulischen Durchlässigkeiten wurde ebenfalls beschrieben.

Die Grundlagen der Implementierung der dynamischen Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung zur Modellierung des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhaltens in Abaqus/Standard wurden zusammenfassend dargestellt. Die Implementierung des benutzerdefinierten Elementtyps in eine Subroutine vom Typ UEL sowie die numerischen Lösungsansätze wurden aufgezeigt.

Für die implementierten hydraulischen Modelle wurden Parametersätze für die Modell-sande Hamburger Sand und ISS-0 Sand abgeleitet und erfolgreich gegen Messdaten validiert. Die Implementierung des Kapillardrucksättigungsmodells mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese in die Finite-Elemente-Umgebung in Abaqus/Standard wurde verifiziert.

Zusätzlich wurde eine in MATLAB<sup>®</sup> formulierte Erweiterung des Modells zur Beschreibung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese sowie des Einflusses des Verdichtungsgrades vorgestellt. Dieses hydraulische Modell wurde ebenso in die Finite-Elemente-Umgebung in Abaqus/Standard implementiert. Die so ermöglichten Simulationen von teilgesättigten Ödometerversuche zeigen zum einen die Funktionalität des im Rahmen dieser Arbeit entwickelten Kapillardruck-Sättigungs-Modells. Zum anderen wird neben dem Einfluss des initialen Verdichtungsgrads der des herrschenden Saugspannungs-Sättigungs-Zustandes auf das Verformungsverhalten unter zyklischer mechanischer Last deutlich.

Außerdem wurde ein neuer Lasttyp für die Verwendung in den benutzerdefinierten Elementen in Abaqus/Standard entwickelt, der die Modellierung zeitlich veränderlicher glockenförmiger Flächenlasten zur Abbildung von Radlasten ermöglicht.

Die im Rahmen dieser Arbeit entwickelten und validierten Modelle zur realistischen Beschreibung des hydraulisch-zyklischen Verhaltens teilgesättigter granularer Böden sowie die Formulierung des neuen Lasttyps werden im Folgenden angewendet, um ausgewählte Fragestellungen zu beantworten.

# 6 Entwässerungsverhalten einer wasser-durchlässigen Straßenkonstruktion

Die Dimensionierung von Straßenkonstruktionen verfolgt das Ziel, die Schichtung und Schichtmächtigkeiten des Straßenoberbaus unter Berücksichtigung eines ausreichenden Ermüdungswiderstands sowie einer ausreichenden Tragfähigkeit gegen Belastung aus Verkehr und Witterung während der Nutzungsdauer sowie einer ausreichenden Frostsicherheit festzulegen. Relevant sind hierbei u. a. die Funktion der Verkehrsfläche, die Lage des Straßenbauwerks im Gelände, die Untergrundverhältnisse, die Bauweise sowie die zu erwartende Verkehrsbelastung, vgl. Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12).

Für das Verformungsverhalten eines Korngerüsts und somit auch von Straßenkonstruktionen ist die effektive Spannung maßgebend. Der herrschende effektive Spannungszustand wird weiterhin durch teilgesättigte Zustände beeinflusst. Zur Identifikation dieses Einflusses auf den effektiven Spannungszustand wird zunächst ein Modellversuch zum Entwässerungsverhalten einer wasserdurchlässigen Straßenkonstruktionen im bodenmechanischen Forschungslabor der Technische Universität Hamburg durchgeführt.

Der untersuchte Straßenaufbau besteht aus einer PU-gebundenen Deckschicht, zwei unterlagernden Schottertragschichten sowie einer Frostschutzschicht. Zur Erfassung des hydraulischen Systemverhaltens werden die in eine Acrylglasäule schichtweise eingebauten Materialien mit Messtechnik ausgestattet. Neben Einblicken in das hydraulische Verhalten des untersuchten wasserdurchlässigen Straßenaufbaus lassen sich aus den Versuchsergebnissen zudem hydraulische Kenngrößen für die Modellierung des teilgesättigten Verhaltens der mehrschichtigen Konstruktion ableiten.

Aufbauend auf den Ergebnissen des Modellversuchs werden numerische Untersuchungen durchgeführt, um den in einer teilgesättigten Straßenkonstruktion herrschenden effektiven Spannungszustand abzuleiten. Basierend hierauf lässt sich der Einfluss teilgesättigter Zustände auf das Verformungsverhalten bewerten.

## 6.1 Material in der Straßenkonstruktion

Der u. a. aus dem neuartigen Deckschichtmaterial PUPM Typ A hergestellte Fahrbahnaufbau wird durch zwei Schottertragschichten (oben: STS 2, Kornklasse 0/32, unten: STS 1 Kornklasse, 0/32) und eine unterlagernde Frostschutzschicht (FSS, Kornklasse 0/45) getragen. Für ausreichende Entwässerungsbedingungen gewährleisten alle Schichten einen Durchlässigkeitsbeiwert von  $k_f \geq 5,4 \times 10^{-5}$  m/s, wie in dem Merkblatt für versickerungs-

fähige Verkehrsflächen (M VV) empfohlen. Bei den untersuchten Materialien handelt es sich um typische Straßenbaumaterialien, die im Rahmen des beschriebenen Forschungsprojekts bereits in mehreren Studien verwendet und hinsichtlich ihrer mechanischen und hydraulischen Eigenschaften untersucht wurden.

Die Korngrößenverteilungen nach DIN EN ISO 17892-4:2017-04 der verwendeten Geomaterialien der einzelnen Schichten sind in Abbildung 6.1 dargestellt. Die verwendeten Gesteinsmischungen orientieren sich an den in den Technischen Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau vorgegebenen Korngrößenverteilungen, vgl. TL SoB-StB 04 (2007). Die Korngrößenverteilung des verwendeten Deckschichtmaterials entspricht der des PUPM Typ B, vgl. Abbildung 4.5.

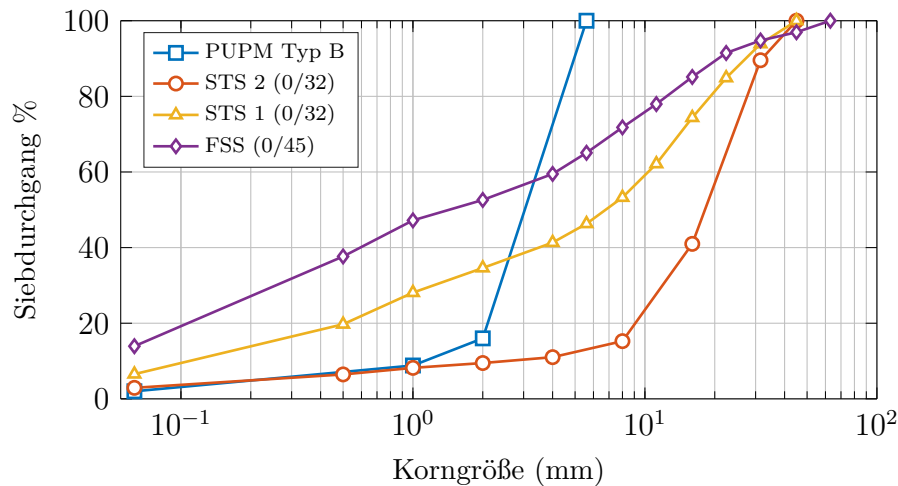


Abbildung 6.1: Korngrößenverteilungen nach DIN EN ISO 17892-4:2017-04 der in der wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion verwendeten Geomaterialien.

Aufgrund eines anzustrebenden möglichst hohen Verdichtungsgrads sowie der hohen Durchlässigkeiten ist davon auszugehen, dass sich der Straßenaufbau durch die rein hydraulische Belastung vernachlässigbar gering verformt. Demnach werden im Zuge der numerischen Untersuchungen für die Schichten elastische Materialparameter angesetzt. Die elastischen Materialparameter der Deckschicht wurden aus Laborversuchen anhand von Bohrkernen aus einer Teststrecke ermittelt und sind in G. Lu, Renken u. a. (2019) dokumentiert. Die Elastizitätsmoduln der Schottertragschichten STS 1 und STS 2 sowie der Frostschutzschicht FSS wurden auf der Grundlage der Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12) (2012) abgeschätzt, vgl. G. Lu, Liu, Törzs u. a. (2020). Die mechanischen Eigenschaften der untersuchten Materialien sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Der im Modellversuchsstand hergestellte Verdichtungsgrad der eingebauten Schichten lässt sich nur ungenau bestimmen. Somit werden im Zuge der numerischen Untersuchungen Parametervariationen durchgeführt. Der Durchlässigkeitsbeiwert sowie die daraus resultierende Permeabilität werden unter Verwendung des semi-empirischen, semi-theoretischen Kozeny-Carman-Modells aus den Korngrößenverteilungen abgeleitet, vgl. Carrier (2003).

Tabelle 6.1: Mechanische Eigenschaften der Geomaterialien der untersuchten wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion.

Parameter	Symbol	Einheit	PUPM	STS 2	STS 1	FSS
Elastizitätsmodul	$E$	MPa	3 310,0	300,0	300,0	150,0
Querdehnzahl	$\nu$	–	0,16	0,4	0,4	0,4
Korndichte	$\rho_s$	g/cm <sup>3</sup>	1,849	2,713	2,730	2,665

Für die Schottertragschichten sowie die Frostschuttschicht lassen sich so die Permeabilitäten abschätzen, vgl. Törzs, G. Lu u. a. (2019). Die in das Modell eingehende Porenzahl  $e_{\text{eff}}$  der einzelnen Schichten wird entsprechend eines variierenden Verdichtungsgrads von  $D_{pr} = 95/97/100\%$  angesetzt. In diesem Fall ist der Verdichtungsgrad  $D_{pr}$  das Verhältnis der Trockenrohichte  $\rho_d$  zu der Proctordichte  $\rho_{Pr}$ , vgl. Gleichung 6.1. Die Proctordichte  $\rho_{Pr}$  bezeichnet die größte unter definierter Verdichtungsarbeit erreichbare Trockendichte eines Bodens, die sich bei optimalem Wassergehalt einstellt, vgl. DIN 18127:2012-09.

$$D_{pr} = \frac{\rho_d}{\rho_{Pr}} \times 100 \quad (6.1)$$

Das Kozeny-Carman-Modell zur Prognose des Durchlässigkeitsbeiwerts  $k_f$  der Schichten wird durch Gleichungen 6.2 und 6.3 beschrieben.

$$k_{f,\text{KCM}} = \frac{\gamma_w}{\mu_w C_{\text{KC}}} D_{\text{eff}}^2 \frac{1}{S_F^2} \frac{e_{\text{eff}}^3}{1 + e_{\text{eff}}} \quad (6.2)$$

In Gleichung 6.2 gilt Gleichung 6.3.

$$D_{\text{eff}} = \frac{100\%}{\sum_i (f_i / (D_g^{0,5} \times D_k^{0,5}))} \quad (6.3)$$

Hierbei ist  $f_i$  der Anteil der Partikel zwischen zwei benachbarten Siebmaschenweiten  $D_g$  (größere Siebmaschenweite) und  $D_k$  (kleinere Siebmaschenweite). Weiter bezeichnet  $\mu_w$  die Viskosität von Wasser, die mit  $1 \times 10^{-6}$  kPa·s bei 20 °C angesetzt wird.  $\gamma_w = 9,8$  kN/m<sup>2</sup> ist die Wichte von Wasser.  $C_{\text{KC}}$  ist der von Carman (1956) eingeführte empirische Koeffizient, der hier entsprechend Carrier (2003) mit 4,5 angesetzt wird.  $S_F$  ist der in Fair und Hatch (1933) eingeführte Formfaktor der Gesteinskörner: (a) sphärische Körner: 6,0, (b) abgerundete Körner: 6,1, (c) abgenutzte Körner: 6,4, (d) scharfe Körner: 7,4 und (e) eckige Körner: 7,7. Dieser wird in Anlehnung an die Kornformen mit 6,4 abgeschätzt.

Die hydraulischen Eigenschaften der untersuchten Materialien sind in Tabelle 6.2 zusammengefasst. Die Durchlässigkeit des Deckschichtmaterials wurde experimentell ermittelt, vgl. Kapitel 4.2. Die Durchlässigkeitsbeiwerte der übrigen Schichten werden mit dem Kozeny-Carman-Modell prognostiziert.

Tabelle 6.2: Experimentell erhobene (PUPM) und modellierte (übrige Schichten) hydraulische Eigenschaften der Geomaterialien in der untersuchten Straßenkonstruktion.

Schicht	Verdichtungsgrad $D_{pr}$ (-)	Porosität $n$ (-)	Durchlässigkeitsbeiwert $k_f$ (m/s)	Permeabilität $K$ (m <sup>2</sup> )
PUPM	–	0,289	$3,67 \times 10^{-3}$	$3,74 \times 10^{-10}$
STS 2	1,00	0,208	$8,78 \times 10^{-3}$	$8,95 \times 10^{-10}$
	0,97	0,233	$1,33 \times 10^{-2}$	$1,36 \times 10^{-9}$
	0,95	0,248	$1,67 \times 10^{-2}$	$1,70 \times 10^{-9}$
STS 1	1,00	0,223	$1,02 \times 10^{-3}$	$1,04 \times 10^{-10}$
	0,97	0,245	$1,43 \times 10^{-3}$	$1,46 \times 10^{-10}$
	0,95	0,264	$1,87 \times 10^{-3}$	$1,91 \times 10^{-10}$
FSS	1,00	0,189	$2,22 \times 10^{-4}$	$2,27 \times 10^{-11}$
	0,97	0,212	$3,29 \times 10^{-4}$	$3,36 \times 10^{-11}$
	0,95	0,231	$4,46 \times 10^{-4}$	$4,54 \times 10^{-11}$

## 6.2 Experimentelle und numerische Untersuchungen

### 6.2.1 Experimentelle Untersuchungen

Der für die experimentellen Untersuchungen hergestellte Versuchsaufbau besteht aus einem wasserdurchlässigen Straßenaufbau, der mit einer Höhe von  $H = 0,9\text{ m}$  und einem Durchmesser von  $D = 0,18\text{ m}$  in einen modular gestalteten Acrylglaszylinder eingebaut wurde. Die Saugspannung  $s$  und der Sättigungsgrad  $S_r$  werden auf festgelegten Höhenlagen messtechnisch erfasst. Die Höhenlagen der Sensoren sowie die Schichtdicken sind in Abbildung 6.2 (links) dargestellt. Die Frostschutzschicht FSS ist mit drei Sensorlagen instrumentiert: oben (o), Mitte (m) und unten (u). Die Tragschichten STS 1, STS 2 sowie die poröse Deckschicht PUPM sind mit jeweils einem Sensor zur Erfassung der o. g. Messgrößen ausgestattet. Abbildung 6.2 (rechts) veranschaulicht die instrumentierte Acrylglasäule im bodenmechanischen Forschungslabor.

Für die Instrumentierung des Aufbaus werden in der Deckschicht ein Wassergehaltssensor des Typs HydraProbe der *Stevens Water Monitoring Systems Inc.* und in den übrigen Schichten Wassergehaltssensoren des Typs GS3 der *METER Group AG* verwendet. Zur Saugspannungsmessung werden auf jeder Sensorlage Tensiometer des Typs T5 der *METER Group AG* eingesetzt. Dieser Typ Tensiometer wurde u. a. in Studien mit vergleichbaren Messaufbauten verwendet, vgl. Milatz (2016) und Törzs (2015). Für die kontinuierliche Aufzeichnung der Sättigungsgrade  $S_r$  und der im Straßenbauwerk herrschenden Saugspannungen  $s$  wird das Datenerfassungssystem Sirius der *Dewesoft d.o.o.* eingesetzt.

Um eine gleichmäßige Entwässerung zu ermöglichen, wird an der Unterseite der Säule eine poröse Filterplatte installiert, durch die das Wasser durch ein Entwässerungssystem dem Ablaufventil zugeführt wird.

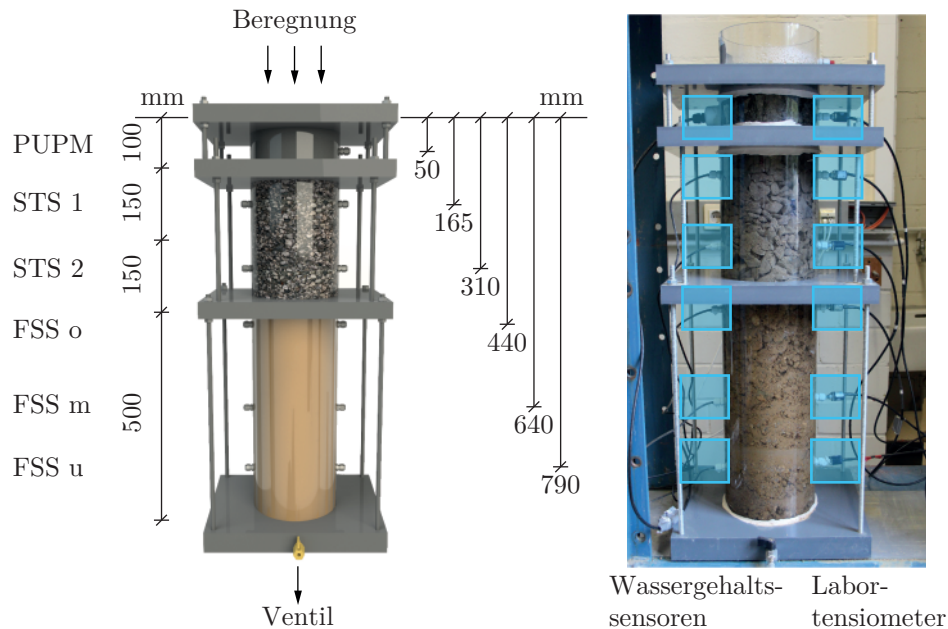


Abbildung 6.2: Versuchsaufbau für das Entwässerungsexperiment in einer Acrylglasäule. Abbildung modifiziert nach G. Lu, Törzs u. a. (2020).

Es wird ein Versuch zum Entwässerungsverhalten an einer anfänglich vollständig gesättigten wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion unter Verwendung der im vorangegangenen beschriebenen Versuchseinrichtung durchgeführt. Ziel ist es, Wassertransportvorgänge im System einer porösen PU-gebundenen Deckschicht und darunter liegenden Oberbaumaterialien messtechnisch zu erfassen. Aus den experimentell gewonnenen Daten wird im Folgenden ein numerisches Modell des mehrschichtigen Aufbaus kalibriert. Im Zuge der Versuchsdurchführung wird die Säule durch einen gezielten Anstieg des Wasserspiegels ausgehend von unten aufgesättigt. Hierdurch kann die in den Poren befindliche Luft nach oben ausströmen. Über die gesamte Höhe kann somit von einem anfänglichen Sättigungsgrad von  $S_r \approx 100,0\%$  bei hydrostatischen Wasserdruckverhältnissen ausgegangen werden.

Um die gravitationsbedingte Entwässerung des gesamten Systems einzuleiten, wird das Ventil am unteren Ende der Acrylglasäule zum Beginn des Versuchs geöffnet. Die Daten werden während des Entwässerungsprozesses für  $10\,800\text{ s} = 3\text{ h}$  aufgezeichnet.

## 6.2.2 Numerische Untersuchungen

Das Entwässerungsverhalten einer anfangs vollständig gesättigten mehrschichtigen Straßenkonstruktion wird mit der in Kapitel 5 beschriebenen Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung numerisch abgebildet. Für das mehrschichtige Straßensystem wird hierzu ein zweidimensionales (ebene Dehnung) FE-Modell erstellt. Die Säulengeometrie wird in  $90 \times 1$

benutzerdefinierte Elemente des Typs U8P8 diskretisiert, vgl. Abbildung 6.3 (rechts). Bei einer Modellhöhe von 0,9 m hat jedes finite Element die Abmessungen  $0,01 \text{ m} \times 0,01 \text{ m}$ . Dieser hohe Grad der Diskretisierung ist notwendig, um den stark wasserdurchlässigen Materialien und den Schichtgrenzen Rechnung zu tragen. Jedes der biquadratischen Elemente hat 8 Knoten mit Freiheitsgraden für die Verschiebung ( $u_x$  und  $u_y$ ) und für die Porenfluiddrücke ( $p_w$  und  $p_g$ ).

Das Verformungsverhalten des Korngerüsts wird mit einem linear elastischen Stoffgesetz abgebildet. Da in den experimentellen Untersuchungen ein hoher Verdichtungsgrad angestrebt wurde und dadurch, dass die Belastung rein hydraulischer Art ist, was geringe Verformungen zur Folge hat, ist diese vereinfachte Darstellung des Verformungsverhaltens zulässig. Zugrunde liegende Parameter sind in Tabelle 6.1 zusammengefasst.

Die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung wird über die Beziehung nach van Genuchten (1980) abgebildet. Zugrunde liegende Parameter werden direkt aus den experimentellen Entwässerungsversuchen abgeleitet und sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst.

Die relative hydraulische Leitfähigkeit wird durch den statistischen Ansatz nach Mualem (1976) abgebildet, der in Kombination mit dem gewählten Modell zur Beschreibung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung auf die van Genuchten/Mualem-Permeabilitätsbeziehung führt, vgl. Kapitel 5.2.2.

Da dynamische Effekte bei der Schwerkraftentwässerung vernachlässigbar sind, wird ein quasi-statischer Simulationstyp gewählt, vgl. Schümann (2015). Hierbei bleiben die Feststoffbeschleunigungen und damit sämtliche Massenträgheitseffekte unberücksichtigt.

Die Straßenschichtung sowie die in dem numerischen Modell angesetzten Anfangs- und Randbedingungen sind in Abbildung 6.3 dargestellt. Um die Entwässerungseigenschaften der porösen Filterplatte in den numerischen Untersuchungen zu berücksichtigen, wird der zeitlich veränderliche Porenwasserdruck  $p_w(t)$  entsprechend der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen in Form einer exponentiellen Zerfallsfunktion angesetzt, vgl. Dassault Systèmes (2019). Die zugrunde liegende abschnittsweise definierte Funktion für den Porenwasserdruck  $p_w(t)$  ist mit Gleichung 6.4 gegeben und in Abbildung 6.4 (a) dargestellt.

$$\begin{aligned} p_w(t) &= p_{w0} + p_{w1} \exp(-(t - t_0)/t_d) & \text{für } t \geq t_0 \\ p_w(t) &= p_{w0} & \text{für } t < t_0 \end{aligned} \quad (6.4)$$

Hierbei sind die benutzerdefinierten Konstanten  $p_{w0} = 0,0 \text{ kPa}$ ,  $p_{w1} = 8,8254 \text{ kPa}$ ,  $t_0 = 0,0 \text{ s}$  sowie  $t_d = 150,0 \text{ s}$ .

In einer ersten Simulationsreihe wird das verwendete FE-Modell zur Simulation des Entwässerungsverhalten des mehrschichtigen versickerungsfähigen Straßenaufbaus unter Ansatz der in Tabelle 6.2 zusammengefassten hydraulischen Materialkennwerten verifiziert.

In einer weiteren Simulationsreihe wird das Modell bei verschiedenen Entwässerungszuständen in einen aus einer einmaligen Radüberfahrt resultierenden Verformungszustand überführt. Hierzu wird eine vertikale Spannung an der Oberkante des Modells nach verschiedenen Zeitpunkten des Entwässerungsschrittes, d. h. bei verschiedene Verteilungen

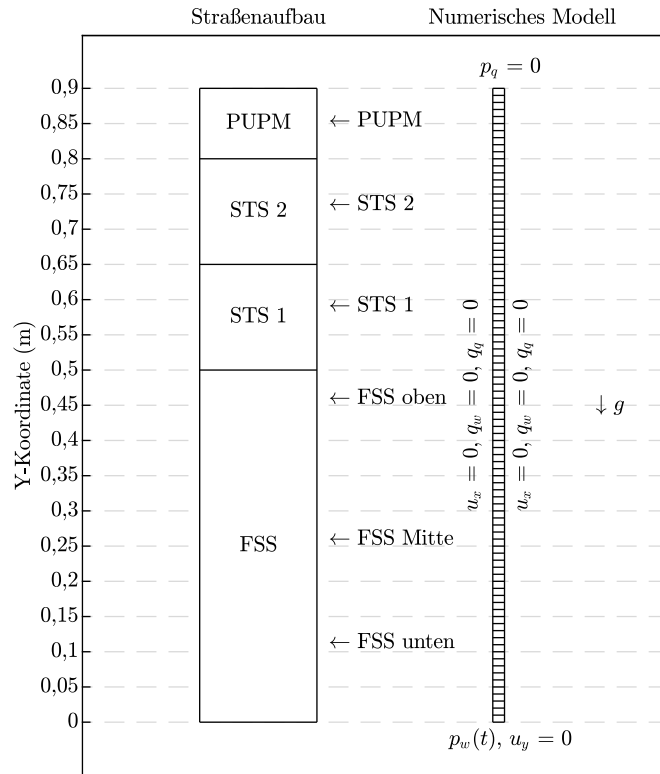


Abbildung 6.3: Straßenschichtung, numerisches Modell ( $90 \times 1$  UEL des Typs U8P8) sowie Anfangs- und Randbedingungen zu den Simulationen versickerungsfähiger Straßenkonstruktionen.

des Sättigungsgrads über die Modellhöhe, aufgebracht. Im Modell wird eine Vertikalspannung von  $\sigma_y = 750,0$  kPa über die mit Gleichung 6.5 gegebene abschnittsweise definierte Funktion aufgebracht, vgl. Dassault Systèmes (2019) sowie Abbildung 6.4 (b).

Die Analyse ist somit in drei Berechnungsschritte unterteilt: 1. ein erster statischer Schritt zur Sicherstellung hydrostatischer Anfangsbedingungen (1 s), 2. die Entwässerungsphase (variable Zeit) und 3. die Lastaufbringung (1 s).

$$\begin{aligned}
 a &= A_0 \text{ für } t \leq t_0 \\
 &= A_0 + (A_1 - A_0) \xi^3 (10 - 15\xi + 6\xi^2) \text{ für } t_0 < t < t_1 \\
 &= A_1 \text{ für } t \geq t_1 \\
 \text{mit } \xi &= \frac{t - t_0}{t_1 - t_0}
 \end{aligned} \tag{6.5}$$

Hierin sind die benutzerdefinierten Konstanten  $t_0 = 0,0$  s,  $t_1 = 1,0$  s,  $A_0 = 0,0$  kPa,  $A_1 = 750,0$  kPa.

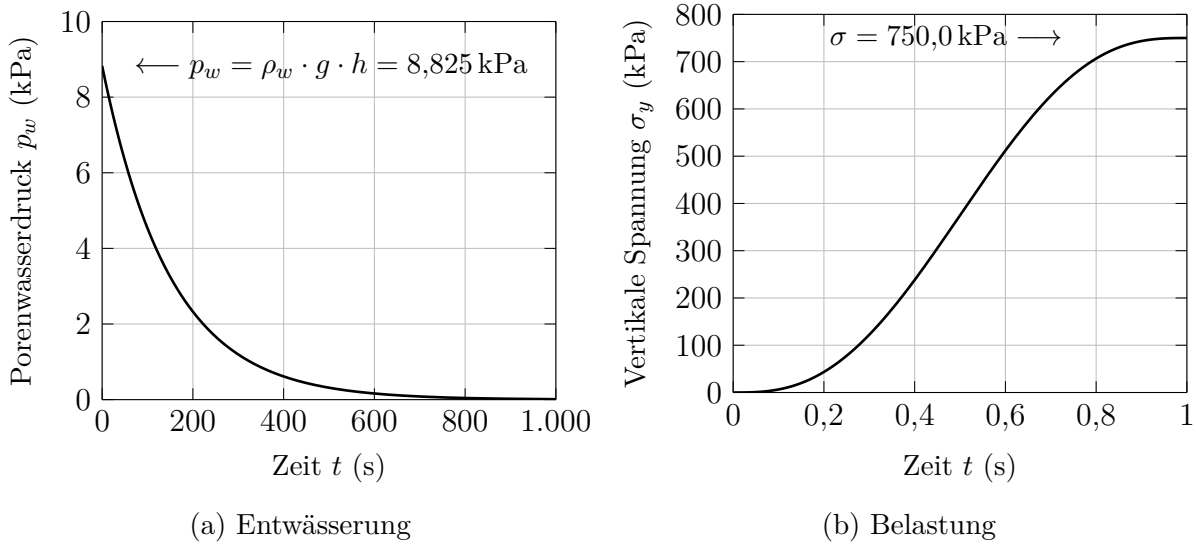


Abbildung 6.4: (a) am unteren Ende der Säule aufgebrachte Änderung des Porenwasserdrucks zur Modellierung der Entwässerung sowie (b) am oberen Ende der Säule aufgebrachte Spannung zur Modellierung der Radlast.

## 6.3 Ergebnisse

### 6.3.1 Experimentelle Untersuchungen

Aus den experimentell gewonnenen Daten werden die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehungen der einzelnen Schichten der Straßenkonstruktion abgeleitet. Die während des Entwässerungsexperiments innerhalb der entsprechenden Schichten, d. h. in der neuartigen PU-gebundenen Deckschicht, den Tragschichten sowie der Frostschuttschicht, gemessenen Sättigungsgrade  $S_r$  werden über die gemessenen Saugspannungen  $s$  aufgetragen, vgl. Abbildung 6.5.

Die Geomaterialien der einzelnen Schichten weisen einen geringen Lufttrittspunkt von  $s_{AEV} < 0,2 \text{ kPa}$  und somit ein für versickerungsfähige Verkehrsflächen geeignetes Drainageverhalten auf, vgl. M VV (2013). Zur Ermittlung der Parameter für die Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehungen nach van Genuchten (VG) wird das in Seki (2007) vorgestellte Computerprogramm verwendet. Die zugrunde liegenden Modellparameter sind in Tabelle 6.3 zusammengefasst. Für die unterlagernde Frostschuttschicht FSS wird zusätzlich zu den Materialparametern für die drei Sensorlagen ein gemittelter Modellparametersatz – VG FSS  $\emptyset$  – angegeben.

Aus den im Zuge des Entwässerungsversuchs ermittelten Kapillardruck-Sättigungs-Beziehungen der einzelnen Geomaterialien lässt sich die Suction-Stress-Characteristic-Curve ableiten. Die Suction-Stress  $\sigma_s$ , die per Definition sämtliche Effekte der Teilsättigung in einer Größe abbildet, ist in der folgenden Abbildung 6.6 in Abhängigkeit des Sättigungsgrads  $S_r$  dargestellt. Der Anteil, der im Zuge der Entwässerung bzw. bei Radüberfahrt mobilisiert wird, lässt sich mit numerischen Methoden prognostizieren.

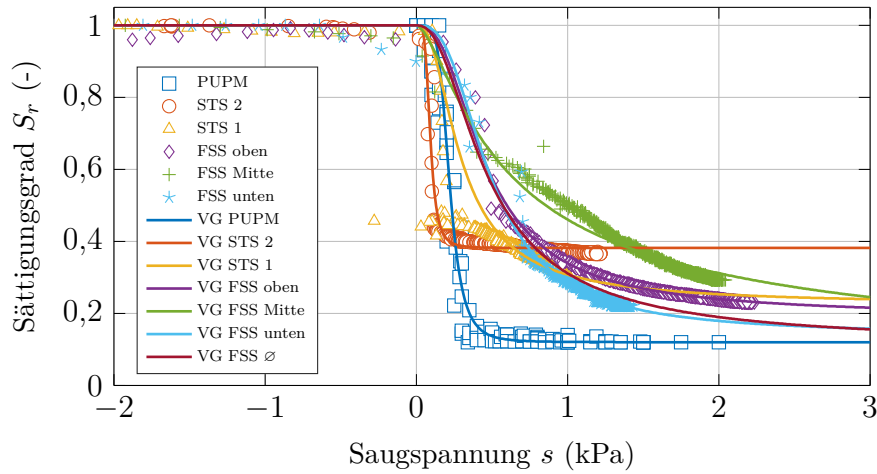


Abbildung 6.5: Kapillardruck-Sättigungs-Beziehungen, abgeleitet aus Entwässerungsversuchen einschließlich Kurvenanpassung unter Verwendung des Modells nach van Genuchten (1980).

Tabelle 6.3: Aus den experimentellen Entwässerungsuntersuchungen abgeleitete Parameter nach van Genuchten (1980) zur Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehungen der verwendeten Geomaterialien.

Bezeichnung	Parameter	Einheit	PUPM	STS 2	STS 1	FSS
Maximaler Sättigungsgrad	$S_{r,max}$	—	1,000	1,000	1,000	1,000
Minimaler Sättigungsgrad	$S_{r,min}$	—	0,120	0,382	0,223	0,110
Modellparameter	$\alpha_{VG}$	1/kPa	4,792	11,685	4,418	2,824
Modellparameter	$n_{VG}$	—	5,526	4,731	2,481	2,385
Modellparameter	$m_{VG}$	—	0,819	0,789	0,600	0,581

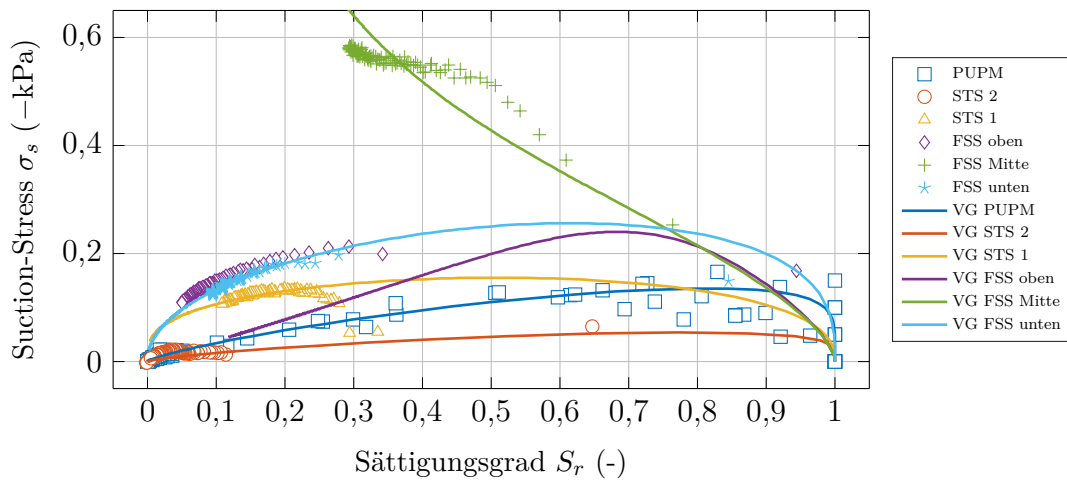


Abbildung 6.6: Suction-Stress-Characteristic-Curves abgeleitet aus den experimentell ermittelten Kurven der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung der Schichten des wasserdurchlässigen Straßenaufbaus, vgl. Abbildung 6.5.

### 6.3.2 Numerische Untersuchungen

In Abbildung 6.7 sind die ersten 1000 s des Entwässerungsversuchs der versickerungsfähigen Straßenkonstruktion dargestellt. Hierbei werden vergleichend die experimentell erhobenen Daten sowie die Simulationsergebnisse dargestellt. Der anfängliche und wasser-gesättigte hydrostatische Zustand wird anhand der negativen Saugspannung  $s$ , d. h. des positiven Porenwasserdrucks  $p_w$ , zu Beginn des Tests verdeutlicht. Generell sind die Abweichungen zwischen den Simulationsergebnissen und des experimentell ermittelten Verhaltens bei Vorgabe eines Verdichtungsgrads von  $D_{pr} = 0,95$  am geringsten. Für die zeitlichen Änderungen der Saugspannung  $s$  und des Sättigungsgrads  $S_r$  können geringe Abweichungen identifiziert werden. Das Entwässerungsverhalten wird jedoch qualitativ korrekt abgebildet.

Die Saugspannung sowie die Residualzustände der Sättigung innerhalb der PU-gebundenen Deckschicht werden mit den Simulationen minimal überschätzt. Die experimentellen Ergebnisse zeigen zu Beginn der Entwässerung zudem eine höhere Änderungsrate der beiden Messgrößen. Diese Abweichungen lassen sich durch die Abhängigkeit des Entwässerungsverhalten der Deckschicht von dem der drei unterlagernden Schichten erklären.

Für die beiden Schottertragschichten STS 1 und STS 2 zeigen die experimentell erhobenen Daten sowie die Simulationsergebnisse eine Übereinstimmung mit geringer Abweichung.

In der Frostschutzschicht FSS wird die Saugspannung während der Entwässerungsphase unter- und während der Residualphase durch die Simulation minimal überschätzt. Die in der Simulation errechneten Sättigungsgrade überschätzen das tatsächliche Verhalten. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die gemittelten Modellparameter der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung für die gesamte Frostschutzschicht angesetzt werden, wodurch mögliche einbaubedingte Inhomogenitäten unberücksichtigt bleiben.

Abbildung 6.8 (a) und (b) zeigen die zeitliche Änderung der Saugspannung  $s$  und des Sättigungsgrads  $S_r$  während der Entwässerungsphase aufgetragen über die Höhe  $y$  der mehrschichtigen Straßenkonstruktion. Die an den Entwässerungsschritt anschließende Belastungsphase und hiermit einhergehende Kompression des Porenraumes beeinflusst die sich in der Konstruktion einstellenden Saugspannungs-Sättigungs-Zustände. Dies hat wiederum einen Einfluss auf die in der Straßenkonstruktion herrschenden effektiven Spannungen, der sich anhand der über die Höhe  $y$  aufgetragenen Suction-Stress  $\sigma_s$  verdeutlichen lässt. Die stark durchlässigen Geomaterialien zeigen bei Belastung eine geringe Änderung des effektiven Spannungszustandes mit Werten  $< 1$  kPa. Der größte Einfluss zeigt sich bei einer Sättigungsverteilung, in der sich die Straßenmaterialien in hydraulischen Zuständen nahe dem Wendepunkt der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung befinden.

## 6.4 Fazit

Es wurde ein modularer Versuchsstand entwickelt, der für hydraulische Untersuchungen geschichteter wasserdurchlässiger Straßenaufbauten eingesetzt werden kann. Dieser Versuchsstand wurde zur Untersuchung des Entwässerungsverhaltens einer Straßenkonstruk-

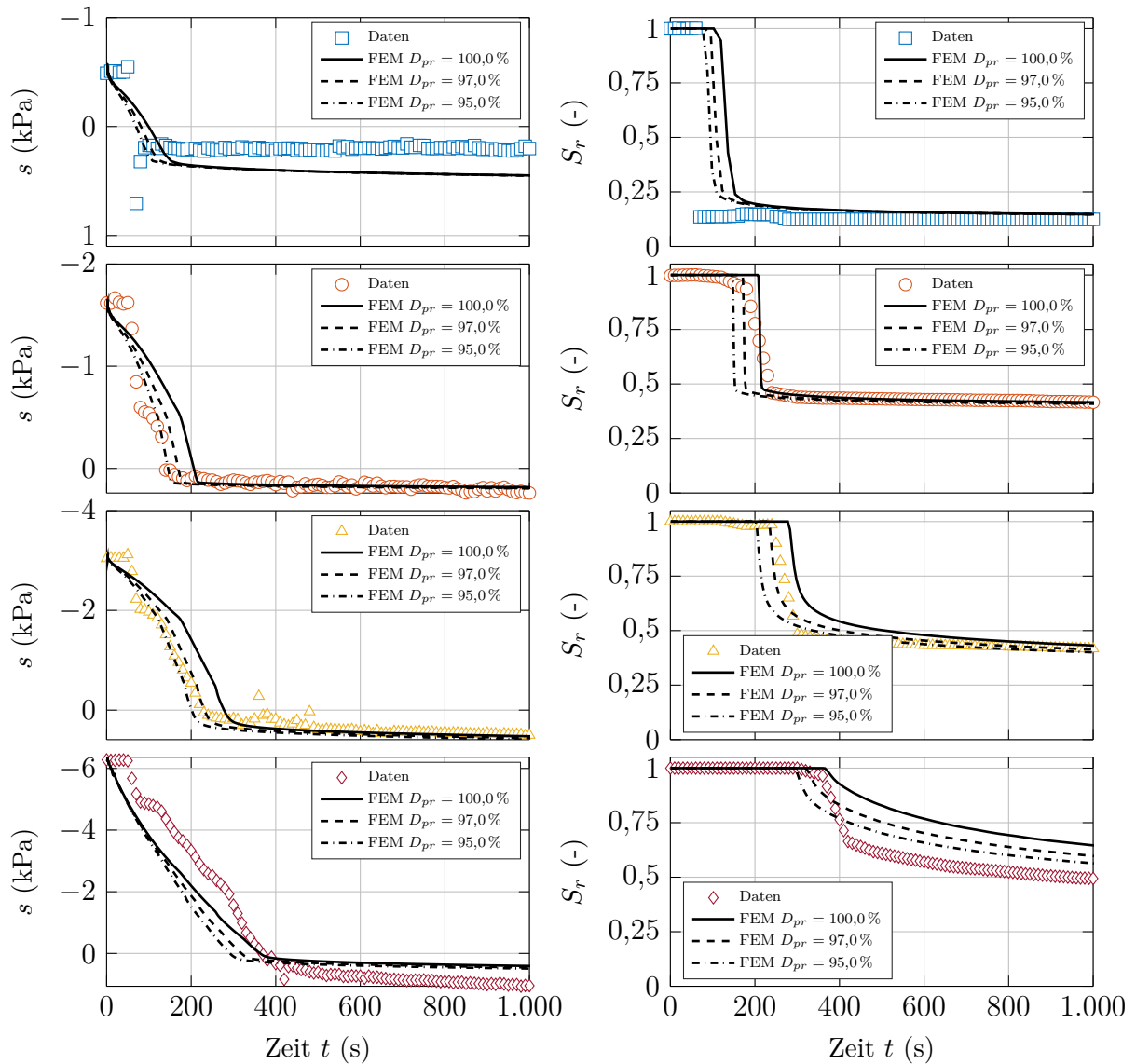


Abbildung 6.7: Ergebnisse der Entwässerungsversuche einer mehrschichtigen versickerungsfähigen Straßenkonstruktion: experimentell erhobene Daten und Simulationsergebnisse.

tion, die mit dem neuartigen Deckschichtmaterial ausgestattet ist, verwendet. Die Funktionsfähigkeit des entwickelten Versuchsaufbaus konnte gezeigt werden.

Aus den experimentell erhobenen Daten wurden die teilgesättigten hydraulischen Eigenschaften, d. h. die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung sowie die Suction-Stress-Characteristic-Curve, der zugehörigen Geomaterialien der einzelnen Straßenschichten abgeleitet. Die abgeleiteten teilgesättigten hydraulischen Kennwerte zeigen geringe Lufttrittspunkte und können mit dem klassischen Modell nach van Genuchten zutreffend beschrieben werden.

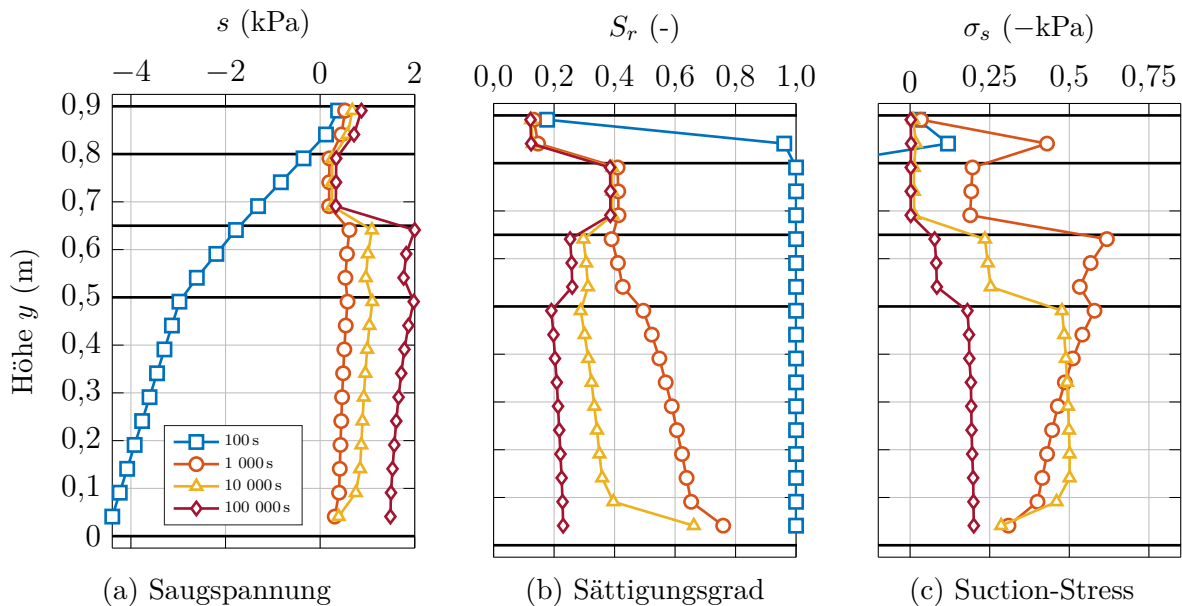


Abbildung 6.8: Zum Zeitpunkt der Lastaufbringung ausgegebene und über die Höhe aufgetragene Profile der (a) Saugspannung  $s$ , des (b) Sättigungsgrads  $S_r$  sowie (c) der Suction-Stress  $\sigma_s$ . Die Legende in (a) gilt für (a), (b) und (c).

Zur numerischen Modellierung des mehrschichtigen Aufbaus wurden Analysen mit Berücksichtigung teilgesättigter Zustände unter Verwendung der Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung durchgeführt. Für den Beobachtungszeitraum wurde eine Übereinstimmung zwischen experimentell erhobenen und numerisch ermitteltem Entwässerungsverhalten festgestellt. Die numerischen Untersuchungen erlauben eine Prognose der auf teilgesättigte Zustände zurückzuführenden Einflüsse auf die effektiven Spannungen in der untersuchten Straßenkonstruktion.

Die Verwendung der neuartigen Straßenkonstruktionen verfolgt u. a. das Ziel, anfallendes Tag- bzw. Niederschlagswasser zügig von Oberflächen zu entfernen und dem anstehenden Boden zuzuführen. Die experimentellen Untersuchungen zeigen ein Entwässerungsverhalten, das für baupraktische Zwecke als positiv zu bewerten ist.

Die numerisch gestützte Prognose des Verformungsverhaltens der teilgesättigten Konstruktion ermöglicht die Quantifizierung des Einflusses der Teilsättigung auf die effektiven Spannungen. Im Vergleich zu üblichen in Straßenkonstruktionen eingebrachte Spannungen lassen sich vernachlässigbar geringe Einflüsse der teilsättigten Zustände auf die effektiven Spannungen identifizieren.

# 7 Zyklische Belastungsversuche einer teilgesättigten Straßenkonstruktion

Im Rahmen des Forschungsprojektes zur hydraulisch-mechanischen Wechselwirkung in wasserdurchlässigen Fahrbahnaufbauten wurde in Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule Aachen eine Versuchsstrecke für Feldversuche hergestellt. Das mit Messtechnik instrumentierte Straßenbauwerk wurde in Anlehnung an die Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12) und das Merkblatt für versickerungsfähige Verkehrsflächen (M VV) kooperativ geplant und hergestellt. Hierbei kam außerdem das neuartige PU-gebundene Deckschichtmaterial zum Einsatz.

An der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule Aachen wurde zur Aufbringung von Verkehrsbelastungen auf der neuartigen Straßenkonstruktion ein mobiler von der Bundesanstalt für Straßenwesen (BaSt) bereitgestellter Belastungssimulator eingesetzt, vgl. Mobile Load Simulator MLS30. Derartige Belastungssimulatoren werden zur Bestimmung des Lastabtrags bzw. zur Identifizierung konstruktiver Schwachstellen in Verkehrsflächenbefestigungen eingesetzt. Diese sog. zeitraffenden Versuchsverfahren werden als Accelerated Pavement Testing (APT) bezeichnet und sind weltweit in Verwendung. Hierbei werden zyklische Radlasten unter kontrollierten Versuchsrandbedingungen in einem komprimierten Zeitraum auf Fahrbahnsysteme aufgebracht. Durch Akkumulation der resultierenden Fahrbahnverformungen und daraus folgenden Schäden können Straßenbeläge hinsichtlich ihrer Leistung, Qualität und Dauerhaftigkeit bewertet werden, vgl. Plessis u. a. (2018), Aguiar-Moya u. a. (2016) und Wacker u. a. (2016).

Die durchgeführten zeitraffenden Belastungsversuche verfolgen zunächst das Ziel, die materialwissenschaftlichen Eigenschaften sowie das Verformungs- und Ermüdungsverhalten der wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion bei Verwendung des neuartigen Deckschichtmaterials unter zyklischer mechanischer Belastung zu untersuchen. Daneben wird untersucht, inwiefern teilgesättigte Initialzustände einen Einfluss auf Sättigungs- und Porenwasserdruckänderungen haben.

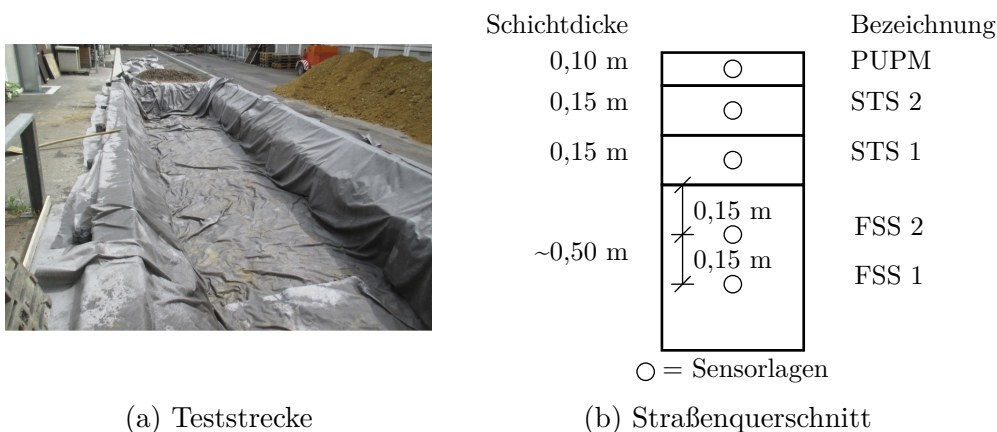
An drei Versuchstagen wurden hierzu zyklisch aufgebrachte Radlasten bei jeweils verschiedenen initialen Saugspannungs-Sättigungs-Zuständen in die Straßenkonstruktion eingetragen. Die Überrollgeschwindigkeit wurde täglich in jeweils drei Laststufen gesteigert, vgl. G. Lu, H. Wang u. a. (2020).

## 7.1 Material, Teststrecke und Instrumentierung

Der Schichtenaufbau der hergestellten Straßenkonstruktion entspricht dem Aufbau, der bereits in den beschriebenen hydraulischen Säulenversuchen verwendet wurde, vgl. Kapitel 6. Die Deckschicht der Fahrbahn wurde mit dem neuartigen PU-gebundenen Deckschichtmaterial PUPM Typ A hergestellt. Der Aufbau wurde durch zwei Schottertragschichten (oben: STS 2, Kornklasse 0/32, unten: STS 1 Kornklasse, 0/32) und eine unterlagernde Frostschutzschicht (FSS, Kornklasse 0/45) vervollständigt.

Die Teststrecke wurde mit einer Länge von  $l = 10,0\text{ m}$  und eine Breite von  $b = 3,0\text{ m}$  konstruiert. Die verbauten Materialien wurden insgesamt mit einer Mächtigkeit von  $t = 0,9\text{ m}$  eingebaut. Um den Wasserpegel und die damit in Verbindung stehenden Saugspannungs-Sättigungs-Zustände in der Konstruktion gezielt einstellen zu können, wurde die trogartige Baugrube vor Baubeginn mit einer wasserdichten Folie abgedichtet, vgl. G. Lu, Törzs u. a. (2020) und G. Lu, H. Wang u. a. (2020).

Die Baugrube sowie eine schematische Darstellung des Straßenquerschnitts sind in Abbildung 7.1 dargestellt. Relevante Materialkennwerte sind in Kapiteln 4 und 6 zusammengefasst.



(a) Teststrecke

(b) Straßenquerschnitt

Abbildung 7.1: (a) Teststrecke vor Herstellung der Straßenkonstruktion. Abbildung entnommen aus G. Lu, Törzs u. a. (2020). (b) Schichtung der untersuchten wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion einschließlich Sensorlagen und Bezeichnungen. Wenn nicht gesondert angegeben, befinden sich die Sensoren in Schichtmitte.

Die verwendeten Sensortypen sind in Abbildung 7.2 (a) und (b) dargestellt. Diese Sensoren wurden jeweils auf jeder Sensorlage, vgl. Abbildung 7.1 (b), installiert. Die verbauten Sensoren wurden an ein Datenerfassungssystem der *Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH* angeschlossen, das mit einer Abtastrate von 600 Hz betrieben wurde, vgl. Abbildung 7.2 (c).

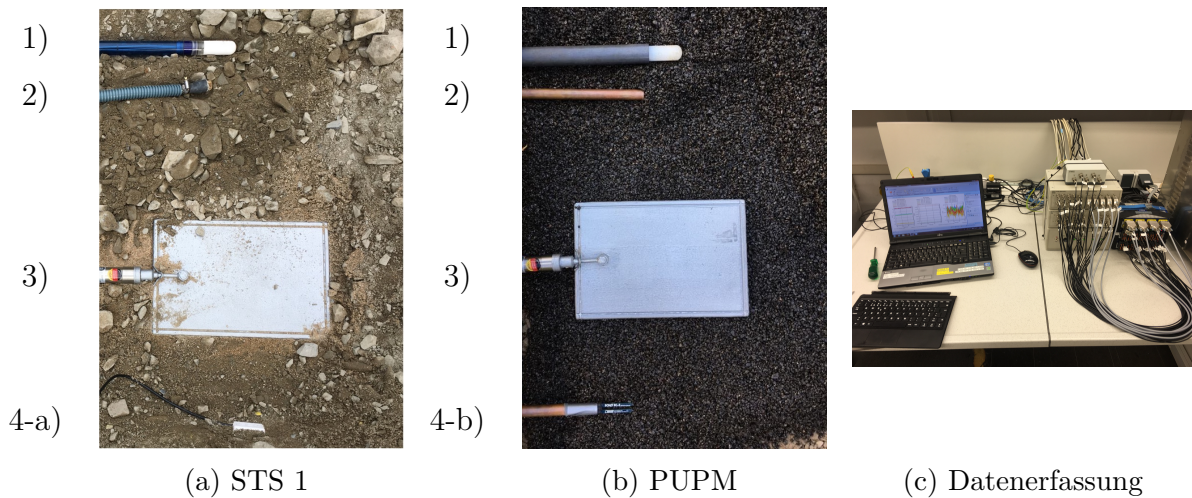


Abbildung 7.2: Instrumentierte (a) Schottertragschicht STS 1 und (b) Deckschicht PUPM. Verbaut wurden Sensoren zur Messung des 1) Porenwasserdrucks, 2) Porenluftdrucks, der 3) vertikalen totalen Spannung und des 4) volumetrischen Wassergehalts. (c) Datenerfassungssystem. (a) und (b) entnommen aus Monteiro (2017), (c) Eigene Aufnahme, 2017.

Messtechnisch erfasst wurden die totale vertikale Spannung  $\sigma_y$ , der Porenwasserdruck  $u_w$ , der Porenluftdruck  $u_a$  und der volumetrische Wassergehalt  $\theta$ . Die Messgrößen und die entsprechenden Sensortypen sind in der folgenden Liste aufgeführt.

- 1) Porenwasserdruck  $u_w$ : T4/T8 Tensiometer der METER Group, Inc. USA.
- 2) Porenluftdruck  $u_a$ : PGM-02KG Luftdruckmessaufnehmer von Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd.
- 3) Totale Spannung  $\sigma$ : EEKE 10/20 K7 A Z4 Erddruckaufnehmer der GLÖTZL Gesellschaft für Baumesstechnik mbH.
- 4-a) Volumetrischer Wassergehalt  $\theta$ : GS1 Wassergehaltssensoren der METER Group, Inc. USA.
- 4-b) Volumetrischer Wassergehalt  $\theta$ : ECH<sub>2</sub>O EC-5 Wassergehaltssensoren der METER Group, Inc. USA.

Zur Überwachung des in der Straßenkonstruktion herrschenden Grundwasserspiegels wurde unmittelbar neben der Konstruktion ein Pumpensumpf installiert. Dieser wurde hydraulisch mit der trogartigen Baugrube verbunden, wobei der sich darin einpegelnde Wasserstand, d. h. der hydrostatische Wasserdruck, über einen Sensor aufgezeichnet wurde.

## 7.2 Mobiler Lastsimulator MLS30

Mit dem Mobile Load Simulator MLS30, dargestellt in Abbildung 7.3, lassen sich Lasten über rollende Räder auf einen geradlinigen Prüfbereich von 3,3 m Länge aufbringen. Innerhalb des MLS30 werden vier Lasträder verwendet, um variabel einstellbare Radlasten von 45 bis 75 kN auf den Prüfbereich aufzubringen. Die Lasträder sind in sog. Drehgestellen (Bogies) montiert, die sich auf Schienen in vertikal-ovaler Richtung bewegen. Hierdurch ist eine realistische Aufbringung der Last in Fahrtrichtung gewährleistet. Der mobile Lastsimulator MLS30 bringt die vier Lasträder nacheinander auf die Straßenoberfläche auf. Die aufgebrachte Last hat eine Reaktion innerhalb der Straßenkonstruktion zur Folge, welche wiederum von den oben genannten Sensoren erfasst und zur weiteren Auswertung gespeichert wird.



(a)



(b)

Abbildung 7.3: (a) Aufgebockter und (b) in Betrieb befindlicher mobiler Lastsimulator MLS30 für zeitraffende Belastungsversuche im Realmaßstab am Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule Aachen. Bildquellen: eigene Aufnahmen, 2018.

## 7.3 Belastungsszenario

Die Belastungsgeschwindigkeit des MLS30 ist zwischen 2 m/s und 6 m/s steuerbar. Bei kontinuierlichem Betrieb entspricht dies 2 000 bzw. 6 000 Belastungen, d. h. Radüberfahrten, pro Stunde.

Für jeden teilgesättigten Initialzustand wurde eine Abfolge von drei Lastphasen mit verschiedener Geschwindigkeit, d. h. 2 m/s, 4 m/s und 6 m/s, aufgebracht. Jede Belastungsgeschwindigkeit wurde für 100 min konstant gehalten. Die Belastungsfrequenz beträgt für 2 m/s 0,55 Hz, für 4 m/s 1,10 Hz und für 6 m/s 1,65 Hz.

Der MLS30 ermöglicht die Regelung der Radlast zwischen 40 kN und 75 kN. Diese wurde während der Belastungsversuche konstant auf 50 kN bei einem Reifendruck von 0,85 MPa

eingestellt, was der Standardeinstellung der Bundesanstalt für Straßenwesen entspricht, vgl. Jansen u. a. (2018).

Der in der Konstruktion vorherrschende initiale Grundwasserspiegel  $GwSp_{init}$  wurde durch Bewässerung der Teststrecke geregelt. Mit dem Ziel, eine große Bandbreite von Anfangsbedingungen zu unteruchen, wurden die Wasserstände am ersten bzw. zweiten Versuchstag innerhalb der Frostschuttschicht angeordnet. Diese pegelten sich auf rd.  $-70$  cm bzw. rd.  $-67$  cm unter der Deckschichtoberkante ein. Für den dritten Versuchstag wurde ein initialer Grundwasserstand innerhalb der Schottertragschichten vorgesehen. Dieser pegelte sich bei rd.  $-26$  cm unter der Deckschichtoberkante ein. Mit jedem initialen Grundwasserspiegel geht eine unterschiedliche Verteilung der hydraulischen Eigenschaften in der Straßenkonstruktion einher.

Je Versuchstag wurden so rd. 20 000 Belastungen auf die teilgesättigte wasserdurchlässige Straßenkonstruktion aufgebracht. Zwischen den Versuchstagen wurde der MLS30 aufgebockt und zu Wartungszwecken sowie zur Begutachtung der Deckschichtbeschaffenheit aus dem Belastungsbereich bewegt. Anschließend konnte am Ende des Versuchstages die Bewässerung für den Folgetag erfolgen.

## 7.4 Ergebnisse der Feldversuche

In Abbildungen 7.4 und 7.5 sind die Ergebnisse eines Versuchstages zusammenfassend dargestellt. Abgebildet sind die zeitlichen Änderungen der vertikalen totalen Spannungen  $\sigma_y$  sowie der Porenwasserdrücke  $u_w$  für jede Schicht in den in Abbildung 7.1 (b) angegebenen Höhenlagen. Der initiale Grundwasserspiegel  $GwSp_{init}$  wurde auf einer Höhe von  $-70$  cm unter Oberkante der PUPM-Deckschicht in der Frostschuttschicht eingestellt. Alle darüber liegenden Schichten wurden durch den Bewässerungsvorgang in einen teilgesättigten Zustand versetzt. Hervorgehoben sind die Übergangszeitspannen zwischen den konstanten Belastungsgeschwindigkeiten, wobei jeweils Betrachtungszeiträume von 60 s dargestellt sind. Der Startzeitpunkt des jeweiligen Betrachtungszeitraums ist mit  $t_0$  unterhalb der entsprechenden Abbildung angegeben.

In Abbildungen 7.4 (a) und 7.5 (a) wird der Anfangszustand ersichtlich. Der Lastsimulator MLS30 ist nicht in Betrieb, die vertikale totale Spannung  $\sigma_y$  liegt bei rd. 0 kPa. Aufgrund der Tarierung der Erddruckaufnehmer wird das Eigengewicht der Straßenkonstruktion sowie die Auflast aus dem MLS30 nicht erfasst.

Abgesehen von dem unteren Bereich der Frostschuttschicht – Höhenlage FSS 1 – liegen die Porenwasserdrücke  $u_w$  im negativen Bereich, d. h. die darüber liegenden Geomaterialien befinden sich in einem teilgesättigten Zustand. In der PUPM-Schicht stellen sich Porenwasserdrücke um rd. 0 kPa ein, was für einen hohen Sättigungsgrad spricht.

Aus den zeitlichen Verläufen lässt sich ableiten, dass eine Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit zu geringeren vertikalen totalen Spannungen in den Schichten führt. Bei Radüberfahrt nehmen die Porenwasserdrücke zunächst tendenziell ab. Bei höheren Radgeschwindigkeiten ist dieser Effekt geringer, d. h. die Betrag der Porenwasserdruckreduktion vor einem heranfahrenden Rad reduziert sich.

Es lässt sich feststellen, dass der initiale Anfangszustand in Bezug auf die Porenwasserdrücke nach der Aufbringung von 20 000 Radüberfahrten nahezu unverändert bleibt, vgl. Abbildung 7.5 (a) und Abbildung 7.5 (d). Ein geringer Zuwachs der Porenwasserdrücke von bis zu rd. 1,0 kPa lässt sich jedoch verzeichnen. Dieses Verhalten lässt sich für alle drei initialen Wasserstände beobachten.

Für eine detailliertere Darstellung der mit einer Radüberfahrt einhergehenden Effekte werden in Abbildung 7.6 die vertikalen totalen Spannungen  $\sigma_y$ , die Porenwasserdrücke  $u_w$  und die Porenluftdrücke  $u_a$  in einem kürzeren Beobachtungszeitraum dargestellt. Dieser wird so gewählt, dass unter Berücksichtigung der Überrollgeschwindigkeit jeweils zwei Radüberfahrten abgebildet werden.

Hierbei wird die beschriebene Abnahme der Porenwasserdrücke  $u_w$  vor einer Radüberfahrt deutlich. Diese Abnahme der Porenwasserdrücke ist darauf zurückzuführen, dass die sich elastisch verhaltende PU-gebundene Deckschicht, vgl. mechanische Eigenschaften in Tabelle 4.3, unmittelbar vor dem sich nähernden Rad eine Hebung erfährt. Insbesondere in den Tragschichten STS 2 und STS 1 kann jedoch zum Zeitpunkt der Überfahrt eine Signalauslenkung des Porenwasserdrucks in Richtung des Porenwasserüberdrucks festgestellt werden. Damit überlagern sich zwei Effekte. Zum einen kommt es zu einer Abnahme der Porenwasserdrücke vor einer Radüberfahrt sowie zur Entwicklung von Porenwasserüberdrücken während einer Radüberfahrt.

Für die hier außerdem dargestellten Porenluftdrücke  $u_a$  konnten Schwankungen in der zu erwartenden Größenordnung registriert werden, vgl. G. Lu, Törzs u. a. (2020). Entgegen der Erwartung, werden in der Deckschicht kaum Änderungen des Porenluftdrucks registriert. Es wird durch die Radüberfahrt demnach kein Luftstrom in die Konstruktion eingetragen und die registrierten Schwankungen müssen aus der Verformung des Korngerüsts resultieren.

In Abbildung 7.6 sind die mit einer Radüberfahrt einhergehenden Reduktionen der Porenwasserdrücke dargestellt. Hierzu werden die Porenwasserdrücke  $u_w$  mit den vertikalen totalen Spannungen  $\sigma_y$  innerhalb der Schottertragschicht STS 2 korreliert. Die Spitzenwerte der bei Radüberfahrt auftretenden vertikalen totalen Spannung werden mit den tendenziell etwas vor dem Raddurchgang auftretenden Spitzenwerten der Porenwasserdrücke verglichen. Die initialen Wasserstände  $GwSp_{init}$  innerhalb der Konstruktion sind angegeben. Mit steigendem Wasserspiegel werden die vertikalen totalen Spannungen für niedrige Radgeschwindigkeiten reduziert. Bei höheren Radgeschwindigkeiten ist das Gegenteil der Fall. Auch bei Anstieg des Wasserspiegels wird die Reduzierung des Porenwasserdrucks vor dem Durchgang bei niedrigeren Geschwindigkeiten tendenziell geringer, bei höheren Radgeschwindigkeiten jedoch höher.

In Abbildung 7.7 sind die in dem Pumpensumpf gemessenen Wasserstände für die drei Versuchstage dargestellt. Mit den aufgebrachtten zyklischen Belastungen gehen Aufsättigungseffekte einher. Hierbei kann für die tiefer liegenden initialen Wasserstände ausgeprägteres Aufsättigungspotenzial beobachtet werden.

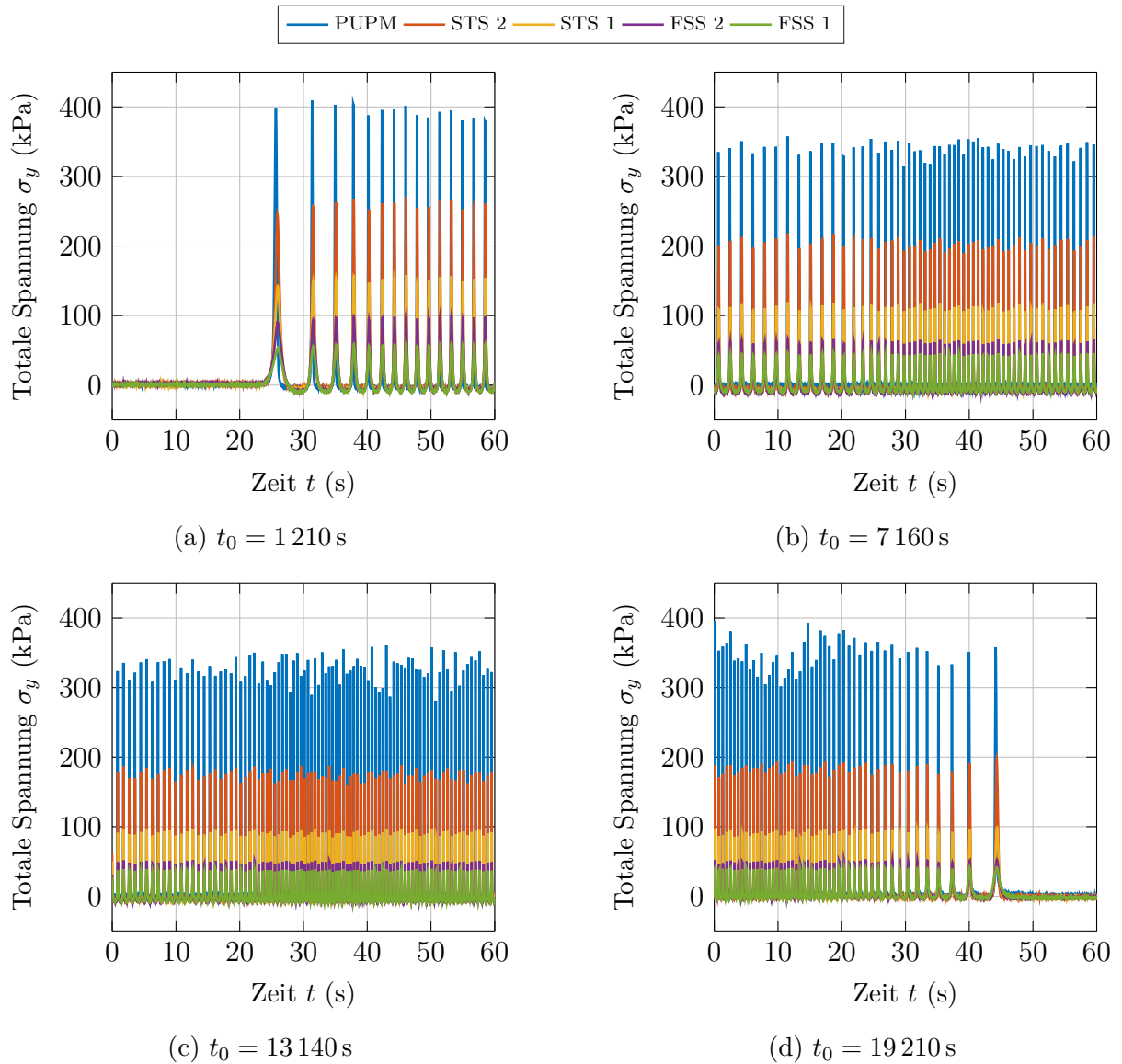


Abbildung 7.4: Verläufe der vertikalen totalen Spannungen  $\sigma_y$  erhoben mit den APT-Versuchen unter Verwendung des Mobilten Lastsimulators MLS30. Start: 0 Hz auf 0,55 Hz, Übergänge: 0,55 Hz auf 1,1 Hz und 1,1 Hz auf 1,65 Hz, Ende: 1,1 Hz auf 0 Hz. Die Startzeitpunkte der Betrachtungszeiträume  $t_0$  sind angegeben.

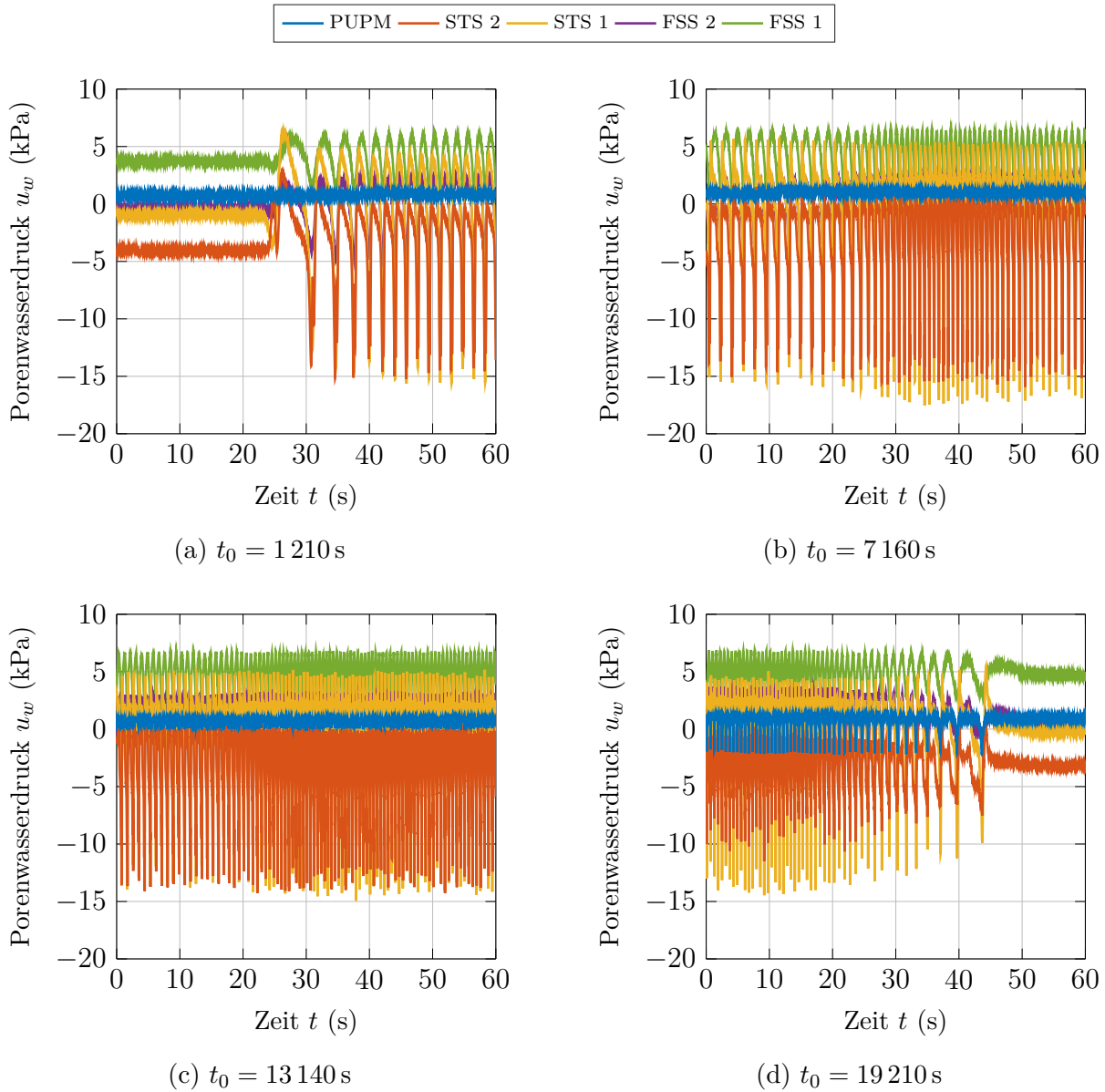


Abbildung 7.5: Verläufe der Porenwasserdrücke  $u_w$  erhoben mit den APT-Versuchen unter Verwendung des Mobilens Lastsimulators MLS30. Start: 0 Hz auf 0,55 Hz, Übergänge: 0,55 Hz auf 1,1 Hz und 1,1 Hz auf 1,65 Hz, Ende: 1,1 Hz auf 0 Hz. Die Startzeitpunkte der Betrachtungszeiträume  $t_0$  sind angegeben.

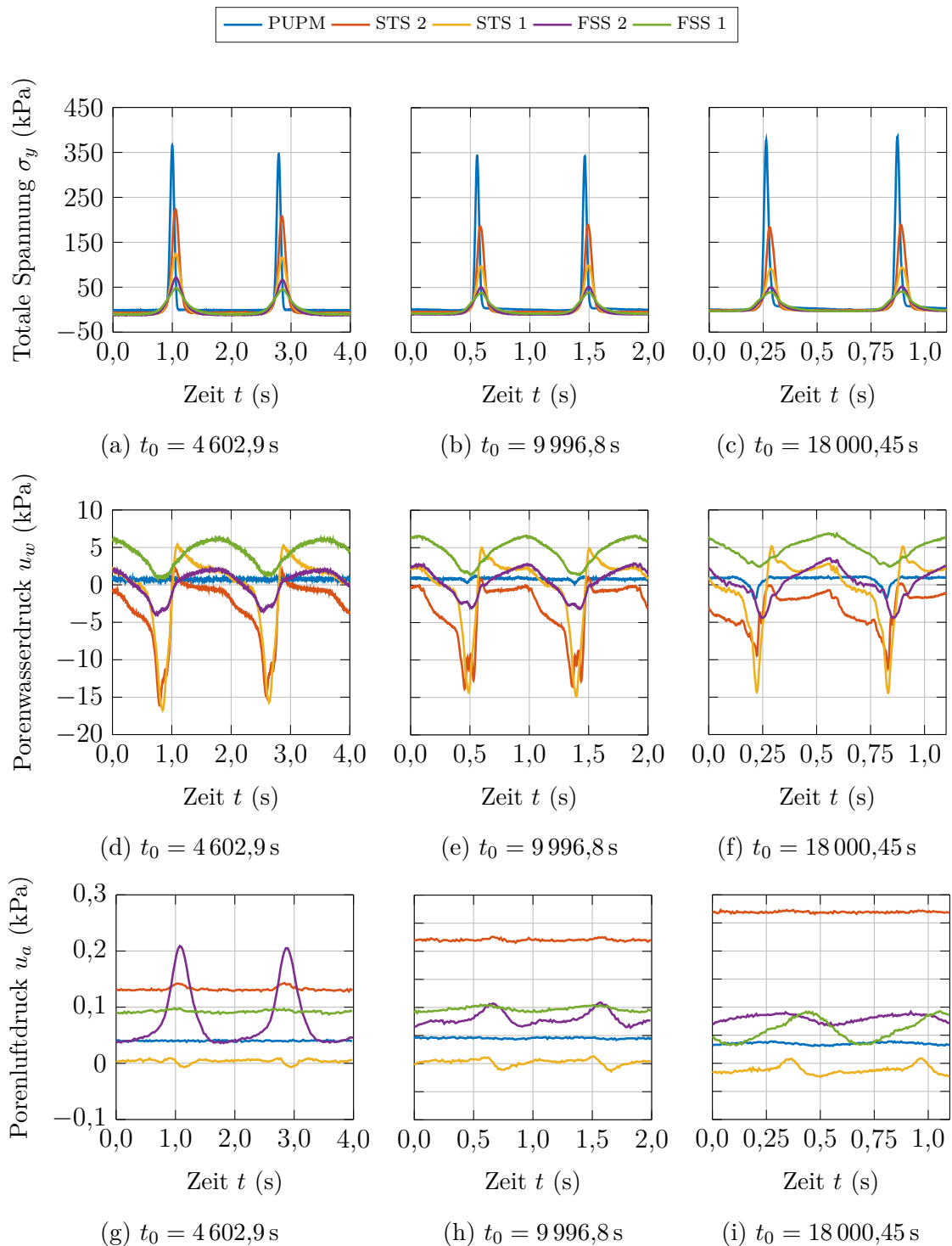


Abbildung 7.6: Verläufe der vertikalen totalen Spannungen  $\sigma_y$  (a)-(c), der Porenwasserdrücke  $u_w$  (d)-(f) sowie der Porenluftdrücke  $u_a$  (g)-(i) für einen initialen Wasserstand von rd.  $\text{GwSp}_{\text{init}} = -70\text{ cm}$  Abhängigkeit der Radgeschwindigkeit. Die Startzeitpunkte der Betrachtungszeiträume  $t_0$  sind angegeben.

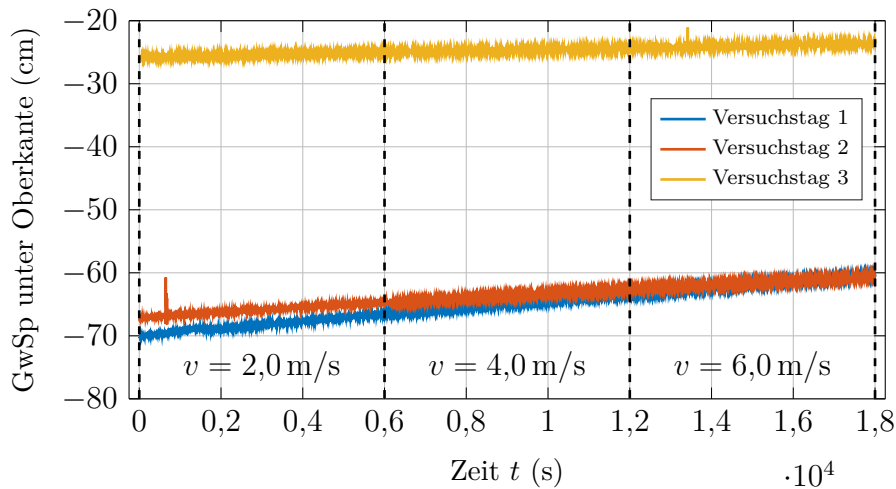


Abbildung 7.7: Änderung der Wasserspiegel innerhalb der Straßenkonstruktion für drei Versuchstage.

## 7.5 Fazit

Der mobile Lastsimulator MLS30 der Bundesanstalt für Straßenwesen konnte auf einer Teststrecke am Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen an der RWTH erfolgreich eingesetzt werden. An drei Versuchstagen wurde das Verformungsverhalten einer teilgesättigten wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion bei Verwendung des neuartigen PU-gebundenen Deckschichtmaterials unter zyklischer Radlast untersucht. Hierbei wurde der initiale Wasserspiegel und die daraus resultierenden hydraulischen Randbedingungen sowie die Belastungsgeschwindigkeit variiert.

Es konnte eine Abhängigkeit der in die Konstruktion eingetragenen vertikalen totalen Spannungen von der Belastungsgeschwindigkeit festgestellt werden. Diese nehmen mit zunehmender Belastungsgeschwindigkeit geringfügig ab.

Vor einem heranfahrenden Rad bilden sich negative Porenwasserdrücke. Diese gehen aus der Hebung der sich elastisch verhaltenden neuartigen Deckschicht hervor. Mit höherer Belastungsgeschwindigkeit wird der Effekt der Porenwasserunterdrücke für die Deckschicht verstärkt und für die unterlagernden Schichten geringer.

Die vertikalen totalen Spannungen sowie die negativen Porenwasserdrücke werden in der die Deckschicht unterlagernden ungebundenen Tragschicht STS 2 maßgeblich durch den initialen Wasserstand innerhalb der Straßenkonstruktion beeinflusst. Hierbei führt ein höherer Sättigungsgrad innerhalb der Schottertragschicht zu höheren totalen Spannungen.

Die gemessenen Porenluftdrücke zeigen für die Deckschicht und die unterlagernden Tragschicht bei Radüberfahrt keine nennenswerten Schwankungen an. Für die Schottertragschicht STS 1 lässt sich ein Drift der Sensordaten verzeichnen, was örtlichen Luftdruckschwankungen oder einer Fehlfunktion des Sensors zuzuschreiben ist. Für die Schottertragschicht STS 2 werden insignifikant geringe Luftdruckschwankungen verzeichnet. Die

Messwerte der unterlagernd anstehenden Frostschutzschicht zeigen bei Radüberfahrt Auslenkungen in plausibler Größenordnungen. Es fällt auf, dass die gemessenen Porenluftdrücke in der Frostschutzschicht in Höhenlage FSS 2 mit der Belastungsgeschwindigkeit abnehmen und in der Höhenlage FSS 1 zunehmen.

Das Aufsättigungspotenzial der Konstruktion zeigt sich in den gemessenen Porenwasserdrücken sowie in den höheren Wasserständen. Bei tieferen initialen Wasserständen innerhalb der Frostschutzschicht kommt es zu höheren Aufsättigungseffekten, als bei einem initialen Wasserstand innerhalb der Schottertragschicht. Dieser Effekt lässt sich durch den höheren Feinkornanteil in der Frostschutzschicht begründen. Derartige Böden weisen höhere kapillare Steighöhen auf, was sich bei Verringerung des Porenraumes stärker bemerkbar macht.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die hydraulischen Randbedingungen eines versickerungsfähigen Straßenquerschnitts den inneren Spannungszustand sowie die hydraulischen Eigenschaften bei zyklischer Belastung signifikant beeinflussen können.

Die beobachteten Aufsättigungseffekte führten nicht zu einem Wasseraustritt an der Deckschichtoberkante, was im Hinblick auf die Verkehrssicherheit der Straßenbaukonstruktion als positiv zu bewerten ist.

Mit den am dritten Versuchstag untersuchten Wasserständen nahe der Deckschichtunterkante gingen bei Belastung die höchsten Porenwasserüberdrücke einher. Die Herstellung der Straßenkonstruktion in einer undrainierten Trogbaugrube hat die Porenwasserüberdruckbildung zudem begünstigt. Dieser Zustand ist als außergewöhnlich zu bezeichnen und baupraktisch sollte auf eine ausreichende Drainagewirkung des Unterbaus geachtet werden.

Zudem sollte bei dem Design wasserdurchlässiger Straßenkonstruktionen berücksichtigt werden, dass mit rapiden Wasserstandsänderungen oder Starkregenereignissen Änderungen der hydraulischen Zustände einhergehen. Diese können wiederum auf hydraulisch-mechanische Zustände führen, die die Tragfähigkeit der Konstruktion beeinträchtigen.

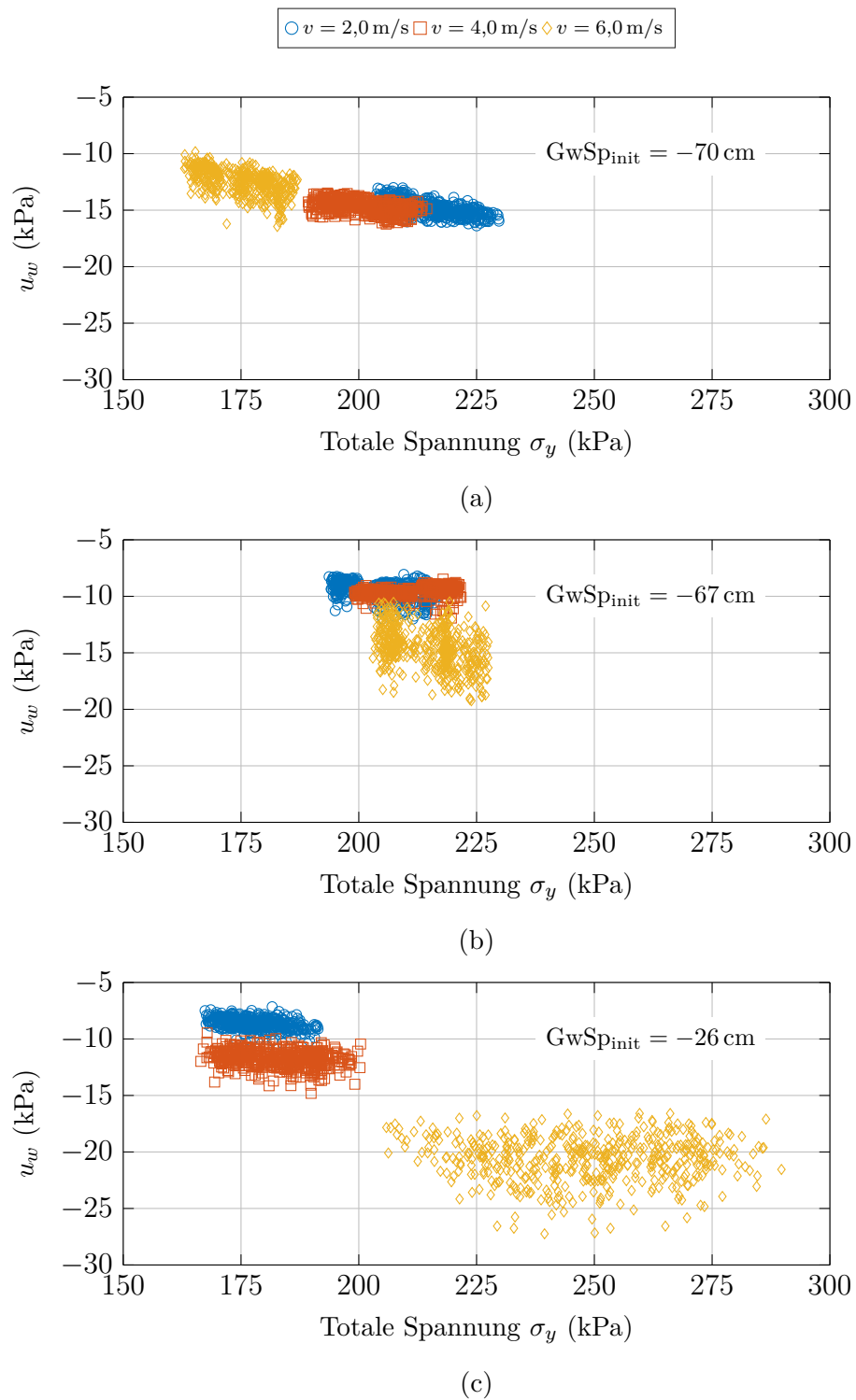


Abbildung 7.8: Spitzenwerte der Verringerung des Porenwasserdrucks  $u_w$  gegenüber den entsprechenden Spitzenwerten der vertikalen totalen Spannung  $\sigma_y$  in der Schottertragschicht STS 2 bei Radüberfahrt in Abhängigkeit des initialen Wasserstandes  $GwSp_{init}$ .

# 8 Simulation von Radüberfahrten teilgesättigter Straßenunterbauten

Die zweidimensionale Spannungsausbreitung in einem teilgesättigten wasserdurchlässigen Straßenbauwerk konnte in den Feldversuchen nicht ausreichend untersucht werden. Hierbei wurde lediglich der Oberbau des Straßenbauwerks, bestehend aus der PU-gebundenen Deckschicht PUPM sowie unterlagernden Schottertragschichten und Frostschuttschicht, verbaut.

Mit den Simulationen von Radüberfahrten teilgesättigter Straßenunterbauten wird das Ziel verfolgt, das Verformungsverhalten bei verschiedenen Lastszenarien zu prognostizieren und Einblicke in die zweidimensionale Spannungsausbreitung zu ermöglichen. Dies gibt Aufschluss über die aus der Belastung resultierenden gekoppelten hydraulisch-mechanischen Wechselwirkungen in teilgesättigten Unterbaumaterialien. Weiterhin wird hierbei der Einfluss der hydraulischen Hysterese der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung auf die Wechselwirkung untersucht.

Daneben wird die Funktionalität des um die hydraulische Hysterese der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung erweiterten benutzerdefinierten finiten Elementtyps in einem Anwendungsbeispiel mit komplexen Belastungsszenarien demonstriert. Die gewählte Methode zielt auf die Modellierung von zeitabhängigen begrenzten Flächenlasten auf einem zweidimensionalen teilgesättigten Sandunterbau mit realistischen Lasten ab. Hierbei werden zwei Sandarten mit unterschiedlichen Materialparametern – Hamburger Sand und ISS-0 Sand – untersucht.

Es werden Verformungsprognosen mit bzw. ohne Verwendung der hydraulischen Hysterese im Rahmen des Kapillardruck-Sättigungs-Modells durchgeführt. Hieraus wird abgeleitet, welchen Einfluss die Wahl des Kapillardruck-Sättigungs-Modells im Rahmen der hier durchgeführten numerischen Untersuchungen hat.

## 8.1 Belastungsszenarien

Mithilfe verschiedener Belastungsszenarien wird das zweidimensionale Verformungsverhalten teilgesättigter Unterbaumaterialien bei Radüberfahrt untersucht. Hierzu werden Variationen ausgewählter Parameter und Randbedingungen durchgeführt, um Auswirkungen der Verwendung des implementierten hydraulischen Hysterese Modells zu identifizieren. Zu variierende Parameter sind neben der Art des Sands mitsamt den zugehörigen mechanischen und hydraulischen Materialkennwerten die aufgebrachte Spitzenlast  $a_L$  und die Höhenlage des initialen Wasserspiegels  $GwSp_{init}$ . In weiteren Simulationen wird die Über-

fahrgeschwindigkeit  $v_L$  der aufgetragenen Flächenlast sowie die Anzahl der Lastzyklen variiert. Die vorgegebenen Bodenarten, Randbedingungen sowie der Modellierungsansatz – HM oder NHM – des hydraulischen Modells sind in Tabelle 8.1 zusammengefasst. Hierbei stehen HM für *hysteretic model*, d. h. mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese und NHM für *non hysteretic model*, d. h. ohne Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese. Für den Fall NHM wird der Entwässerungspfad der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung stellvertretend für Be- und für Entwässerung angesetzt. Scanning bzw. ein Wechsel der Hauptkurven bei Vorzeichenwechsel der Saugspannungsänderung bleiben bei diesem Modellierungsansatz somit unberücksichtigt.

Tabelle 8.1: Variationssimulationen der Radüberfahrt auf teilgesättigten Unterbaumaterialien.

Boden	Spitzenlast $a_L$ (kPa)	Wasserspiegel GwSp <sub>init</sub> (m u. Oberkante)	Geschwindigkeit $v_L$ (m/s)	Last- zyklen	HM/NHM
HH	50,0/100,0/150,0	0,5	1,0	1	HM
ISS-0	75,0	1,0/0,75/0,5	1,0	1	HM
ISS-0	75,0	0,75	1,0/5,0/25,0	1	HM
ISS-0	75,0	0,75	1,0	5	HM
ISS-0	75,0	0,75	1,0	5	NHM

## 8.2 Numerische Modellbildung und Materialkennwerte

Nachstehend werden die Geometrie, die örtliche und zeitliche Diskretisierung, die Anfangs- und Randbedingungen, die Umsetzung der Lastaufbringung sowie die zugrunde liegenden Materialkennwerte aufgezeigt.

### 8.2.1 Numerisches Modell

Zur numerischen Lösung der vorgestellten Variationssimulationen wird, wie bereits in den vorangegangenen Kapiteln 5.6 und 6, auf die in Abaqus/Standard implementierte Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung zurückgegriffen.

In Anlehnung an die an der RWTH durchgeführten Feldversuche wird ein zweidimensionales Gebiet (ebene Dehnung) mit den Abmessungen  $b \times h = 8,0 \text{ m} \times 3,0 \text{ m}$  untersucht, vgl. Abbildung 8.1. Die rechteckige Geometrie wird in 9 600 benutzerdefinierte Elemente des Typs UEL U8P8 – volle Integration mit neun Integrationspunkten – diskretisiert. Da bei Überfahrten Scherspannungen entstehen und um unrealistisch steifem Verformungsverhalten entgegenzuwirken, werden viereckige isoparametrische Elemente mit biquadratischen Ansatzfunktionen für die Verschiebungen und Porenfluiddrücke gewählt, vgl. Bathe (2014). Mit 29 241 FE-Knoten weist das Modell insgesamt 116 964 Freiheitsgrade für die Verschiebungen und Porenfluiddrücke auf.

Mittig in dem in Abbildung 8.1 dargestellten FE-Modell ist eine vertikale Analyselinie hervorgehoben. Ausgewählte auf dieser Linie liegende FE-Knoten sowie  $5,64 \times 10^{-2}$  m rechts daneben liegende Integrationspunkte werden für die Auswertung der zeitlichen Verläufe der Feldgrößen, d. h. der Verschiebungen und der Porenfluiddrücke, herangezogen.

Die seitlichen Modellränder sind in horizontaler Richtung und der untere Rand in vertikaler Richtung unverschieblich. Die Unterkante und die Seitenränder des Modells werden wasserundurchlässig angesetzt. Die Modellunterkante kann hierbei, ähnlich wie die Trogbaugrube der realen Versuchsstrecke, als undurchlässige natürlich anstehende bindige Bodenschicht interpretiert werden.

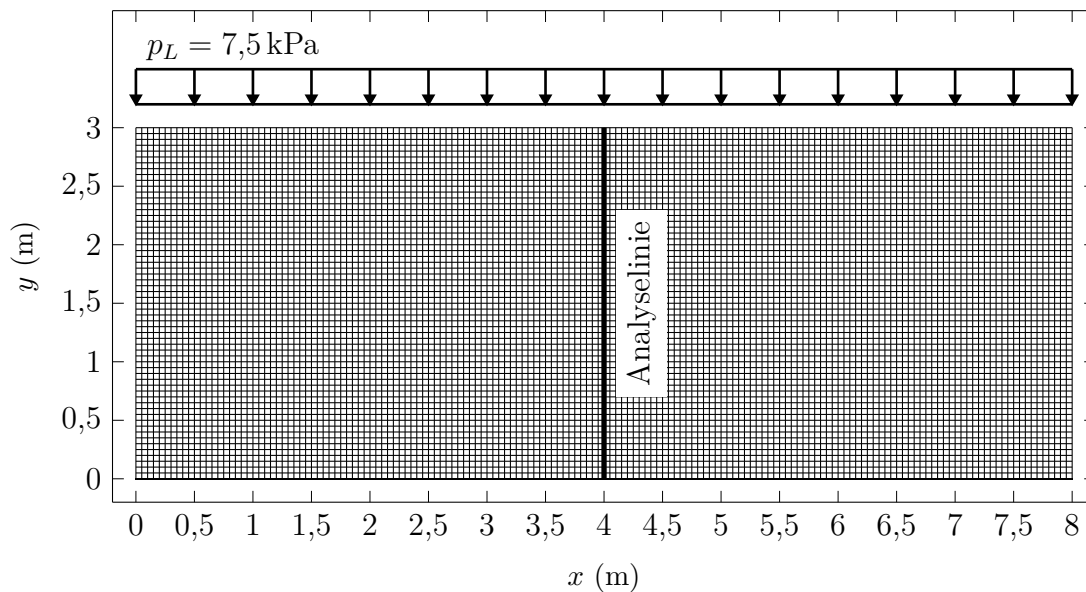


Abbildung 8.1: Geometrie, Diskretisierung und Auflast  $p_L$  zur Simulation von Radüberfahrten.

### 8.2.2 Simulation

Die Anfangsbedingungen sehen einen vollständig wassergesättigten Zustand vor. Mit einer Modellhöhe von  $h = 3,0$  m entspricht das einem hydrostatischen Porenwasserdruck von  $p_w = \rho_w g h = 1\,000,0 \text{ kg/m}^3 \times 9,806 \text{ m/s}^2 \times 3,0 \text{ m} = 29,418 \text{ kPa}$ . Anschließend wird der Soll-Wasserspiegel über die Vorgabe einer zeitlich veränderlichen Porenwasserdruckrandbedingung an der Modellunterkante eingestellt. In Abbildung 8.2 (a) ist eine beispielhafte Absenkung des Wasserspiegels von  $0,5$  m unter Modelloberkante dargestellt. Hierzu wird die in Gleichung 5.32 in Abschnitt 5.6 vorgestellte abschnittsweise definierte Funktion verwendet, vgl. Dassault Systèmes (2019). Die benutzerdefinierten Konstanten werden hier mit  $t_0 = 0,0 \text{ s}$ ,  $t_1 = 8,0 \text{ s}$ ,  $A_0 = 29,418 \text{ kPa}$ ,  $A_1 = 24,515 \text{ kPa}$  angesetzt.

Zur Vorwegnahme von Verformungen, die aus einer Erstbelastung hervorgehen, wird nach dem hydraulischen statischen Berechnungsschritt eine mechanische Vertikalspannung  $\sigma_y$  über eine periodische Amplitudenfunktion entsprechend Gleichung 5.33 in Abschnitt 5.6

bei einer Simulationsschrittzeit von  $t_{\text{step}} = 30,0 \text{ s}$  aufgebracht, vgl. Abbildung 8.2 (b). Die gesamte Modelloberkante wird entsprechend be- und anschließend wieder entlastet. Hierbei sind die benutzerdefinierten Konstanten  $t_0 = 0,0 \text{ s}$ ,  $A_0 = a_L/2 = 50,0 \text{ kPa}$ ,  $A_1 = -a_L/2 = -50,0 \text{ kPa}$  sowie  $\omega = 12,0^\circ/\text{s}$ . Die Spitzenlast beträgt hier beispielhaft  $a_L = 100 \text{ kPa}$ .

Die in Abbildung 8.1 dargestellte Zusatzlast von  $p_L = 7,5 \text{ kPa}$  entspricht überschlägig der Überlagerungsspannung eines Straßenoberbaus. Diese Zusatzlast ist während jedem Simulationsschritt aktiviert.

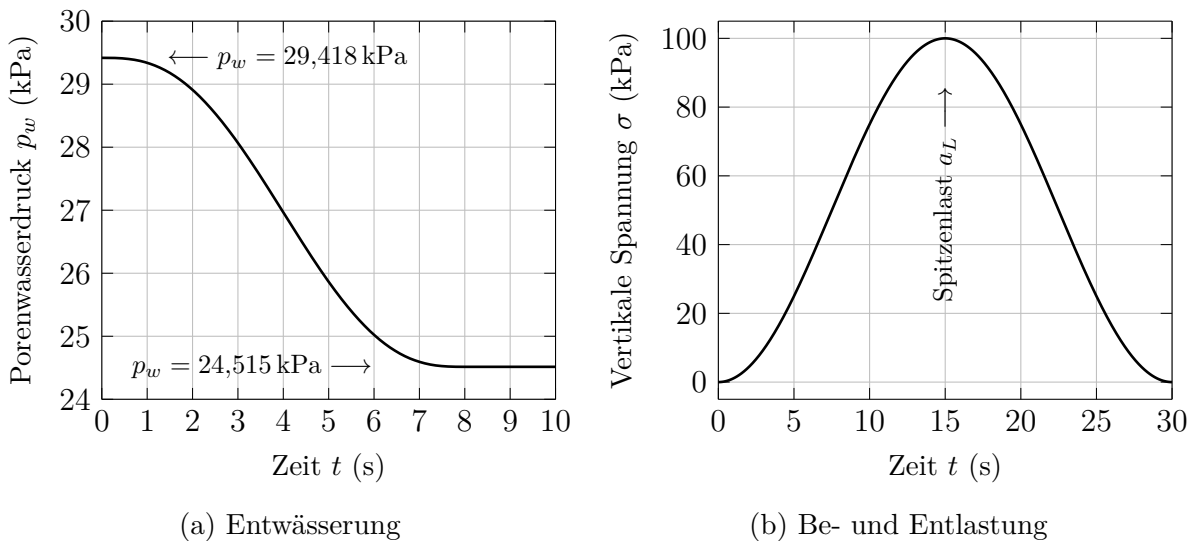
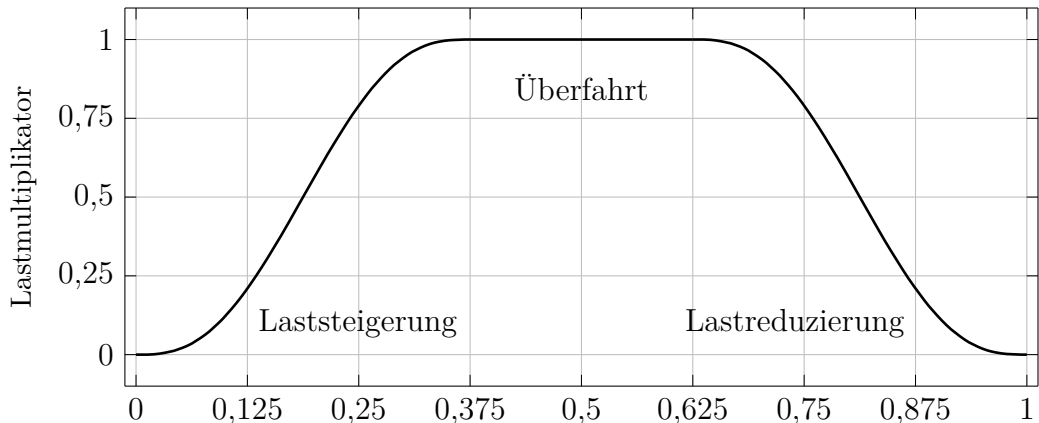


Abbildung 8.2: (a) An der Modellunterkante angesetzte Änderung des Porenwasserdrucks zur Modellierung der statischen Entwässerung – hier dargestellt für den Fall einer Absenkung des Wasserspiegels von  $0,0 \text{ m}$  auf  $0,5 \text{ m}$  unter Modelloberkante. (b) An der Modelloberkante aufgebrachte vertikale Spannung zur Modellierung einer initialen statischen Be- und Entlastung – hier dargestellt für den Fall einer Spitzenlast  $a_L = 100 \text{ kPa}$ .

Nach Herstellung des hydraulischen Anfangszustandes sowie der initialen Be- und Entlastung folgen die Simulationen der Radüberfahrten gemäß Tabelle 8.1. Zur Aktivierung der Flächenlast wird im Zuge des Berechnungsschrittes der Lastüberfahrt ein Lastmultiplikator angesetzt, um numerischen Instabilitäten an den Modellrändern vorzubeugen. Dieser aktiviert die volle Flächenlast in einem definierten Bereich in der Modellmitte. Am linken und rechten Modellrand wird die Belastung auf  $0 \text{ kPa}$  reduziert, vgl. Abbildung 8.3. Zur Laststeigerung bzw. Lastreduzierung wird erneut eine abschnittsweise definierte Funktion verwendet, vgl. Gleichung 5.32 in Abschnitt 5.6 sowie Dassault Systèmes (2019).

Die Lastaufbringung, d. h. die Simulation der Radüberfahrt/en, erfolgt über den Ansatz der in Kapitel 5.7 vorgestellten glockenförmigen Funktion. Die Spitzenlasten  $a_L$  werden in den jeweiligen Simulationen entsprechend Tabelle 8.1 angesetzt. In Abbildung 8.4 sind die Glockenfunktionen gemäß Gleichung 5.34 für ausgewählte Spitzenlasten  $a_L$  dargestellt. Die benutzerdefinierten Konstanten sind hierbei  $b(t) = vt \text{ (m)}$  und  $c = 0,22 \text{ (-)}$ . Zur Verdeutlichung der Größenordnung der gewählten Lasten sind außerdem die im Rahmen der Überfahrversuche ermittelten Verläufe der totalen Vertikalspannungen unterhalb der



Auf die Gesamtzeit des Berechnungsschrittes normierte Zeit  $t^* = \frac{t-t_0}{t_1-t_0}$  (-)

Abbildung 8.3: Lastmultiplikator zur Aktivierung der Flächenlast.

Schottertragschichten für drei Überfahrgeschwindigkeiten  $v_L$  aufgetragen. Die zugrunde liegenden Daten basieren auf den Ergebnissen des ersten Versuchstags der APT-Versuche bei einem initialen Grundwasserspiegel von  $GwSp_{init} = -70$  cm unter der Deckschichtoberkante, vgl. Kapitel 7.

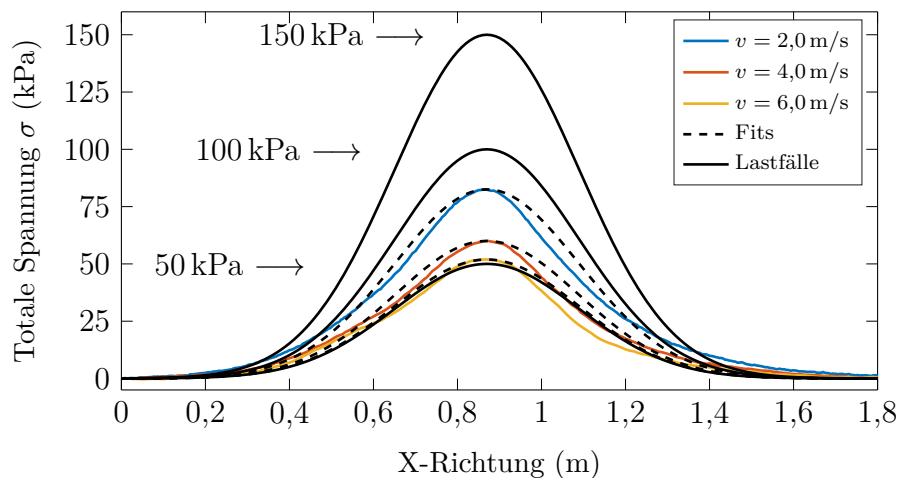


Abbildung 8.4: Bei verschiedener Überrollgeschwindigkeit unter den Schottertragschichten gemessene sowie mit der Dichtefunktion der Normalverteilung angepasste totale Spannungsverläufe. Zusätzlich sind drei Lastfälle dargestellt.

### 8.2.3 Modellparameter

Das Verformungsverhalten des Korngerüsts des Hamburger Sands sowie des ISS-0 Sands wird mit dem hypoplastischen Stoffmodell nach von Wolffersdorff (1996) mit Erweiterungen nach Niemunis und Herle (1997) abgebildet. Zugehörige Stoffparameter sowie die Validierungen gegen Ergebnisse aus Laborversuchen sind in Anhang B zusammengefasst.

Für das hydraulische Verhalten wird das in Kapitel 5.2.1.2 vorgestellte Kapillardruck-Sättigungs-Modell mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese verwendet. Die für die beiden Modellböden angesetzten hydraulischen Parametersätze können der Tabelle 5.1 in Kapitel 5.4 entnommen werden. Für Hamburger Sand bzw. für ISS-0 Sand werden die Modellparameter entsprechend einer mitteldichten Lagerung mit Porenanteilen von  $n = 0,394$  bzw.  $n = 0,492$  zugrunde gelegt.

Für die Modellierung der Durchlässigkeiten der Porenfluide im teilgesättigten Zustand  $k_{r,w}$  und  $k_{r,a}$  wird der in Kapitel 5.2.2 in Gleichungen 5.26 und 5.27 vorgestellte auf dem Konzept der Referenzkurven basierende Ansatz verwendet. Für Hamburger Sand sowie für ISS-0 Sand werden folgende Modellparameter angesetzt:  $\lambda_{0,w,a} = 2,0$ ,  $\lambda_{1,w,a} = 0,001$ ,  $\alpha_{w,a} = 0,01$  sowie  $\beta_{w,a} = 10,0$ .

### 8.3 Ergebnisse

Im Folgenden sind die Ergebnisse der in Tabelle 8.1 genannten Belastungsszenarien zusammengefasst. Die neben der in Abbildung 8.1 dargestellten Analyselinie liegenden Koordinaten der Integrationspunkte, die zur Auswertung der Simulationen herangezogen werden, sind in Tabelle 8.2 aufgelistet. Für Hamburger Sand und ISS-0 Sand werden verschiedene Höhenlagen gewählt, da sich die hydraulischen Materialeigenschaften und sich damit auch die initiale Kapillardruck-Sättigungs-Verteilung über die Modellhöhe unterscheidet.

Tabelle 8.2: Zur Auswertung der Simulationsreihen an Hamburger Sand sowie ISS-0 Sand verwendete Koordinaten  $x$  und  $y$  ausgewählter Integrationspunkte (IP) und Elemente (E).

Hamburger Sand				ISS-0 Sand			
E	IP	$x$ (m)	$y$ (m)	E	IP	$x$ (m)	$y$ (m)
		Modellunterkante				Modellunterkante	
9681	1	4,00564	0,00564	9681	1	4,00564	0,00564
16081	1	4,00564	2,00564	12881	1	4,00564	1,00564
17681	1	4,00564	2,50564	16081	1	4,00564	2,00564
17841	1	4,00564	2,55563	16401	1	4,00564	2,10563
17841	4	4,00564	2,57500	16721	1	4,00564	2,20564
17841	7	4,00564	2,59436	17041	1	4,00564	2,30563
18001	1	4,00564	2,60563	17361	1	4,00564	2,40564
18001	4	4,00564	2,62500	17681	1	4,00564	2,50564
18001	7	4,00564	2,64437	18001	1	4,00564	2,60563
18161	1	4,00564	2,65564	18321	1	4,00564	2,70564
18161	4	4,00564	2,67500	18641	1	4,00564	2,80563
18161	7	4,00564	2,69437	18961	1	4,00564	2,90564
19121	7	4,00564	2,99436	19121	7	4,00564	2,99436
		Modelloberkante				Modelloberkante	
		3,00000				3,00000	

## 8.3.1 Hamburger Sand

### 8.3.1.1 Variation der Spitzenlast

Es werden Belastungssimulationen mit variabler Spitzenlast durchgeführt. Die Änderungen der vertikalen effektiven Spannungen  $\sigma'$  sind in Abbildung 8.5, die Änderungen der Porenwasserdrücke  $u_w$  bei einer Überfahrt sind in Abbildung 8.6 dargestellt. Die variable Spitzenlast  $a_L$  wird entsprechend Abbildung 8.4 bzw. Tabelle 8.1 mit 50,0 kPa, 100,0 kPa bzw. 150,0 kPa angesetzt. Somit werden verschiedene Spannungszustände inklusive der in den Belastungsversuchen gemessenen sowie darüber hinaus zu erwartende Zustände abgedeckt.

Wie bei höheren Lasten zu erwarten, erhöht sich bei Überfahrt der effektive Spannungszustand, vgl. Abbildung 8.5 (a)-(i). Zusätzlich kommt es zu einer Ausbildung von Porenwasserüberdrücken unmittelbar unterhalb der aufgebrachten Flächenlast, vgl. Abbildung 8.6 (a)-(i). Höhere Vertikalspannungen und die damit einhergehende Verformung, d. h. Verringerung des Porenraumes, resultieren hier in höheren Porenwasserüberdrücken.

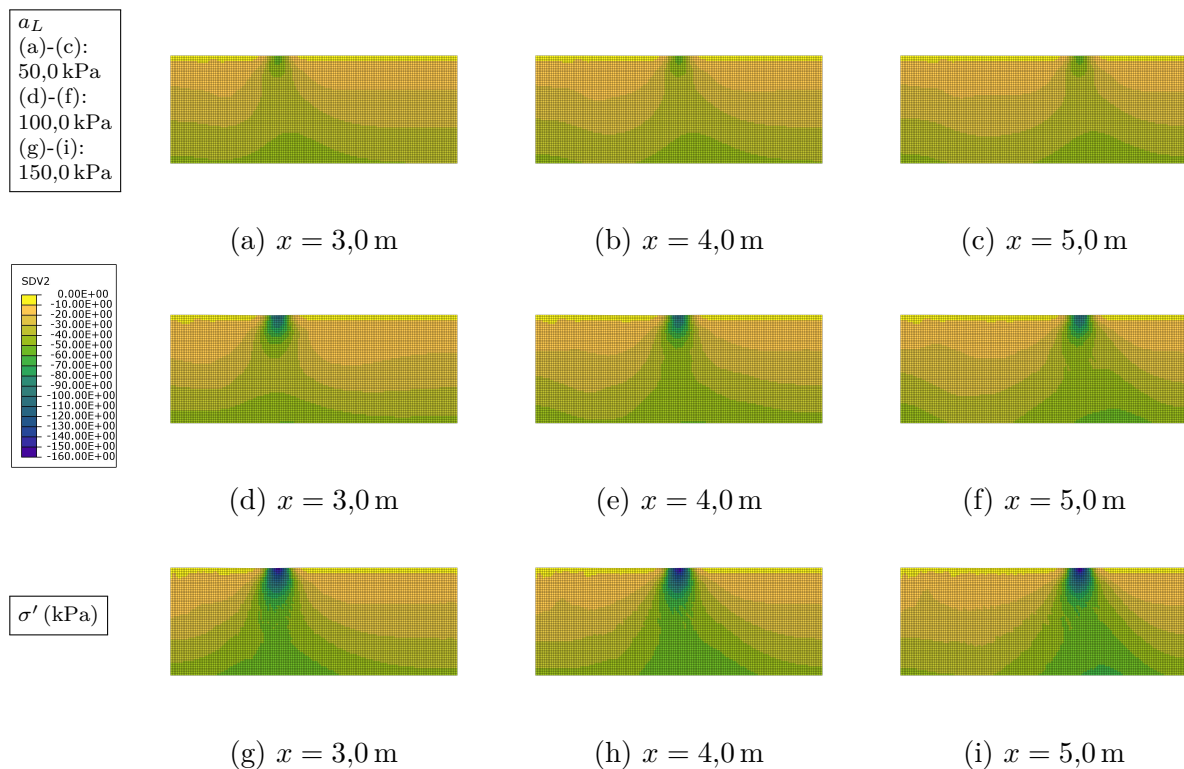


Abbildung 8.5: (a)-(i) Änderung der effektiven Spannungsverteilung  $\sigma'$  bei Radüberfahrt bei Variation der Auflastspannung  $a_L$  im Hamburger Sand.

Mit der Überfahrt gehen Setzungen der Modelloberkante einher, vgl. Abbildung 8.7 (a). Diese sind zum Teil reversibel, zum Teil irreversibel, was maßgeblich mit den initialen Lagerungsdichte zusammenhängt. Außerdem kommt es unmittelbar vor der Radüberfahrt zu Hebungen, wobei dieser Effekt sich für höhere Verdichtungsgrade aufgrund des dilatanten Materialverhaltens verstärkt, vgl. Anhang B. Höhere initiale Verdichtungsgrade resultie-

ren aus der initialen Kompression mit der jeweiligen Spitzenlast  $a_L$ , vgl. Kapitel 8.2.2. Die Verkleinerung des dem Porenwasser zur Verfügung stehenden Porenraumes resultiert lokal in einem Anstieg des Sättigungsgrads  $S_r$ . Es kommt zu Aufsättigung. Dieser Effekt ist in Abbildung 8.7 (b) in Form der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung dargestellt. Die Bereiche höherer kapillarer Aktivität, in denen es zu Aufsättigungseffekten kommt, lassen sich innerhalb des Kapillarsaums auf Höhen zwischen rd. 0,35 m und rd. 0,45 m unter Modelloberkante identifizieren.

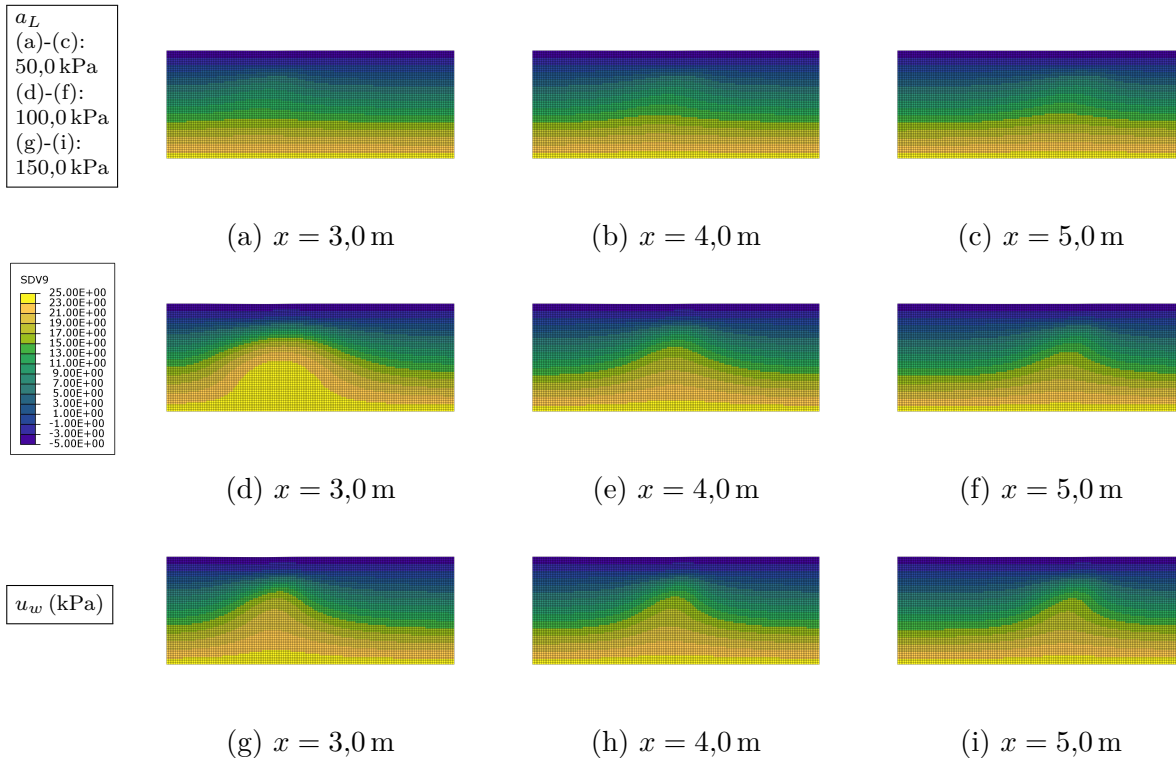


Abbildung 8.6: (a)-(i) Änderung des Porenwasserdrucks  $u_w$  bei Radüberfahrt bei Variation der Auflastspannung  $a_L$  im Hamburger Sand.

### 8.3.2 ISS-0 Sand

Das hydraulische sowie das mechanische Verhalten des ISS-0 Sands unterscheidet sich von dem des Hamburger Sands, vgl. Kapitel 4. Die größere kapillare Steighöhe versetzt einen mächtigeren Bodenbereich in einen teilgesättigten Zustand. Die teilgesättigte Zone des ISS-0 Sands wird im Rahmen umfangreicher Variationsberechnungen im Folgenden untersucht.

#### 8.3.2.1 Variation des Wasserspiegels

Zunächst wird der Einfluss des in dem teilgesättigten Sands vor Radüberfahrt herrschende  $s$ - $S_r$ -Zustand auf das Verformungsverhalten bei konstanter Spitzenlast und Überfahrge-

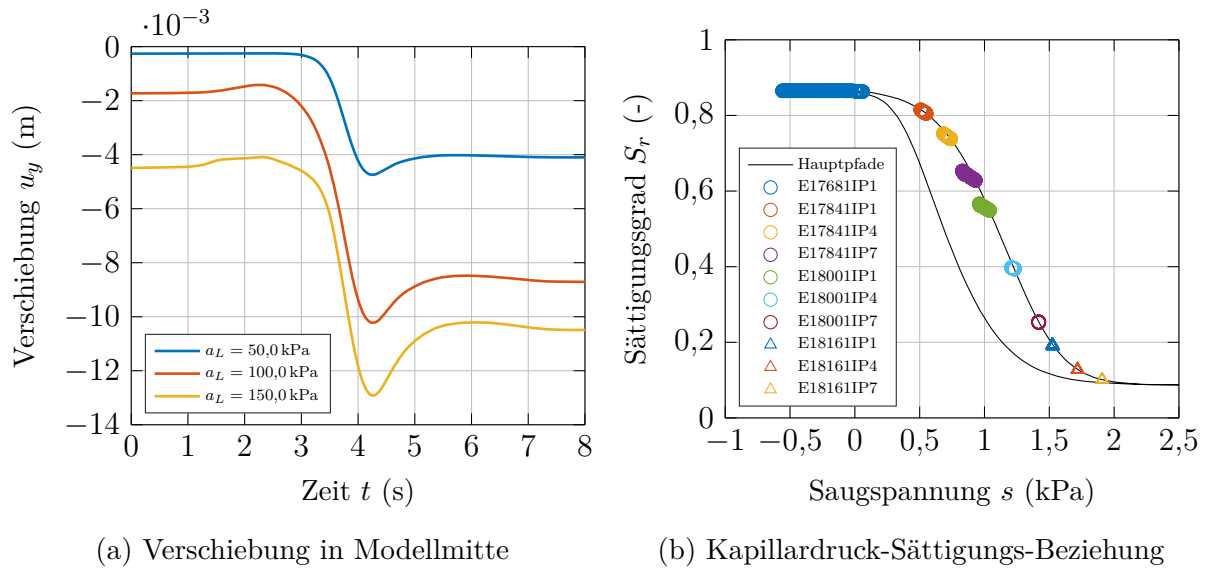


Abbildung 8.7: (a) Vertikale Verschiebung bei Radüberfahrt  $u_y$  (m) in Modellmitte bei  $x = 4,0$  m. (b) Aus der Überfahrt resultierende Änderung des  $s$ - $S_r$ -Zustandes in Form der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung.

schwindigkeit untersucht. Entsprechend Tabelle 8.1 werden drei verschiedene initiale Wasserstände  $GwSp_{init}$  untersucht, die vor der Überfahrt durch eine Porenwasserdruckrandbedingung an der Modellunterkante in einem statischen Entwässerungsschritt eingestellt werden, vgl. Abbildung 8.2 (a). Die vor der Modellierung einer Radüberfahrt herrschenden initialen Verteilungen des Sättigungsgrads sind in Abbildung 8.8 (a)-(c) dargestellt. Der Wasserstand wird zwischen 1,0 m und 0,5 m unter Modelloberkante variiert. Zur Beurteilung des Einflusses auf die Verformung sowie des hydraulischen Verhaltens werden die vertikalen Verformungen in Modellmitte sowie die Änderungen des  $s$ - $S_r$ -Zustands, d. h. die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung, verglichen.

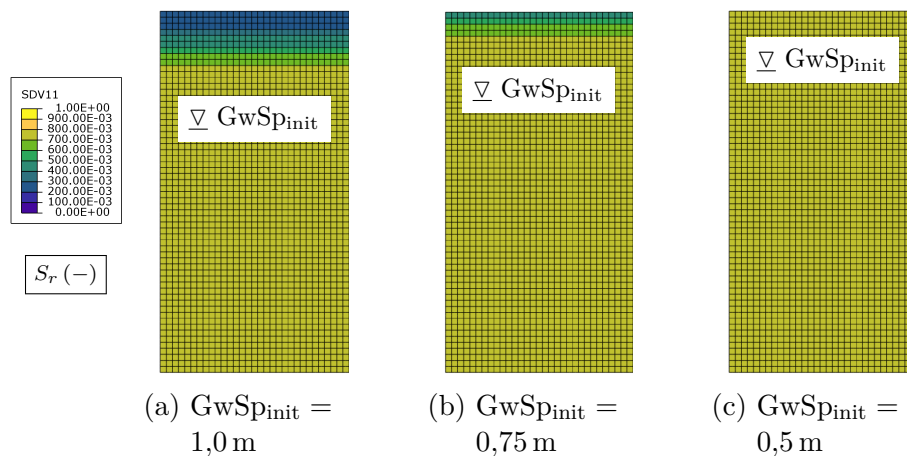
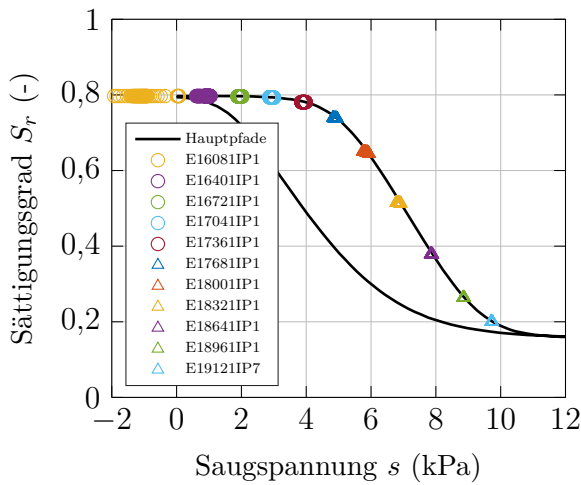
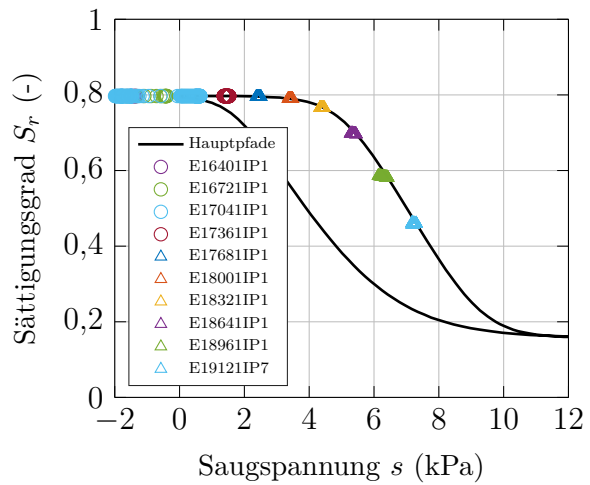


Abbildung 8.8: Ausschnittsweise dargestellte Verteilung des Sättigungsgrads  $S_r$  im Anfangszustand. Der maximale und der minimale Sättigungsgrad des ISS-0 Sands betragen  $S_{r,max} = 0,797$  bzw.  $S_{r,min} = 0,158$ .

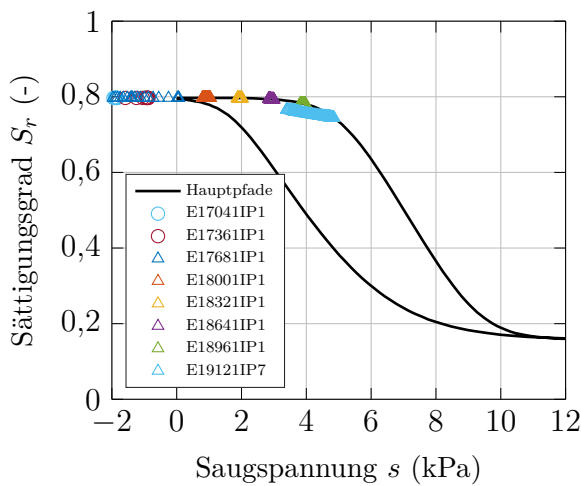
In Abbildung 8.9 (a)-(c) sind die Änderungen der  $s$ - $S_r$ -Zustände bei Radüberfahrt in Form der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung dargestellt. Wie zu erwarten war, nimmt der Sättigungsgrad durch die Verringerung des Porenraums bei Radüberfahrt zu. Die Änderungen fallen vergleichsweise jedoch gering aus. Die größten Änderungen lassen sich für den Fall eines hohen Wasserstandes identifizieren. Hier hat eine Verringerung des Porenraums den größten Effekt, da der Boden aufgrund des hohen Anfangssättigungsgrads zu einer raschen Aufsättigung neigt. In Abbildung 8.9 (d) sind die zugehörigen vertikalen Verformungen der Modelloberkante visualisiert.



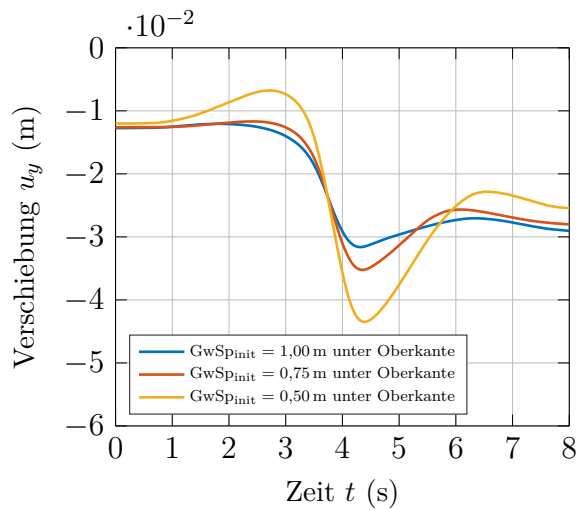
(a)  $GwSp_{init} = 1,0$  m unter Oberkante



(b)  $GwSp_{init} = 0,75$  m unter Oberkante



(c)  $GwSp_{init} = 0,5$  m unter Oberkante



(d) Vertikale Verschiebung

Abbildung 8.9: (a)-(c) Änderung des  $s$ - $S_r$ -Zustandes in Form der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung für verschiedene initiale Grundwasserstände. (d) Vertikale Verschiebung  $u_y$  (m) bei Radüberfahrt in Modellmitte bei  $x = 4,0$  m.

Mit steigendem Wasserstand werden die Verformungen größer. Dies gilt für die Setzungen, die sich während der Überfahrt einstellen, sowie für für Hebungen, die sich vor der Über-

fahrt einstellen können. Hebungen können für den Fall eines tiefliegenden Wasserstands nicht identifiziert werden. Die vor der nahenden Streckenlast in den mitteldicht gelagerten Boden eingetragenen Scherkräfte führen zu dilatantem Verhalten und folglich zu Hebungen. Die Verteilung des initialen Sättigungsgrads hat hierbei einen maßgeblichen Einfluss auf das Verformungsverhalten.

### 8.3.2.2 Variation der Geschwindigkeit

Weiterhin wird der Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit auf das hydraulisch-mechanisch gekoppelte Verhalten untersucht. Bei einem initialen Wasserstand von 0,75 m unter Modelloberkante werden hierzu die Verteilungen der Porenwasserdrücke  $u_w$  bei Radüberfahrt für verschiedene Überfahrgeschwindigkeiten abgebildet, vgl. Abbildung 8.10. Es wird jeweils die Zeitpunkte dargestellt, bei dem die Spitzenlast der Streckenlast einen Meter vor, genau in der Modellmitte und einen Meter danach liegt.

Wie bereits im vorangegangenen Abschnitt werden zudem die vertikalen Verformungen in Modellmitte vergleichend dargestellt, vgl. Abbildung 8.11. Da die Berechnungszeiten einer Radüberfahrt bei unterschiedlicher Geschwindigkeit variieren, wurde die Zeit auf der X-Achse auf die Dauer des jeweiligen Rechenschritts normiert.

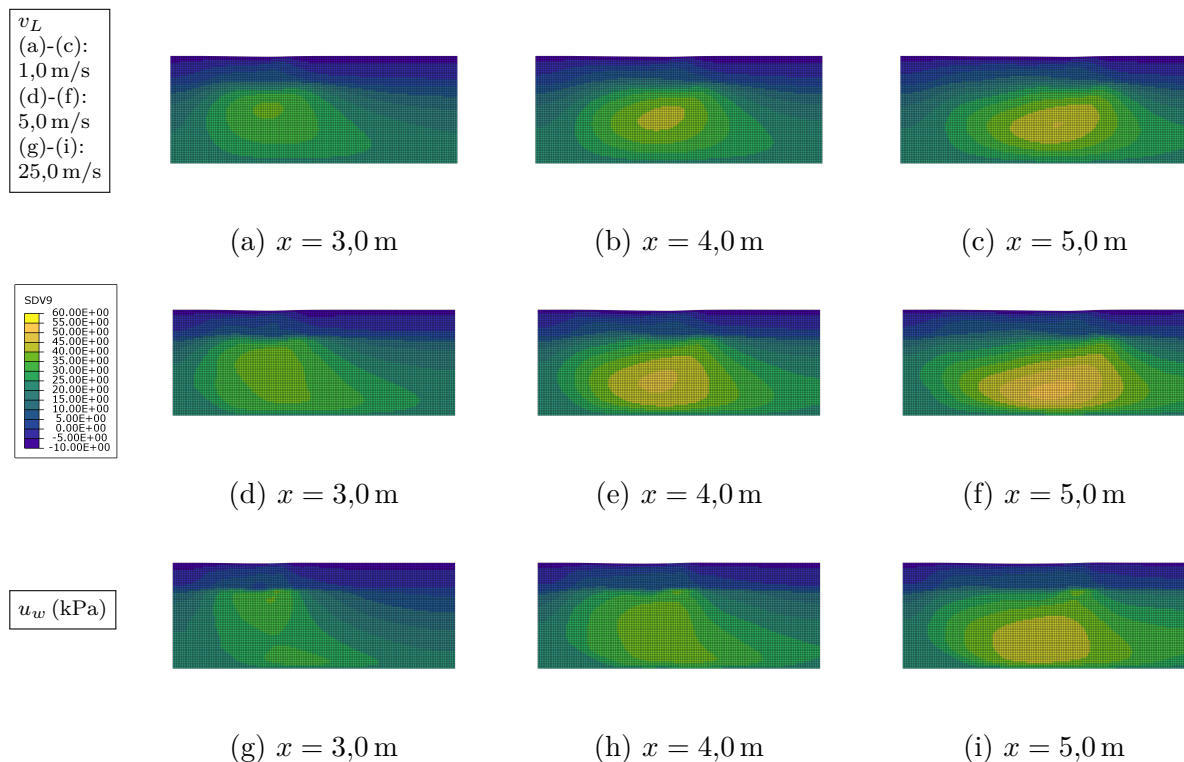


Abbildung 8.10: (a)-(i) Änderung des Porenwasserdrucks  $u_w$  bei Radüberfahrt bei Variation der Belastungsgeschwindigkeit  $v_L$  in ISS-0 Sand.

Oberhalb des Wasserspiegels befindet sich der Boden in einem teilgesättigten Zustand, was anhand der positiven Saugspannungswerte  $s$  in der Abbildung 8.10 deutlich wird.

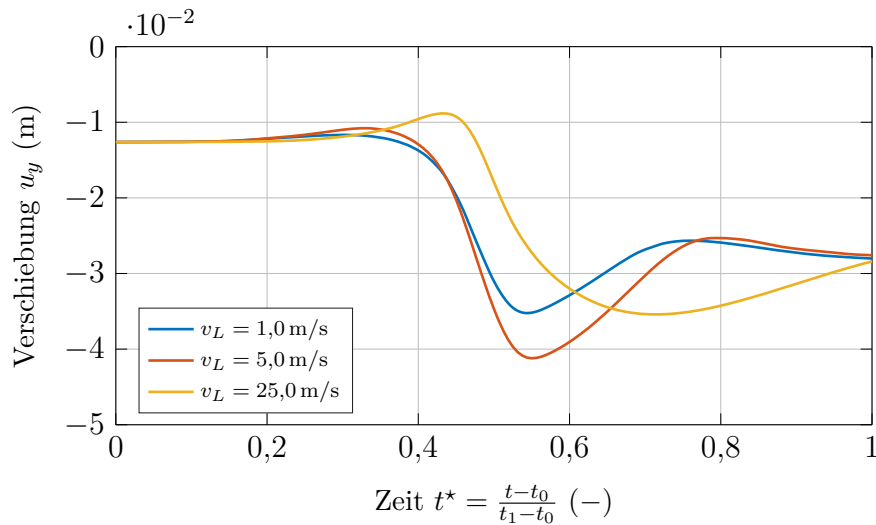


Abbildung 8.11: Vertikale Verschiebung  $u_y$  (m) bei Radüberfahrt bei Variation der Belastungsgeschwindigkeit  $v_L$  in Modellmitte bei  $x = 4,0 \text{ m}$  in ISS-0 Sand.

Anhand der Abbildungen lässt sich der Einfluss der Geschwindigkeit  $v_L$  der zur Simulation der Radüberfahrt verwendeten Streckenlast auf die Porenwasserdrücke verdeutlichen. Innerhalb des Kapillarsaums finden bei Lasteintrag nahezu keine Porenwasserdruckänderungen statt. Die Änderungen des  $s$ - $S_r$ -Zustandes weisen für die drei Simulationen einen Verlauf vergleichbar mit der in Abbildung 8.9 (b) dargestellten Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung auf. Die bereits im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen vor der nahenden Last entstehenden Hebungen lassen sich für die drei Belastungsgeschwindigkeiten identifizieren. Diese gehen mit Porenwasserdrücken in der gesättigten Zone einher, die sich aufgrund der Drainagebedingung am unteren Modellrand sowie der Durchlässigkeit des Sands aufbauen. Höhere Belastungsgeschwindigkeiten resultieren hierbei in höheren Porenwasserdrücken und größeren Hebungen.

### 8.3.2.3 Einfluss zyklischer Belastungen sowie der hydraulischen Hysterese

Unter Realbedingungen treten Lasten im Straßenverkehr zumeist in zyklischer Form auf. Derartige Lasten können zu Akkumulationseffekten von Fluiddrücken oder Verformungen führen, vgl. Kapitel 2.2.

Um den Einfluss zyklischer Belastungen auf das hydraulisch-mechanisch gekoppelte Verhalten des teilgesättigten Sandunterbaus zu untersuchen, werden fünf Lastzyklen bei konstantem Wasserstand aufgebracht. Die Randbedingungen entsprechen den im vorangegangenen Abschnitt beschriebenen Einstellungen für eine Überfahrgeschwindigkeit von  $v_L = 1,0 \text{ m/s}$ , vgl. Tabelle 8.1. Hierzu wird die Flächenlast in dem Simulationsschritt der Belastung jeweils fünf mal hintereinander aktiviert.

Es werden zwei Simulationen unter Verwendung des in Kapitel 5.2.1.2 vorgestellten Kapillardruck-Sättigungs-Modell durchgeführt. Zum einen findet die hydraulischen Hysterese Berücksichtigung – HM – und zum anderen wird sie deaktiviert – NHM – und lediglich der

Entwässerungspfad der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung berücksichtigt. Neben einem Erkenntnisgewinn über das Verformungsverhalten des teilgesättigten Sands mit zyklischer Belastung wird so der Einfluss der Wahl des Kapillardruck-Sättigungs-Modells verdeutlicht.

In Abbildung 8.12 (a)-(b) sind die zeitlichen Änderungen der Porenwasserdrücke  $u_w$  in ausgewählten Höhenlagen vergleichend dargestellt. Nach der initialen Belastung stellt sich bei Verwendung des HM ein Zustand geringfügiger Akkumulationseffekte ein. Bei Verwendung des NHM treten stärkere Akkumulationseffekte auf und bereits im fünften Belastungsschritt sind die Porenwasserdrücke vollständig im positiven Bereich.

In Abbildung 8.12 (c)-(d) sind die zeitlichen Änderungen der Porenluftdrücke  $u_a$  dargestellt. Die Verformung des Korngerüsts und die aus der Drainagebedingung am unteren Modellrand resultierenden hohen Porenwasserüberdrücke haben einen direkten Einfluss auf die sich in der teilgesättigten Zone ausbildenden Porenluftdrücke. Mit zunehmender Akkumulation von Porenwasserdrücken und gleichzeitiger Aufsättigung des Modells akkumulieren sich auch die Porenluftdrücke. Bei Verwendung des NHM fallen die Porenluftüberdrücke geringer aus, was auf die Aufsättigung der Wasserphase innerhalb des Modells zurückzuführen ist.

In Abbildung 8.12 (e)-(f) sind die zeitlichen Änderungen des Sättigungsgrads  $S_r$  dargestellt. Für beide Modellierungsansätze lassen sich Aufsättigungseffekte erkennen. Diese sind bei Verwendung des NHM deutlich ausgeprägter. Bereits im fünften Belastungsschritt ist die Wasserphase innerhalb des Modells vollständig aufgesättigt.

In Abbildung 8.13 (a)-(b) sind die  $s$ - $S_r$ -Zustände innerhalb des Kapillarsaums in Form der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung dargestellt. Deutlich zu erkennen ist, dass sich die Saugspannung bei zyklischer Belastung tendenziell verringert. Damit erhöhen sich die Sättigungsgrade und es kommt zu Aufsättigung. Bei Verwendung des HM bilden sich ausgehend von dem initialen Hauptentwässerungspfad Scanning-Pfade, die auf vergleichsweise geringere Aufsättigungseffekte führen. Bei Verwendung des NHM, wobei lediglich  $s$ - $S_r$ -Zustände auf dem Hauptentwässerungspfad zulässig sind, sättigt der Sand hingegen innerhalb weniger Belastungszyklen auf.

Die in Abbildung 8.13 (c) dargestellten vertikalen Verformungen liegen für beide Modellierungsansätze in einer ähnlichen Größenordnung. Mit jedem Lastzyklus treten reversible und irreversible Verformungen auf, die sich stetig akkumulieren. Der initialen mitteldichten Lagerung entsprechend, fallen die sich hier einstellenden Verformungen relativ groß aus. Da das Modell bei Verwendung des NHM zu einem früheren Zeitpunkt vollständig gesättigt ist, werden die Lasten vorwiegend von der Wasserphase getragen, was wiederum die effektiven Spannungen und somit die Verformungen reduziert.

## 8.4 Fazit

Die entwickelten FE-Modelle konnten erfolgreich verwendet werden, um umfangreiche Parametervariationen zum Verformungsverhalten teilgesättigter Sandunterbauten bei Radüberfahrt durchzuführen. Die Untersuchung der hydraulisch-mechanisch gekoppelten Pro-

zesse wurde durch die in Kapitel 5.3 beschriebenen Erweiterungen der Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung ermöglicht. Die Implementierung des in Kapitel 5.2.1.2 vorgestellten Kapillardruck-Sättigungs-Modells sowie des neuen Lasttyps zur Modellierung zeitlich veränderlicher glockenförmiger Flächenlasten zur Abbildung von Radlasten, vgl. Kapitel 5.7, hat sich hierbei als funktional erwiesen.

Die Simulationsergebnisse zeigen, dass die mit der Radüberfahrt einhergehenden Spannungsänderungen zu Verformungen führen, die die Kapillardruck-Sättigungs-Zustände maßgeblich beeinflussen. Die Änderungen der Porenfluiddrücke liegen in Größenordnungen, die mit den APT-Versuchen im Realmaßstab korrespondieren. Hierbei hat die Drainagebedingung sowie die der Sandart zugehörigen Durchlässigkeiten einen signifikanten Einfluss auf die Bildung von Porenwasserüberdrücken.

Unabhängigkeit von der Wahl des Kapillardruck-Sättigungs-Modells konnten Akkumulationseffekte der Porenwasserdrücke sowie hiermit einhergehende Aufsättigungseffekte registriert werden. Die Deaktivierung der Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese im Rahmen der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung führt in den Simulationen zu stärkeren Aufsättigungseffekten. Inwiefern diese Vereinfachung zulässig ist, ist im realen Einzelfall zu beurteilen. Verdeutlicht wird an dieser Stelle außerdem, dass die Wahl und Kalibrierung des Kapillardruck-Sättigungs-Modells im Rahmen numerischer Untersuchungen mit großer Sorgfalt erfolgen muss, da die Simulationsergebnisse hierdurch maßgeblich beeinflusst werden.

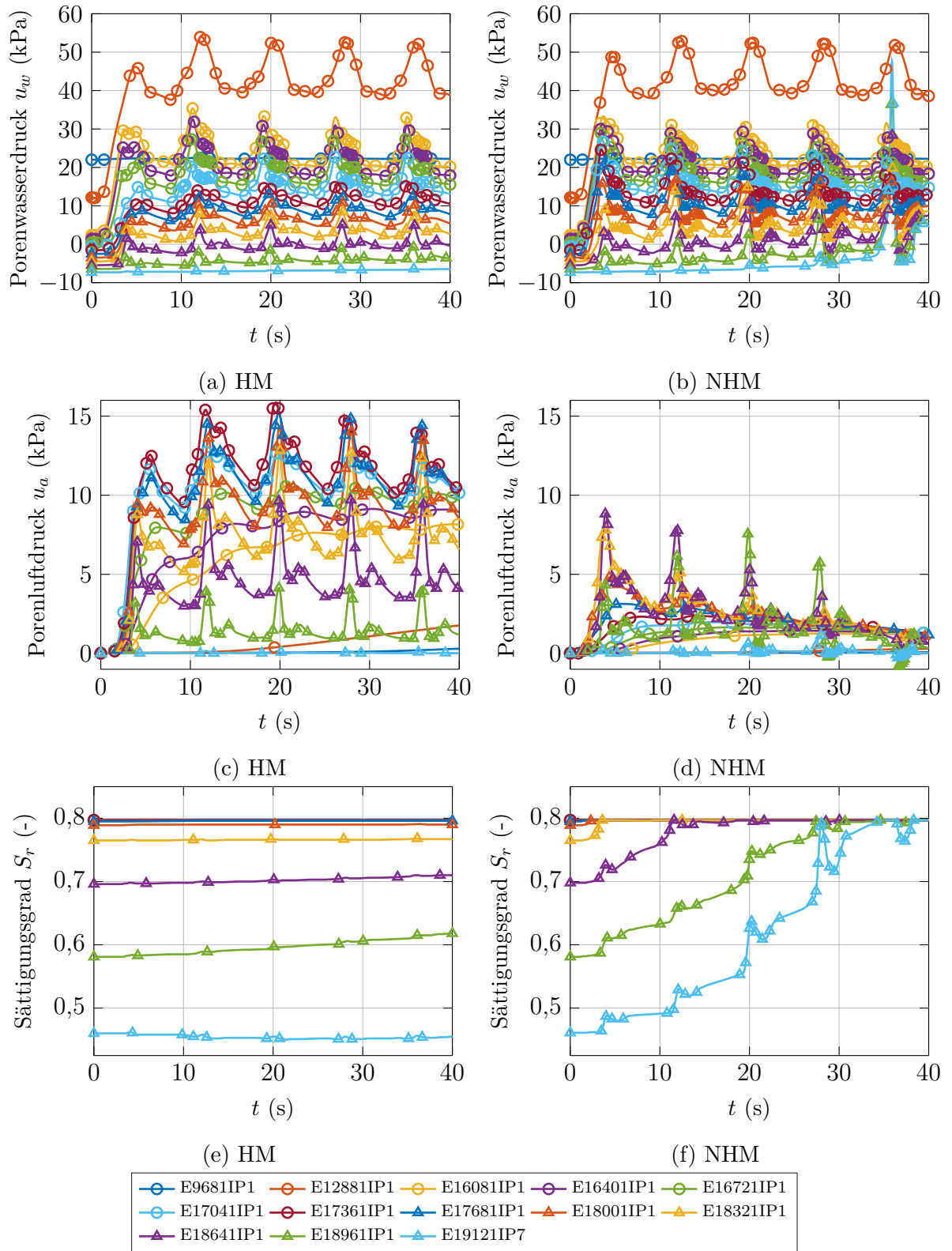


Abbildung 8.12: Änderungen des (a)-(b) Porenwasserdrucks  $u_w$ , des (c)-(d) Porenluftdrucks  $u_a$  und des (e)-(f) Sättigungsgrads  $S_r$  in Modellmitte bei  $x = 4,0$  m in ISS-0 Sand, vergleichend dargestellt für zyklische Belastung bei Verwendung des HM und des NHM.

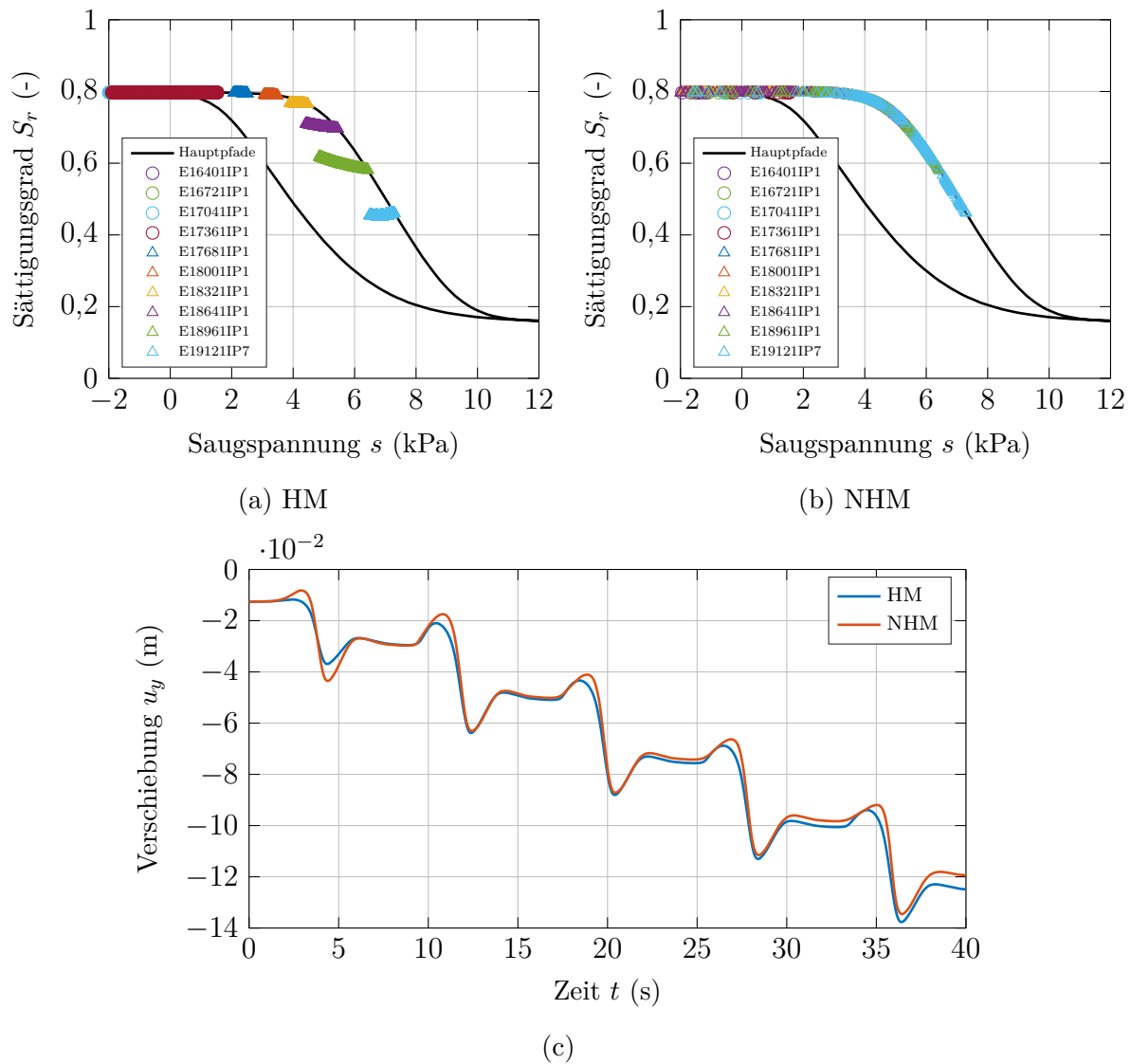


Abbildung 8.13: Änderung der (a)-(b) Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung und der (c) vertikalen Verschiebung  $u_y$  (m) in Modellmitte bei  $x = 4,0$  m in ISS-0 Sand, vergleichend dargestellt für zyklische Belastung bei Verwendung des HM und des NHM.

# 9 Zusammenfassung und Ausblick

## 9.1 Zusammenfassung

Zur Reduzierung der zunehmenden Oberflächenversiegelung sowie zur Verbesserung des Klimas in urbanen Räumen werden zunehmend versickerungsfähige Verkehrsflächen eingesetzt. Dem anfallenden Regenwasser wird hierdurch eine direkte Drainage durch die Straßenkonstruktion in die unterlagernden Böden ermöglicht.

Derartige Bauwerke sowie der darunter oberflächennah anstehende Untergrund befinden sich demnach vorwiegend in teilgesättigten Zuständen. Diese durch Niederschlag, aufsteigendes Kapillarwasser und Verdunstungseffekte beeinflussten Zustände, in dem der Porenraum eines Bodens zu einem Teil mit Wasser und zu einem Teil mit Luft gefüllt ist, sind die generell anzutreffenden Zustände natürlicher Böden.

Die grundlegende Funktion zur Beschreibung des hydraulischen, teilgesättigten Bodenverhaltens ist die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung. Hierbei wird die in einem teilgesättigten Boden herrschende Saugspannung, die Differenz zwischen Porenluft- und Porenwasserdruck, dem sich einstellenden Sättigungsgrad gegenübergestellt. Der sich hieraus ergebende nichtlineare Zusammenhang weist aufgrund einer Vielzahl von mikromechanischen Phänomenen eine hydraulische Hysterese auf. Aus Belastungen eines Bodens resultieren Verformungen. Diese Verformungen beeinflussen wiederum das komplexe Porensystem, was sich auf die Kapillarität und demnach ebenfalls auf die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung auswirkt.

Die Ziele dieser Arbeit sind die experimentelle Identifizierung sowie die numerische Modellierung hydraulisch-mechanisch gekoppelter Prozesse in granularen Geomaterialien, die u. a. in straßenbaulichen Konstruktionen eingesetzt werden. Aufgrund der relativ geringen Kapillareffekte granularer Böden ist diesen in der Forschung bisher vergleichsweise wenig Aufmerksamkeit zugekommen.

So wird im Rahmen dieser Arbeit durch die Durchführung experimenteller Untersuchungen zunächst eine Datengrundlage zum Kapillardruck-Sättigungs-Verhalten verschiedener granularer Geomaterialien erarbeitet. Erfahrungsgemäß weisen derartige Materialien einen geringen Einflussbereich der Saugspannung auf. Die zur experimentellen Erfassung des Kapillardruck-Sättigungs-Verhaltens verwendeten Methoden wurden gezielt für die jeweiligen Geomaterialien modifiziert bzw. entwickelt. Die erwarteten geringen Saugspannungsbereiche werden durch die experimentell erhobenen Daten bestätigt. Die untersuchten granularen Materialien sind durch eine hydraulische Hysterese gekennzeichnet. Zudem konnte für zwei Sande, die sich in ihren granulometrischen Eigenschaften unterscheiden, eine Abhängigkeit der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung von der Lagerungsdichte ermittelt werden.

Zur realistischeren Abbildung des teilgesättigten Materialverhaltens wird ein analytischer Ansatz zur Modellierung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese und der Abhängigkeit des Kapillardruck-Sättigungs-Zustands von der Lagerungsdichte vorgelegt. Dieser wird gegen Messdaten validiert und in eine dynamische Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung in den FE-Code Abaqus/Standard eingearbeitet. Die möglichen Anwendungsbereiche der Implementierung der dynamischen Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung zur Simulation des hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhaltens teilgesättigter Böden wurden dadurch vergrößert und um ein wesentliches Merkmal teilgesättigter Böden erweitert.

Aus Modellversuchen zum Entwässerungsverhalten eines versickerungsfähigen Straßenquerschnitts im Realmaßstab ließen sich die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehungen sowie die Suction-Stress-Characteristic-Curves der jeweiligen Schichten ableiten. Basierend auf den gewonnenen Daten ließ sich ein numerisches Modell kalibrieren. Dieses wurde zur Beurteilung des Einflusses teilgesättigter Zustände auf den effektiven Spannungszustand einer teilgesättigten Straße herangezogen. Für die stark wasserdurchlässige Konstruktion kann ein geringer Einfluss teilgesättigter Zustände auf den effektiven Spannungszustand identifiziert werden, was in Verbindung mit dem beobachtetem Entwässerungsverhalten aus baupraktischer Sicht als positiv zu bewerten ist.

Zur Identifizierung des Einflusses zyklischer mechanischer Lasten auf eine teilgesättigte wasserdurchlässige Straßenkonstruktion wurden an der Rheinisch-Westfälisch Technischen Hochschule Aachen Feldversuche mit einem mobilen Belastungssimulator im Realmaßstab durchgeführt. Ziel war die messtechnische Erfassung der Kapillardruck-Sättigungs-Zustände und die Beurteilung möglicher Akkumulationseffekte bei zyklischer Radlast. Zusätzlich wurde der in der Straßenkonstruktion geregelte Wasserstand variiert. Es konnte festgestellt werden, dass sich vor dem überfahrenden Rad Porenwasserunterdrücke ausbilden. Zudem konnten aus den zyklischen Belastungen resultierende Porenwasserdruckakkumulationen sowie hiermit einhergehende Aufsättigungseffekte festgestellt werden. Die Aufsättigungseffekte sowie die Zunahme der Porenwasserdrücke werden durch die im Rahmen der Feldversuche eingesetzte trogartige Baugrube begünstigt. Zur Minimierung derartiger Effekte sollte in der Baupraxis auf eine ausreichende Drainagewirkung des Unterbaus und anstehenden Untergrundes geachtet werden.

Die um das Kapillardruck-Sättigungs-Modell erweiterte Dreiphasen-Kontinuums-Formulierung wurde verwendet, um den Einfluss von Radlasten auf das hydraulisch-mechanisch gekoppelte Verhalten in teilgesättigten Sandunterbauten zu untersuchen. So konnten umfangreiche Parametervariationen zum Verformungsverhalten durchgeführt werden. Die Bildung von Porenwasserüberdrücken hängt maßgeblich von den hydraulischen Eigenschaften der Unterbaumaterialien sowie von der Überfahrgeschwindigkeit ab. So fallen die bei Radüberfahrt generierten Porenwasserüberdrücke für den grobkörnigeren, durchlässigeren Sand geringer aus, als für den feineren Sand. Die mit den modellierten Radüberfahrten einhergehenden Bodenverformungen resultieren in Änderungen der hydraulischen Zustände. So lassen sich bei zyklischer Belastung Aufsättigungseffekte und Porenwasserdruckakkumulationen verzeichnen. Die Modellantwort wird hierbei durch die Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese stark beeinflusst. Diese Tatsache verdeutlicht den Einfluss der

Wahl des Kapillardruck-Sättigungs-Modells im Rahmen von Simulationen teilgesättigter Geomaterialien.

Mit der vorliegenden Arbeit wird ein Beitrag zum grundlegenden Verständnis des Materialverhaltens teilgesättigter Böden unter zyklischer mechanischer Belastung geschaffen. Der Fokus liegt hierbei auf granularen Geomaterialien, die in wasserdurchlässigen straßenbaulichen Konstruktionen Verwendung finden. Mit dem neuartigen Modell zur Beschreibung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese steht ein validiertes Werkzeug zur Verfügung, das sich auf eine Vielzahl weiterer Fragestellungen anwenden lässt.

## 9.2 Ausblick

Die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung ist die fundamentale Kenngröße zur Beschreibung und Modellierung des hydraulischen bzw. hydraulisch-mechanisch gekoppelten Verhaltens teilgesättigter Böden. Die Kalibrierung des im Rahmen dieser Arbeit beschriebenen Kapillardruck-Sättigungs-Modells mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese ist auf zwei granulare Böden beschränkt. Daneben sollte eine breitere Datenbasis inklusive Daten für gemischtkörnige und bindige Böden herangezogen werden, um die Funktionalität des Modells dahingehend zu überprüfen und erweitern.

Die Festlegung der Parameter des hydraulischen Modells erfolgte im Rahmen dieser Arbeit händisch durch Annäherung. Zukünftig könnten genetische Algorithmen herangezogen werden, um die benötigten Materialparameter für das hydraulische Modell zu ermitteln. Ein derartiger Ansatz findet sich u. a. in Pedroso und Williams (2011).

Die Fachliteratur beschreibt neben den vorgestellten nichtlinearen Eigenschaften der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung zusätzlich eine Abhängigkeit von dynamischen Effekten, vgl. u. a. Hassanizadeh u. a. (2002). So wird der grundlegende Zusammenhang zwischen Saugspannung und Sättigungsgrad demnach durch die Be- bzw. Entwässerungsrate beeinflusst. Experimentelle Untersuchungen dieses Effekts zweier Sande werden in Milatz, Törzs u. a. (2018) präsentiert. Die Implementierung ebendieser Effekte in die präsentierten Modellierungsansätze könnten zur Verbesserung der numerischen Prognosen beitragen.

Im Bruchzustand können sich in Böden Scherfugen einstellen. Diese sind durch große Verformungen und bei teilgesättigten Böden durch hohe Änderungsraten der Kapillardruck-Sättigungs-Zustände geprägt. Die vorliegenden Modellierungsansätze können im Rahmen einer mikroskaligen Finite-Elemente-Methode z. B. zur Prognose von lokalen Kapillardruck-Sättigungs-Änderungen in diskretisierten numerischen Laborversuchen herangezogen werden.

Bildgebende Verfahren stellen ein mächtiges Werkzeug zum Erkenntnisgewinn über eine Vielzahl mikromechanischer Phänomene poröser Medien dar. Die dreidimensionalen Volumen können darüber hinaus zur Modellbildung im Rahmen numerischer Untersuchungen herangezogen werden. Die im Anhang der Arbeit beschriebenen Vorgehensweisen zur Segmentierung dreidimensionaler Bilddaten von PU-gebundenem Deckschichtmaterial sowie die Untersuchung zu repräsentativen Volumenelementen bilden die Basis für weitere

Forschung. Derartig aufbereitete Daten lassen sich z. B. zur Prognose des Verstopfungsverhaltens der neuartigen Deckschichtmaterialien heranziehen.

Der modular gestaltete Versuchsstand zur Ermittlung des Entwässerungsverhaltens einer wasserdurchlässigen Straßenkonstruktion ist über die vorgestellten Ergebnisse hinaus vielseitig einsetzbar. So kann dieser zukünftig herangezogen werden, um umfangreiche Parameterstudien zum Versickerungs- bzw. Wasserretentionsverhalten durchzuführen. Ebenso sind Langzeitstudien mit wechselnden hydraulischen Randbedingungen, wie Beregnung oder alternierenden Grundwasserständen umsetzbar.

Das im Rahmen dieser Arbeit weiterentwickelte benutzerdefinierte Element für Abaqus/Standard ermöglicht, neben den vorgestellten FE-Modellen zur Modellierung des Verformungsverhaltens teilgesättigter Unterbaumaterialien, eine Vielzahl weiterer Anwendungsmöglichkeiten. Belastungen von Bauwerken oder des Untergrunds treten oft in Zyklen auf. Zu nennen sind u. a. wiederkehrende Niederschlagsereignisse, saisonale Temperaturschwankungen, Schwankungen des Grundwasserspiegels oder durch Tidenhübe beeinflusste Böden sowie Verkehrslasten aller Art. Mit den neuen Modellierungsansätzen kann das Verformungsverhalten teilgesättigter Böden unter zyklischer hydraulischer oder mechanischer Belastung nun realitätsnäher modelliert werden. Außerdem ist die Implementierung des Modells in die numerisch gestützte Dimensionierung von Straßenkonstruktionen mit Berücksichtigung teilgesättigter Zustände denkbar.

# Literatur

- Aguiar-Moya, J. P., A. Vargas-Nordbeck, F. Leiva-Villacorta und L. G. Loría-Salazar, Hrsg. (2016). *The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability*. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-42797-3.
- Amelung, W., H.-P. Blume, H. Fleige, R. Horn und E. Kandeler (2018). *Scheffer/Schacht-schabel Lehrbuch der Bodenkunde*. Springer-Verlag GmbH.
- Aubertin, M., M. Mbonimpa, B. Bussière und R. P. Chapuis (2003). „A model to predict the water retention curve from basic geotechnical properties“. In: *Can. Geotech. J.* 40 (6), S. 1104–1122. DOI: 10.1139/t03-054.
- Azizi, A., C. Jommi und G. Musso (2017). „A water retention model accounting for the hysteresis induced by hydraulic and mechanical wetting-drying cycles“. In: *Computers and Geotechnics* 87, S. 86–98. DOI: 10.1016/j.compgeo.2017.02.003.
- Barbour, S. L. (1998). „Nineteenth Canadian Geotechnical Colloquium: The soil-water characteristic curve: a historical perspective“. In: *Canadian Geotechnical Journal* 35.5, S. 873–894. DOI: 10.1139/t98-040.
- Bathe, K.-J. (2014). *Finite element procedures*. 2. Aufl. United States Watertown, MA: K.J. Bathe, Watertown, MA.
- Bear, J. (1979). *Hydraulics of groundwater*. McGraw-Hill.
- Bezerra-Coelho, C. R., L. Zhuang, M. C. Barbosa, M. A. Soto und M. T. van Genuchten (2018). „Further tests of the HYPROP evaporation method for estimating the unsaturated soil hydraulic properties“. In: *Journal of Hydrology and Hydromechanics* 66.2, S. 161–169. DOI: 10.1515/johh-2017-0046.
- Biot, M. A. und D. G. Willis (1957). „The Elastic Coefficients of the Theory of Consolidation“. In: *Journal of Applied Mechanics* 24.4, S. 594–601. DOI: 10.1115/1.4011606.
- Bishop, A. W. (1959). „The Principle of Effective Stress“. In: *Teknisk Ukeblad* 39, S. 859–863.
- Brooks, R. und T. Corey (1964). „Hydraulic Properties Of Porous Media“. In: *Hydrology Papers, Colorado State University*.
- Burdine, N. (1953). „Relative Permeability Calculations From Pore Size Distribution Data“. In: *Journal of Petroleum Technology* 5.03, S. 71–78. DOI: 10.2118/225-g.
- Caicedo, B. (2018). *Geotechnics of Roads: Fundamentals*. Taylor & Francis Ltd. DOI: 10.1201/9780429025914.
- Carman, P. C. (1956). *Flow of Gases Through Porous Media*. London: Butterworths Scientific Publications.
- Carrier, W. D. (2003). „Goodbye, Hazen; Hello, Kozeny-Carman“. In: *J. Geotech. Geoenviron. Eng.* 129.11, S. 1054–1056. DOI: 10.1061/(ASCE)1090-0241(2003)129:11(1054).
- Chen, J., X. Yin, H. Wang und Y. Ding (2018). „Evaluation of durability and functional performance of porous polyurethane mixture in porous pavement“. In: *Journal of Cleaner Production* 188, S. 12–19. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.297.

- Chu, X. (2020). „A Review on the Resilient Response of Unsaturated Subgrade Soils“. In: *Advances in Civil Engineering* 2020. DOI: 10.1155/2020/7367484.
- Cong, L., T. Wang, L. Tan, J. Yuan und J. Shi (2018). „Laboratory evaluation on performance of porous polyurethane mixtures and OGFC“. In: *Construction and Building Materials* 169, S. 436–442. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2018.02.145.
- Cong, L., F. Yang, G. Guo, M. Ren, J. Shi und L. Tan (2019). „The use of polyurethane for asphalt pavement engineering applications: A state-of-the-art review“. In: *Construction and Building Materials* 225, S. 1012–1025. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.07.213.
- Coussy, O. (2005). „Poromechanics of freezing materials“. In: *J. Mech. Phys. Solids* 53.8, S. 1689–1718. DOI: 10.1016/j.jmps.2005.04.001.
- Darcy, H. (1856). *Les fontaines publiques de la ville de Dijon: exposition et application*.
- Dawson, A. (1997). „Rutting in unsurfaced roads-materials and structure interaction effects“. In: *Symposium on Thinly Surfaced Pavements*.
- Dawson, A., Hrsg. (2009). *Water in Road Structures*. Springer Netherlands. DOI: 10.1007/978-1-4020-8562-8.
- de Boer, R. (2000). *Theory of Porous Media*. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-59637-7.
- Durner, W. (1994). „Hydraulic conductivity estimation for soils with heterogeneous pore structure“. In: *Water Resources Research* 30.2, S. 211–223. DOI: 10.1029/93WR02676.
- Everett, D. H. (1954). „A general approach to hysteresis. Part 3.—A formal treatment of the independent domain model of hysteresis“. In: *Transactions of the Faraday Society* 50.0, S. 1077–1096. DOI: 10.1039/tf9545001077.
- Fahrmeir, L., C. Heumann, R. Künstler, I. Pigeot und G. Tutz (2016). *Statistik*. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-50372-0.
- Fair, G. M. und L. P. Hatch (1933). „Fundamental Factors Governing the Streamline Flow of Water Through Sand“. In: *Journal - American Water Works Association* 25.11, S. 1551–1563. DOI: 10.1002/j.1551-8833.1933.tb18342.x.
- Fredlund, D. G. und H. Rahardjo (1993). *Soil Mechanics for Unsaturated Soils*. New York: Wiley.
- Fredlund, D. G., H. Rahardjo und M. D. Fredlund (2012). *Unsaturated Soil Mechanics in Engineering Practice*. John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10.1002/9781118280492.
- Fredlund, D. G. und A. Xing (1994). „Equations for the soil-water characteristic curve“. In: *Can. Geotech. J.* 31 (4), S. 521–532. DOI: 10.1139/t94-061.
- Fredlund, D. G., A. Xing und S. Huang (1994). „Predicting the permeability function for unsaturated soils using the soil-water characteristic curve“. In: *Canadian Geotechnical Journal* 31.4, S. 533–546. DOI: 10.1139/t94-062.
- Fredlund, D. G. und H. Q. Pham (2006). „A Volume-Mass Constitutive Model for Unsaturated Soils in Terms of Two Independent Stress State Variables“. In: *Unsaturated Soils 2006*. American Society of Civil Engineers. DOI: 10.1061/40802(189)4.
- Freie und Hansestadt Hamburg, Behörde für Umwelt und Energie (2018). *Bodenversiegelung in Hamburg 2017 - Auswertung sowie Vergleichende Bewertungen - Ergebnisbericht*.
- Gallipoli, D., A. Gens, R. Sharma und J. Vaunat (2003). „An elasto-plastic model for unsaturated soil incorporating the effects of suction and degree of saturation on mechanical behaviour“. In: *Géotechnique* 53.1, S. 123–135. DOI: 10.1680/geot.2003.53.1.123.

- Gardner, W. (1958). „Mathematics of isothermal water conduction in unsaturated soils“. In: *Highway research board special report 40*, S. 78–87.
- Haines, W. B. (1930). „Studies in the physical properties of soil. V. The hysteresis effect in capillary properties, and the modes of moisture distribution associated therewith“. In: *The Journal of Agricultural Science* 20.1, S. 97–116. DOI: 10.1017/s002185960008864x.
- Han, Z., S. K. Vanapalli und W.-l. Zou (2019). „Simple Approaches for Modeling Hysteretic Soil Water Retention Behavior“. In: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 145.10, S. 04019064. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002148.
- Hassanizadeh, S. M., M. A. Celia und H. K. Dahle (2002). „Dynamic Effect in the Capillary Pressure-Saturation Relationship and its Impacts on Unsaturated Flow“. In: *Vadose Zone Journal* 1.1, S. 38–57. DOI: 10.2136/vzj2002.3800.
- Haverkamp, R., M. Vauclin, J. Touma, P. J. Wierenga und G. Vachaud (1977). „A Comparison of Numerical Simulation Models For One-Dimensional Infiltration“. In: *Soil Science Society of America Journal* 41.2, S. 285–294. DOI: 10.2136/sssaj1977.03615995004100020024x.
- Holler, S. (2006). „Dynamisches Mehrphasenmodell mit hypoplastischer Materialformulierung der Feststoffphase“. Dissertation. RWTH Aachen.
- Ionescu, M. (2016). Chemistry and technology of polyols for polyurethanes. 2nd Edition. Shawbury Shrewsbury Shropshire: A Smithers Group Company.
- Jansen, D., B. Wacker und L. Pinkofsky (2018). „Full-scale accelerated pavement testing with the MLS30 on innovative testing infrastructures“. In: *International Journal of Pavement Engineering* 19.5, S. 456–465. DOI: 10.1080/10298436.2017.1408274.
- Jaynes, D. B. (1984). „Comparison of soil-water hysteresis models“. In: *Journal of Hydrology* 75.1-4, S. 287–299. DOI: 10.1016/0022-1694(84)90054-4.
- Kanitz, M. (2021). „Experimental and numerical investigation of particle-fluid systems in geotechnical engineering“. Dissertation. Technische Universität Hamburg, Institut für Geotechnik und Baubetrieb.
- Kaya, H. (2016). „Bodenverschleppung und Spaltbildung infolge der Einbringung von Profilen in Dichtungsschichten aus Ton“. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Geotechnik und Baubetrieb.
- Kelly, S. F. und J. S. Selker (2001). „Osmotically Driven Water Vapor Transport in Unsaturated Soils“. In: *Soil Science Society of America Journal* 65.6, S. 1634–1641. DOI: 10.2136/sssaj2001.1634.
- Kettl, P., G. Engström und N.-E. Wiberg (2005). „Coupled hydro-mechanical wave propagation in road structures“. In: *Computers & Structures* 83.21, S. 1719–1729. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruc.2005.02.012>.
- Khalili, N., F. Geiser und G. E. Blight (2004). „Effective Stress in Unsaturated Soils: Review with New Evidence“. In: *International Journal of Geomechanics* 4.2, S. 115–126. DOI: 10.1061/(asce)1532-3641(2004)4:2(115).
- Khalili, N. und M. H. Khabbaz (1998). „A unique relationship for  $\chi$  for the determination of the shear strength of unsaturated soils“. In: *Géotechnique* 48.5, S. 681–687. DOI: 10.1680/geot.1998.48.5.681.
- Khogali, W. E., K. O. Anderson, J. K. Gan und D. G. Fredlund (1991). „Installation and Monitoring of Thermal Conductivity Suction Sensors in a Fine-Grained Subgrade

- Soil Subjected to Seasonal Frost“. In: *Road and Airport Pavement Response Monitoring Systems*. ASCE, S. 153–167.
- Klausner, Y. (1991). *Fundamentals of Continuum Mechanics of Soils*. Springer London. DOI: 10.1007/978-1-4471-1677-6.
- Kolymbas, D. (2016). *Geotechnik*. Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-662-53593-6.
- Kolymbas, D. und I. Herle (2017). „Stoffgesetze für Böden“. In: Wiley, S. 457–509. DOI: 10.1002/9783433607275.ch7.
- Kuhr, I. M. (2016). „Untersuchungen zum Volumenänderungs- und Kollapsverhalten von teilgesättigtem Sand bei Sättigungsänderungen“. Bachelorarbeit. Technische Universität Hamburg, Institut für Geotechnik und Baubetrieb.
- Lekarp, F., U. Isacsson und A. Dawson (2000). „State of the Art. I: Resilient Response of Unbound Aggregates“. In: *Journal of Transportation Engineering* 126.1, S. 66–75. DOI: 10.1061/(asce)0733-947x(2000)126:1(66).
- Lenhof, B., P. Kettil, K. Runesson und N.-E. Wiberg (2008). „Assessment of acceleration modelling for fluid-filled porous media subjected to dynamic loading“. In: *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 32.2, S. 109–119. DOI: 10.1002/nag.610.
- Lewis, R. W. und B. A. Schrefler (1998). *The finite element method in the static and dynamic deformation and consolidation of porous media*. John Wiley & Sons.
- Li, X. S. (2005). „Modelling of hysteresis response for arbitrary wetting/drying paths“. In: *Computers and Geotechnics* 32.2, S. 133–137. DOI: 10.1016/j.compgeo.2004.12.002.
- Lins, Y., Y. Zou und T. Schanz (2007). „Physical Modeling of SWCC for Granular Materials“. In: *Springer Proceedings in Physics 113*. Springer Berlin Heidelberg, S. 61–74. DOI: 10.1007/3-540-69876-0\_7.
- Lu, G. (2019). „Permeable pavements: hydraulic and mechanical investigations“. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen.
- Lu, G., P. Liu, T. Törzs, D. Wang, M. Oeser und J. Grabe (2020). „Numerical analysis for the influence of saturation on the base course of permeable pavement with a novel polyurethane binder“. In: *Construction and Building Materials* 240, S. 117930. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.117930.
- Lu, G., P. Liu, Y. Wang, S. Faßbender, D. Wang und M. Oeser (2019). „Development of a sustainable pervious pavement material using recycled ceramic aggregate and bio-based polyurethane binder“. In: *Journal of Cleaner Production*. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.02.184.
- Lu, G., L. Renken, T. Li, D. Wang, H. Li und M. Oeser (2019). „Experimental study on the polyurethane-bound pervious mixtures in the application of permeable pavements“. In: *Construction and Building Materials* 202, S. 838–850. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.01.051.
- Lu, G., T. Törzs, P. Liu, Z. Zhang, D. Wang, M. Oeser und J. Grabe (2020). „Dynamic Response of Fully Permeable Pavements: Development of Pore Pressures under Different Modes of Loading“. In: *Journal of Materials in Civil Engineering* 32.7, S. 04020160. DOI: 10.1061/(asce)mt.1943-5533.0003217.

- Lu, G., H. Wang, T. Törzs, P. Liu, Y. Zhang, D. Wang, M. Oeser und J. Grabe (2020). „In-situ and numerical investigation on the dynamic response of unbounded granular material in permeable pavement“. In: *Transportation Geotechnics* 25, S. 100396. DOI: 10.1016/j.trgeo.2020.100396.
- Lu, N. (2020). „Unsaturated Soil Mechanics: Fundamental Challenges, Breakthroughs, and Opportunities“. In: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 146.5. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002233.
- Lu, N., J. W. Godt und D. T. Wu (2010). „A closed-form equation for effective stress in unsaturated soil“. In: *Water Resources Research* 46.5. DOI: 10.1029/2009wr008646.
- Lu, N., L. R. Hoyos und L. Reddi, Hrsg. (2006). *Advances in Unsaturated Soil, Seepage, and Environmental Geotechnics*. American Society of Civil Engineers. DOI: 10.1061/9780784408605.
- Lu, N. und W. J. Likos (2004). *Unsaturated Soil Mechanics*. John Wiley & Sons.
- Lu, N. und W. J. Likos (2006). „Suction Stress Characteristic Curve for Unsaturated Soil“. In: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132.2, S. 131–142. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2006)132:2(131).
- Lu, N. und J. K. Mitchell, Hrsg. (2019). *Geotechnical Fundamentals for Addressing New World Challenges*. Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-030-06249-1.
- Lu, N. und C. Zhang (2019). „Soil Sorptive Potential: Concept, Theory, and Verification“. In: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 145.4, S. 04019006. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002025.
- Marjerison, B., N. Richardson, A. Widger, D. Fredlund und C. Berthelot (2001). „Installation of sensors and measurement of soil suction below thin membrane surface pavements in Saskatchewan“. In: *Proceedings of 54th Canadian geotechnical conference, Calgary, Alta*, S. 16–19.
- Marshall, T. J. (1958). „A Relation Between Permeability and Size Distribution of Pores“. In: *Journal of Soil Science* 9.1, S. 1–8. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1958.tb01892.x.
- Mbonimpa, M., M. Aubertin, A. Maqsoud und B. Bussière (2006). „Predictive Model for the Water Retention Curve of Deformable Clayey Soils“. In: *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 132.9, S. 1121–1132. DOI: 10.1061/(asce)1090-0241(2006)132:9(1121).
- Milatz, M. (2016). „Untersuchungen zum Einfluss der Kapillarität auf das hydraulisch-mechanische Verhalten von granularen Tragschichten für Verkehrswege“. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Geotechnik und Baubetrieb.
- Milatz, M. (2020). „An automated testing device for continuous measurement of the hysteretic water retention curve of granular media“. In: *Acta Geotechnica*. DOI: 10.1007/s11440-020-00922-y.
- Milatz, M. und J. Grabe (2019). „Microscopic investigation of the hydro-mechanical behavior of unsaturated granular media with X-ray CT“. In: *Proc. of 7th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils (AP-UNSAT2019)*. Bd. 7. 2. The Japanese Geotechnical Society, S. 615–626. DOI: 10.3208/jgssp.v07.095.
- Milatz, M., N. Hüsener, E. Andò, G. Viggiani und J. Grabe (2021). „Quantitative 3D imaging of partially saturated granular materials under uniaxial compression“. In: *Acta Geotechnica*. DOI: 10.1007/s11440-021-01315-5.

- Milatz, M., T. Törzs, E. Nikooee, S. M. Hassanizadeh und J. Grabe (2018). „Theoretical and experimental investigations on the role of transient effects in the water retention behaviour of unsaturated granular soils“. In: *Geomechanics for Energy and the Environment* 15, S. 54–64. DOI: 10.1016/j.gete.2018.02.003.
- Monteiro, A. O. (2017). „Monitoring the hydro-mechanical behaviour of a novel open porous pavement approach upon heavy traffic loads“. Posterbeitrag zu den Aachener Straßenbau- und Verkehrstagen 2017.
- Mualem, Y. (1976). „A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media“. In: *Water Resources Research* 12.3, S. 513–522. DOI: 10.1029/WR012i003p00513.
- Mualem, Y. (1986). „Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils: Prediction and Formulas“. In: *Methods of Soil Analysis: Part 1 Physical and Mineralogical Methods, 5.1, Second Edition*. Soil Science Society of America, American Society of Agronomy, S. 799–823. DOI: 10.2136/sssabookser5.1.2ed.c31.
- Muraleetharan, K. K., C. Liu, C. Wei, T. C. Kibbey und L. Chen (2009). „An elastoplastic framework for coupling hydraulic and mechanical behavior of unsaturated soils“. In: *International Journal of Plasticity* 25.3, S. 473–490. DOI: 10.1016/j.ijplas.2008.04.001.
- Murray, E. J. und V. Sivakumar (2010). *Unsaturated Soils*. John Wiley & Sons.
- Nguyen, H. und D. Durso (1983). „Absorption of water by fiber webs: an illustration of diffusion transportation“. In: *Tappi journal* 66.12, S. 76–79.
- Niemunis, A. und I. Herle (1997). „Hypoplastic model for cohesionless soils with elastic strain range“. In: *Mechanics of Cohesive-frictional Materials* 2.4, S. 279–299. DOI: 10.1002/(sici)1099-1484(199710)2:4<279::aid-cfm29>3.0.co;2-8.
- Nishimura, T., J. Koseki, D. G. Fredlund und H. Rahardjo (2012). „Microporous Membrane Technology for Measurement of Soil-Water Characteristic Curve“. In: *Geotechnical Testing Journal* 35.1, S. 103670. DOI: 10.1520/GTJ103670.
- Osthoff, D. (2018). „Zur Ursache von Schlosssprengungen und zu einbringbedingten Lageabweichungen von Spundwänden“. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Geotechnik und Baubetrieb.
- Pedroso, D. M. (2014). „A consistent u-p formulation for porous media with hysteresis“. In: *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 101.8, S. 606–634. DOI: 10.1002/nme.4808.
- Pedroso, D. M., D. Sheng und J. Zhao (2009). „The concept of reference curves for constitutive modelling in soil mechanics“. In: *Computers and Geotechnics* 36.1-2, S. 149–165. DOI: 10.1016/j.compgeo.2008.01.009.
- Pedroso, D. M. und D. J. Williams (2010). „A novel approach for modelling soil–water characteristic curves with hysteresis“. In: *Computers and Geotechnics* 37.3, S. 374–380. DOI: 10.1016/j.compgeo.2009.12.004.
- Pedroso, D. M. und D. J. Williams (2011). „Automatic calibration of soil-water characteristic curves using genetic algorithms“. In: *Computers and Geotechnics* 38.3, S. 330–340. DOI: 10.1016/j.compgeo.2010.12.004.
- Pedroso, D. M., Y. Zhang und W. Ehlers (2017). „Solution of Liquid–Gas–Solid Coupled Equations for Porous Media Considering Dynamics and Hysteretic Retention Behavior“.

- In: *Journal of Engineering Mechanics* 143.6. DOI: 10.1061/(asce)em.1943-7889.0001208.
- Pham, H. Q., D. G. Fredlund und S. L. Barbour (2005). „A study of hysteresis models for soil-water characteristic curves“. In: *Can. Geotech. J.* 42.6, S. 1548–1568. DOI: 10.1139/t05-071.
- Plessis, L. du, A. Ulloa-Calderon, J. Harvey und N. Coetzee (2018). „Accelerated pavement testing efforts using the Heavy Vehicle Simulator“. In: 11.4, S. 327–338. DOI: 10.1016/j.ijprt.2017.09.016.
- Prisacariu, C. (2011). *Polyurethane Elastomers - From Morphology to Mechanical Aspects*. Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media.
- Qiu, G. (2012). „Coupled Eulerian Lagrangian simulations of selected soil-structure interaction problems“. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Geotechnik und Baubetrieb.
- Renken, L., M. Oeser, M. Milatz und J. Grabe (2015). „Measurement of hydraulic properties of unsaturated permeable polyurethane bound asphalt materials“. In: *Proc. of 6th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils (AP-UNSAT 2015)*, S. 407–412.
- Renken, L. (2019). „Entwicklung von PU-Asphalt: von der Idee bis zur baupraktischen Umsetzung“. Dissertation. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen, Lehrstuhl und Institut für Straßenwesen. DOI: 10.18154/RWTH-2019-11994.
- Renken, L., S. Kreisler und M. Oeser (2015). „Entwicklung von Deckschichtmaterialien für versickerungsfähige Verkehrsflächenbefestigungen auf Basis alternativer Bindemittel - Teil II: Ansprache der Performance“. In: *Straße und Autobahn* 11, S. 776–784.
- Renken, L. und M. Oeser (2014). „Innovative Material Concepts : Application Potentials and Characterization of Synthetic Road Pavements“. In: *3rd China-Europe Workshop on Functional Pavement Proceedings*.
- Renken, L. und M. Oeser (2015). „Entwicklung von Deckschichtmaterialien für versickerungsfähige Verkehrsflächenbefestigungen auf Basis alternativer Bindemittel - Teil I: Festigkeit, Permeabilität, Kornverlust“. In: *Straße und Autobahn* 9, S. 601–608.
- Sattler, P., D. Fredlund, M. Klassen und W. Rowan (1989). „Bearing capacity approach to railway design using subgrade matric suction“. In: *Transportation Research Record* 1241, S. 27–33.
- Schelle, H., L. Heise, K. Jänicke und W. Durner (2013). „Water retention characteristics of soils over the whole moisture range: a comparison of laboratory methods“. In: *European Journal of Soil Science* 64.6, S. 814–821. DOI: 10.1111/ejss.12108.
- Schindler, U. (1980). „Ein Schnellverfahren zur Messung der Wasserleitfähigkeit im teilgesättigten Boden an Stechzylinderproben“. In: *Archiv für Acker- und Pflanzenbau und Bodenkunde* 24.1, S. 1–7. DOI: 10.1080/03650349509365901.
- Schümann, B. (2015). „Beitrag zum dynamischen Dreiphasenmodell für Boden auf Basis der Finite-Elemente-Methode“. Dissertation. Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Geotechnik und Baubetrieb.
- Seki, K. (2007). „SWRC fit - a nonlinear fitting program with a water retention curve for soils having unimodal and bimodal pore structure“. In: *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 4.1, S. 407–437. DOI: 10.5194/hessd-4-407-2007.
- Söhne, W. H. (1958). „Fundamentals of pressure distribution and soil compaction under tractor tires“. In: *Agricultural Engineering* 39.

- Soos, P. von und J. Engel (2017). „Eigenschaften von Boden und Fels – ihre Ermittlung im Labor“. In: *Grundbau-Taschenbuch: Teil 1: Geotechnische Grundlagen*. Wiley, S. 139–242. DOI: 10.1002/9783433607275.ch3.
- Tan, X., X. Wang, S. Khoshnevisan, X. Hou und F. Zha (2017). „Seepage analysis of earth dams considering spatial variability of hydraulic parameters“. In: *Engineering Geology* 228, S. 260–269. DOI: 10.1016/j.enggeo.2017.08.018.
- Tarantino, A. (2009). „A water retention model for deformable soils“. In: *Géotechnique* 59.9, S. 751–762. DOI: 10.1680/geot.7.00118.
- Terzaghi, K. (1936). „The shearing resistance of saturated soils and the angle between the planes of shear“. In: *First international conference on soil Mechanics, 1936*. Bd. 1, S. 54–59.
- Terzaghi, K. (1943). *Theoretical Soil Mechanics*. John Wiley & Sons, Inc. DOI: 10.1002/9780470172766.
- Törzs, T., G. Lu, A. Monteiro, D. Wang, J. Grabe und M. Oeser (2019). „Hydraulic properties of polyurethane-bound permeable pavement materials considering unsaturated flow“. In: *Construction and Building Materials* 212, S. 422–430. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2019.03.201.
- Törzs, T. (2015). „Experimentelle und numerische Untersuchungen zum Feuchtetransport in teilgesättigten Böden“. Masterarbeit. Technische Universität Hamburg-Harburg, Institut für Geotechnik und Baubetrieb.
- Törzs, T., J. Grabe, G. Lu und M. Oeser (2019). „Investigations on microstructure characteristics of porous pavement based on X-ray CT scanning“. In: *7th Asia-Pacific Conference on Unsaturated Soils (AP-UNSAT2019)*. Bd. 7. 2. The Japanese Geotechnical Society, S. 609–614. DOI: 10.3208/jgssp.v07.094.
- Tsiampousi, A., L. Zdravković und D. Potts (2013). „A three-dimensional hysteretic soil-water retention curve“. In: *Géotechnique* 63.2, S. 155–164. DOI: 10.1680/geot.11.p.074.
- van Genuchten, M. T. (1980). „A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils“. In: *Soil Science Society of America Journal* 44.5, S. 892–898. DOI: 10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x.
- Vanapalli, S. K., D. G. Fredlund, D. E. Pufahl und A. W. Clifton (1996). „Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction“. In: *Canadian Geotechnical Journal* 33.3, S. 379–392. DOI: 10.1139/t96-060.
- Vollmert, A. L. (2017). „Zur Gebrauchstauglichkeit geogitter-bewehrter Tragschichten unter zyklisch-dynamischen Beanspruchungen“. Dissertation. Technische Universität Clausthal, Fakultät für Energie- und Wirtschaftswissenschaften.
- Wacker, B., M. Scherkenbach, R. Rabe und G. Golkowski (2016). „Belastungseinrichtung Mobile Load Simulator MLS30: Sensorik zur Beanspruchungsdetektion im ersten gemeinsamen Versuchsbetrieb“. Berichte der Bundesanstalt für Straßenwesen.
- Wang, D., A. Schacht, Z. Leng, C. Leng, J. Kollmann und M. Oeser (2017). „Effects of material composition on mechanical and acoustic performance of poroelastic road surface (PERS)“. In: *Constr. Build. Mater.* 135, S. 352–360. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2016.12.207.

- 
- Wolffersdorff, P.-A. von (1996). „A hypoplastic relation for granular materials with a pre-defined limit state surface“. In: *Mechanics of Cohesive-frictional Materials* 1.3, S. 251–271. DOI: 10.1002/(sici)1099-1484(199607)1:3<251::aid-cfm13>3.0.co;2-3.
- Yang, C., D. Sheng und J. P. Carter (2012). „Effect of hydraulic hysteresis on seepage analysis for unsaturated soils“. In: *Computers and Geotechnics* 41, S. 36–56. DOI: 10.1016/j.compgeo.2011.11.006.
- Zapata, C. E., Y. Y. Perera und W. N. Houston (2009). „Matric Suction Prediction Model in New AASHTO Mechanistic–Empirical Pavement Design Guide“. In: *Transportation research record* 2101.1, S. 53–62.
- Zhang, C. und N. Lu (2019). „Unitary Definition of Matric Suction“. In: 145.2, S. 02818004. DOI: 10.1061/(asce)gt.1943-5606.0002004.
- Zhou, A.-N. (2013). „A contact angle-dependent hysteresis model for soil–water retention behaviour“. In: *Computers and Geotechnics* 49, S. 36–42. DOI: 10.1016/j.compgeo.2012.10.004.
- Zhou, A.-N., D. Sheng, S. W. Sloan und A. Gens (2012). „Interpretation of unsaturated soil behaviour in the stress – Saturation space, I: Volume change and water retention behaviour“. In: *Computers and Geotechnics* 43, S. 178–187. DOI: 10.1016/j.compgeo.2012.04.010.



# Normen und Standards

- American Association of State Highway and Transportation Officials Transportation Officials (1993). AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, 1993.
- ASTM D6836-16 (2016). Standard Test Methods for Determination of the Soil Water Characteristic Curve for Desorption Using Hanging Column, Pressure Extractor, Chilled Mirror Hygrometer, or Centrifuge. ASTM International, West Conshohocken, PA.
- DIN 18127:2012-09 (2012). Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Proctorversuch. Beuth Verlag. DOI: 10.31030/1906160.
- DIN 18130-1:1998-05 (1998). Baugrund - Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung des Wasserdurchlässigkeitsbeiwerts - Teil 1: Laborversuche. zurückgezogen. Beuth Verlag.
- DIN 18137-1:2010-07 (2010). Baugrund, Untersuchung von Bodenproben - Bestimmung der Scherfestigkeit - Teil 1: Begriffe und grundsätzliche Versuchsbedingungen. Beuth Verlag. DOI: 10.31030/1634914.
- DIN EN ISO 11274:2020-04 (2020). Bodenbeschaffenheit – Bestimmung des Wasserrückhaltevermögens – Laborverfahren. Beuth Verlag. DOI: 10.31030/3071987.
- DIN EN ISO 14688-1:2018-05 (2018). Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung. Beuth Verlag. DOI: 10.31030/2748424.
- DIN EN ISO 17892-11:2021-03 (2021). Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 11: Bestimmung der Wasserdurchlässigkeit. Beuth Verlag. DOI: 10.31030/3236129.
- DIN EN ISO 17892-4:2017-04 (2017). Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung. Beuth Verlag. DOI: 10.31030/2362539.
- DIN EN ISO 17892-5:2017-08 (2017). Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 5: Ödometerversuch mit stufenweiser Belastung. Beuth Verlag. DOI: 10.31030/2579350.
- DIN EN ISO 17892-9:2018-07 (o. D.). Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 9: Konsolidierte triaxiale Kompressionsversuche an wassergesättigten Böden. Beuth Verlag. DOI: 10.31030/2791792.
- EAB (2021). Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ (EAB) (2021). DOI: 10.1002/9783433610633.
- EAU (2020). Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Ufereinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen EAU (2020). DOI: 10.1002/9783433610336.
- Merkblatt für versickerungsfähige Verkehrsflächen: M VV (2013). M VV. Köln: Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

Richtlinien für die Standardisierung des Oberbaus von Verkehrsflächen (RStO 12) (2012).

RStO 12. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

Technische Lieferbedingungen für Baustoffgemische und Böden zur Herstellung von Schichten ohne Bindemittel im Straßenbau (2007). TL SoB-StB 04. Ausgabe 2004 / Fassung 2007. Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen.

# Sonstiges

- ANSYS (2022). URL: <https://www.ansys.com/> (besucht am 11.01.2022).
- Bundesanstalt für Straßenwesen (2020). Mobile Load Simulator MLS30. URL: [https://www.bast.de/BASSt\\_2017/DE/Strassenbau/Technik/MLS30.html](https://www.bast.de/BASSt_2017/DE/Strassenbau/Technik/MLS30.html) (besucht am 04.08.2020).
- C St. - Rocky Mountain Arsenal NWR von „USFWS Mountain-Prairie“ (2013). Lizenz: <https://creativecommons.org/licenses/by/2.0/>. URL: <https://flickr.com/photos/usfwsmtmprairie/9822522496> (besucht am 01.03.2022).
- Citation report from Web of Science Core Collection (1950–2020) (2021). URL: <https://apps.webofknowledge.com/> (besucht am 18.05.2021).
- Dassault Systèmes (2019). SIMULIA User Assistance. Abaqus. Dassault Systèmes. URL: <https://help.3ds.com/> (besucht am 04.04.2020).
- Deutsche Forschungsgemeinschaft (2021). Hydraulisch-mechanische Wechselwirkung in wasserdurchlässigen Fahrbahnaufbauten unter Berücksichtigung teilgesättigter Zustände. Projektnummer 285972906. URL: <https://gepris.dfg.de/gepris/projekt/285972906> (besucht am 21.10.2021).
- First Footprints On Another World, NASA (1969). Lizenz: <https://www.nasa.gov/multimedia/guidelines/index.html>. URL: [https://www.nasa.gov/centers/marshall/history/apollo11\\_140718.html](https://www.nasa.gov/centers/marshall/history/apollo11_140718.html) (besucht am 10.01.2022).
- FORTRAN (2022). URL: <https://fortran-lang.org/> (besucht am 11.01.2022).
- GLÖTZL Gesellschaft für Baumesstechnik mbH (2019). URL: <http://www.gloetzl.de> (besucht am 26.09.2019).
- Go (2022). URL: <https://go.dev/> (besucht am 11.01.2022).
- Kyowa Electronic Instruments Co., Ltd. (2019). URL: <https://www.kyowa-ei.com> (besucht am 26.09.2019).
- METER Group AG (2018). Operation Manual HYPROP 2.
- METER Group, Inc. USA (2019). URL: <https://www.metergroup.com> (besucht am 26.09.2019).
- Mini Sand Castle von „drpavloff“ (2012). Lizenz: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc/2.0/>. URL: <https://flickr.com/photos/niceimages/7914786006> (besucht am 02.01.2022).
- Nemes, A., M. Schaap und F. J. Leij (2015). The UNSODA Unsaturated Soil Hydraulic Database Version 2.0. U.S. Salinity Laboratory Riverside CA 92507, USA.
- Schindler, U. (1985). Datensatz UNSODA 2362.
- Shiozawa, S. (1978). Datensatz UNSODA 4800.
- Umweltbundesamt (2021). Bodenversiegelung. URL: <https://www.umweltbundesamt.de/daten/flaeche-boden-land-oekosysteme/boden/bodenversiegelung> (besucht am 21.10.2021).



# Anhang A: Notation

## Lateinische Buchstaben

$c_1^d$	Konstante
$c_2^d$	Konstante
$c_3^d$	Konstante
$c_3^w$	Konstante
$c_2^w$	Konstante
$c_1^w$	Konstante
$D$	Abstand
$h$	Höhe
$x_{Rd}$	Modellparameter
$x_{Rw}$	Modellparameter
$y_d$	Referenzkurve
$y_0$	Modellparameter
$y_R$	Modellparameter
$y_w$	Referenzkurve
$a_L$	Spitzenlast
$C_C$	Krümmungszahl
$C_U$	Ungleichförmigkeitszahl
$D$	Lagerungsdichte
$d$	Durchmesser
$D_{50}$	Korndurchmesser
$D_{pr}$	Verdichtungsgrad

$D_{60}$	Korndurchmesser
$D_{10}$	Korndurchmesser
$D_{30}$	Korndurchmesser
$E$	Elastizitätsmodul
$e$	Porenzahl
$e_{c0}$	Kritische Porenzahl
$e_{d0}$	Minimale Porenzahl
$e_{i0}$	Maximale Porenzahl
$e_{\max}$	Maximale Porenzahl
$e_{\min}$	Minimale Porenzahl
$e_0$	Anfangsporenzahl
$g$	Gravitationsfeldstärke
$h$	Höhe
$h_s$	Granulathärte
$i$	Hydraulisches Gefälle
$I_n$	Verdichtungsgrad
$K$	Permeabilität
$k_f$	Durchlässigkeitsbeiwert
$k_r$	Relative Durchlässigkeit
$k_{r,a}$	Relative Durchlässigkeit der Luftphase
$k_{r,g}$	Relative Durchlässigkeit der Gasphase
$k_{r,w}$	Relative Durchlässigkeit der Wasserphase
$K_s$	Kompressibilität der Einzelkörner
$k_u$	Teilgesättigte hydraulische Leitfähigkeit
$l$	Kantenlänge/Länge
$\max\Delta S_r$	Maximale Differenz des Sättigungsgrads
$M_R$	Resilient Modulus

---

$m_R$	Steifigkeitsfaktor
$m_T$	Steifigkeitsfaktor
$m_{VG}$	Modellparameter
$n$	Porenanteil
$n_B$	Exponent
$n_{\max}$	Minimaler Porenanteil
$n_{\min}$	Maximaler Porenanteil
$n_{VG}$	Modellparameter
$p_{eVG}$	Modellparameter
$pF$	$p$ = Potenz, $F$ = freie Energie des Wassers
$p_g$	Porenluftdruck
$p_L$	Auflastspannung
$p_w$	Porenwasserdruck
$p_{w1}$	Konstante
$p_{w0}$	Konstante
$R$	maximale intergranulare Dehnung
$s$	Saugspannung
$s_{AEV}$	Lufttrittspunkt
$S_e$	Effektiver Sättigungsgrad
$S_r$	Sättigungsgrad
$S_{r,a}$	Sättigungsgrad der Gasphase
$S_{r,entrap}$	Sättigungsgrad mit Lufteinschluss
$S_{r,\max}$	Maximaler Sättigungsgrad
$S_{r,\min}$	Minimaler Sättigungsgrad
$S_{r,0}$	Minimaler Sättigungsgrad (0%)
$S_{r,w}$	Sättigungsgrad der Wasserphase
$s_{WEV}$	Wassereintrittspunkt

$t$	Zeit
$t_d$	Konstante
$t_1$	Zeit zum Zeitpunkt 1
$t_{\text{step}}$	Simulationsschrittzeit
$t_0$	Zeit zum Zeitpunkt 0
$u_a$	Porenluftdruck
$u_w$	Porenwasserdruck
$u_x$	Horizontale Verschiebung
$u_y$	Vertikale Verschiebung
$V$	Gesamtvolumen
$v$	Geschwindigkeit
$V_a$	Volumen des Wassers
$v_f$	Filtergeschwindigkeit
$v_L$	Geschwindigkeit
$V_s$	Volumen des Feststoffs
$V_v$	Porenvolumen
$V_w$	Volumen der Luft
$\text{GwSp}_{\text{init}}$	Initialer Grundwasserspiegel
$x$	Abszisse, Achsenbezeichnung
$y$	Ordinate, Achsenbezeichnung
$a$	Maximum Spitzenlast
$b$	Kontextabhängig: Breite / Ort Spitzenlast
$c$	Modellparameter
$w$	Gravimetrischer Wassergehalt

**Griechische Buchstaben**

$\alpha$	Kontextabhängig: Koeffizient, Exponent
$\beta$	Kontextabhängig: Koeffizient, Exponent

---

$\beta_d$	Modellparameter
$\beta_1$	Modellparameter
$\beta_2$	Modellparameter
$\beta_w$	Modellparameter
$\bar{\lambda}$	Steigung
$\lambda_d$	Modellparameter
$\bar{\lambda}_d$	Steigung
$\lambda_0$	Gerade
$\lambda_1$	Gerade
$\lambda_2$	Gerade
$\lambda_w$	Steigung
$\bar{\lambda}_w$	Steigung
$\alpha$	Exponent
$\alpha_{VG}$	Modellparameter
$\beta$	Exponent
$\beta_r$	Faktor
$\chi$	Faktor
$\varepsilon_1$	Axiale Dehnung
$\varepsilon_3$	Radiale Dehnung
$\varepsilon_v$	Volumendehnung
$\mu$	Dynamische Viskosität des Fluids
$\nu$	Querkontraktionszahl
$\Psi$	Totale Saugspannung
$\psi_m$	Matrixpotenzial
$\psi_o$	Osmotisches Potenzial
$\rho$	Feuchtdichte
$\rho_a$	Partialdichte der Luft

$\rho_d$	Lagerungsdichte
$\rho_{d,\max}$	Maximale Lagerungsdichte
$\rho_{d,\min}$	Minimale Lagerungsdichte
$\rho_{Pr}$	Proctordichte
$\rho_s$	Korndichte
$\rho_w$	Partialdichte von Wasser
$\sigma$	Totale Spannung
$\sigma_1$	Axiale totale Spannung
$\sigma'$	Effektive Spannung
$\sigma_s$	Suction-Stress
$\sigma_3$	Radiale totale Spannung
$\sigma_2$	Radiale totale Spannung
$\sigma_y$	Vertikale totale Spannung
$\theta$	Volumetrischer Wassergehalt
$\theta_{\max}$	Maximaler volumetrischer Wassergehalt
$\varphi_c$	Kritischer Reibungswinkel

### **Konstanten**

$e$	Eulersche Zahl
-----	----------------

### **Abkürzungen**

UEL	Abaqus Subroutine User-defined elements
UMAT	Abaqus Subroutine User-defined mechanical material behavior
ADVDCSS	Combined Advanced Dynamic Cyclic Simple Shear
FEM	Finite-Elemente-Methode
HM	hysteretic model
HYPROP	<b>HY</b> draulic <b>PROP</b> erty analyser
NHM	non-hysteretic model
PU	Polyurethan

---

PUPM	polyurethane-bound pervious mixture
PUR	Polyurethan
REV	representative elementary volume
SSCC	suction stress characteristic curve
SWCC	soil-water characteristic curve
SWCS	soil-water characteristic surface(s)
WRC	water retention curve

### **Abkürzungen im Text**

bzw.	beziehungsweise
D. h./d. h.	Das heißt/das heißt
etc.	et cetera
o. g.	oben genannte/r/s
rd.	rund
sog.	sogenannte/r/s
u. a.	Kontextabhängig: unter anderem / und andere
vgl.	vergleiche
Z. B./z. B.	Zum Beispiel/zum Beispiel

### **Elementtypen in Abaqus/Standard**

CPE8P	8-node plane strain quadrilateral, biquadratic displacement, bilinear pore pressure
U4P4	Benutzerdefiniertes quadrilaterales Element erster Ordnung (4 Knoten)
U8P8	Benutzerdefiniertes quadrilaterales Element zweiter Ordnung (8 Knoten)

### **Institutionen, Gesellschaften etc.**

BaSt	Bundesanstalt für Straßenwesen
DFG	Deutsche Forschungsgemeinschaft
FGSV	Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen e. V.
NASA	National Aeronautics and Space Administration

RWTH Rheinisch-Westfälisch Technische Hochschule Aachen

TUHH Technische Universität Hamburg

# Anhang B: Modellierung des Verformungsverhaltens granularer Böden

## Numerische Simulation von Elementversuchen

Zur Validierung der in Tabelle B1 angegebenen Parameter für das verwendete hypoplastische Materialmodell nach Wolffersdorff (1996) und Niemunis und Herle (1997) werden im Folgenden die Ergebnisse von Laborversuchen und Simulationen gegenübergestellt. Zum einen sind die zugrunde liegenden Ergebnisse von Ödometerversuchen nach DIN EN ISO 17892-5:2017-08, vgl. Abbildung B1 (a), und CD-Triaxialversuchen nach DIN EN ISO 17892-9:2018-07, vgl. Abbildung B1 (b), abgebildet. Die zugrunde liegenden Daten wurden der Datenbank des Labors des Institut für Geotechnik und Baubetrieb der TUHH entnommen. Zum anderen wurden numerische Elementversuche durchgeführt, um das in die verwendete dynamische Dreiphasenformulierung hypoplastische Materialmodell anhand der experimentell ermittelten Daten zu validieren. Verwendet wurden benutzerdefinierte axialsymmetrische Elemente UEL vom Typ U4P4. Die Gegenüberstellungen sind in Abbildungen B2 und B3 für ISS-0 Sand sowie in Abbildungen B4 und B5 für Hamburger Sand dargestellt.

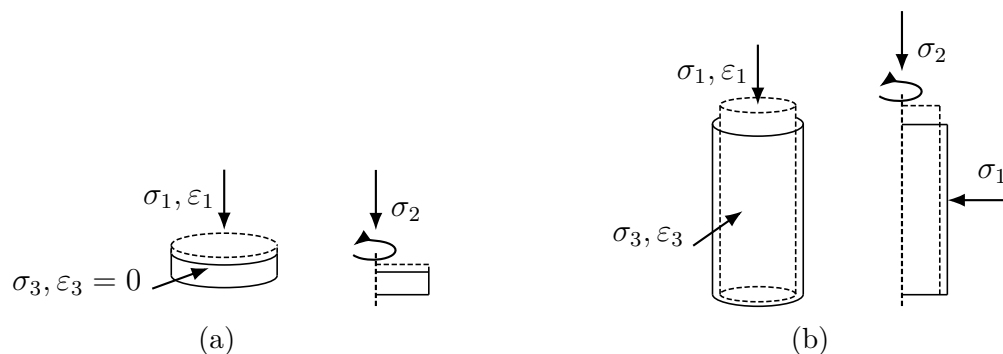


Abbildung B1: Laborbedingungen und axial-symmetrisches FE-Modell des (a) Ödometerversuchs und (b) CD-Triaxialversuchs.

## Parameter für das verwendete hypoplastische Materialmodell

Tabelle B1: Parameter für das verwendete hypoplastische Materialmodell für ISS-0 Sand nach Qiu (2012) und für Hamburger Sand in Anlehnung an Kaya (2016).

Symbol	Bezeichnung	Einheit	ISS-0	HH
Hypoplastizität (Wolffersdorff, 1996)				
$\varphi_c$	Kritischer Reibungswinkel	°	32,00	31,00
$h_s$	Granulathärte	MPa	13000	4000
$n_B$	Exponent	–	0,240	0,290
$e_{i0}$	Maximale Porenzahl	–	1,170	0,935
$e_{c0}$	Kritische Porenzahl	–	1,020	0,813
$e_{d0}$	Minimale Porenzahl	–	0,600	0,526
$\alpha$	Exponent	–	0,080	0,164
$\beta$	Exponent	–	0,220	2,180
Intergranulare Dehnung (Niemunis und Herle, 1997)				
$m_T$	Steifigkeitsfaktor	–	2,0	2,0
$m_R$	Steifigkeitsfaktor	–	5,0	5,0
$R$	max. intergr. Dehnung	–	$1,0 \times 10^{-4}$	$1,0 \times 10^{-4}$
$\beta_r$	Faktor	–	0,5	0,5
$\chi$	Faktor	–	6,0	5,0

## ISS-0 Sand

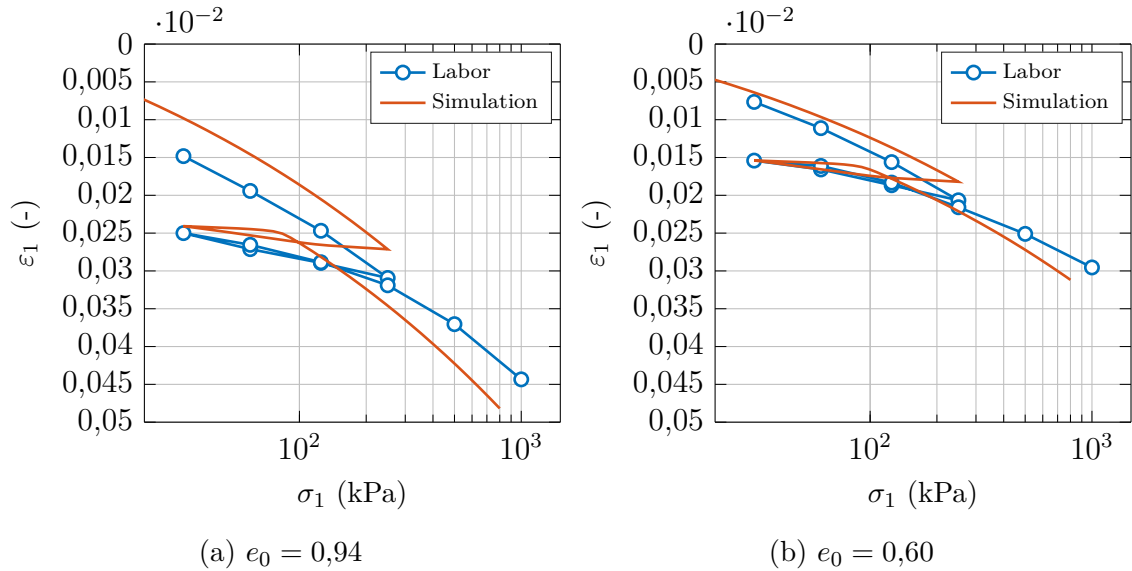


Abbildung B2: Vergleich der simulierten Elementversuche mit experimentell erhobenen Daten. Ödometerversuche mit (a) locker gelagertem und (b) dicht gelagertem ISS-0 Sand. Daten aus Qiu (2012).

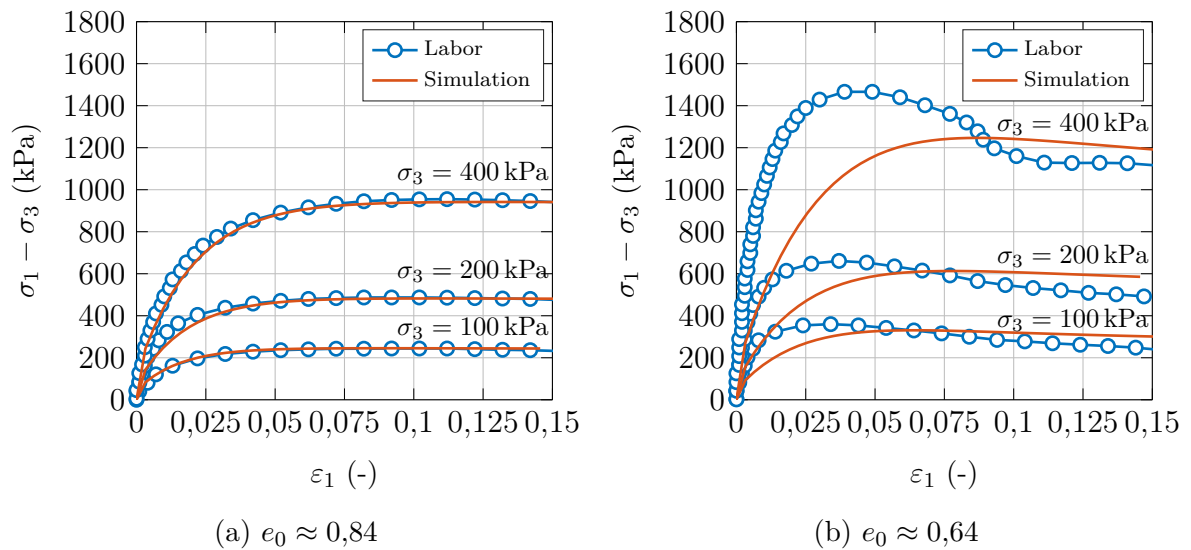


Abbildung B3: Vergleich der simulierten Elementversuche mit experimentell erhobenen Daten. CD-Triaxialversuche mit (a) locker gelagertem und (b) dicht gelagertem ISS-0 Sand bei variablem Seitendruck  $\sigma_3$ . Daten aus Qiu (2012).

**Hamburger Sand**

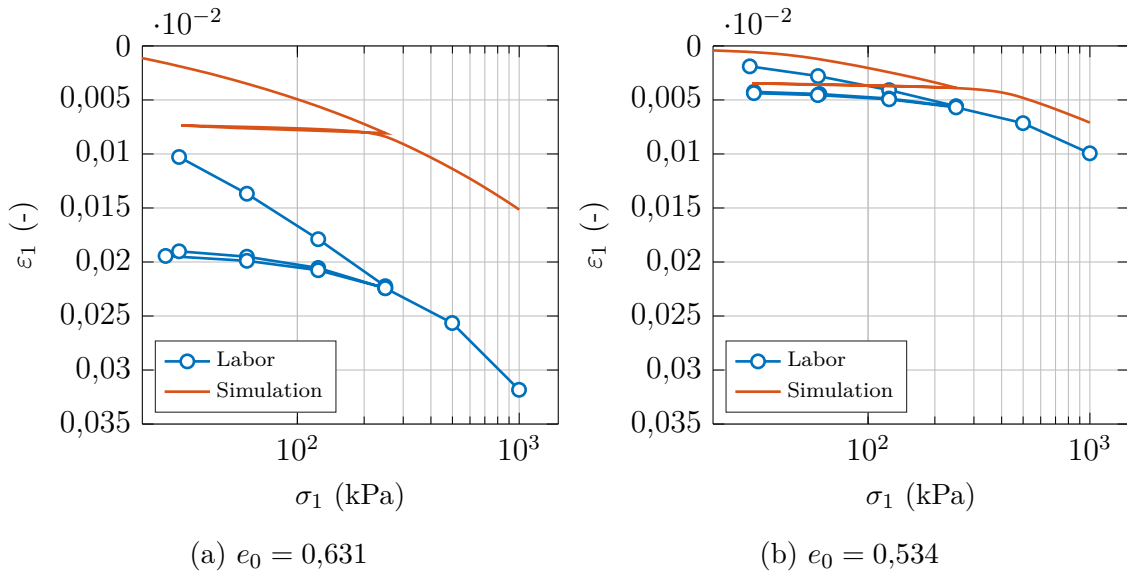


Abbildung B4: Vergleich der simulierten Elementversuche mit experimentell erhobenen Daten. Ödometerversuche mit (a) locker gelagertem und (b) dicht gelagertem Hamburger Sand. Daten entnommen aus Kaya (2016).

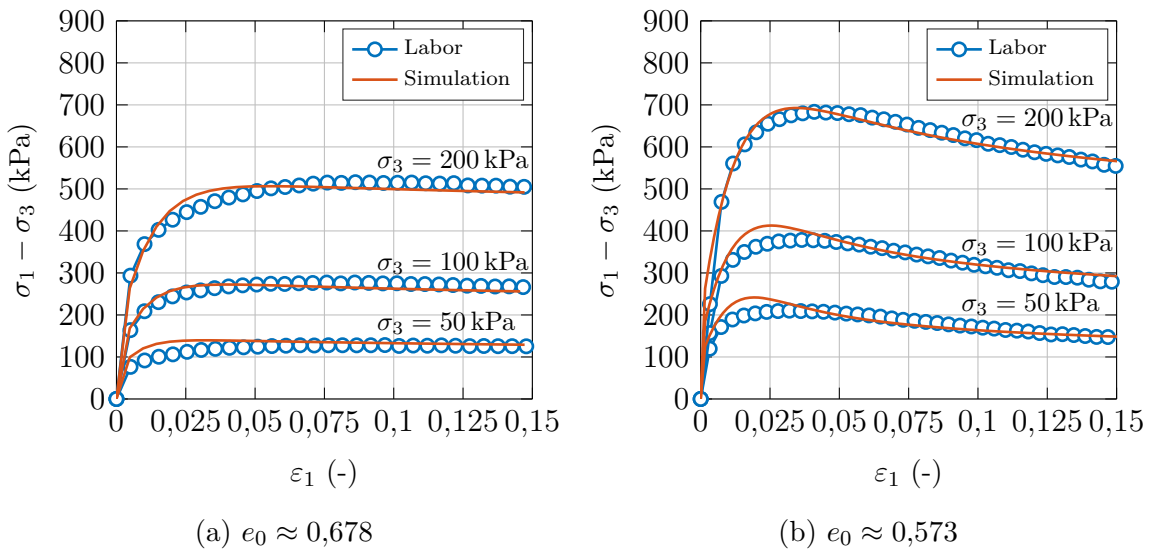


Abbildung B5: Vergleich der simulierten Elementversuche mit experimentell erhobenen Daten. CD-Triaxialversuche mit (a) locker gelagertem und (b) dicht gelagertem Hamburger Sand bei variablem Seitendruck  $\sigma_3$ . Daten entnommen aus Kaya (2016).

## Teilgesättigte CD-Triaxialversuche mit monotoner mechanischer Belastung

Diese Kapitel beschreibt FE-Simulationen von Triaxialversuchen mit monotoner mechanischer Belastung bei verschiedenen Sättigungsgraden. Hierbei wird das erweiterte Prinzip der effektiven Spannungen angewendet, vgl. Kapitel 2.1.2.2. So wird der Einfluss teilgesättigter Zustände auf das Verformungsverhalten – speziell auf die Scherfestigkeit – der zwei im Rahmen dieser Arbeit verwendeten granularen Sande, ISS-0 Sand und Hamburger Sand, untersucht. Ausgehend von den validierten Parametersätzen zur Beschreibung des Verformungsverhaltens der Feststoffphase für trockene bzw. gesättigte Zustände wird das teilgesättigte Verformungsverhalten prognostiziert.

### Beschreibung

In Anlehnung an die DIN EN ISO 17892-9:2018-07, welche die Durchführung konsolidierter triaxialer Kompressionsversuche an wassergesättigten Böden regelt, werden zur Ermittlung des Einflusses auf die Scherfestigkeit der o. g. granularen Böden teilgesättigte Triaxialversuche bei verschiedenen Sättigungsgraden simuliert.

Bei den simulierten Versuchen handelt es sich um teilgesättigte CD-Triaxialversuche. Hierbei steht das C für konsolidiert und das D für drainiert). Im Laborversuch wird die Manteloberfläche einer zylindrischen Bodenprobe durch eine Latexmembran umschlossen. Die an der Ober- und Unterseite durch Endplatten begrenzte Probe befindet sich in der Triaxialzelle, in der der Radialdruck  $\sigma_3$  durch den umliegenden Wasserdruck gesteuert wird. Nach isotroper Belastung, d. h. unter Ansatz einer totalen Spannungen von gleichem Wert in axialer Richtung  $\sigma_1$  und radialer Richtung  $\sigma_3$ , wird der Grenzzustand der Probe durch kontinuierliche vertikale Zusammendrückung bei geöffnetem Drainagekanal herbeigeführt, vgl. u. a. Kolymbas (2016).

### Simulation

In Anlehnung an die in Schümann (2015) beschriebenen Simulationen von Triaxialversuchen an bindigen Böden, wird bei der Modellierung davon ausgegangen, dass sich den drainierten Bedingungen entsprechend sowie aufgrund der geringen Schergeschwindigkeit keine Porenwasserdrücke aufbauen. Demnach werden statische Analysen durchgeführt. Unter Verwendung eines rotationssymmetrischen Modells werden idealisierte Elementversuche an einem axialsymmetrischen benutzerdefinierten finiten Element UEL vom Typ U4P4 durchgeführt. Der Triaxialversuch ist in Abbildung B1 (b) schematisch für Laborbedingungen und idealisiert als axialsymmetrisches FE-Modell abgebildet. In Einklang mit der DIN EN ISO 17892-9:2018-07 wird die Geometrie des zylindrischen Probekörpers mit  $H/D = 2,5$  ( $H =$  Höhe,  $D =$  Durchmesser) modelliert.

Das Verformungsverhalten des Korngerüsts wird mit dem in Kapitel 5.1 beschriebenen hypoplastischen Materialmodell nach von Wolffersdorff (1996) mit Erweiterungen nach Niemunis und Herle (1997) abgebildet. Die Validierung der zugrunde liegenden Material-

parameter für ISS-0 Sand sowie Hamburger Sand für trockene bzw. drainierte gesättigte Zustände ist in Anhang B dargestellt. Die angesetzten Parametersätze basieren auf Qiu (2012) für ISS-0 Sand sowie Kaya (2016) für Hamburger Sand, vgl. Kapitel 5.1.

Die Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung der untersuchten Sande wird über die Formulierung nach van Genuchten (1980) angesetzt. Zugrunde liegende Messdaten zu der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung sowie die Kurvenanpassung sind in Abbildung B6 dargestellt. Die auf der Methode der kleinsten Quadrate basierende Kurvenanpassung zur Ermittlung der Modellparameter nach van Genuchten (1980) erfolgt mithilfe des in Seki (2007) vorgestellten Computerprogramms. Die für die Simulationen angesetzten initialen Saugspannungs-Sättigungs-Zustände sind in der Abbildung hervorgehoben. Diese wurden so ausgewählt, dass folgende relevanten Zustände mit den Simulationen abgedeckt werden:

1. vollständig gesättigt, d. h.  $S_r = S_{r,\max}$
2. Lufttrittspunkt, d. h.  $s \approx s_{\text{AEV}}$
3. Maximale Änderungsrate der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung, d. h.  $\max dS_r/ds$
4. Beginn der residualen Zone, d. h.  $s \approx s_{\text{WEV}}$
5. Residualzustand, d. h.  $S_r \approx S_{r,\min}$

Die verwendeten Materialparameter zur Beschreibung der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung sind in Tabelle 4.4 bzw. und in Tabelle 4.5 in Kapitel 4.3.2 zusammengestellt.

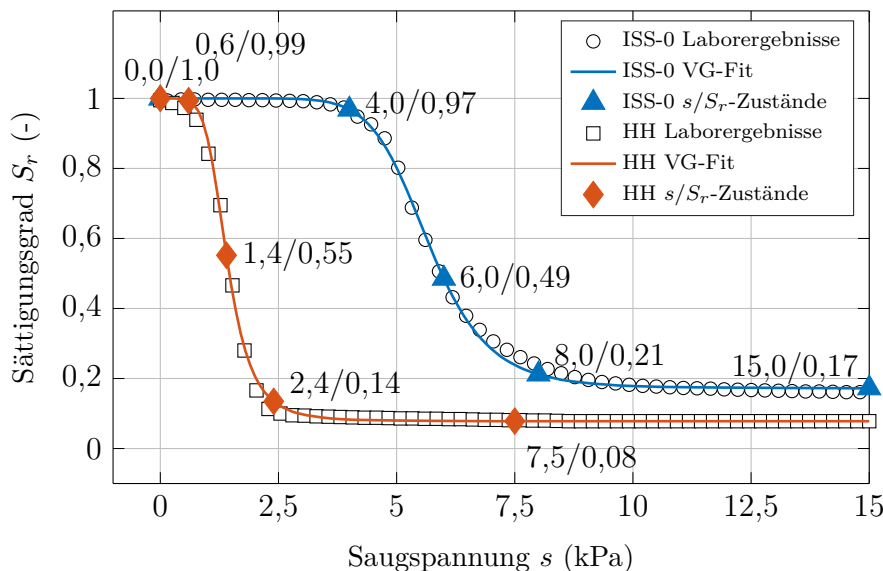


Abbildung B6: Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung von ISS-0 Sand und Hamburger Sand mit Kurvenanpassung nach van Genuchten (1980) sowie in den Simulationen angesetzte initiale Saugspannungs-Sättigungs-Zustände.

Um ein realistisches Verhalten im Bereich geringer Sättigungsgrade abzubilden, wird der Bishop-Parameter  $\chi$  in der Gleichung der effektiven Spannungen mit  $S_e$  gleichgesetzt, was dem Ansatz des in Kapitel 2.1.2.2 erläuterten Suction-Stress-Konzepts entspricht. Die sich hieraus für die beiden Sande ergebenden Zusammenhänge zwischen Suction-Stress  $\sigma_s$  und

der Saugspannung  $s$  bzw. zwischen Suction-Stress  $\sigma_s$  und dem Sättigungsgrad  $S_r$  sind in Abbildung B7 in Form der Suction-Stress-Characteristic-Curve (SSCC) dargestellt. Die Verläufe der Kurven zeigen den typischen Verlauf für granulare Böden, vgl. N. Lu, Godt u. a. (2010). Weiterhin korrespondieren die Kurven mit den in Abbildung B6 dargestellten Verläufen der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung, die das SSCC-Modell als Eingangsparameter verwendet.

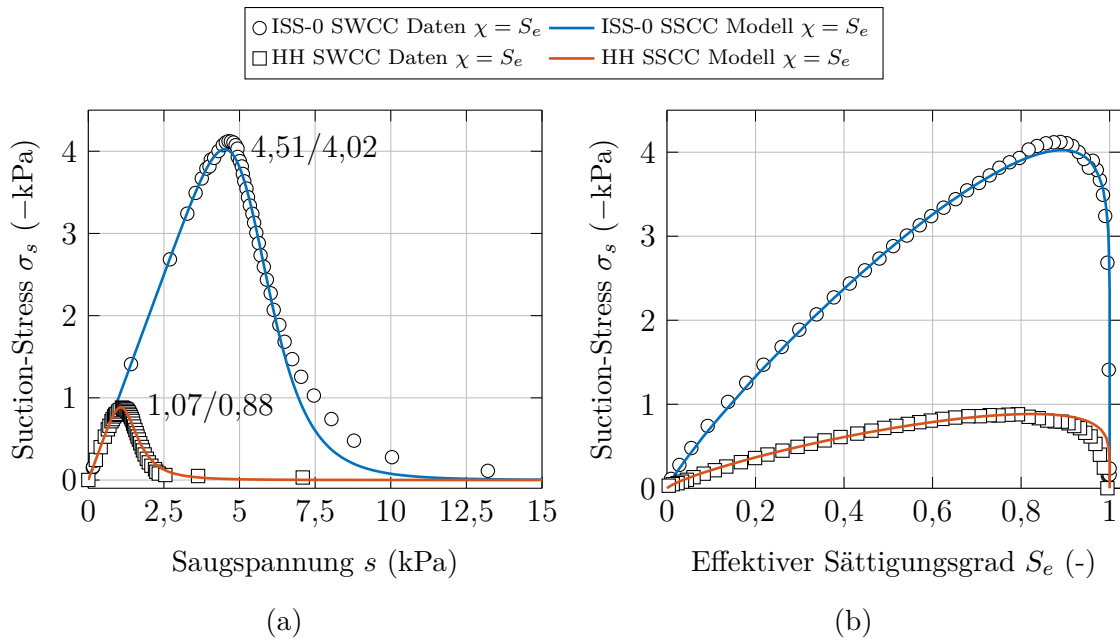


Abbildung B7: Aus den Kapillardruck-Sättigungs-Beziehungen von ISS-0 Sand und Hamburger Sand modellierte Suction-Stress-Characteristic-Curve dargestellt über (a) die Saugspannung  $s$  sowie (b) den effektiven Sättigungsgrad  $S_e$ .

Die Anfangsporenzahlen betragen entsprechend lockerer, mitteldichter und dichter Lagerung  $e_0 = 0,805$ ,  $0,663$  und  $0,520$  für Hamburger Sand und  $e_0 = 1,020$ ,  $0,810$  und  $0,599$  für ISS-0 Sand. Diese entsprechen jeweils den Verdichtungsgraden von  $I_n = 0,25/0,5/0,75$ .

Der initiale Zustand der Simulation sieht einen Anfangsspannungszustand vor, bei dem die axiale und radiale totale Spannung identisch sind:  $\sigma_1 = \sigma_3 = 50,0$  kPa. Die radiale Spannung  $\sigma_3 = 50,0$  kPa entspricht einer für statische Bedingungen in einer Tragschicht mit und ohne Asphaltdeckschichten als charakteristisch anzunehmenden Größenordnung, vgl. Vollmert (2017). Für die Simulationen bei ausgewählten Saugspannungs-Sättigungs-Zuständen werden zum einen der Porenluftdruck auf  $u_a = 0$  gesetzt und zum anderen der Porenwasserdruck  $u_w$  entsprechend den in Abbildung B6 dargestellten Saugspannungen  $s$  eingestellt.

Der Abschervorgang wird in dem folgenden Simulationsschritt bei konstanten totalen Spannungen weggesteuert durch Vorgabe der vertikalen Verschiebung der Probenoberkante simuliert. Der in einem statischen Simulationsschritt vorgegebene Scherweg, d. h. die an der Probenoberkante angesetzte vertikale Verschiebung, beträgt  $u_y = 0,15h_0$ .

### Ergebnisse

Die mit verschiedenen Anfangsporenzahlen und den in Abbildung B6 vorgegebenen initialen Saugspannungs-Sättigungs-Zuständen durchgeführten Simulationen verdeutlichen den Zuwachs der Scherfestigkeit in Abhängigkeit des Sättigungsgrads. In Abbildung B8 und Abbildung B9 ist das Verformungsverhalten im triaxialen Spannungszustand für Hamburger Sand und für ISS-0 Sand dargestellt. Es sind die maximale Schubspannung  $(\sigma_1 - \sigma_3)/2$  sowie die Volumendehnung  $\varepsilon_v$  jeweils über die axiale Dehnung  $\varepsilon_1$  dargestellt. Die geringsten Scherfestigkeiten der untersuchten Sande ergeben sich für trockene bzw. drainierte gesättigte Zustände. Die auf die Teilsättigung zurückzuführende maximale Steigerung der Scherfestigkeit wird für Hamburger Sand bei  $u_w = -1,4$  kPa und für ISS-0 Sand bei  $u_w = -4,0$  kPa erreicht. Diese Porenwasserdrücke entsprechen – bei Umkehr des Vorzeichens – den Saugspannungen, die den geringsten Abstand zu den Maximalwerten der Suction-Stress  $\sigma_s$  in Abbildung B7 (a) aufweisen. Die prozentuale Steigerung der Scherfestigkeit beträgt für Hamburger Sand 1,0% bis 1,43 %. Hierbei tritt die größte Steigerung bei einer Anfangsporenzahl von  $e_0 = 0,805$ , entsprechend einer lockeren Lagerung, auf. Für ISS-0 Sand beträgt die Scherfestigkeitssteigerung 7,32% bis 7,67%. Für eine lockere Lagerung liegt erneut der höchste Wert vor. Die teilgesättigten Zustände haben auf die Volumendehnung lediglich einen minimalen Einfluss. Diese Beobachtungen sind konsistent mit den in Milatz (2016) beschriebenen Erkenntnissen zu der Simulation von teilgesättigten Triaxialversuchen an einem vergleichbaren Sand.

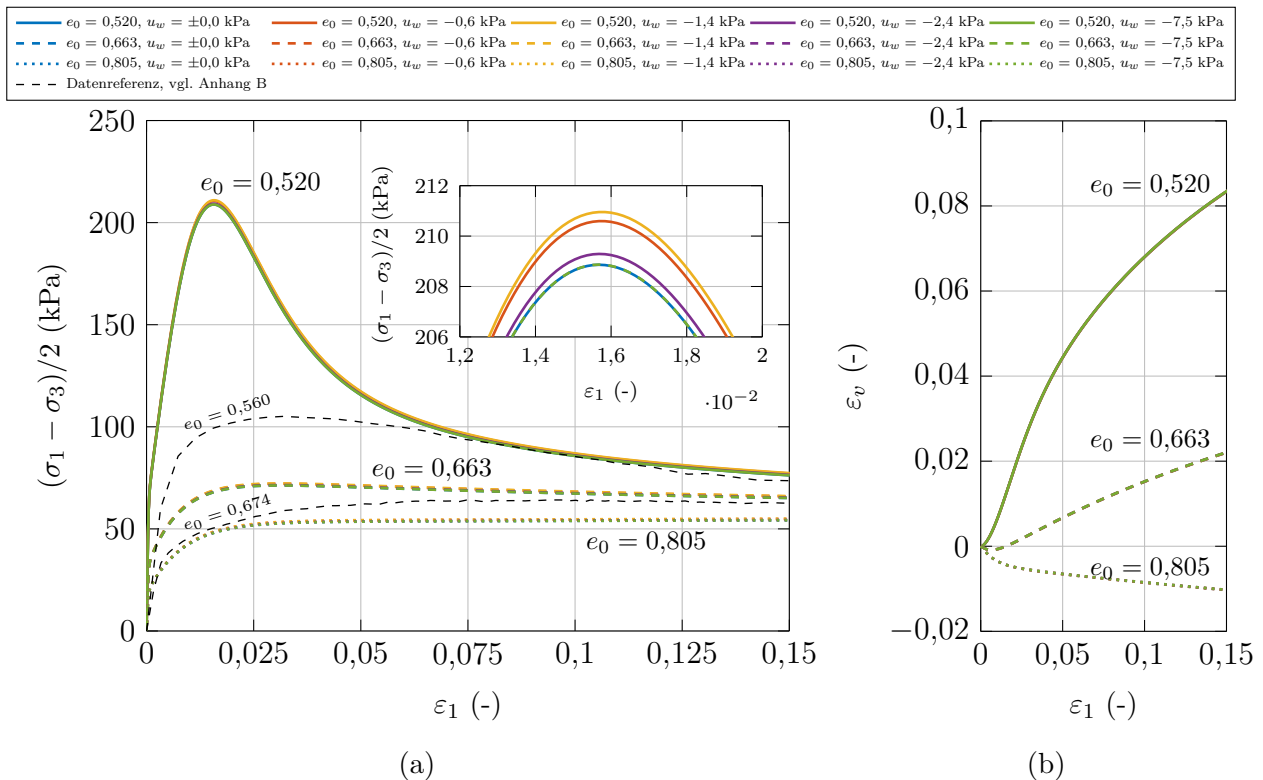


Abbildung B8: Simulationsergebnisse teilgesättigter Triaxialversuche an Hamburger Sand: (a) Arbeitskurven und (b) Volumendehnungskurven.

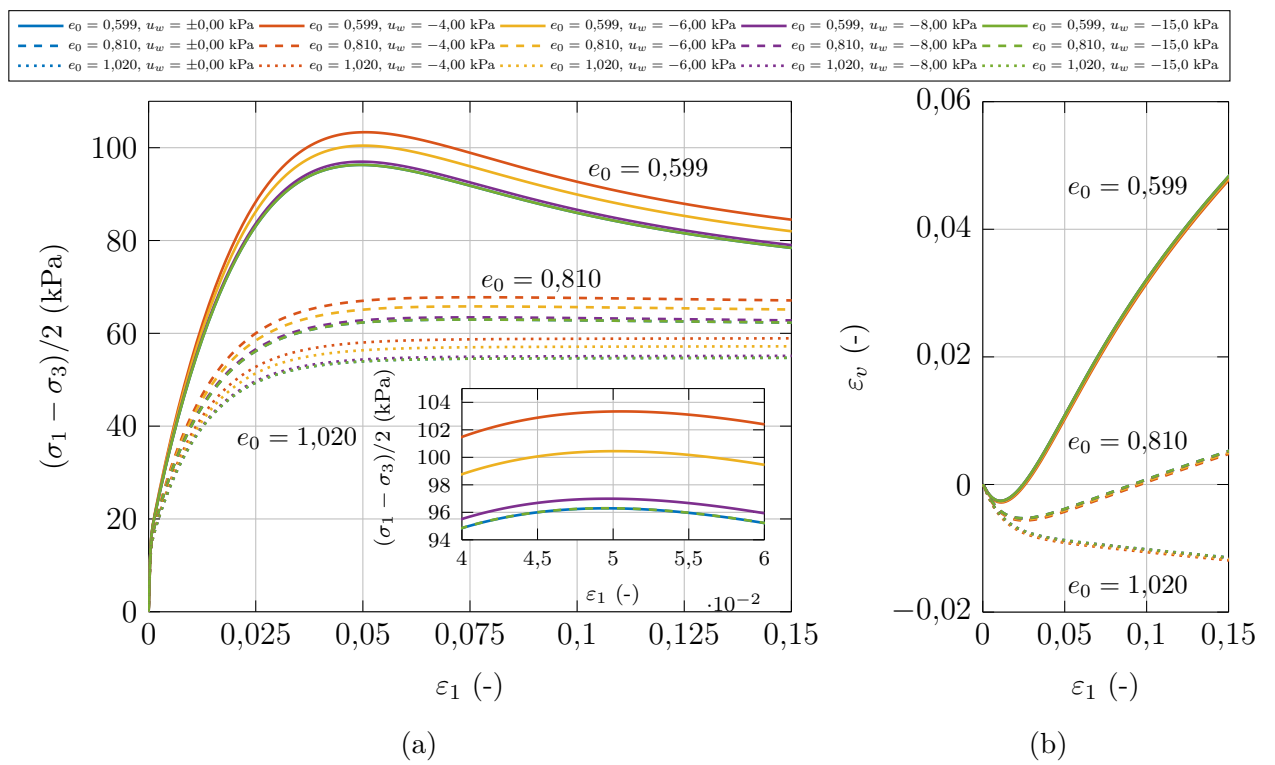


Abbildung B9: Simulationsergebnisse teilgesättigter Triaxialversuche an ISS-0 Sand: (a) Arbeitskurven und (b) Volumendehnungskurven.



# Anhang C: Optimierung des Versuchsstands mit der hängenden Wassersäule

Wie in Kapitel 4.3.2 beschrieben, hat die Geometrie, speziell die Höhe, der untersuchten Proben des PU-gebundenem Deckschichtmaterials einen Einfluss auf die gemessene Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung. Um eine möglichst geringe Probenhöhe wählen zu können, wurden Untersuchungen mittels bildgebender Verfahren durchgeführt. In diesem Zuge wurde das kleinste repräsentative Elementvolumen (REV) bestimmt, vgl. Törzs, Grabe u. a. (2019). Das REV ist das kleinste Volumen eines porösen Mediums, dessen Eigenschaften repräsentativ für die Eigenschaften des gesamten Volumens sind, vgl. Bear (1979). Daher kann die Kantenlänge des REV als Mindesthöhe einer Probe angesehen werden.

Zwei verschiedene Zusammensetzungen des PU-gebundenem Deckschichtmaterials – PUPM-Typ A und PUPM Typ B – wurden in einem Computertomographen (CT) untersucht. Die verwendete CT-Anlage befindet sich im Laboratoire 3SR der Université Grenoble Alpes, vgl. Milatz (2020) und Milatz, Hüsener u. a. (2021). Mit dem Ziel eine hohe Bildqualität zu erhalten, wurden die Proben mit einer isotropen Voxelkantenlänge von  $30\ \mu\text{m}$  viermal gescannt und die Bilddaten gemittelt (sog. averaging). Verwendete Scanningparameter sind in Tabelle C1 zusammengefasst.

Tabelle C1: Eigenschaften des am Laboratoire 3SR verwendeten CT-Scanners.

Parameter	Wert (Einheit)
Spannung der Röntgenröhren	120 kVp
Stromstärke der Röntgenröhre	$250\ \mu\text{A}$
Projektionen/360°-Umdrehung	1200 (–)
Isotrope Voxelgröße	$30\ \mu\text{m}$
Aufnahmezeit	ca. 3,5 h
Aufnahmemodus	Helikoidal (–)

Nach der Datenaufbereitung und Segmentierung der Teilvolumen in die drei Phasen – Luft, PU-Binder und Gesteinskörner – folgt die Auswertung zur Bestimmung der REV's. Das Vorgehen wird in Törzs, Grabe u. a. (2019) beschrieben. In Abbildung C1 sind die Arbeitsschritte dargestellt, die durchgeführt wurden, um aus den Rohdaten segmentierte Volumen zu erreichen. In Abbildung C2 sind die segmentierten und separierten dreidimensionalen Volumina abgebildet.

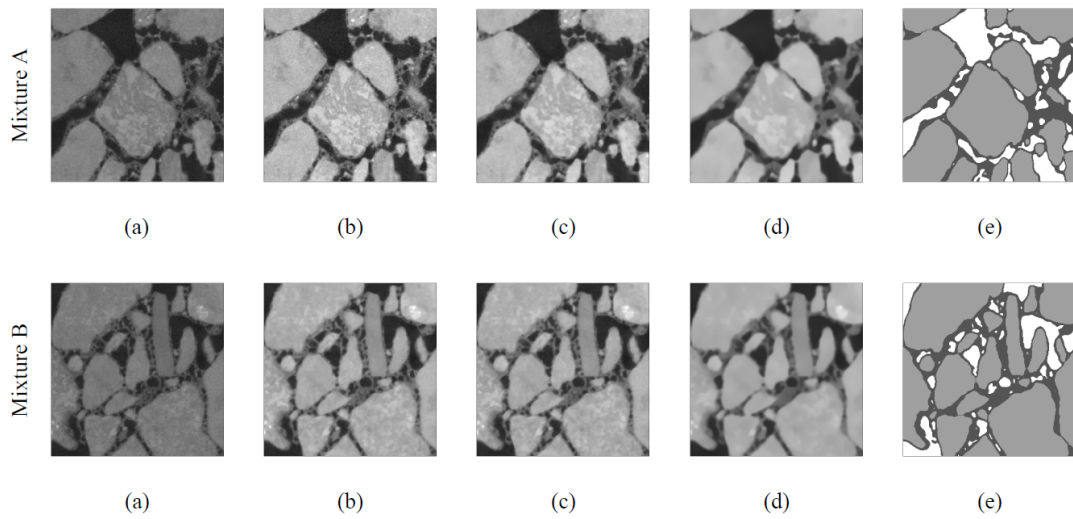


Abbildung C1: Arbeitsablauf von den Rohbilddaten zu segmentierten Bilddaten für PUPM Typ A und PUPM Typ B: (a) Rohbilddaten, (b) Greyscale Histogramm Normalisierung, (c) Median Filter, (d) Non-local means Filter, (e) Label fields: weiß - Luft, dunkelgrau - PU, hellgrau - Gesteinskörnung. Dargestellt sind Details mit einer Kantenlänge von 335 px aus den Zentren der jeweiligen Proben in vertikaler Richtung. Abbildung aus Törzs, Grabe u. a. (2019).

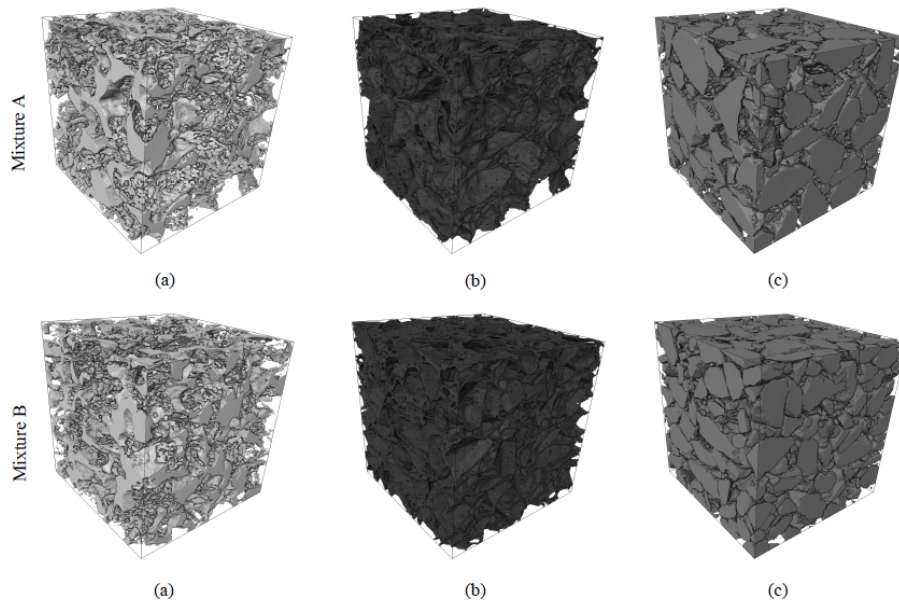


Abbildung C2: Segmentierte und separierte Phasen von PUPM Typ A (oben) und PUPM Typ B (unten). Von links nach rechts: (a) Luft, (b) PU-Binder und (c) Gesteinskörnung. Die Kantenlänge beträgt in allen Volumina 800 px. Abbildung aus Törzs, Grabe u. a. (2019).

Abbildung C3 zeigt das Ergebnis der REV-Studie. Die zugrunde liegenden Algorithmen sind in Törzs, Grabe u. a. (2019) zusammengefasst. Mit Berücksichtigung fertigungstechnischer Aspekte, wurde die kleinste Kantenlänge des REVs auf 333,33 px festgelegt. Das entspricht bei einer Kantenlänge der Voxel von  $30\ \mu\text{m}$  einer Probenhöhe von 10,0 mm.

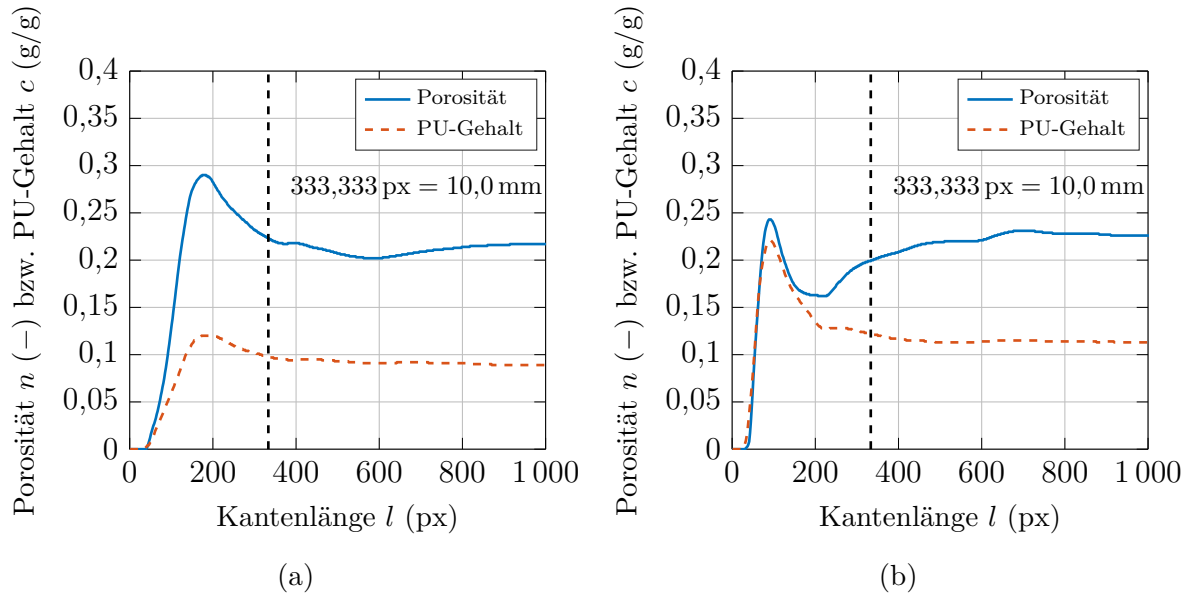


Abbildung C3: Dreidimensionale Studie zum repräsentativen Elementvolumen in Abhängigkeit der Porosität  $n$  (—) und dem Polyurethangehalt  $c$  (g/g) für die PU-Rezepturen A und B. Abbildung nach Törzs, Grabe u. a. (2019).



# Anhang D: Implementierung des SWCC-Modells in MATLAB®

Skript D1: MATLAB® initiieren, Parameterdefinition und Programmaufruf.

```
1 %% pedrosoRetentionModel
2 % MATLAB implementation of a nonlinear liquid retention model
   based on the concept of references (Pedroso DM and Williams
   DJ (2010))
3 %
4 % Tom Törzs TUHH 2019–2021
5
6 %% initialize script
7 clearvars
8 close all
9 clc
10
11 %% add global functions and settings path to search directory
12 addpath(genpath(['.' filesep 'auxiliary']));
13
14 %% set TeX interpreter
15 set(0, 'defaultTextInterpreter', 'latex');
16 set(groot, 'defaultLegendInterpreter', 'latex');
17 set(groot, 'defaultAxesTickLabelInterpreter', 'latex');
18
19 %% add colors
20 load('standardColors.mat');
21
22 %% start timer
23 tic
24
25 %% model
26
27 % sand parameters
28 n = 0.333; % porosity (-)
29 lambdad = 2.8; % parameter
30 lambdaw = 2.8; % parameter
31 xrd = 0.88; % parameter (kPa)
32 xrw = 0.7; % parameter (kPa)
```

```

33 betad = 3.0; % parameter
34 betaw = 5.0; % parameter
35 beta1 = 1.8; % parameter
36 beta2 = 5.0; % parameter
37 y0 = 1.0; % initial y0 = Sr,max
38 yr = 0.04; % initial yr = Sr,min
39 ndiv = 1000; % increments between base points
40 sModel_base = [0 3 1 4 0.5 1.75 0]; % suction base points for
    the model
41 SrModel_base = []; % saturation base points for the model
42 nowet = 'false'; % true == disregard wetting path
43 logModel = 'true'; % true == logarithmic model formulation
44 sModel = 'true'; % true == suction based model // false ==
    saturation based model
45 livePlot = 'false'; % true == plot simultaneously (caution:
    might be very time consuming)
46 param = {n, lambdad, lambdaw, xrd, xrw, betad, betaw, beta1,
    beta2, ...
47     y0, yr, ndiv, sModel_base, SrModel_base, nowet, logModel, ...
48     sModel, livePlot};
49
50 % run model
51 [s, Sr] = swccPedr(param);

```

## Skript D2: Programm.

```

1 function [s, Sr] = swccPedr(param)
2 % swccPedr
3
4 %% read parameters
5 if size(param,2) ~= 18
6     fprintf('error 1\n')
7     return
8 end
9 n = param{1}; % porosity (-)
10 lambdad = param{2}; % parameter
11 lambdaw = param{3}; % parameter
12 xrd = param{4}; % parameter (kPa)
13 xrw = param{5}; % parameter (kPa)
14 betad = param{6}; % parameter
15 betaw = param{7}; % parameter
16 beta1 = param{8}; % parameter
17 beta2 = param{9}; % parameter
18 y0 = param{10}; % initial y
19 yr = param{11}; % initial y
20 ndiv = param{12}; % increments between base points

```

```

21 sModel_base = param{13}; % suction base points
22 SrModel_base = param{14}; % saturation base points
23 nowet = param{15}; % true == disregard wetting path
24 logModel = param{16}; % true == logarithmic model formulation
25 sModel = param{17}; % true == suction based model // false ==
    saturation based model
26 livePlot = param{18}; % true == plot the model live
27
28 %%
29 if strcmp(sModel, 'true')
30     SrModel = 'false'; % suction based model
31 elseif strcmp(sModel, 'false')
32     SrModel = 'true'; % saturation based model
33 end
34 % fix variables if no-wetting model is selected
35 if strcmp(nowet, 'true')
36     lambdaw = lambdad;
37     betaw = beta2;
38     beta1 = betad;
39     xrw = xrd;
40 end
41 % constants
42 % drying
43 c1d = betad * lambdad;
44 c2d = exp(betad * yr);
45 c3d = exp(betad * (y0 + lambdad * xrd)) - c2d * exp(c1d * xrd);
46 % wetting
47 c1w = -betaw * lambdaw;
48 c2w = exp(-betaw * y0);
49 c3w = exp(-betaw * lambdaw * xrw) - c2w * exp(c1w * xrw);
50 %
51 % model
52 % preparation of suction or saturation input
53 if strcmp(sModel, 'true')
54     Sr = y0; % initial state
55     y = Sr;
56 elseif strcmp(SrModel, 'true')
57     s = 0; % initial state
58     x = s;
59 end
60
61 % initial state
62 if strcmp(sModel, 'true')
63     s(1) = sModel_base(1);
64     if strcmp(logModel, 'true')

```

```
65     x = log(1+s);
66     else
67         x = s;
68     end
69 elseif strcmp(SrModel, 'true')
70     Sr(1) = SrModel_base(1); % y0;
71     y = Sr;
72 end
73
74 if strcmp(livePlot, 'true')
75     figure100 = figure(100);
76     subplot(3,1,1)
77     ax = gca;
78     hold on
79     plot(x,y, '.k');
80     ax.Title.String = 'SWCC';
81     subplot(3,1,2)
82     ax = gca;
83     hold on
84     plot(0,x, '.k');
85     ax.Title.String = '$s$';
86     subplot(3,1,3)
87     ax = gca;
88     hold on
89     plot(0,y, '.k');
90     ax.Title.String = '$S_r$';
91 end
92
93 if strcmp(sModel, 'true')
94     loop = 1:length(sModel_base)-1;
95 elseif strcmp(SrModel, 'true')
96     loop = 1:length(SrModel_base)-1;
97 end
98
99 for ii = loop
100     if strcmp(sModel, 'true')
101         ds = sModel_base(ii+1)-sModel_base(ii);
102         if strcmp(logModel, 'true')
103             dx = log(1+ds/(1+sModel_base(ii)))/ndiv;
104         else
105             dx = ds/ndiv;
106         end
107     elseif strcmp(SrModel, 'true')
108         dSr = SrModel_base(ii+1)-SrModel_base(ii);
109         dy = dSr/ndiv;
```

```

110     end
111
112     for jj = 1:ndiv
113
114         if (strcmp(sModel, 'true') && ds >= 0) || (strcmp(
                SrModel, 'true') && dSr <= 0) || strcmp(nowet, 'true')
                % case drying
115             Dd = max(y-yr, 0.0);
116             lambdadb = lambdad * (1.0 - exp(-betad*Dd));
117             yd = -lambdad*x + log(c3d+c2d*exp(c1d*x))/betad;
118             D = max(yd-y, 0.0);
119             if strcmp(nowet, 'true')
120                 beta2b = beta2;
121             else
122                 beta2b = beta2 * sqrt(max(y, 0.0));
123             end
124             lambdab = lambdadb * exp(-beta2b*D);
125         else % case wetting
126             Dw = max(y0-y, 0.0);
127             lambdawb = lambdaw * (1.0 - exp(-betaw*Dw));
128             yw = -lambdaw*x - log(c3w+c2w*exp(c1w*x))/betaw;
129             D = max(y-yw, 0.0);
130             lambdab = lambdawb * exp(-beta1*D);
131         end
132
133         if strcmp(sModel, 'true') % case suction driven model
134             dy = -lambdab * dx;
135             x = x + dx;
136             y = y + dy;
137             if strcmp(logModel, 'true')
138                 s(end+1) = s(end) + (exp(dx)-1)*(1+s(end));
139             else
140                 s(end+1) = s(end) + ds/ndiv;
141             end
142             Sr(end+1) = y;
143
144         elseif strcmp(SrModel, 'true') % case Sr driven model
145             dx = (-1/lambdab) * dy;
146             x = x + dx;
147             if x < 0
148                 x = 0;
149             end
150             y = y + dy;
151             if strcmp(logModel, 'true')
152                 s(end+1) = s(end) + (exp(dx)-1)*(1+s(end));

```

```

153         else
154             s(end+1) = s(end) + dx;
155             if s(end) < 0
156                 s(end) = 0;
157             end
158         end
159         Sr(end+1) = y;
160     end
161     if strcmp(livePlot, 'true')
162         pause(0.0000000001)
163         subplot(3,1,1)
164         plot(x,y, '.k');
165         subplot(3,1,2)
166         plot((ii-1)*ndiv+jj, x, '.k');
167         subplot(3,1,3)
168         plot((ii-1)*ndiv+jj, y, '.k');
169     end
170 end
171 end

```

### Skript D3: Visualisieren der Simulationsergebnisse

```

1 %% plot
2 res_prediction = 10;
3
4 f001 = figure(1);
5 ax = gca;
6 fig = gcf;
7 fig.Color = Color_08;
8
9 hold on
10
11 % p=plot(suction(1:res_data:end),saturation(1:res_data:end), '
    Color',Color_00);
12 p_prediction = plot(s(1:res_prediction:end),Sr(1:res_prediction
    :end), '-', 'Color',Color_00, 'LineWidth',2);
13
14 ax.XLabel.String = 'Saugspannung ln(1+$s$) (kPa)';
15 ax.YLabel.String = 'Sättigungsgrad $S_{r}$ (-)';
16
17 % legend([p, p_prediction],{'Data', 'Prediction'},'location','
    SE');
18
19 ax.XGrid = 'on';
20 ax.YGrid = 'on';
21 ax.Box = 'on';

```

```

22
23 ax.XColorMode = 'manual';
24 ax.XColor = Color_00;
25 ax.YColorMode = 'manual';
26 ax.YColor = Color_00;
27
28 ax.XLim= [0 4];
29 ax.YLim= [0 1];
30 % ax.XTick = 0:0.5:15;
31 % ax.YTick = 0:0.2:1;
32
33 ax.XTickLabel = strrep(cellstr(get(gca, 'XTickLabel')), '.', ',
    ');
34 ax.YTickLabel = strrep(cellstr(get(gca, 'YTickLabel')), '.', ',
    ');
35
36 hold off
37
38 clearvars ax fig p p_prediction
39
40 %% print
41 fprintf('Done. ')
42
43 %% read time and print
44 toc

```

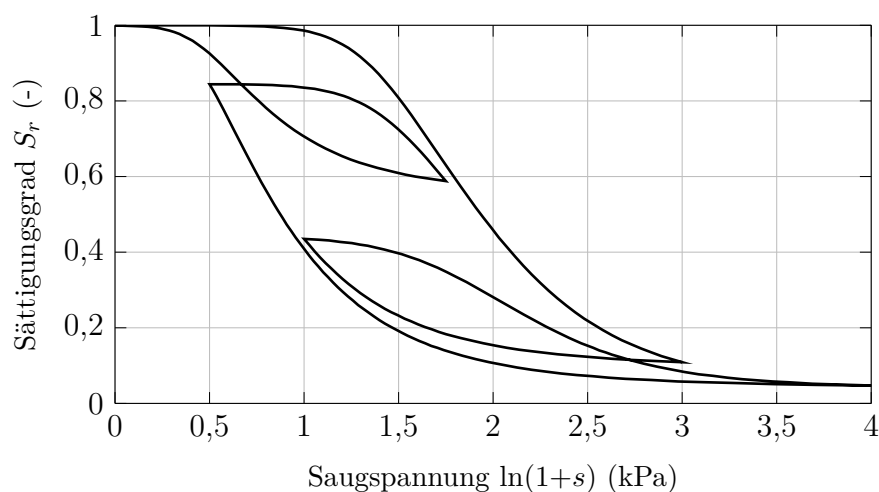


Abbildung D1: Ergebnis der beispielhaften Simulation der Kapillardruck-Sättigungs-Beziehung mit Berücksichtigung der hydraulischen Hysterese in MATLAB® mit dem Skript in Anhang D.

