
SCHLUSSBERICHT

INGENIEURNACHWUCHS 2016:
EINSATZ VON ROLLING DYNAMIC COMPACTION AUF
KIPPENBODEN
(RoDYCom)

FÖRDERKENNZEICHEN: 13FH678IX6

ZUWÄNDUNGSEMPFÄNGER: HOCHSCHULE FÜR TECHNIK, WIRTSCHAFT UND KULTUR
LEIPZIG

AUSFÜHRENDE STELLE: HOCHSCHULE FÜR TECHNIK, WIRTSCHAFT UND KULTUR
LEIPZIG - FAKULTÄT BAUWESEN -
POSTFACH 30 11 66
04251 LEIPZIG

PROJEKTLEITUNG: HERR PROF. DR.-ING. RALF THIELE

PROJEKTLAUFZEIT: 01.04.2019 BIS 31.03.2023

Kurzbericht

I. Aufgabenstellung

In der Lausitz ist durch die Verlagerung von Bodenmassen beim Kohleabbau eine der größten Landschaftsbaustellen Europas entstanden. Die so entstandenen Kippenböden zeichnen sich durch ihre geringe Tragfähigkeit und Dichte aus. Eine Verdichtung ist die Grundlage für ihre landwirtschaftliche, touristische und wirtschaftliche Nachnutzung. Das Verfahren **Rolling Dynamic Compaction** (RDC) wird es in Deutschland vor allem für die Verdichtung von Kippenböden verwendet. Obwohl sich das Verfahren in der praktischen Anwendung etabliert hat, fehlt Wissen zu ihrer Funktions- bzw. Wirkungsweise. Es fehlen Studien zur Bestimmung des Einflusses von verfahrenstechnischen Parametern wie Zuggeschwindigkeit auf die Verdichtung. Die Ermittlung des Energieeintrags und des übertragenen Impulses stellen weiteren wissenschaftlichen Lücken dar. Eine gut dokumentierte flächendeckende Verdichtungskontrolle für das Verfahren existiert nicht. Kernziel des Forschungsvorhabens war es daher, die Wirkungsweise von RDC auf Kippenböden wissenschaftlich zu erfassen und zu beschreiben. Dies sollte nicht nur zu einem besseren Verständnis der Wirkungsmechanismen von RDC, sondern auch zu Ergebnissen für unterschiedliche Böden führen und neue Kontrollmechanismen des Verdichtungserfolges aufschlüsseln. Ein Erkenntnisgewinn für die Nachbildung von RDC und Kippenböden sowohl in Modellversuche als in numerischen Simulationen wurde ebenfalls angestrebt. Ein weiteres Kernziel war der Ausbau der Nachwuchsforschergruppe durch die Erweiterung ihrer Nachwuchskonzept und durch die Verbesserung der Kooperation für Promovierende, Mitarbeiter und Studierende mit Universitäten und mit der Wirtschaft sowie durch die Promotion von Frau Ocaña.

II. Ablauf des Vorhabens

Die Aufgabe wurde über 48 Monate in fünf Arbeitsmodulen bearbeitet, die in insgesamt 15 Arbeitspakete unterteilt waren. Die Methodik des Projekts bestand in der Verwendung von drei Prüfwerkzeugen: Modellversuche im ebenen Dehnungszustand, numerische Simulationen mit der Software ABAQUS sowie Labor- und Feldversuche, um die Wirkungsweise des realen Systems zu erfassen. Diese Methoden wurden parallel in allen Arbeitsmodulen angewandt und ihre Ergebnisse wurden stufenweise abgeglichen.

III. wesentliche Ergebnisse

Es wurde eine Datenbank erstellt, in der alle bekannten Forschungsarbeiten über RDC sowie Daten zu verschiedenen Kippenböden aus dem Lausitzer Braunkohlerevier gesammelt wurden. Auf dieser Grundlage wurden alle geotechnisch relevanten Parameter und maschinentechnischen Einflussfaktoren für RDC auf Kippenböden zusammengefasst. Für die Simulationen wurde ein numerisches Grundmodell erstellt, das aus einer starren dreiseitigen Walzengeometrie und einem Bodenmodell (30x10 m) mit infiniten Rändern besteht. Nach einer Studie zur Modellierung der kinematischen Randbedingungen des Walzenantriebs wurde die Verwendung einer exzentrisch eingebrachten konstanten Zuggeschwindigkeit v_T festgelegt, die zunächst linear erhöht wird. Das Bodenverhalten wurde über das hypoplastische Stoffgesetz mit der Erweiterung der intergranularen Dehnungen modelliert. Dazu wurde ein standardisiertes Verfahren zur Bestimmung der Materialparameter entwickelt, das durch die Kombination bekannter Ansätze zur Kalibrierung ein möglichst kleines, aber ausreichend genaues Versuchsprogramm umfasst. Es wurde ein theoretischer Ansatz zur Beschreibung der Kinematik entwickelt, der es ermöglichte, die Energie und den Impuls auf einer starren Untergrund für beliebige Walzengeometrien und Zuggeschwindigkeiten abzuschätzen. Außerdem wurde die Kinematik durch drei Phasen der Achsenbewegung beschrieben: Heben, Fallen und Stoß. Der Ansatz wurde mit den drei im Rahmen des Projekts vorgesehenen Prüfwerkzeugen validiert. Bei der Durchführung der Modellversuche mit einem trockenen Sand als Kippenmusterboden traten mehrere Schwierigkeiten auf, z. B. Schlupf beim Rollen der Bandage, deren Lösung viel Zeit in Anspruch nahm. Aufgrund der Anforderung, das System korrekt abzubilden und der methodischen Herausforderung des Schlupfes konnte nur ein einziger Walzenstoß ausgewertet werden. Es wurde festgestellt, dass RDC den Boden vor allem in der Stoß-Phase und dann in der Heben-Phase verdichtet. Dabei verursacht die Walze zwei Verschiebungsfronten, eine in horizontaler und eine in vertikaler Richtung. Dieses Ergebnis wurde durch die ganzheitliche Erfassung der Walzenkinematik in einem Feldversuch bei zwei Zuggeschwindigkeiten und jeweils 40 Überfahrten bestätigt. Die Kontaktkraft hat beim Stoß und zu Beginn des Hebens eine für die Verdichtung in vertikaler und horizontaler Richtung ausschlaggebende Komponente. Im Vergleich zu anderen Impulsverdichtern stellt der Walzenaufprall einen unterbrochenen Stoß dar, da er nicht durch den Boden abgebremst wird, wie z.B. bei einem Fallgewicht. Somit steht als möglicher Indikator für die Entwicklung einer flächendeckenden Verdichtungskontrolle nur die Zunahme der vertikalen Beschleunigung zum Stoßbeginn zur Verfügung. Durch die Schaffung künstlicher Schwachstellen im Boden im Versuch konnte gezeigt werden, dass unzureichend verdichtete Bereiche durch die Analyse der Beschleunigungsmaxima beim Aufprall und der Oberflächensetzungen erkannt werden können. Auf der Grundlage der Ergebnisse wurde ein Ansatz zur Abschätzung der aufzubringenden Verdichtungsenergie in Abhängigkeit von v_T und der Masse entwickelt. Der Ausbau der Nachwuchsgruppe wurde durch das Promotionsvorhaben von Frau Ocaña und die Einleitung der Promotion von Herrn Löwe verstärkt. Darüber hinaus wurden zwei neue wissenschaftliche Mitarbeiter eingestellt, die im Rahmen des Projekts an ihren Abschlussarbeiten arbeiteten.

Eingehende Darstellung

I. Projektbeschreibung und -ziele

I.I. Stand des Wissens zu Projektbeginn

Unrunde Walzenverdichtern, auch bekannt als Rolling Dynamic Compaction (RDC), bestehen aus einer unrunden Walze, die von einer Zugmaschine gezogen wird. Während des Fahrens kippt die Walze von einer auf die nächste Seite und schlägt dabei auf den Boden. Baupraktisch werden drei unterschiedliche Walzengeometrien eingesetzt. Diese haben drei, vier bzw. fünf Seiten und Gewichte zwischen acht und zwölf Tonnen (D. Avalle 2004; Broons 2023; LANDPAC 2023). Die Arbeitsgeschwindigkeit liegt zwischen 9 und 15 km/h. Wirktiefen werden typischerweise zwischen zwei und drei Metern angegeben (Jalili et al. 2012; Ranasinghe und M. Jaksa 2016). Das RDC-Verfahren wird in nicht-städtischen Gebieten, insbesondere auf großen Erdbaustellen eingesetzt (Kahnt 2018). In Deutschland wird es vor allem für die Verdichtung von Kippenböden verwendet.

Eine gut dokumentierte flächendeckende Verdichtungskontrolle für diese Verfahren existiert nicht. Die Firma LANDPAC® entwickelte ein im Gerät integriertes System zur Verdichtungsprüfung, das CIR- / CIS-System, welches analog zur FDVK funktioniert. Allerdings gibt es keine detaillierten Informationen zur genauen Funktionsweise bzw. keine Forschungsarbeiten zu diesen Prüfverfahren. Die Oberflächensetzungen (CIS) sowie die Beschleunigungen (CIR) werden bei jedem Schlag i.d.R. nach jeder 10. Überfahrt aufgezeichnet. Die Korrelation beider Ergebnisgrößen zueinander erlaubt eine flächendeckende Verdichtungskontrolle. Wobei diese Methode nur für die ersten zwei Metern Tiefe Rückschlüsse über die Verdichtungswirkung erlaubt.

In der Lausitz ist durch die Verlagerung von Bodenmassen beim Kohleabbau eine der größten Landschaftsbaustellen Europas entstanden. Laut Nachhaltigkeitsbericht der Lausitzer und Mitteldeutsche Bergbau-Verwaltungsgesellschaft aus dem Jahr 2021 gibt es in der Region rund 4000 ha Sperrgebiete, auf denen 25 Mio. m³ Boden fachgerecht aufbereitet werden müssen. Die Kippenböden, die durch den Kohleabbau entstanden sind, zeichnen sich durch ihre geringe Tragfähigkeit und Dichte aus. Eine Verdichtung ist die Grundlage für ihre landwirtschaftliche, touristische und wirtschaftliche Nachnutzung und ist daher von hoher politischer und wirtschaftlicher Bedeutung. Aus Arbeitsschutzgründen sind stehende Verdichter oder langsam fahrende Walzen zur Baugrundverbesserung der Kippenflächen nicht geeignet. Studien belegen, dass einzige Arbeitsgeschwindigkeiten über

10 km/h inklusive Verdichtungsanhängesysteme, wie die Rolling Dynamic Compaction (RDC), keine Gefahr für Technik und Personal darstellen (Freiberg 2009; LMBV 2016).

Obwohl sich das RDC-Verfahren international in der praktischen Anwendung etabliert hat (D.L. Avalle et al. 2009; M. B. Jaksa et al. 2012), fehlt Wissen zu ihrer Funktions- und Wirkungsweise sowie den damit verbundenen bodenmechanischen Prozessen. Es fehlen parametrische Studien zur Bestimmung des Einflusses von verfahrenstechnischen Parametern auf die Verdichtungsleistung. Die meisten Arbeiten konzentrieren sich auf die Beziehung zwischen Überfahrtanzahl und Wirktiefe. Andere Steuergrößen des Verdichtungsprozesses wie Zuggeschwindigkeit und Masse wurden bisher nur mit Hilfe von numerischen Simulationen in der Arbeit von (Y. Kuo et al. 2013) untersucht. Darin wurden jedoch keine konkreten Ergebnisse erläutert. Ein Vergleich der Verdichtungswirkung von unterschiedlichen Bandagengeometrien erfolgte bisher nur in der Arbeit von (Kim 2010) und (Kim und Chun 2016) anhand von FEM-Simulationen.

Eine Differenzierung nach der im Boden eingebrachten Verdichtungsenergie oder Impuls hat in diesen Parameterstudien (Kim 2010; Kim und Chun 2016; Y. Kuo et al. 2013) nicht stattgefunden. Der Grund hierfür ist sicherlich, dass die Ermittlung des Energieeintrags und des übertragenen Impulses pro Schlag eine weitere wissenschaftliche Lücke darstellt. Die Verdichtungswirkung von unrunden Walzenverdichtern stellt sich i.d.R. nach 40 Überfahrten ein. Dieser Wert hat sich auf Basis von Erfahrungswert in der Baupraxis etabliert. Eine ausführliche Untersuchung abhängig von der Bandagegeometrie, der Verdichtungsenergie oder des Impulses wurde bisher nicht unternommen. In Modellversuchen wurde die Überfahrtanzahl nur von (Z. Chen und Lv 2017) untersucht. Ihre Studie zeigte, dass die gemessenen Spannungen im Untergrund mit der Überfahrtanzahl zunehmen. Dieser Trend stellte sich in der Studie nach der 15. Überfahrt ein, was ein Indikator zur Festlegung der optimale Überfahrtanzahl darstellen könnte.

I.II. Bekanntgewordene Fortschritte auf dem Gebiet

Die G² Gruppe Geotechnik ist derzeit die einzige Forschungsgruppe in Europa, die über die RDC-Technologie aktiv forscht. Darüber hinaus gibt es eine weitere Forschungsgruppe an der Universität von Adelaide, Australien, die seit mehreren Jahren aktiv an diesem Verdichtungsverfahren forscht. Alle der in dem aktuellen Abschnitt behandelten Arbeiten wurden in dieser Forschungsgruppe durchgeführt. Sie konzentrieren sich hauptsächlich auf die vierseitige Bandagengeometrie und auf die Bestimmung der Verdichtungsenergie während des Aufpralls auf den Boden.

Die Kinematik der Bandage wurde von (Bradley et al. 2019) in einem Feldversuch mithilfe einer Hochgeschwindigkeitskamera gemessen. Dabei wurde eine Umdrehung der Bandage bei einer konstanten Zuggeschwindigkeit von 10 km/h und 40 Überfahrten aufgezeichnet. Es wurden keine signifikante Änderung der Kinematik mit steigender Überfahrtanzahl verzeichnet. Eine Verdichtungsprüfung wurde nicht durchgeführt.

In (B. T. Scott et al. 2020) wurden Ergebnisse aus einem Feldversuch mit dem vierseitigen System vorgestellt, bei dem Spannungsmessungen mit vergrabenen Druckmessdosen bei verschiedenen Zuggeschwindigkeiten durchgeführt wurden. Sie konnten zeigen, dass die optimale Zuggeschwindigkeit zwischen 9 und 12 km/h liegt. Unterhalb dieses Bereichs wird ein viel geringerer Druck auf den Boden ausgeübt, während bei höheren Geschwindigkeiten die Stöße in Richtung der Ecken des Moduls abgegeben werden und das Verhalten weniger reproduzierbar ist. Außerdem wurde ein Ansatz zur Berechnung der Verdichtungsenergie vorgestellt. Dabei wird die Energie als Summe der Änderungen der potenziellen und kinetischen Energie während des Stoßes bestimmt. Problematisch ist jedoch, dass ihre Berechnungen auf der maximalen Hubhöhe basieren, die lange vor dem Aufprall erreicht wird und daher nicht berücksichtigt werden sollte.

Ein Jahr später wurde in (B. Scott et al. 2021) eine Gleichung zur Abschätzung der Wirkungstiefe der Methode vorgeschlagen, wobei sie stark an die der dynamischen Intensivverdichtung angelehnt ist. Der einzige Unterschied zur Grundgleichung betrifft den Parameter k , der das Verhältnis zwischen der Verdichtungsenergie beim Aufprall und der maximalen potentiellen Energie beschreibt. Abgesehen von den Ergebnissen der Messkampagne, die in diesem Papier vorgestellt werden, ist keine weitere Validierung dieser Gleichung bekannt.

Außerdem wurden in (Y. Chen, Mark B. Jaksa, Y.-L. Kuo et al. 2022) erste Ergebnisse aus Modellversuchen mit der vierseitigen Modellwalze vorgestellt. Bei diesen Untersuchungen fuhren zwei Modellwalzen mit unterschiedlichen Massen und bei unterschiedlichen Zuggeschwindigkeiten 40 Mal über einen Körper aus festem, transparentem, mit einer Jod-sodiumflüssigkeit gesättigtem Granulat. Dieses Material wurde als Bodenersatz verwendet, um die Verschiebungen unter den Modellwalzen aufzuzeichnen. Die Verschiebungen in der Tiefe nahmen mit zunehmender Zuggeschwindigkeit bis zu einem Grenzwert von 299 mm/s zu, der eine optimale Geschwindigkeit darstellen könnte. Die Oberflächensetzungen hingegen nahmen mit der Zuggeschwindigkeit kontinuierlich zu. In (Y. Chen, Mark B. Jaksa, B. T. Scott et al. 2023) wird der Einfluss der beiden Module der dreiseitigen Walze auf die Bodenverbesserung untersucht, und die Ergebnisse deuten darauf hin, dass der Boden unter einem einzelnen Modul nur durch das darüber liegende Modul verbessert wird.

I.III. Projektziele

Das Projektziel hat sich während der Projektbearbeitung im Vergleich zum Projektantrag unter den bekanntgewordenen Fortschritten auf dem Themenfeld nicht verändert. Die nachstehende Formulierung entstammt dem Projektantrag:

Kernziel des Forschungsvorhabens ist die Verdichtung von großflächigen Tagebauinnenkippen mit dem Verfahren Rolling Dynamic Compaction. Es soll eine wissenschaftliche Erfassung und Beschreibung der Wirkungsweise des RDC-Verfahrens auf Kippenböden

inklusive Prüfsystem und Datenerfassung für diese Verdichtungstechnologie als energie-sparende Verdichtung erarbeitet werden.

Durch die Verbindung von Geotechnik, Messtechnik und Maschinenbau wird ein Erkenntnissgewinn für die Methodik der systemischen Untersuchungen von geotechnischen Prozessen durch Modell- und Feldversuche inklusive Numerik in den durch die DGTT definierten Forschungsfeldern angestrebt. Konkret wird ein besseres Verständnis der Wirkungsmechanismen von RDC hinsichtlich Wirkungsumfang (Tiefe) und Verbesserungsgrad, speziell für Kippenböden erwartet. Da die Versuche zuerst auf trockenem Sand und dann auf modelliertem Kippenboden erfolgen, liegen Forschungsergebnisse für unterschiedliche Böden und damit Anwendungsfelder vor. Es werden außerdem Ergebnisse für die Entwicklung von neuen Kontrollmechanismen zur Ergebnisprüfung durch Erfassung Interaktion RDC/Boden erwartet. Durch Abgleich der Modell- und Feldversuche mit numerischen Simulationen wird ein Erkenntnissgewinn für die Modellierung von RDC und von Kippenboden erwartet. Der internationale Wissenstand zu Modellversuchen am Halbmodell mit Hochgeschwindigkeitsskamera und PIV-Analyse wird weiterentwickelt, ebenso für teilgesättigten Kippenboden im Modellversuche (Zusammensetzung, Einbau, Reproduzierbarkeit, Wasser). Wissenschaftlicher Zugewinn wird durch neuartige Messsysteme im Boden und Gerät für Modell- und Feldversuche erwartet (Beschleunigung, Porenwasserdruck).

Das Kernziel Ausbau der Nachwuchsforschergruppe G² Gruppe Geotechnik entspricht der Hightech-Strategie des Bundesregierung und stärkt die Entwicklung der Profilbildung der HTWK Leipzig. Die interdisziplinäre Nachwuchsforschergruppe wird entsprechend unserem Nachwuchskonzept erweitert, wobei die Promotion von Frau Ocaña und die Entwicklung eines weiteren Promotionsthemas Hauptziele sind. Die bessere Verzahnung von Forschung und Lehre, der frühzeitige Forschungstransfer und die forschungsnahe Qualifizierung von Studierende und Mitarbeitern wird durch mehrere Bausteine umgesetzt. Ziel ist die verbesserte Kooperation für Promovierende, Mitarbeiter, Studierende mit Universitäten (Promotion) und mit der Wirtschaft (Überführung in den Markt, bessere Wissenstransfer, neue Forschungspartner).

II. Durchgeführte Arbeiten im Rahmen des Vorhabens

II.I. Vergleich der tatsächlich ausgeführten Arbeiten mit der Arbeitsplanung

Gemäß der Arbeitsplanung wurde die Aufgabe in fünf Arbeitsmodulen bearbeitet, wobei drei wesentliche Prüfwerkzeuge zum Einsatz kamen: Modellversuche, numerische Simulationen in ABAQUS sowie Feld- und Laborversuche. Die Module bestanden aus insgesamt 15 Arbeitspaketen und umfassten sowohl wissenschaftliche als auch technische Arbeitsziele. Die Werkzeuge wurden in den ersten vier Modulen parallel eingesetzt und ihre Ergebnisse wurden nach und nach aufeinander abgestimmt. Um das Vorgehen und die Entwicklungen in den anderen Modulen zu planen und festzulegen, wurde zunächst

eine Datenbank im *Modul 1* erstellt. Diese enthielt Veröffentlichungen und Informationen über die RDC-Technologie, die Eigenschaften von Kippenböden, die Möglichkeiten der Verdichtungskontrolle und die Nachbildung von Kippenböden sowohl im Modellversuch als auch in ABAQUS. Im *Modul 2* war geplant, erste Untersuchungen zur Wirkungsweise des Verfahrens mit einem homogenen Boden durchzuführen. Dieses Modul beinhaltete den Umbau des vorhandenen Modellprüfstandes und die Erstellung erster numerischer Modelle. Labor- und Feldversuche waren hier nicht vorgesehen. *Modul 3* diente der Vorbereitung der numerischen Simulationen sowie der Modell- und Feldversuche mit Kippenboden. In diesem Modul wurde die Definition eines Kippenbodenmusters für die Modellversuche geplant, das ebenfalls mit ABAQUS abgebildet werden sollte. Ebenso sollten hier Messsysteme für den Einsatz im Feld entwickelt und getestet werden. *Modul 4* umfasste die numerischen Simulationen sowie die Modell-, Labor- und Feldversuche mit Kippenboden mit dem Ziel, technische und gerätespezifische Parameter für einen maximalen Verdichtungserfolg abzuleiten, indem die Verdichtungswirkung des RDC-Systems beschrieben wird. Zu diesem Zweck wurde eine Feldmesskampagne pro Jahr geplant, die in Zusammenarbeit mit dem Projektpartner durchgeführt werden sollte. Aufgrund des Wechsels des Projektpartners konnte die geplante Feldmesskampagne bis 2022 nicht realisiert werden. Darüber hinaus wurde aufgrund verschiedener Schwierigkeiten eine einzige Parameterstudie im Modellversuchsstand durchgeführt (siehe Abschnitt II.II.II). Aufgrund von technischen Problemen bei der Implementierung der VUMAT-Subroutine in ABAQUS konnten die in diesem Modul geplanten Simulationen nicht stattfinden. *Modul 5* umfasste die Dokumentation und Öffentlichkeitsarbeit.

Am Ende der Module 1 bis 4 wurden vier Meilensteine (MS) definiert. Sie markieren jeweils das Ende einer längeren Projektphase (Modul) und stehen damit für die Erreichung der Modulziele (siehe Tabelle 1).

II.II. Methodik der jeweils angewandten Prüfwerkzeuge

II.II.I. Numerik

Nach einer umfangreichen Recherche über Möglichkeiten zur Simulation von Impulsverdichtern in ABAQUS sowie über bestehende numerische Arbeiten zur RDC-Technologie (*Modul 1*) wurde ein erstes Grundmodell erstellt (*Modul 2*). Das erste Grundmodell bestand aus einem homogenen Bodenmodell mit 22.840 quadratischen CPE4R-Elementen und einer als Starrkörper modellierten Walze. Als Randbedingungen für den Bodenabschnitt (12x4 m) wurden infiniten Elemente verwendet, um Reflexionen an den Modellrändern zu vermeiden. Obwohl Hypoplastizität in der Numerik Stand der Technik ist, um das Verhalten von nichtbindigen Böden darzustellen, wurde das Bodenverhalten zunächst mit Drucker-Prager modelliert, da es in ABAQUS implementiert und daher stabiler ist. Das adaptive ALE-Netzverfahren (Arbitrary Lagrangian-Eulerian) wurde verwendet, um die starken Bodenverformungen besser darstellen zu können. Nach einer ersten Studie zur Auswahl einer geeigneten Variante für die Simulation des Walzenantriebs wurde

Tabelle 1.: Meilensteine (MS) und Modulziele

MS	Modulziele
MS 1	<p>Datenbank zur Verdichtungssystem und -Prüfung Zusammenfassung aller für die Verdichtung relevanten geotechnischen und maschinenbaulichen Parameter. Dokumentation zur Erkundungsmethode und Eigenschaften von Kippenböden. Möglichkeiten zur Nachbildung von RDC und eines Kippenmusterbodens in Modellversuchen und ABAQUS. Liefert Erkenntnisse insbesondere zur Auswahl der Untersuchungsschwerpunkte und zur Erstellung eines Messkonzeptes und Prüfschema des Verdichtungserfolges und Energieaufwandes.</p>
MS 2	<p>Numerische und experimentelle Modelle der RDC an homogenen Böden Erfolgreiche Implementierung aller Randbedingungen des RDC-Systems an homogenen Böden in der Numerik und in den Modellversuchen. Nutzbare Aussagen zu geotechnischen und maschinenbaulichen Parametern. Entwicklung erster Prüfsysteme des Verdichtungserfolges im Modellversuch. Liefert Erkenntnisse insbesondere zur Wirkungsweise und Nachbildung des RDC-Systems sowie zum Messkonzept des Verdichtungserfolges.</p>
MS 3	<p>Numerische und experimentelle Modelle der RDC an Kippenböden Erfolgreiche Umsetzung eines Kippenmusterbodens in der numerischen Simulation und in den Modellversuchen. Gelungene Materialkalibrierung für die numerische Simulation. Erstellung eines Aufbereitungskonzepts für die Nachbildung des Musterbodens im Modellversuch. Erstellung eines Bewertungskonzepts des Verdichtungserfolges an Kippenböden anhand von Labor- und Feldversuchen. Liefert Erkenntnisse insbesondere zur Nachbildung von Kippenböden im Modell und in der Numerik, sowie zur Möglichkeiten der Kontrolle des Verdichtungserfolges in Kippenböden.</p>
MS 4	<p>Ableitung technischer gerätespezifischer Parameter für eine energie-sparende Verdichtung Erfolgreiche Umsetzung aller geräteseitigen Parameter an Kippenböden. Versuchsanordnung entspricht einer realitätsnahe Umgebung. Die Modellversuche und die numerischen Simulationen liefern Auskunft zur Optimierung der Verdichtungsarbeiten. Validierung der Modellversuchen und der numerischen Simulationen anhand von Feldversuchen. Erfolgreiche Umsetzung des Konzepts zur Messung des Verdichtungserfolges in Modell- und Feldversuchen. Gemeinsame Bewertung des RDC-Verfahrens auf Kippenböden mit wirtschaftlicher Projekt-partner. Vorgabenkatalog zur Anwendung des RDC-Systems und Bewertung des Verdichtungserfolges in Kippenböden.</p>



Abbildung 1.: Modellversuchsstand.

beschlossen, die Walze an eine starre Stange zu koppeln, auf die die Zuggeschwindigkeit des Traktors wirkt. Die Stange wird 1 s lang beschleunigt, bis die Zielgeschwindigkeit erreicht ist. Danach wird die Zuggeschwindigkeit bis zum Ende des Verdichtungsvorgangs konstant gehalten.

Nach weiteren Untersuchungen wurde das Grundmodell für die Untersuchungen mit Kippenboden angepasst (*Modul 3*). Das Bodenmodell wurde mit einer Größe von 30x10 m abgebildet, um die volle Tiefenwirkung des Verfahrens zu erfassen. Darüber hinaus wurde beschlossen, mit dem hypoplastischen Stoffgesetz mit der Erweiterung der intergranularen Dehnungen zu arbeiten, da dies das Bodenverhalten unter einer stoßartigen Belastung, wie sie bei der RDC-Technologie auftritt, realistischer darstellt. Die anderen bereits definierten Randbedingungen des Modells wurden unverändert gelassen. Nach der außerplanmäßigen Unterbrechung der Arbeit mit ABAQUS aufgrund verschiedener Probleme mit der Subroutine zur Bindung des hypoplastischen Materialgesetzes wurde beschlossen, den Kalibrierungsprozess der hypoplastischen Materialparameter zu optimieren. Der Grund dafür war, dass zu diesem Zeitpunkt mehrere Ansätze zur Kalibrierung bekannt waren, z.B. durch Nachrechnungen auf der Basis von geotechnischen Laborversuchen, durch Simulationen von geotechnischen Elementversuchen oder durch Verwendung eines Online-Kalibrierungswerkzeugs. Mit dem Ziel, den Aufwand so gering wie möglich zu halten, experimentelle Fehler zu vermeiden und bestmögliche Simulationsergebnisse zu erzielen, wurde für die weiteren Arbeiten im Projekt ein standardisiertes Kalibrierverfahren entwickelt (Fock 2021). Außerdem wurde ein neues Instrument entwickelt, um die Leistung der für die Kalibrierung erforderlichen Schüttkegelnversuche zu verbessern.

II.II.II. Modellversuche

Nach der im *Modul 1* durchgeführten Recherchen wurde festgestellt, dass es nur wenige Erfahrungen oder Studien mit RDC-Modellen gibt (siehe Abschnitt I). Es wurde auch festgestellt, dass die Erfassung der Kinematik der Walze im Modell für die Durchführung von Parameterstudien unerlässlich ist, da nur so Parameter wie Verdichtungsenergie und Impuls untersucht werden können. Basierend auf den eigenen Erfahrungen der Forschungsgruppe mit Impulsverdichtern wurde ein Modellversuchsstand entwickelt (*Modul 2*), welche in Abbildung 1 dargestellt ist. Die Herstellung des Versuchsstands überstieg den geplanten Zeitrahmen, da es aufgrund der Corona-Pandemie zu erheblichen Verzögerungen bei der Lieferung mehrerer Komponenten und zu Problemen beim Testen des ursprünglichen Konzepts kam.

Der Modellversuchsstand besteht aus einem Stahlrahmen und einem Behälter mit Plexiglasfront. Der Rahmen dient der Positionierung des Behälters und des Verdichtungsgerätes. Der Behälter dient der Einfassung des Versuchsmaterials bzw. Bodens. Durch die mittlere Plexiglasscheibe wird die Aufnahme von Bildern mit einer Hochgeschwindigkeitskamera möglich. Die Bereiche links und rechts der Scheibe dienen lediglich zum Beschleunigen und Bremsen der Bandage. Die Verdichtungsgeräte werden fast so breit wie der Probeträger konzipiert, um einen ebenen Dehnungszustand zu gewährleisten. Ihre Konstruktion ist so gestaltet, dass gerätetechnische Parameter wie Zuggeschwindigkeit und -Masse in einer möglichst großen Spanne variiert werden können. Die Anpassung der Masse wird durch das Anspannen von Gewichtstafeln im inneren der Bandagenmodelle realisiert. Das Fahren der Bandage wird durch einen Antrieb gewährleistet. Die Bandage wird von einem vertikalen Arm gezogen. Von dort überträgt ein Gestell die Bewegung an die Lager der Bandagenwelle. Das Fahrprofil inkl. Zielgeschwindigkeit kann über die Steuerungssoftware des Linearantriebs eingestellt werden. Für erste Versuche wurden zwei Ausführungen der dreiseitigen Bandage in unterschiedlichen Skalierungen hergestellt.

Zur Erfassung der Kinematik des Walzenmodells wurden unterschiedliche Sensoren verwendet: ein Wegaufnehmer bzw. Seilzuggeber zur Erfassung der Achsgeschwindigkeit in horizontaler Richtung, ein Beschleunigungssensor zur Erfassung der Achsgeschwindigkeit in vertikaler Richtung und ein Drehgeber zur Erfassung der Winkelgeschwindigkeit. Alle Sensoren wurden mit einer im Rahmen des Projekts entwickelten Messbox verbunden, um die zeitliche Synchronisation der Daten zu gewährleisten. Die Messbox wurde so entwickelt, dass sie auch während der Feldkampagnen eingesetzt werden könnte, um die Kinematik der realen Systeme zu erfassen. Um die Verdichtungswirkung zu erfassen, wurden die Bodenverschiebungen als Ergebnisgröße gewählt. Die Erfassung der Bodenverformungen unterhalb der Verdichtungsgeräte erfolgte mit einer Hochgeschwindigkeitskamera. Die Bilder wurden mit Hilfe der Software Istra4D ausgewertet. Für einen reproduzierbaren homogenen Einbau eines Bodenkörpers mit konstanter Dichte wurde die Sandregenmethode eingesetzt. Dazu wurde eine erste Einrieselapparatur gebaut und getestet, die sich aufgrund von Entmischungen der Bodenkörper als ungeeignet erwies. Die Probleme konnten durch den Bau einer zweiten Apparatur gelöst werden.

Weitere Anpassungen waren notwendig, weil die Walzenmodelle mit zunehmender Strecke einen erhöhten Schlupf während der Fahrt entwickelten. Durch den ebenen Dehnungszustand bildete sich immer ein Sandhügel vor der Bandage, der beim Rollen überwunden werden musste. Als Lösung für dieses Problem wurde ein Ansatz entwickelt, der den Schlupf nicht für die gesamte Strecke, sondern für den Bereich hinter der Plexiglasscheibe minimiert. Zu Beginn des Versuchs wird ein Gummimantel (Dicke 1 mm) auf den Boden der Beschleunigungsstrecke gelegt. Dadurch fährt die Walze zunächst über den Gummimantel und dann über den Boden hinter der Plexiglasscheibe. So findet ein Drittel einer Umdrehung ohne Schlupf statt. Dies ermöglicht die Aufnahme von einem Stoß. Aufgrund der außerplanmäßigen längeren Entwicklungsarbeit des Versuchsstands fanden im *Modul 2* keine Parameterstudien mit homogenen Böden statt.

Als Kippenmusterboden (*Modul 3*) wurde ein verflüssigungsfähiger Sand aus einer regionalen Kiesgrube gewählt. Um Kosten, Zeit und Lagerhaltung zu sparen, wurde beschlossen, bei den Modellversuchen nur mit diesem Bodenmaterial zu arbeiten und andere Kippenböden durch numerische Simulationen einzubeziehen. Des Weiteren wurde im Rahmen der Vorbereitung der Versuche beschlossen, die Erfassung der Bodenverschiebungen durch den Einsatz eines 3D-Scanners zu ergänzen, da diese Parameter einen möglichen Verdichtungsindikator darstellen könnten. So kann nach jedem Überfahren der Walze das komplette Fahrprofil aufgezeichnet und mit dem Bodenprofil vor der Verdichtung verglichen werden. Die Auswertung der gescannten Oberfläche erfolgt mit einem Matlab-Skript nach (Jutzenka 2022).

Eine erste Parameterstudie wurde mit dem Kippenmusterboden durchgeführt (*Modul 4*), um den Einfluss der Anzahl der Überfahrten auf die Verdichtungswirkung zu untersuchen. Um den Aufprall der Walze immer an der gleichen Stelle zu erreichen, startete die Walze bei jeder Überfahrt an der gleichen Stelle. Die Ergebnisse zeigten jedoch, dass die Bodenverformungen die Reproduzierbarkeit der Versuchsreihen stark beeinflussen, so dass die Überfahrten nicht miteinander verglichen werden konnten.

II.III.III. Labor- und Feldversuche

Nach den Recherchen im Rahmen des *Moduls 1* stellte sich heraus, dass gerätespezifische Parameter wie die Zuggeschwindigkeit, die Masse oder die Geometrie bisher nicht in Feldversuchen untersucht worden waren. Daraufhin wurde beschlossen, den Einfluss dieser Parameter unter realen Bedingungen zu untersuchen. Aufgrund des Wechsels des Projektpartners konnten vor 2022 keine Feldversuche durchgeführt werden. Daher wurde im Rahmen des Forschungsvorhabens eine einzige Feldmesskampagne durchgeführt, die jedoch aufwändiger als geplant gestaltet wurde, um möglichst viele Fragestellungen behandeln zu können.

Die Vorbereitung der Feldmesskampagne (*Modul 3*) erstreckte sich über mehrere Monate. Dazu gehörte die Planung und Durchführung mehrerer kleiner Feldversuche, um verschiedene Messsysteme vor dem geplanten Großeinsatz zu testen. Mit Hilfe des neuen

Projektpartners wurden die fünf- und dreiseitigen Bandgeometrien mit einem 3D-Scanner erfasst, um das an der Walze zu befestigende Messsystem entsprechend zu bauen. Die erfassten Daten dienten auch zur Validierung der Geometrien, die in der theoretischen kinematischen Analyse, dem Modellversuchsstand und der Numerik verwendet wurden. Viele der für den Einsatz in der Feldmesskampagne vorgesehenen Messsysteme mussten entwickelt werden. Außerdem hatte die Forschungsgruppe wenig oder keine Erfahrung mit anderen Messsystemen. Aus diesem Grund wurde beschlossen, im Vorfeld drei kleine Feldversuche durchzuführen, um die Messsysteme schrittweise zu testen und anzupassen. Folgende Messsysteme wurden getestet: Sensoren inklusive einer Messbox sowie ein optisches Messsystem zur Erfassung der Kinematik, Lichtschranken zur Erfassung der Maschinenposition und ein Radarmessgerät zur Erfassung der Zuggeschwindigkeit.

Die Laborversuche im *Modul 3* betreffen vor allem Experimente zur Charakterisierung von Bodenmaterialien aus der Lausitz und deren anschließende Kalibrierung für die geplanten numerischen Simulationen im Folgemodul. Im *Modul 4* wurden weitere Labortests durchgeführt, um den Versuchsboden der Feldmesskampagne zu charakterisieren.

Die Feldmesskampagne auf Kippenböden (*Modul 4*) wurde im ehemaligen Tagebau Greifenhain des Lausitzer Braunkohlereviers durchgeführt. Ziel war es, den Einfluss der Zuggeschwindigkeit v_T und der Anzahl an Überfahrten N auf die Verdichtungswirkung zu ermitteln. Weiterhin sollten mögliche Indikatoren für die Verdichtungsqualität aufgeschlüsselt sowie Möglichkeiten zur Optimierung des Verfahrens durch ein besseres Verständnis seiner Wirkungsweise aufgezeigt werden. Um die vorgenannten Ziele zu erreichen, wurde auf dem anstehenden Kippenboden eine Versuchsfläche mit ausreichend großem Grundwasserflurabstand von mindestens 5,0 m ausgewählt. Die Versuchsfläche wurde in zwei Messbereiche aufgeteilt, um den Einfluss von v_T auf die Verdichtungswirkung zu erfassen. Jedem Messbereich wurde eine Fahrspur (FS) zugewiesen, auf der die dreiseitige Walze den Untergrund mit einer konstanten Zuggeschwindigkeit verdichten sollte.

Das Zuggerät (CAT Challenger 85e) kann die Geschwindigkeit nicht regeln. Der Geräteführer wurde angewiesen, jede FS mit einem anderen Gang zu fahren, um die unterschiedlichen Zuggeschwindigkeiten realisieren zu können. FS 1 wurde mit Gang 8 verdichtet, während dass die Verdichtungsarbeiten in der FS 2 mit Gang 7 durchgeführt wurden. Die während der Untersuchung tatsächlich erreichte mittlere Zuggeschwindigkeit wurde für jede FS in Abbildung 2 dargestellt.

Um den Einfluss lokaler Schwachstellen auf die Kinematik zu untersuchen und damit mögliche Indikatoren für den Verdichtungserfolg aufzuzeigen, wurden am Ende jeder FS zwei Matratzen (1,4 x 2,0 m) eingebaut. In FS 1 wurden die Matratzen in einem Meter Tiefe vergraben, in FS 2 in zwei Metern Tiefe.

Der vorhandene Kippenboden in der Versuchsfläche wurde im Vorfeld durch vier Rammkernsondierungen und neun Rammsondierungen mit der leichten Rammsonde untersucht. Ziel der Vorerkundung war es, den am besten geeigneten Standort innerhalb der Versuchsfläche für die Fahrspuren zu finden. Bei allen Rammkernsondierungen lag bis zur Endteufe

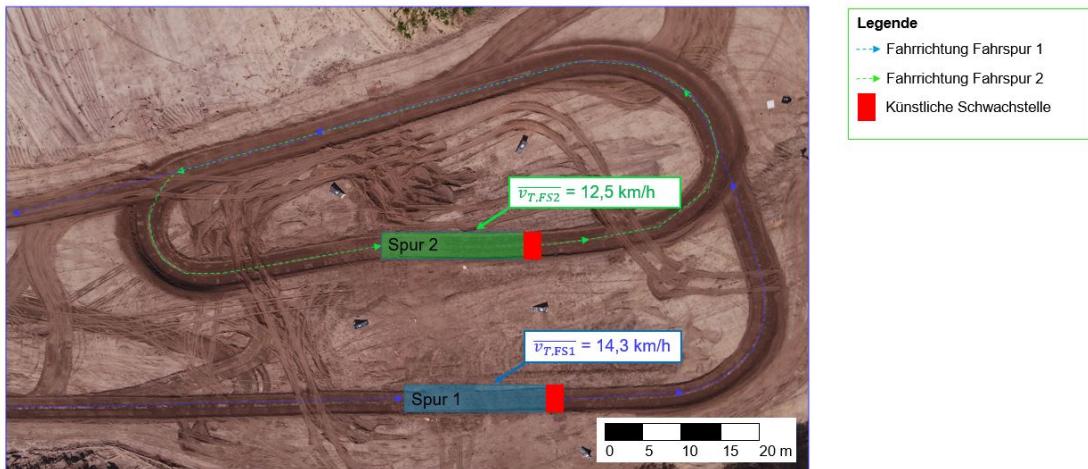


Abbildung 2.: Versuchsfläche auf dem ehemaligen Tagebau Greifenhain. Hervorgehoben sind die beiden Fahrspuren, auf denen mit jeweils unterschiedlichen Geschwindigkeiten verdichtet wurde.

bei fünf Metern unter GOK eine Schicht aus schwach kiesigen, schwach schluffigen Fein- bis Mittelsanden mit geringen Anteilen an Kohle an. Die Rammkernsondierungen ergaben sehr lockere bis mitteldichte Lagerungsverhältnisse, die sowohl in der Erkundungstiefe als auch über das gesamte Erkundungsgebiet verstreut waren. Aufgrund dieses Ergebnisses wurde beschlossen, den Boden in den Fahrspuren und im Bereich der Drucksondierungen mit Hilfe eines Baggers bis zu einer Tiefe von zwei Metern aufzulockern und dann die Oberfläche mit einer Planierraupe zu ebnen. Aus Zeitgründen konnte der anstehenden Boden jedoch nur bis zu einer Tiefe von einem Meter aufgelockert werden.

Die Spuren wurden jeweils 40-mal überfahren. Zur Erfassung der Verdichtungswirkung wurden in beiden Fahrspuren vor der Verdichtung und nach 10, 20 und 40 Überfahrten zwei Drucksondierungen bis zu einer Tiefe von fünf Metern abgeteuft. Zwei bis drei weitere Drucksondierungen wurden in der Nähe der Fahrspuren vor der Verdichtung und nach 10, 20 und 40 Überfahrten durchgeführt, um die seitliche Verdichtungswirkung zu erfassen. Weiterhin wurde mit der MASW-Methode die Verdichtungswirkung mit einer Tiefenauflösung zwischen 0,5 und 5,0 m untersucht. Für jede FS wurden 24 Anregungen vor der Verdichtung und 12 nach 10, 20 und 40 Überfahrten aufgezeichnet. Der Mittelpunkt der Geophonmesskette und die Anregungsquelle wurden während der Ausgangsmessung je Anregung um einen halben Meter, bei den darauffolgenden Messungen um einen Meter versetzt. Die von den Geophonen erfassten Signale wurden einer Dispersionsanalyse nach (Park 2011) unterzogen, und die ermittelten Dispersionskurven entsprechend (Löwe et al. 2019) ausgewertet. Die experimentellen Dispersionskurven wurden aus dem Frequenz-Geschwindigkeitsspektrum der Signalaufzeichnung gewonnen. Hierfür wird das Wellenfeld aus einer Zeit-Weg-Beziehung im Seismogramm in eine spektrale Frequenz-Wellenzahl (F-K-Analyse), oder Frequenz-Langsamkeits-Beziehung (F-p-Analyse) transformiert (Foti

et al. 2018).

Die Oberflächensetzungen wurden vor der Verdichtung sowie nach 10, 20 und 40 Überfahrten für beide Fahrspuren ermittelt. Dazu wurden ein terrestrischer Laserscanner und eine Kamera-Drohne (UAV-Photogrammetrie) verwendet. Auf Grund der höheren Reproduzierbarkeit über den gesamten, zweiwöchigen Versuchszeitraum hinweg, in dem verschiedene Beleuchtungs- und Witterungsbedingungen vorherrschten, wurden vorrangig die Messungen des terrestrischen Laserscanners zur Setzungsanalyse verwendet.

Zur Aufzeichnung der Kontaktfläche der Walze mit dem Boden wurde eine Hochgeschwindigkeitskamera (HGK) eingesetzt, die bei jeder zweiten Überfahrt und zusätzlich bei der ersten Überfahrt jeder FS eine vollständige Umdrehung der Bandage erfassen konnte. Zu diesem Zweck wurde die HGK mittig vor der FS positioniert. Der aufgezeichnete Weg betrug etwa sieben Meter, so dass pro Aufnahme drei bis vier Schläge mit einer Bildfrequenz von 700 Hz aufgenommen wurden. Darüber hinaus wurden die Aufnahmen zur Bestimmung der Walzenkinematik verwendet (redundantes Messsystem). Für beide Zwecke wurden im Vorfeld mit Schablonen verschiedene Markierungen auf die Bandage gesprührt. Um den Einfluss der Sonneneinstrahlung zu verringern, wurde die Kamera unter einem Pavillon positioniert.

Um die Geräteposition und die Zuggeschwindigkeit über die gesamte FS zu erfassen wurde ein Stereo-Kamera-System verwendet, welche aus zwei digitalen Spiegelreflexkameras (DSLR-Kameras) mit einer Brennweite von 18 mm bestand. Beide Kameras wurden Synchron durch Funkauflöser gestartet und in einem Abstand von ca. zehn Meter von dem unteren Rande der FS positioniert. Beide Kameras konnten nur den mittleren Bereich der FS aufzeichnen. Dies entspricht ca. 10 bis 15 m, je nach Kameraanordnung. Die Bildrate betrug 1 Hz.

Um die Aufzeichnungen der beiden optischen Messsysteme mit den Sensoren an der Walze zu synchronisieren, wurde eine elektronische Anzeigetafel vor der FS positioniert. Diese zeigte eine laufende Uhr an, die per Funk zusammen mit der Sensor-Messbox gestartet wurde. Vor jeder Überfahrt wurde die Uhr auf null gesetzt und neu gestartet. Die Anzeige zeigte die Zeit im Format hh:mm:ss,fff an und wurde immer von allen Kameras aufgezeichnet. Die Auswertung der Bilder erfolgte mit MATLAB-Skripten. Die Compute Vision Toolbox der MATLAB-Software verfügt über verschiedene Funktionen, die die Kalibrierung von Kameras, die Verfolgung von Bildbereichen oder Pixeln usw. ermöglicht. Zuerst wurden beide optische Messsysteme, das HGK- sowie das Stereokamerasytem, kalibriert. Da beide Messsysteme mehrmals positioniert wurde, wurde für jede Positionierung eine Kalibrierung durchgeführt.

Zur Erfassung der Kinematik über die Fahrtenanzahl wurde ein mobiles Messsystem bestehend aus einem PC, mehreren Messkarten und 7 Sensoren entwickelt. Um eine autarke Funktionsweise zu gewährleisten erfolgte die Steuerung des Messsystems über Funksignale und die Spannungsversorgung über Batterie. Die Bewegung des Zugfahrzeugs wurde mit einem triaxialen Beschleunigungssensor mit Messbereich +/-2G aufgezeichnet.

Die Bewegung der Deichsel (Verbindung zwischen Bandagenachse und Anhangereinheit) wurde hinsichtlich, deren Relativposition zum Anhänger mittels Seilzugsensor und deren Verdrehung mit Hilfe eines uniaxialen Drehratensensors am Verbindungspunkt zur Anhangereinheit erfasst. Die Beschleunigung und die Verdrehung der Bandagenachse wurden durch einen triaxialen Beschleunigungssensor (Messbereich +/- 10g) und einen triaxialen Inertialsensor (Beschleunigung: +/-50g und Drehrate: +/- 75°/s) bestimmt. An jeden Bandagenkörper wurde ein Messrad befestigt, deren Winkeländerungen von inkrementellen Drehgebern erfasst werden. Durch das Messsystem lassen sich alle einzelne möglichen Bewegungskomponenten ermitteln und zu einer Beschreibung des Gesamtsystems zusammenführen.

III. Projektergebnisse

III.I. Wissenschaftlich/technische Ergebnisse

III.I.I. Modul 1: Datenbank zum Verdichtungssystem und -Prüfung

Im *Modul 1* wurde eine Datenbank erstellt, welche als Grundlage für die weitere Arbeiten im Projekt dienen sollte. In dieser Datenbank wurden alle bekannten Forschungsarbeiten und Berichte über die Anwendung der RDC-Technologie in der Praxis gebündelt (siehe Abschnitt I). Ebenso wurden Daten zu verschiedenen Kippenböden aus dem Lausitzer Braunkohlerevier gesammelt. Die Datenbank wurde bis zum Ende des Projektes systematisch gepflegt und aktualisiert. Auf dieser Grundlage wurden entsprechend des Meilenstein 1 (vgl. Tabelle 1) alle geotechnisch relevanten Parameter und maschinentechnischen Kennwerte (Einflussfaktoren) für die oberflächennahe Verdichtung von Kippenböden zusammengefasst und die Anforderungen an einen Kippenmusterboden spezifiziert.

Zum Kippenmusterboden: Zur Aufarbeitung der Datenbank wurde u.a. durch (Roßberg 2020) eine rekursive Studie zur Ableitung der Anforderungen an einen Kippenmusterboden durchgeführt. Aus der hervorgeht, dass im Lausitzer Revier hauptsächlich Geschiebemergel, Schmelzwassersande und –kiese, sowie Schluffe, Tone, Mudden und Torfe abgelagert wurden. Die abgelagerten Böden sind stark nach Korngröße geordnet und weisen eine außerordentlich abgerundete Kornform auf. Das Kornband der Sande ist sehr eng ($1,5 < CU < 3$), der Grundwasserleiter liegt i.d.R. oberflächennah. Die Technologie der Verkippung bestimmt die Genese des abgelagerten Abraums. Typischerweise kommen Abraumförderbrücken zum Einsatz, die sogenannte Rippen aufschütten, wodurch lokale Materialhomogenität erzeugt aber durch den Abbaufortschritt global starke Materialheterogenität vorliegt. Diese äußert sich in Restlöchern und Unter- bzw. Überfüllungen des Abraumgeländes. Die Ablagerung des Materials ist aufgrund der runden Kornform und der Versturzhöhe typischerweise locker bis mitteldicht. In der Kombination dieser Randbedingungen sind die Kippen im Lausitzer Revier i.d.R. stark Verflüssigungsgefährdet.

Tabelle 2.: Bodenparameter und Zustandsgrößen, die eine Verflüssigung begünstigen (Grauwinkel 2020).

φ'	φ_u	d_{50}	$C_u \mid C_c$	RK	FKA	n
35°	11°	0,1 mm	<3 <1	0,8	<5 %	0,39 - 0,44

RK ... Rundheitskoeffizient (Kugel: RK = 1)

FKA ... Feinkornanteil $d < 0,063$ mm

n ... Typische Porenzahl der Verkipfung im Lausitzer Revier

Konkret wurden von (Grauwinkel 2020), der ebenfalls auf Basis der erstellten Datenbank eine rekursive Studie vorgelegt hat, die Bodenparameter und Zustandsgrößen zusammengefasst, welche den Versagensfall der Verflüssigung begünstigen. Als verflüssigungsgefährdet gelten demnach vor allem enggestuften Fein- und Mittelsande mit einem Feinkornanteil $<5\%$, gut gerundete kugelförmige Körner mit glatter Oberflächenstruktur und einen mittleren Korndurchmesser zwischen 0,08 und 0,1 mm. Die Parameter, die eine Verflüssigung begünstigen sind in Tabelle 2 zusammengefasst.

Die geotechnische Herausforderung in der Lausitz ist die Bodenverflüssigung, welche – entgegen der Problematik im Rheinischen Revier – durch innere Initiale (Personen, Verkehr, Bautätigkeit) ausgelöst wird. Zur Wiedernutzbarmachung der Flächen müssen diese stabilisiert werden. Typischerweise erfolgt eine Verfahrenskombination aus einer Spezialtiefbaumethode (Rütteldruck- bzw. Rüttelstopfverdichtung) und einer nachfolgenden oberflächennahen Nachverdichtung. Alternativ zu den Verfahren des Spezialtiefbaus ist die schonende Sprengverdichtung ein etabliertes Werkzeug. Die Rütteldruck- und Rüttelstopfverdichtung wird üblicherweise in Böschungsnähe genutzt um einen versteckten Damm im Boden herzustellen. Nach der Methode des Spezialtiefbaus muss das Gelände profiliert und die ersten Meter mit einer oberflächennah wirkenden Methode nachverdichtet werden. Diese oberflächennah wirkenden Methoden sind i.d.R. Walzenzüge oder die hier bearbeitete RDC-Methode.

Durch die Spezialtiefbaumethoden wird grundsätzlich die Verflüssigungsgefahr des verkippten Bodens signifikant reduziert. Die Ausführung der Nachverdichtung ist durch Verflüssigung wesentlich weniger gefährdet. Deshalb wurde beschlossen, auf Basis dieser Eigenschaften bestimmten nichtbindigen Bodenarten für die weiteren Untersuchungen (Numerik, Modell- und Feldversuche) im Projekt auszuwählen. Da Verflüssigung im Kontext des Bauablaufs weniger relevant ist, wurde im Projekt trockenes Material genutzt. Im Kontext der Modellversuche führt dies zu einer reproduzierbareren Versuchsdurchführung. Darüber hinaus wird der Einfluss der Wasserphase im reduzierten Spannungszustand der Modellversuche kritisch bewertet, insbesondere wenn nicht ausschließbare Phänomene der Teilsättigung – wie die scheinbare Festigkeitszunahme durch Kapillarkohäsion, die insbesondere im niedrigen Spannungsbereich relevant ist – auftreten.

Zu Einflussfaktoren des RDC-Systems und dessen im Kontext der Studie relevanten Parametern: RDC-Systeme haben unterschiedliche Geometrien, die insbesondere durch

die Anzahl der Ecken und deren geometrische Ausprägung definiert sind. Daneben wurden die Bandagenmasse und die Fahrgeschwindigkeit der Zugmaschine als für die Verdichtung relevanten maschinentechnischen Parameter identifiziert. Im Kontext des ersten Meilensteins wurde herausgearbeitet, dass insbesondere hinsichtlich der Modellierung des RDC-Systems mit numerischen Methoden und der Abbildung dieser Systeme im Modellversuch wenig Arbeiten bekannt sind. Insgesamt wurde dies auf die These zurückgeführt, dass die Gesamtbeschreibung der Kinematik der Bandage komplex und bislang unbekannt ist. Die sich aus der Kinematik und den maschinentechnischen Parametern ableitenden Größen Energie und Kraftstoß wurden als wesentliche Einflussfaktoren auf die Wirkungsweise des Systems festgelegt. Die korrekte Abbildung des RDC-Systems mit numerischen Methoden – insbesondere die korrekten kinematischen Randbedingungen des Antriebs – sollte durch eigene Arbeiten weiter untersucht werden. Für die Abbildung des RDC-Systems im Modellaufbau musste eine weitere Antriebsachse installiert werden. Bekannte Modellaufbauten, die wiederholt längere Strecken abfahren wie bei (Y. Chen, Mark B. Jaksa, Y.-L. Kuo et al. 2022) sind im vorhandenen Modellaufbau nicht realisierbar.

III.I.II. Modul 2: Numerische und experimentelle Modelle des RDC an homogenen Böden

Im *Modul 2* sollten die Ergebnisse aus *Modul 1* für homogene Böden und einfache bodenmechanische Zustände im numerischen Modell und einem Versuchsaufbau aufbereitet und umgesetzt werden. Insbesondere musste die korrekte Abbildung der kinematischen Randbedingungen des Antriebs für das numerische Modell hinterfragt werden. Bei einfachen Modellversuchen ist die Wirkungsweise und Nachbildung des RDC-Systems inhaltlich relevant, um u.a. erste Prüfsysteme zur Verdichtungsprüfung ableiten zu können. Die konkreten Zielkriterien des Moduls sind in Tabelle 1 Meilenstein 2 zu lesen.

Abbildung der kinematischen Randbedingungen im numerischen Modell: Im *Modul 2* wurde das numerische Grundmodell für die folgenden Untersuchungen aufgebaut. Hierzu wurden Sensitivitätstudien mit dem Drucker-Prager-Kappen-Modell durchgeführt. Insbesondere wurden die Aspekte der Modell- und Elementgröße, sowie der Gestaltung der äußeren Randbedingungen beleuchtet. Zusammenfassend konnte aufgrund dieser Untersuchungen festgestellt werden, dass ein Modell mit infiniten Elementen an den Rändern und einer Dimension von 30 m Breite und 10 m Tiefe für die untersuchte dreiseitige Geometrie ausreichend ist. Insbesondere im Hinblick auf die kinematische Interpretation ist die Verwendung von infiniten Elementen an den Rändern notwendig, da nur so starke Reflexionen der Boden- und Oberflächenwellen und damit eine fehlerhafte Interpretation der Gerätekinetik vermieden werden können. Eine Reduktion der Elementgröße führt erwartungsgemäß zu einer Verbesserung der numerischen Abbildung des Kontakts zwischen Boden und Walze. Es wurde auf Basis der Studien festgelegt, den Boden und die Walze mit quadratischen Elementen mit einer Kantenlänge von 5 cm zu diskretisieren.

Im Hinblick auf die korrekte Modellierung der kinematischen Randbedingungen des Antriebs der Walze wurden insgesamt fünf verschiedene Varianten untersucht. Dabei wurde unterschieden zwischen einer Randbedingung die im Massenschwerpunkt der Walze wirkt, und einer exzentrisch wirkenden Randbedingung. Die hierzu durchgeführte Variantenstudie Szloboda 2019 kommt zu dem Schluss, dass insbesondere die Vorgabe einer Winkelgeschwindigkeit und/oder eines Moments zu fehlerhaften Ergebnissen führt. Sehr ähnliche Ergebnisse trotz Unterscheidung in exzentrische und zentrische Aufbringung der Randbedingung wurden bei den Varianten mit einer konstanten Zuggeschwindigkeit erzielt. Die Definition der exzentrischen Randbedingung an einem Kelvin-Voigt-Elements führte zu keinem signifikanten Unterschied in den Ergebnissen. Es wurde auf Basis von ebd. festgelegt, die kinematische Randbedingung über eine exzentrisch eingeleitete konstante Zuggeschwindigkeit zu modellieren, die am Anfang des Berechnungsschrittes linear auf die Zielgeschwindigkeit gesteigert wird.

Wirkungsweise und Nachbildung des RDC-Systems im Modellversuch: Die Untersuchung der Gerätekinetik erfolgte praktisch im Modellversuch. Zusätzlich dazu wurde ein theoretischer Ansatz zur Beschreibung der Kinematik entwickelt, der folgend beschrieben wird.

Die Kinematik eines beliebigen starren, nicht kreisförmigen Körpers beim Rollen lässt sich durch die Beziehung zwischen dem Massenschwerpunkt und dem Kontaktspunkt des Körpers mit dem Untergrund beschreiben (siehe Abbildung 3). Der Einfachheit halber wird in Abbildung 3 die Ellipse als Beispiel verwendet, um zu zeigen, wie die Kinematik eines beliebigen nicht kreisförmigen Körpers während des Walzens bestimmt werden kann. Anders als bei einer kreisförmigen Geometrie liegt der Kontaktspunkt nicht immer orthogonal zum Massenschwerpunkt, weshalb die Höhe ebendieses über dem Boden nicht konstant ist. Für die semi-analytische Nachbildung der Kinematik wird angenommen, dass der Massenschwerpunkt mit der Rotationsachse der Walze übereinstimmt. Zwei Koordinatensysteme werden eingeführt. Ein ortsfestes x-y-System und ein Objekt-Koordinatensystem $\Delta x - \Delta y$ des abrollenden unregelmäßigen Starrkörpers. Der Boden wird als starr angenommen.

Die unregelmäßige Geometrie wird definiert als eine Menge von Punkten P , die gleichmäßig über den Umfang der Ellipse verteilt sind. Die Radiusvektoren R , ausgehend vom Objektkoordinaten-Ursprung zum Kontaktspunkt können für einfache Geometrien analytisch gefunden werden. Im vorliegenden Fall, ergaben sich diese aus einer diskretisierten 2D-Geometrie. Zwei benachbarte Radiusvektoren spannen ein Dreieck auf, wobei die Bewegung des Starrkörpers als Kippen über den aktuellen Kontaktspunkt der Geometrie auf dem Boden P_i von einem Dreieck zum nächsten beschrieben wird. Die Translation des Starrkörpers im Objekt-Koordinatensystem ist dann:

$$\mathbf{r}_i = \begin{bmatrix} \Delta x_i \\ \Delta y_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \vec{R}_i \cos(\beta_{i-1}) + \vec{R}_i \cos(\alpha_i) \\ \vec{R}_i \sin(\alpha_i) - \vec{R}_i \sin(\beta_{i-1}) \end{bmatrix}$$

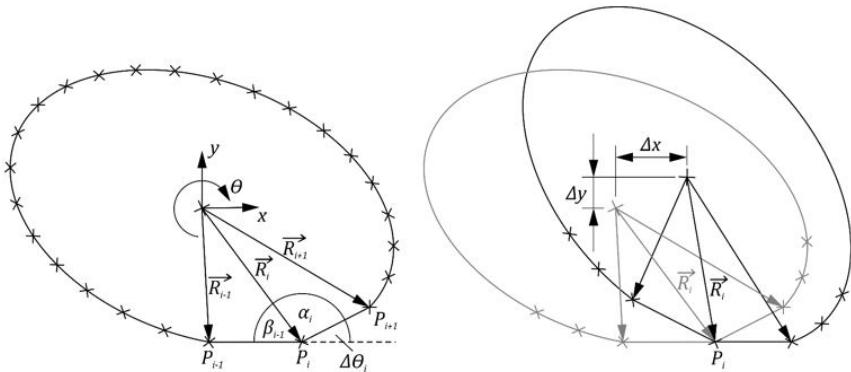


Abbildung 3.: Punkte der Geometrie und Winkel am aktuellen Kontaktpunkt P_i (links). Bewegungskomponenten des Massenschwerpunkts nach dem Umkippen (rechts).

Die Verdrehung um die Schwerpunktlage ist

$$\Delta\theta_i = \pi - \alpha_i - \beta_{i-1}$$

Durch Summation der Inkremente $\Delta\theta_i$ ergibt sich der Ortsvektor \mathbf{r} und der Rotationsvektor $\Delta\theta$. Zur Berechnung der Kinematik wird angenommen, dass $\Delta\dot{x}_i = v_T$ mit v_T als die Zuggeschwindigkeit. Diese Einschränkung ist für bei Interpretation der so berechneten Kinematik zu beachten. Durch das so bestimmbare Zeitinkrement Δt_i kann der Vektor der Translationsgeschwindigkeit $\dot{\mathbf{r}}$ und der Winkelgeschwindigkeit $\dot{\theta}$ des Starrkörpers bezogen auf das ortsfeste Koordinatensystem errechnet werden.

Wie im *Modul 1* herausgearbeitet, haben die maschinentechnischen Parameter der Walzengeometrie, der Bandagenmasse und der Zuggeschwindigkeit Einfluss auf die verdichtungsrelevanten Größen Energie und Impuls des RDC-Systems. Mit dem vorstehend beschriebenen Projektergebnis ist es möglich für beliebige Walzengeometrien und variable Zuggeschwindigkeiten eben diese verdichtungsrelevanten Parameter für ein System auf starrem Untergrund abzuschätzen. Die beschriebene Methode wurde in Matlab implementiert und ist Grundlage für die Validierung der weiteren numerische Untersuchungen, sowie Modell- und Feldversuche.

Die Methode wurde sowohl mit einem kleinskaligen Modellversuch und numerischen Methoden Validiert (vgl. Abbildung 4). Für den Modellaufbau wurde ein dreiseitigen RDC-Gerät im Maßstab 1:16 mit Sensorik zur Erfassung der Kinematik instrumentiert. Die Geometrie wurde auf einem starren Untergrund abgerollt, dass Bewegungsverhalten wurde erfasst und anschließend mit dem theoretisch ermittelten Bewegungsverhalten aus oben beschriebener Methode verglichen. Wie Abbildung 4b am Beispiel des θ - Δy -Diagramms verdeutlicht, bildet der theoretische Ansatz die praktisch messbare Kinematik korrekt ab. Die Ungenauigkeiten im Hinblick auf den lokalen Maximalwert werden auf Fertigungs-Ungenauigkeiten des verwendeten 3D-Druckmodells zurückgeführt.

Dies konnte durch einen Vergleich mit einer numerischen Simulation abgesichert werden (Abbildung 4a).

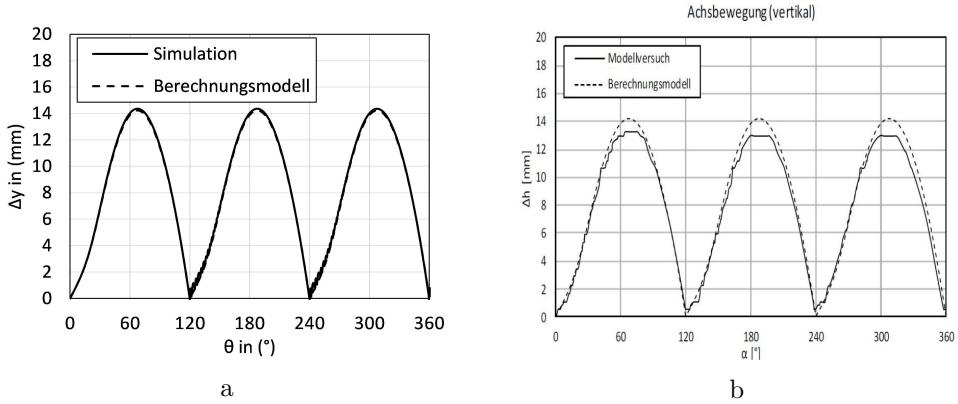


Abbildung 4.: Vergleich der simulierten (a) und gemessenen (b) vertikalen Verschiebung eines dreiseitigen RDC-Verdichters mit der aus dem theoretischen Berechnungsmodell.

III.I.III. Modul 3: Numerische und experimentelle Modelle des RDC an Kippenböden

Übergeordnete Zielstellung des *Moduls 3* war die Implementierung von Modellwalzen im Versuchsaufbau sowie die Abbildung von Kippenböden sowohl im numerischen Modell als auch im Versuchsaufbau. Hierzu werden nachfolgend Ergebnisse zur Materialkalibrierung für die numerische Simulation von Kippenböden, zum Einbau eines Kippenmusterbodens in den Versuchsaufbau sowie zu Indikatoren des Verdichtungserfolgs, insbesondere aus der numerischen Simulation, vorgestellt (vgl. Tabelle 1).

Materialkalibrierung: Das RDC-System bedingt durch seine Arbeitsweise oberflächennahe große Deformationen und eine – durch die Vielzahl an Überfahrten – zyklische Belastung tieferer Bodenschichten. Unter dieser Sachlage wurde das Hypoplastische Stoffgesetz mit der Erweiterung um Intergranulare Dehnungen für die Simulation genutzt und kalibriert. In der projektbegleitend entstandenen Arbeit von (Fock 2021) wurden verschiedene Methoden zur Kalibrierung dieses Stoffgesetzes zusammengefasst und ein standardisiertes Vorgehen zu Parameterspezifikation empfohlen. Der in Abbildung 5 vorgestellte Ansatz kombiniert bekannte Ansätze zur Materialkalibrierung mit dem Ziel ein möglichst kleines – aber hinreichend genaues Versuchsprogramm auszuführen. Zusammenfassend ist festzustellen, dass weggesteuerte Ödometerversuche zur Bestimmung der Materialparameter h_s und n sowie die konventionelle, kraftgesteuerte Ödometerversuche, insbesondere bei der hierbei notwendigen, großen Porenzahl, vorzuziehen sind.

Einbau eines Kippenmusterbodens in den Modellaufbau: Entsprechend den Ergebnissen aus *Modul 1* wurde ein gut gerundeter, enggestufter Sand als Kippenmusterboden eingesetzt. Dieser wurde trocken in den Modellaufbau eingebracht, da die Verflüssigungsgefahr

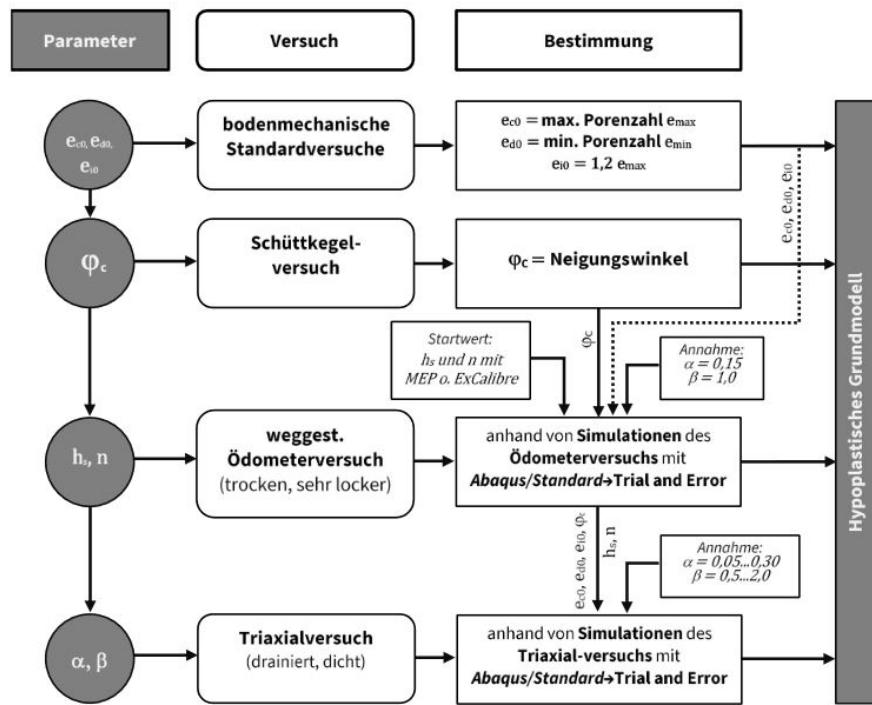


Abbildung 5.: Standardisierte Vorgehensweise zur Parametrisierung der Stoffparameter aus (Fock et al. 2022)

baupraktisch durch den Einsatz von Spezialtiefbaumethoden vor der Überfahrt mit dem RDC-System reduziert wird. Der trockene Einbau sollte eine lockere Lagerungsdichte, entsprechend einem verflüssigungsgefährdeten Sand, herstellen.

Für den trockenen Einbau von granularen Böden ist die Sandregenmethode (Air Pluviation) etabliert. Die Dichte des eingebrachten Bodens ist für diese Methode direkt proportional zur freien Fallhöhe und indirekt proportional zur Ausbringmenge des Sandes. Große Fallhöhen und geringe Ausbringmengen resultieren in einer hohen Lagerungsdichte und vice versa. Eine vorhandene Einrieselaperatur für den Versuchsaufbau wurde dazu im Zuge des Projektes insbesondere hinsichtlich der möglichen Materialentmischung untersucht. Abbildung 6 zeigt ein typisches Ergebnis der Untersuchung. Es wird deutlich, dass der bestehende Aufbau eine Materialentmischung über die Rieseldauer begünstigt. Anfänglich werden Partikel < 0,5 mm verstärkt eingebracht. Der Anteil an kleinen Partikel nimmt mit der Zeit ab, so dass am „Ende“ mehr große Partikel als am „Anfang“ eingerieselten werden. Dieses Phänomen verursacht eine Steigerung der bezogenen Lagerungsdichte über die Zeit.

Für die vorhandene Einrieselaperatur wurde unterstellt, dass die Entmischung durch einen inhomogenen Materialfluss verursacht wird. Bewegt sich nur ein Teilbereich des Bodens kommt es zum sogenannten Kernfluss, wobei im Randbereich Zonen geringer Fließgeschwindigkeiten eminent sind. In der Grenzschicht zwischen Materialfluss und Materialstillstand kommt es zur Entmischung. Im Gegensatz zum Kernfluss, ist beim Massenfluss der gesamte Inhalt der Apparatur im Bewegung. Um einen Massenfluss zu begünstigen, müssen die Wände der Apparatur glatt und ausreichend steil sein. Ein weiterer Störfaktor während des Bodeneinbaus war die händische Führung der bestehenden Einrieselapparatur innerhalb des Probeträgers.

Zum Einbau des Kippenmusterbodens wurde deshalb die bestehende Einrieselvorrichtung grundhaft erneuert. Alle geneigten Flächen der bestehenden Apparatur wurden durch senkrechte Flächen ersetzt. Darüber hinaus wurde ein teilautomatischer Einbau der Schicht realisiert. Dazu wurde die Einrieselaperatur an den in den *Modulen 1 und 2* neu beschafften horizontalen Antrieb des Versuchsaufbaus befestigt. Dieser bewegt die Einrieselvorrichtung mit konstanter Geschwindigkeit durch den Kasten. Der Sandeinbau startet automatisch mit Verfahrbeginn der Apparatur und sorgt so für eine konstante Schichthöhe. Durch diese Anpassungen konnten zum einen die Problematik der Materialentmischung reduziert und zum anderen eine konstanten Schichthöhe erreicht werden, was insgesamt die Einbauqualität des Kippenmusterbodens gewährleistet.

Die Skalierung des Systems im Modellversuch ist nicht linear. Entsprechend (Altaee und Fellenius, Bengt, H. 1994) skaliert z.B. die Masse des Modells mit dem Faktor ξn^3 und die Geschwindigkeit mit \sqrt{n} wobei n der geometrische Skalierungsfaktor und $\xi = \varrho_M / \varrho_R$ eine Walzendichte-Skalierungsfaktor ist. Die Modelldimensionen sind dahingehend nicht frei wählbar, sofern reale Dimensionen des Verdichtungssystems abgebildet werden sollen. Die korrekte Skalierung ist in anderen Modellversuchen (vgl. Abschnitt I) nicht hinreichend diskutiert. Zum Beispiel skaliert nach (Y. Chen, Mark B. Jaksa, Y.-L. Kuo et al. 2022) die Geschwindigkeit mit n und die Zeit mit 1, was zur Folge hat, dass die

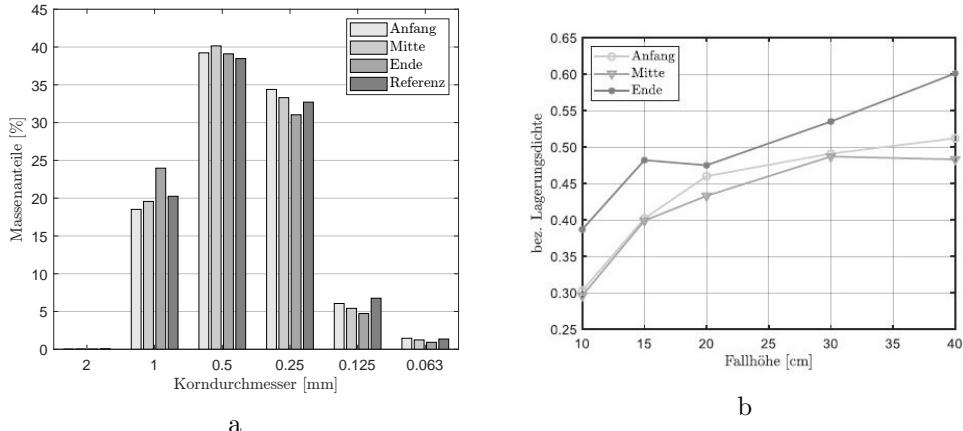


Abbildung 6.: Korngrößenverteilung in Abhängigkeit der Zeit (a) und bezogene Lagerungsdichte in Abhängigkeit der Fallhöhe und der Zeit (b).

Tabelle 3.: Variationsbereich der durchgeführten Modellversuche.

d_M in mm	m_M in kg	v_M in m/s	Real				
			n	ξ	d_R in m	m_R in t	v_R in km/h
335	3,9 - 11,3	1,0 - 1,5	6,5	4,8	2,2	5,0 - 14,6	9,2 - 13,7
193	2,6 - 6,2	0,8 - 1,2	11,2	1,4	2,2	5,0 - 12,0	9,7 - 14,5

$d_{<>}$... Größter Außendurchmesser des Verdichters

$m_{<>}$... Masse des Verdichters

$v_{<>}$... Zuggeschwindigkeit der Achse

n, ξ ... Skalierungsfaktoren

Erdbeschleunigung ungleich 1 skaliert und damit physikalische Gesetze verletzt. Im Projekt wurde ausschließlich ein dreiseitiges System untersucht. Die durchgeführten Versuchsvarianten sind in Tabelle 3 dargestellt.

Die korrekte Abbildung der Kinematik setzt voraus, dass die Bandage – die durch einen Linearantrieb mit konstanter Geschwindigkeit gezogen wird – ideal abrollt. In der praktischen Umsetzung im Modellversuch kommt es allerdings zum Schlupf, der durch ein temporäres Schleifen der Bandage gekennzeichnet ist und durch ein fehlerhaftes Verhältnis von realer Abrolllänge zu Winkellage messbar wird. Der Schlupf ist abhängig von der gewählten Modellskalierung und wird durch größere Geometrien reduziert, allerdings durch größere Massen begünstigt. Zur Reduktion des Schlupfes wurde eine Gummimatte auf den Boden in der Beschleunigungsstrecke platziert. Das System konnte so im Beschleunigungsbereich anfahren und den Prüfbereich nahezu schlupffrei passieren.

Aufgrund der Anforderung, das System korrekt abzubilden und der methodischen Herausforderung des Schlupfes konnte nur ein einziger Walzenstoß ausgewertet werden. Im Boden sind hierbei folgende Aspekte zu beobachten

1. Die Verdichtungswirkung des Systems wird durch den Aufprall der Walze auf den Boden erreicht.
2. Der Stoß der Modellwalze auf den Probekörper verursacht temporär zwei Verschiebungsfronten in unterschiedlichen Raumrichtungen:
 - a) eine horizontale Front entgegen der Fahrtrichtung
 - b) eine vertikale Front direkt unterhalb des Aufprallpunktes.
3. Nach dem Stoß kommt es zu einer horizontalen Verschiebungsfront vor der Walze.

Die durch den Stoß eingeprägte Bodendeformation verändert sich mit der weiteren Bewegungsabfolge des Verdichters (siehe Abbildung 8). Die vertikale Ausprägung der Deformation vergrößert sich räumlich in den ersten Momenten des Hebens, wodurch der Verdichtungsbereich homogenisiert wird. Darüber hinaus wird beobachtet, dass sich die eingeprägte Mulde in Fahrtrichtung des Verdichters durch dessen weitere Bewegung verschiebt. Der Boden wird in dieser Phase "geknnetet". Ein RDC-System wirkt insbesondere in der Phase des Stoßes und anschließend – in Abhängigkeit der Ausprägung der Geländeoberkante – auch noch in der Phase des Hebens verdichtend auf den Boden ein. Das eben beschriebene Verhalten ist beispielhaft in Abbildung 7 und Abbildung 8 dargestellt.

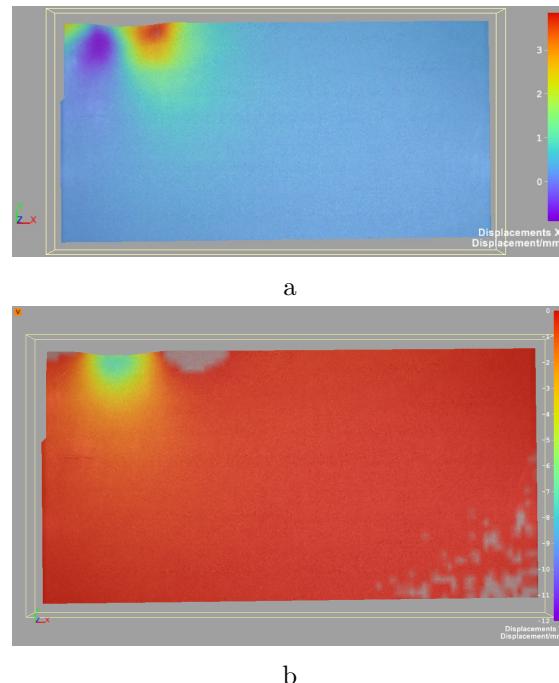


Abbildung 7.: Bodenverschiebungen zum Stoßende in der X-Richtung (a) und in der Y-Richtung (b).

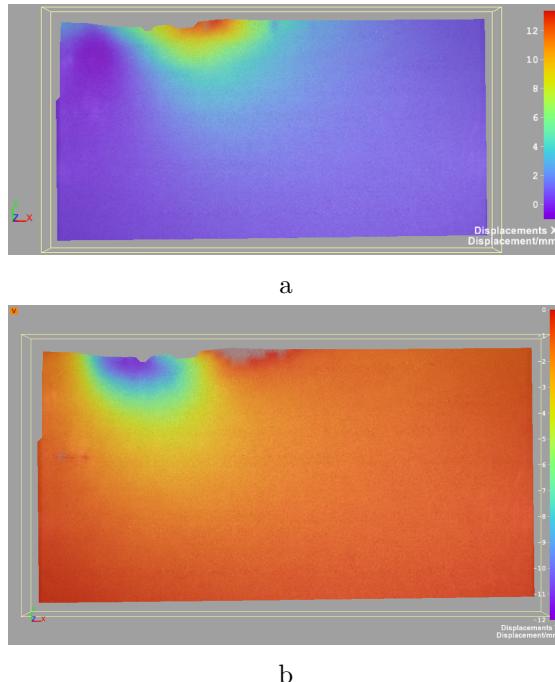


Abbildung 8.: Bodenverschiebungen zum Anfang des Hebens in der X-Richtung (a) und in der Y-Richtung (b).

Neben der Deformation im Boden wurde eine Methode erarbeitet, die Deformation der Geländeoberkante zu erfassen (Jutzenka 2022). Hierzu wurde ein vorhandener 3D-Scanner genutzt, der das Gelände mit einer theoretischen Genauigkeit von 0,1 mm als Punktwolke erfasst. Die so entstandene Punktwolke wird mit einem Matlab-Skript weiterverarbeitet und aufbereitet, wobei nachgewiesen werden konnte, dass die derart ermittelten Oberflächensetzungen mit händischen Messungen korrelieren. Die so erarbeitete Methode ist Grundlage für die Entwicklung einer volumetrischen Interpretation der Geländedeformation und somit ein direkter Indikator für die globale Verdichtung im Modellversuch. Darüber hinaus ist die Methode geeignet um nachzuweisen, nach welcher Überfahrtanzahl keine signifikante Gelände- oder Volumenveränderung stattgefunden hat. Beispielhaft ist ein aufbereitetes Ergebnis in Abbildung 9 dargestellt. Für dieses ist erkennbar, dass die maximale Setzung im Prüfbereich (Mitte) nach 10 Überfahrten erreicht wird und weitere Überfahrten keinen weiteren Verdichtungseffekt zeigen.

Die Auswertung mehrerer Überfahrten erwies sich insbesondere im Hinblick auf die Identifikation relevanter Verdichtungsindikatoren als herausfordernd. Durch den Umstand, dass immer nur ein Schlag im Messfeld ausgewertet werden konnte, kam es zu einer signifikanten Streuung der bis zu diesem Zeitpunkt in der Kinematik identifizierten Verdichtungsindikatoren (Maximalwert der Beschleunigung). Es wurde in Abwägung zwischen zu erwartender Ergebnisqualität und Aufwand entschieden, die Modellversuche nicht für die Interpretation der Verdichtungsindikatoren zu nutzen und den Fokus

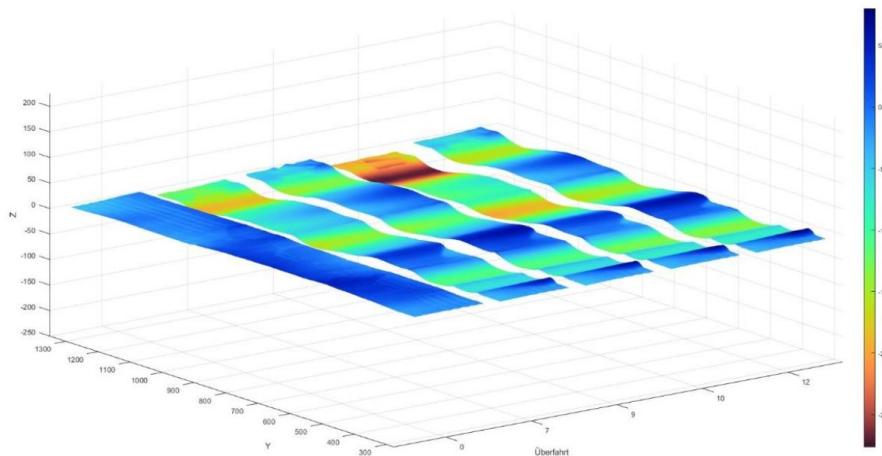


Abbildung 9.: Setzung-Hebungs-Erscheinungen in Relation zum Ausgangsgelände nach 7, 8, 10 und 12 Überfahrten.

diesbezüglich auf die Ausführung eines Feldversuchs zu legen.

III.I.IV. Modul 4: Ableitung technischer gerätespezifischer Parameter für eine energiesparende Verdichtung

Das *Modul 4* greift die Ergebnisse von *Modul 2 bis 4* auf und bündelt diese in einer realitätsnahen Umgebung. In diesem Modul werden insbesondere *Erkenntnisse zur Optimierung der Verdichtungsarbeit* auf Basis des theoretischen Ansatz zur Beschreibung der Kinematik und einem Feldversuch beleuchtet. Hierfür wurde u.a. das RDC-Verfahren auf Basis eines gemeinsamen Feldversuchs mit dem Projektpartner bewertet und *charakteristische Phasen in der Bewegungsabfolge* der Walze benannt. Auf Basis dieser Bewertung wurde ein potentieller *Parameter zur Verdichtungskontrolle* identifiziert. Ferner wird gezeigt, dass *die Ergebnisse des Feldversuchs mit den Ergebnissen der Numerik und dem erarbeiteten theoretischen Modell der Kinematik korrelieren*.

Die Charakteristik in der Bewegungsabfolge des RDC-Systems: Auf Basis des theoretischen Ansatzes zur Beschreibung des Kinematik des System, welche durch den Feldversuch validiert wurde, ist die Bewegungsabfolge des RDC-Systems gekennzeichnet durch die Phasen Heben(A-B), Fallen(B-C), Stoß(C-C'). Ein Vergleich der theoretisch ermittelten Kinematik mit den Ergebnissen des Feldversuchs ist in Abbildung 10a dargestellt.

Die aktive Kraftübertragung in den Boden erfolgt in den Phasen Stoß und Heben. Die Kontaktkraft der Walze hat eine Komponente in vertikaler (siehe Abbildung 11a) und in horizontaler Richtung (siehe Abbildung 11b), wobei hier vorerst nur der Maßgebende Einfluss der vertikalen Stoßkraft vorgestellt wird. Die vertikale Stoßkraft (C - C') nimmt rasch zu, bis sie ein Maximum erreicht. Anders als bei einem Fallgewicht wird das Ende des Aufpralls nicht durch den Boden, sondern durch den Verdichter selbst bestimmt. Das

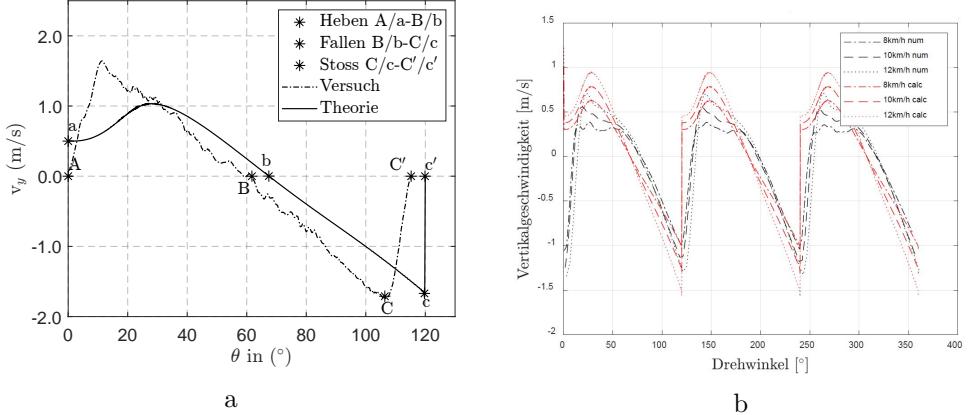


Abbildung 10.: Vergleich der theoretischen Kinematik mit der in Feldversuchen ermittelten Kinematik (??) und der durch numerische Simulationen ermittelten Kinematik (??).

Erreichen einer bestimmten Position des Walzenumfangs führt zu einer Richtungsänderung der Vertikalachsengeschwindigkeit (Punkt C') und damit zum Ende des Stoßvorgangs. Bemerkenswert ist, dass trotz der Richtungsänderung der Bandage eine weitere erhöhte Kraftübertragung in den Boden in der Phase des Hebels erfolgt. Der Boden wird folglich auch in der Phase des Hebels der Bandage verdichtet. Die Beobachtungen aus dem Modellversuchs (vgl. Abbildung 7) lassen sich auf Basis der Ergebnisse des Feldversuchs erklären.

Die Kraftübertragung eines RDC-Systems ist im Vergleich zu anderen transient wirkenden Verdichtungstechnologien (Fallgewichtsverdichtung, Impulsverdichtung) verschieden. Der Stoßprozess ist durch die erzwungene Bandagenbewegung unterbrochen. In Abgrenzung zu eben genannten Verdichtungstechnologien wird kein Beschleunigungsplateau nach erreichen des Maximalwerts der Beschleunigung beobachtet. Ferner ist davon auszugehen, dass der theoretische Maximalwert der Beschleunigung \hat{a}_y – für den $\hat{a}_y \propto \min(v_y)^2$ gilt – nicht erreicht wird. Die transiente eingebrachte Verdichtung durch ein RDC-System wird deshalb als unterbrochener, schiefer, exzentrischer Stoß charakterisiert.

Erkenntnisse zur Optimierung der Verdichtungsarbeit: Auf Basis des in *Modul 2* erarbeiteten theoretischen Ansatzes zur Beschreibung der Kinematik lässt sich feststellen, dass für eine gegebene Walzengeometrie ihre Masse und die Fahrgeschwindigkeit des Zuggeräts wesentlichen Einfluss auf die eingebrachte Energie haben. Die in den Boden eingebrachte Energie wird als die Änderung der kinetischen Energien vom Zeitpunkt des Aufpralls t bis zum nächsten Nulldurchgang der Achsgeschwindigkeit in vertikaler Richtung t' für $v'_{R,y}(t') = 0$. Wird die Walze als einfacher Starrkörper mit der Masse m_R modelliert, so ist die eingebrachte Energie:

$$\Delta E = \frac{1}{2} m_R (v_{R,y}^2 - v'^2_{R,y}) + \frac{1}{2} m_R (v_{R,x}^2 - v'^2_{R,x}) + \frac{1}{2} I_R (\omega_{R,y}^2 - \omega'^2_{R,y})$$

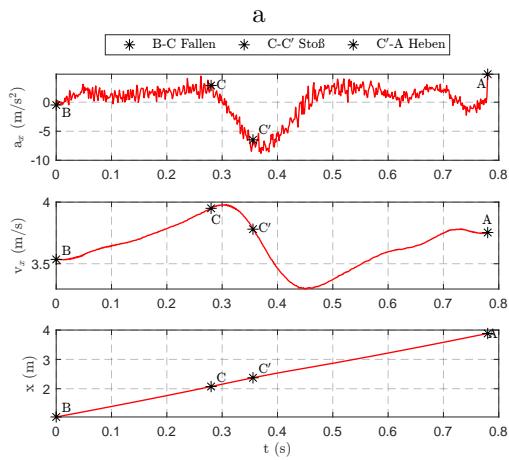
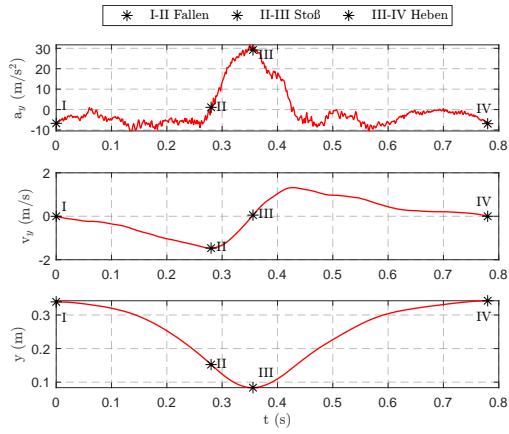


Abbildung 11.: Kinematik in Y-Richtung (a) und in X-Richtung (b).

Tabelle 4.: Quantität der Einflussfaktoren ermittelt aus Feldversuchen in Abgrenzung zum theoretischen Ansatz.

	F_x^i	F_y^i	F_ω^i
Theorie F_i^T	0,0	0,110	0,0
Feldversuch F_i^R	0,046	0,110	0,09

Im Rahmen des Feldversuchs konnte gezeigt werden, dass die Änderung der Einschlaggeschwindigkeit in horizontaler Richtung ($v_{R,x}^2 - v'^2_{R,x}$) nur unwesentlich durch die Anzahl der Überfahrten beeinflusst wird. Die eingebrachte Energie wird mit steigender Überfahrtanzahl durch eine Zunahme der vertikalen Geschwindigkeitsänderung ($v_{R,y}^2 - v'^2_{R,y}$) positiv beeinflusst und gleichsam durch eine Reduktion der Winkelgeschwindigkeitsänderung ($\omega_{R,y}^2 - \omega'^2_{R,y}$) gehemmt. Aus einer begleitenden numerischen Studie ist bekannt, dass die vertikale Geschwindigkeit der Bandage *nicht* durch die Steifigkeit des Bodens beeinflusst wird. Die Abbildung III.I.IV kann unter Vernachlässigung des Einflusses der Überfahrtanzahl verallgemeinert werden zu:

$$\Delta E = m_R(F_y^R + F_x^R)v_T^2 + I_R F_\omega^R v_T^2$$

Darin sind F_j^i die jeweiligen Einflussfaktoren auf die übertragene Verdichtungsenergie, welche in ihrer zahlenmäßigen Größe in Tabelle 4 zusammengefasst sind. Das theoretische Modell ist aufgrund der gewählten Randbedingung einer konstanten Zuggeschwindigkeit nicht in der Lage den Einfluss der horizontalen Geschwindigkeitsänderung abzubilden. Aus eben dieser Annahme im theoretischen Ansatz resultiert ein sehr kleiner Einfluss der Winkelgeschwindigkeitsänderung auf die übertragene Energie. Abseits dieser rand- und modellierungsbedingten Einschränkungen bildet das theoretische Modell den Einfluss der vertikalen Geschwindigkeitsänderung auf die übertragene Energie hinreichend ab.

Auf Basis der durchgeführten Feldstudie kann mit dem Parametersatz aus Tabelle 4 abgeschätzt werden, wie groß die Verdichtungsenergie eines dreiseitigen RDC-Systems mit unterschiedlicher Zuggeschwindigkeit und Bandagenmasse ist. Die Abschätzung ist in Tabelle 5 zusammengefasst. So führt beispielsweise eine Erhöhung von v_T um 2 km/h zu einer etwa gleich hohen Steigerung der Verdichtungsenergie wie eine Erhöhung der Masse um zwei Tonnen. Im Gegensatz zur Erhöhung der Masse führt die Erhöhung von v_T zu einer geringeren Prozessdauer. Unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit ist das System bei der höchsten v_T immer das effizientere System.

Parameter zur Verdichtungskontrolle: Entsprechend dem beobachteten Bewegungsverhalten (unterbrochener, schiefer, exzentrischer Stoß) ist im Zeitbereich der Maximalwert der Beschleunigung ein potentieller Verdichtungsindikator. Auf Basis einer begleitenden numerischen Studie wurde gezeigt, dass die vertikale Beschleunigung durch die Steifigkeit des Bodens beeinflusst wird. Mit zunehmender Steifigkeit steigt der Maximalwert der Beschleunigung. Darstellbar ist diese Beobachtung in einem Arbeitsdiagramm, in dem

Tabelle 5.: Verdichtungsenergie für unterschiedlichen Massen und Zuggeschwindigkeiten der dreiseitigen Walze.

	11 km/h	12 km/h	13 km/h	14 km/h	15 km/h
6 t	8 kJ	10 kJ	12 kJ	14 kJ	16 kJ
8 t	11 kJ	13 kJ	16 kJ	18 kJ	21 kJ
10 t	14 kJ	17 kJ	20 kJ	23 kJ	26 kJ
12 t	17 kJ	20 kJ	23 kJ	27 kJ	31 kJ

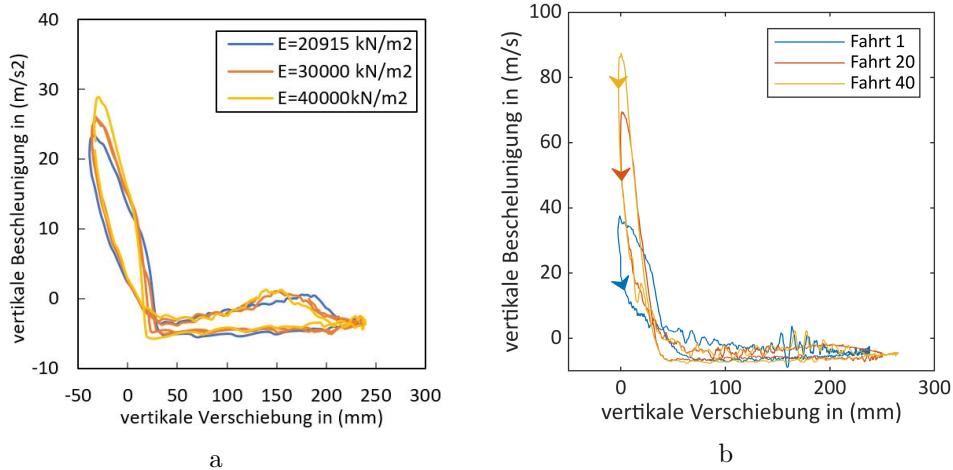
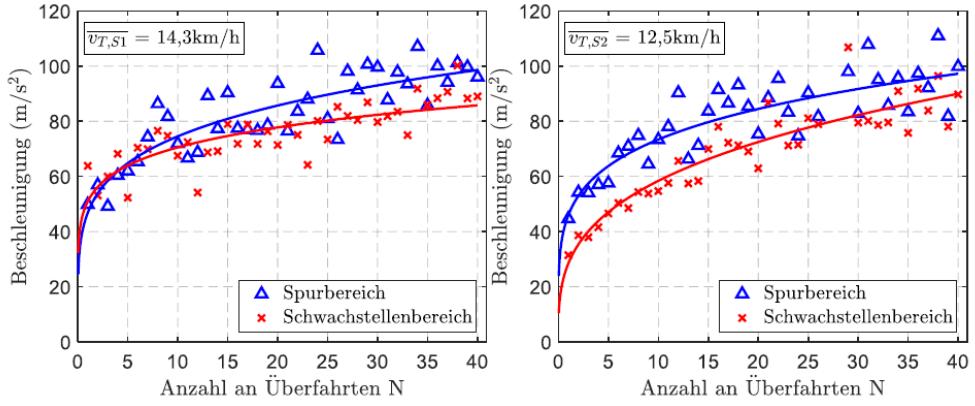


Abbildung 12.: Arbeitsdiagramm aus den numerischen Simulationen bei unterschiedlichen Bodensteifigkeiten E (a) und aus dem Feldversuch bei unterschiedlichen Überfahrten (b).

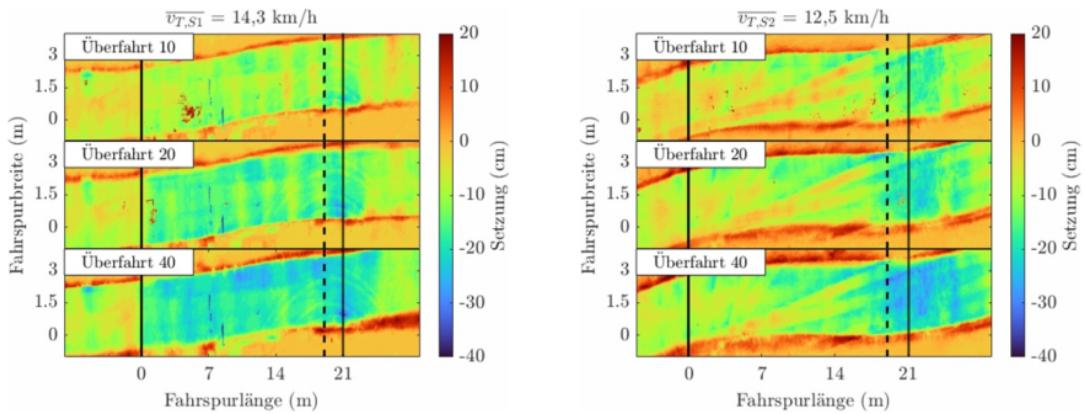
die vertikale Beschleunigung des Massenschwerpunkts der Bandage über dessen vertikale Translation aufgetragen wird. Die Ergebnisse für eine Variation der Steifigkeit des Untergrund sind in Abbildung 12a dargestellt.

Aus den Messungen am Gerät im Zuge des Feldversuchs konnten ebensolche Kurvenverläufe, wenn auch in einem anderen Wertebereich gewonnen werden (vgl. Abbildung 12b). Die Pfeilrichtung kennzeichnet die Ablauf-Richtung der Schleifen und zeigt in anderer Form, dass auch in der Phase des Hebels Kraft in den Boden eingeleitet wird. Mit steigender Anzahl an Überfahrten steigt der Maximalwert der vertikalen Beschleunigung. Entsprechend den Beobachtungen aus dem numerischen Modell ist davon auszugehen, dass ein unbekannter Tiefenbereich des Bodens für Überfahrt 40 eine größere Steifigkeit aufweist, als noch bei Überfahrt 20 bzw. bei der ersten Überfahrt.

Der Maximalwert der Beschleunigung ist ein indirektes Maß für die – über einen Tiefenbereich verschmierte – mittlere Steifigkeit des Baugrunds. Eine Abschätzung der Tiefenwirkung ist allein anhand des Maximalwerts der Beschleunigung nicht möglich. Der Maximalwert der Beschleunigung bleibt deshalb ein geeigneter *Indikator für die*



a



b

Abbildung 13.: Mittlerer maximaler Beschleunigungswert a und Geländesetzung b im ungestörten Spurbereich und im künstlich gestörten Schwachstellenbereich für mehrere Überfahrten mit unterschiedlichen Zuggeschwindigkeiten v_T .

Homogenität entweder der Verdichtung oder der Art des Baugrunds. Er zeigt – im Sinne der aktuell in der Geotechnik aufkommenden Diskussion um zuverlässigskeitsbasierte Methoden – Bereiche hoher Homogenität bzw. Inhomogenität an.

Um dies experimentell zu unterstreichen, wurden im Zuge des Feldversuch gezielte Schwachstellenbereiche vorgesehen. Entsprechend der beschriebenen Methodik aus Abschnitt II wurde zum einen ein tiefer Auflockerungsbereich von 2 m hergestellt und zum anderen in der Tiefe von 1 m eine Matratze als künstliche Schwachstelle eingebracht. Abbildung 13a zeigt die mittlere maximale Beschleunigung für die durchgeführten Überfahrten. Es ist kein offensichtlicher Zusammenhang der maximalen Beschleunigung mit der Zuggeschwindigkeit festzustellen. Zu beobachten ist ein degressiver Anstieg des Maximalwerts mit zunehmender Überfahrtanzahl entsprechend einem exponentiellen Funktion. Bemerkens-

wert ist, dass der Maximalwert der Beschleunigung eine künstliche Schwachstelle in Form einer großen Auflockerung während jeder der durchgeführten Überfahrten abbildet. Der Einfluss der eingebrachten Matratze in 1 m Tiefe wird erst ab der 10. Überfahrt bemerkbar. Indirekt kann daraus geschlussfolgert werden, dass ein künstlicher Schwachstellenbereich in größerer Tiefe erst nach einigen Überfahrten sichtbar wird.

Abbildung 13b zeigt die mittels Laserscaner ermittelten Geländesetzung. Der Spurbereich ist die Zone zwischen der durchgezogenen zur gestrichelten vertikalen Linie, der Schwachstellenbereich ist die Zone zwischen der gestrichelten zur durchgezogenen Linie. Erwartungsgemäß wird eine größere Geländesetzung im Bereich größerer Auflockerung gemessen, wohingegen der Schwachstellenbereich der Matratze nicht durch eine signifikant größere Setzung gekennzeichnet ist.

Zusammenfassend kann der Maximalwert der Beschleunigung in Kombination mit einer Lageerfassung des RDC-Systems (z.B. durch GPS) gezielt zur Detektion der *Verdichtungshomogenität* genutzt werden. Ausgeprägte Zonen unterschiedlicher Steifigkeit können so ermittelt werden. Inhomogenitäten im Untergrund werden nach einigen Überfahrten deutlich. Der Maximalwert der Beschleunigung kann allerdings in seiner hier präsentierten, einfachen Interpretation *nicht* genutzt werden um eine Aussage zur *Verdichtungsquantität* treffen zu können.

III.II. Kernziel: Ausbau der Nachwuchsforschergruppe G²

Neben den einführend benannten fachinhaltlichen Zielen verfolgte das Vorhaben insbesondere die Stärkung des bestehenden Nachwuchskonzepts der Nachwuchsforschergruppe G² Gruppe Geotechnik durch die Promotion von Frau Ocaña und der Initiierung weiterer kooperativer Promotionen. Darüber hinaus ist die Qualifikation von wissenschaftlichem Nachwuchs durch kontinuierliche Begleitung bereits während des Studiums ein Teilziel des Antrags. Die Qualität der Lehre sollte durch neue Module gestärkt werden. Diesbezüglich wurden – trotz der pandemiebedingten Herausforderungen – folgende Ergebnisse erzielt:

Die Promotion von Frau Ocaña ist in einem Fortgeschrittenen Stadium und wird durch Prof. Dr.-Ing. Ivo Herle an der TU Dresden begleitet. während der Projektbearbeitung konnte Prof. Dr.-Ing. Wolfgang Wehr als weiterer Gutachter gewonnen werden. Seine Expertise insbesondere im Hinblick auf geotechnische Felderkundung und Geomonitoring erhöhen die wissenschaftliche Qualität der Arbeit. Insbesondere die Herausforderungen verbunden mit dem Materialeinbau und der methodisch hinreichenden Versuchsdurchführung verhinderten bislang die Eröffnung des Promotionsverfahrens an der TU Dresden. Frau Ocaña hat im Bearbeitungszeitraum folgende Publikationen veröffentlicht (Fock et al. 2022; Ocaña Atencio, Harsányi et al. 2020; Ocaña Atencio, Knut et al. 2023a,b; Ocaña Atencio, Oltmanns et al. 2021; Oltmanns et al. 2021).

Neben Ihrer fachlichen Qualifikation hat Frau Ocaña ihre überfachliche Kompetenz am Graduiertenzentrum der HTWK Leipzig und an der Graduiertenakademie der TU Dresden im Zuge der Teilnahme an mehreren Kursen u.a. zum Thema wissenschaftlich

Publizieren, Forschungsdatenmanagement gesteigert. Darüber hinaus engagiert sie sich im wissenschaftlichen Beirat des Graduiertenzentrums der HTWK Leipzig und ist Ansprechpartnerin für überfachliche Fragen von Doktoranden und Doktorandinnen der HTWK Leipzig. Sie konnte außerdem Erfahrung in der Lehre im Modul Anwendung numerischer Verfahren in der Geotechnik im Masterstudiengang Bauingenieurwesen sammeln.

Im Bearbeitungszeitraum hat Herr Löwe sein Promotionsverfahren zum Thema Der Stoß massereicher Körper auf Lockergesteine in Kooperation mit Prof. Dr.-Ing. Frank Rackwitz an der TU Berlin begonnen. Ferner hat Herr Alexander Knut im März eine Dissertationschrift zum Thema „Einfluss von Impuls und Energie auf die Kontrolle und Optimierung der Fallgewichtsverdichtung“ vorgelegt und das Promotionsverfahren eröffnet. Ein Abschluss des Verfahrens wird Ende 2023 erwartet.

Trotz der Herausforderungen, die die Corona-Pandemie insbesondere für die Lehre mit sich brachte wurden im Projekt 15 Abschlussarbeiten entsprechend Tabelle 6 begleitet. Frau Fock und Herr Oltmanns sind durch die Bearbeitung Ihrer jeweiligen Graduiierungsarbeiten im Zuge des Mentoringkonzepts nunmehr wissenschaftliche Mitarbeitende in der G² Gruppe Geotechnik.

IV. voraussichtlicher Nutzen der Ergebnisse

Das Projekt RoDyCom beschäftigte sich national erstmalig umfassend mit dem RDC-System zur Verdichtung von Kippenböden. Zusammenfassend können aus den vorstehend detailliert präsentierten Ergebnissen der Teilmodule folgende übergeordnet relevanten Erkenntnisse generiert werden:

1. Die Kinematik des Systems wurde mit einem theoretischen Ansatz beschrieben.
2. Die übertragene Verdichtungsenergie ist daraus in Abhängigkeit technologischer Steuergrößen berechenbar.
3. Die für die Verdichtung maßgeblichen Phasen wurden im Modell- und Feldversuch ermittelt.
4. Die Grenzen eines Verdichtungsindikators wurden im Feldversuch aufgezeigt.

Der *wesentliche wissenschaftliche Nutzen* der durchgeföhrten Forschung ergibt sich aus der hierbei erbrachten Erweiterung des Stands des Wissens. Insbesondere der vorgelegte theoretische Ansatz zur Beschreibung der Gerätekinetik ist neuartig. Wie durch begleitende FEM-Studien und einen Feldversuch gezeigt wurde, ist der momentan erarbeitete Ansatz in der Lage die vertikale Geschwindigkeitscharakteristik des RDC-Systems korrekt abzubilden. Darüber hinaus wurde ein neuartiger Ansatz zur Ermittlung der in den Boden übertragenen Verdichtungsenergie vorgelegt. Dieser erweitert bisherige Ansätze um den Einfluss der Zuggeschwindigkeit und kann differenziert den Einfluss der translatorischen und rotatorischen Komponenten der Energie quantifizieren.

Tabelle 6.: Im Projektkontext begleitete Abschlussarbeiten

BearbeiterIn	Jahr	Titel	Art der Schrift
Moritz Ziems	2018	Grundlagenermittlung und Parameteranalyse des Systems Rolling Dynamic Compaction	Bachelorarbeit
Vanessa Fock	2018	Möglichkeiten und aktuelle Entwicklungen von numerischen Verfahren in der Geotechnik mit Hinblick auf die Forschungsarbeiten der G ² Gruppe Geotechnik	Bachelorarbeit
Zsófia Szloboda	2018	Simulation und Vergleich besonderer Erdbauverdichter	Masterarbeit
Yan Xia	2019	Impact compaction under plain strain conditions evaluated with the PIV-/DIC-Method	Masterarbeit
Ansgar Oltmanns	2019	Analyse und Entwicklung eines Richtschwingers zur Erhöhung der Einschlagenergie für Bodenverdichter mit unregelmäßigen Geometrien	Masterarbeit
Lilly Schröder	2019	Geometrisch unrunde Bodenverdichter und ihre Anwendung auf regionalen Kippenböden	Bachelorarbeit
Axel Grauwinkel	2019	Erfassung und Bestimmung von bodenmechanischen Parametern für geotechnischen Risiken von Kippenböden zur weitere Modellierung	Masterarbeit
Susann Roßberg	2020	Randbedingungen und Relevanz für eine Walzenverdichtung mit unrunder Bandagengeometrie auf risikorelevanten Kippenbereichen	Masterarbeit
Clemens Müller	2020	Möglichkeiten der Simulation geotechnischer Fragestellungen mit dem Particle Finite Element Method	Masterarbeit
Jan Hoffmann	2020	Einbaubedingungen für 1g-Modellversuche zur Bewertung des Einflusses von Energie und Impuls bei speziellen Walzenverdichtern	Masterarbeit
Vanessa Fock	2021	Standardisierte Vorgehensweise zur Parametrisierung von sandigen Böden für das hypoplastische Stoffgesetz	Masterarbeit
Jiaojiao Chen	2021	Assesment of an air pluviation device for small-scale tests on sand	Masterarbeit
Yuanzi We	2021	Evaluation of laboratory tests on Rolling Dynamic Compaction	Masterarbeit
Ye Hangzuo	2021	The standard Proctor Test and its misleading results	Masterarbeit
Alexis Jutzenka	2022	Entwicklung einer Methode zur Ermittlung und Auswertung von Oberflächensetzungen mit 3DScanning für geotechnische Modellversuche	Bachelorarbeit

Aus den wissenschaftlichen Ergebnissen lässt sich folgender *technischer Nutzen* formulieren. Mit dem validierten theoretischen Ansatz zur Beschreibung der Gerätekinematik kann in guter Näherung die übertragene Verdichtungsenergie ermittelt werden. Die hierbei ermittelte Energie unterschätzt die real wirkende Energie leicht. Da beliebige Geometrien untersucht werden können, ist es durch diesen Ansatz möglich die Geometrie des RDC-Systems zu optimieren. Dem Markt steht damit ein bislang nicht vorhandenes – einfaches Werkzeug zur maschinenbaulichen Dimensionierung eines RDC-Systems zur Verfügung.

Die vorgeschlagene Ermittlung der übertragenen Verdichtungsenergie kann an bereits mit Messtechnik instrumentierten Walzen genutzt werden, um neben dem Maximalwert der Beschleunigung einen weiteren Prozessparameter zur Verfügung zu stellen und so ebendiesen zu überwachen.

Durch die vorgelegte Forschungsarbeit konnten die Grenzen des Maximalwerts der Beschleunigung als potentieller Verdichtungsindikator aufgezeigt werden. Wir der Maximalwert der Beschleunigung als Parameter der Homogenität – entweder der Bodenart oder der Verdichtung – verstanden, so kann dieser in der Ausschreibung und im baubegleitenden Monitoring korrekt benutzt werden. Eine unnötigerweise festgelegte Anzahl an Überfahrten könnte damit obsolet werden, was wiederum den Prozess der RDC-Verdichtung auf großflächigen Tagebauinnenkippen nachhaltiger und ökonomisch effizienter macht.

Literaturverzeichnis

- Altaee, Ameir und Fellenius, Bengt, H. (1994). „Physical modeling in sand“. In: *Canadian Geotechnical Journal* 31.3, S. 420–431.
- Avalle, D. (2004). „Use of the Impact Roller to Reduce Agricultural Water Loss“. In: *9th ANZ Conference on Geomechanics*.
- Avalle, D.L., B.T. Scott und M.B. Jaksa (2009). „Ground energy and impact of rolling dynamic compaction - results from research test site“. In: *Proceedings of the 17th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*.
- Bradley, Andrew C., Mark B. Jaksa und Yien-Lik Kuo (2019). „Examining the kinematics and energy of the four-sided impact roller“. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Ground Improvement* 172(4), S. 297–304.
- Broons (2023). *Impact Rollers*. URL: <https://www.broons.com/product-category/impact-rollers/> (besucht am 17.02.2023).
- Chen, Yue, Mark B. Jaksa, Yien-Lik Kuo und David W. Airey (2022). „Experimental analysis of rolling dynamic compaction using transparent soils and particle image velocimetry“. In: *Canadian Geotechnical Journal* 59, S. 254–271.
- Chen, Yue, Mark B. Jaksa, Brendan T. Scott und Yien-Lik Kuo (2023). „Numerical investigation of the performance of the 3-sided impact roller“. In: *Computers and Geotechnics*.
- Chen, Zhongqing und Yue Lv (2017). „Ground Response to Rolling Dynamic Compaction of Dry Sand“. In: *Electronic Journal of geotechnical Engineering*.
- Fock, Vanessa (2021). „Standardisierte Vorgehensweise zur Parametrisierung von sandigen Böden für das hypoplastische Stoffgesetz“. Magisterarb. HTWK Leipzig.
- Fock, Vanessa, Rosa Elena Ocaña Atencio und Ralf Thiele (2022). „Standardized Method for the Parameterization of Sandy Soils for the Hypoplastic Constitutive Model - a Contribution to the Recultivation of Post-Mining Landscapes in the Lusatian Lignite Mining Region“. In: *Open Conference Proceedings* 2, S. 123–128.
- Foti, Sebastiano et al. (2018). „Guidelines for the good practice of surface wave analysis: a product of the InterPACIFIC project“. In: *Bulletin of Earthquake Engineering*. 16, S. 2367–2420. DOI: 10.1007/s10518-017-0206-7.
- Freiberg, TU Bergakademie (2009). *Testfeldes zur Tiefenwirkung der Landpac-Walze - Abschlussbericht*. Techn. Ber.
- Grauwinkel, Axel (2020). „Erfassung und Bestimmung von bodenmechanischen Parametern für geotechnische Risiken von Kippenböden zur weiteren Modellierung“. Magisterarb. HTWK Leipzig.

- Jaksa, M. B., B. T. Scott und E. Syamsuddin (2012). „Quantifying the Zone of Influence of the Impact Roller“. In: *ISSMGE - TC 211 Internationale Symposium on Ground Improvement IS - GI Brussels 31 May 1 June 2012*.
- Jalili, D., E. Nohani, S. Mirazizi und H. Mirzaei (2012). „Examining the effect of the interaction of soil and momentum resulted from the trihedral impact roller in the improved depth“. In: *Applied Research Journal*, S. 373–377.
- Jutzenka, Alexis (2022). „Entwicklung einer Methode zur Ermittlung und Auswertung von Oberflächensetzungen mit 3DScanning für geotechnische Modellversuche“. Magisterarb. HTWK Leipzig.
- Kahnt, Moritz (2018). „Ausarbeitung eines Patentvorschlags für ein neuartiges Verdichtungsverfahren unter dem Aspekt der technologischen Abgrenzung und der wirtschaftlichen Vorteilhaftigkeit“. Magisterarb. HTWK Leipzig.
- Kim, Kukjoo (2010). „Numerical simulation of impact rollers for estimating the influence depth of soil compaction“. Magisterarb. Texas A&M University.
- Kim, Kukjoo und Sanghyun Chun (2016). „Finite element Analysis to simulate the effect of impact rollers for estimating the influence depth of soil compaction“. In: *KSCE Journal of Civil Engineering*.
- Kuo, Y.L., M.B. Jaksa, B.T. Scott, A.C. Bradley, C.N. Power, A.C. Crisp und J.H. Jiang (2013). „Assessing the Effectiveness of Rolling Dynamic Compaction“. In.
- LANDPAC (2023). *features and benefits*. URL: <http://landpac.com/features-benefits/> (besucht am 17.02.2023).
- LMBV (2016). *Leistungsbeschreibung/Leistungsverzeichnis: Testfeld Verdichtung Schwarze Keute, Vergabe-Nummer 1602800112*.
- Löwe, Bénédict, Daniel Käßler und Florian Köllner (2019). „Einfluss der Nachverdichtung granularer Böden auf die Phasengeschwindigkeiten von Rayleighwellen“. In: *Tagungsband zum 4. BIH-Treffen*.
- Ocaña Atencio, R. E., Z. Harsányi, A. Oltmanns, A. Knut und R. Thiele (2020). „Effizienz von Walzenverdichtern mit unrunder Bandagengeometrie“. In: *Leipziger Kolloquium*.
- Ocaña Atencio, R. E., A. Knut, A. Oltmanns und R. Thiele (2023a). „Beschreibung der Wirkungsweise von unrunden Walzenverdichtern auf Basis ihrer Kinematik“. In: *Siegener Symposium für Geomesstechnik*.
- (2023b). „Möglichkeiten zur Optimierung des Verdichtungsprozesses von unrunden Walzenverdichtern“. In: *18. Erdbaufachtagung: Nachhaltigkeit im Erd-, Grund- und Wasserbau*.
- Ocaña Atencio, R. E., A. Oltmanns, A. Knut und R. Thiele (2021). „Verdichtungsenergie von Walzenverdichtern mit unrunder Bandagengeometrie“. In: *5. BIH-Treffen*.
- Oltmanns, A., A. Knut, R. E. Ocaña Atencio und R. Thiele (2021). „Bewegungsanalyse von Walzenverdichtern mit unrunder Bandage“. In: *Nachwuchswissenschaftlerkonferenz 2021*.
- Park, Choon B. (2011). „Imaging Dispersion of MASW Data - Full vs. Selective Offset Scheme“. In: *Journal of Environmental and Engineering Geophysics*.
- Ranasinghe, R.A.T.M. und M.B. Jaksa (2016). „Application of Artificial Intelligence Techniques for Rolling Dynamic Compaction“. In: *Proceedings of the 11th ANZ Young Geotechnical Professionals Conference - 11YGPC, Queenstown, New Zealand*.

- Roßberg, Susann (2020). „Relevanz von Walzenverdichtern mit unrunder Bandagengeometrie für die Rekultivierung von Kippenflächen“. Magisterarb. HTWK Leipzig.
- Scott, Brendan, Mark Jaksa und Peter Mitchell (2021). „Depth of influence of rolling dynamic compaction“. In: *Proceedings of the Institution of Civil Engineers –Ground Improvement* 174(2), S. 85–94.
- Scott, Brendan T., Mark B. Jaksa und Peter Mitchell (2020). „Influence of towing speed on effectiveness of rolling dynamic compaction“. In: *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, S. 126–134.
- Szloboda, Zsofia (2019). „Simulation und Vergleich besonderer Erdbauverdichter“. Magisterarb. HTWK Leipzig.