



Bundesinstitut
für Sportwissenschaft



Wir helfen
dem Sport

Olaf Hemker · Alexandra Rauch · Sigrid Bertelmann · Julia Bartke

Prüfung des Reaktionsverhaltens von Tretschichten bei Belastung



Olaf Hemker · Alexandra Rauch · Sigrid Bertelmann · Julia Bartke

Prüfung des Reaktionsverhaltens von Tretschichten bei Belastung

Impressum

Herausgeber

Bundesinstitut für Sportwissenschaft | BISp
Graurheindorfer Straße 198 · 53117 Bonn
info@bisp.de
www.bisp.de

Ansprechperson

Dr. Jutta Katthage
jutta.katthage@bisp.de
Tel.: +49 228 99 640 9026

Stand

Dezember 2024

Hemker, Olaf; Rauch, Alexandra; Bertelmann, Sigrid; Bartke, Julia
Prüfung des Reaktionsverhaltens von Tretschichten bei Belastung
AZ 071403/22-24
ISBN 978-3-96523-105-4
DOI <https://doi.org/10.4126/FRL01-006484155>

Das Werk einschließlich aller seiner Teile ist urheberrechtlich geschützt. Kein Teil dieses Werkes darf ohne ausdrückliche Genehmigung des Bundesinstituts für Sportwissenschaft digital oder analog vervielfältigt werden.

Gestaltung

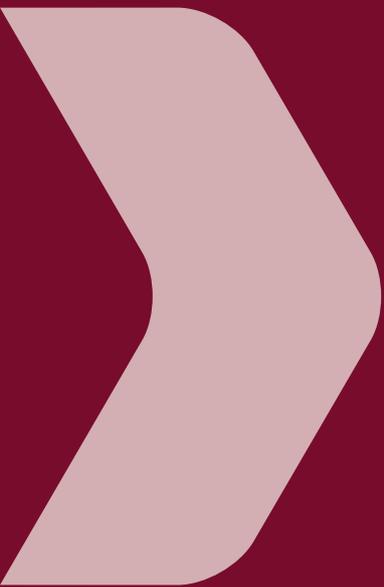
MUMBECK – Agentur für Werbung GmbH, Wuppertal

Bildnachweise

Hochschule Osnabrück

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek

Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über „<https://dnb.ddb.de>“ abrufbar.



Verzeichnisse

Inhalt

Zusammenfassung	10
Vorbemerkungen	13
1 Zielstellung und Forschungssystematik	15
1.1 Zielstellung	16
1.2 Themenabgrenzung	16
1.3 Forschungssystematik	17
2 Grundlagen	18
2.1 Aktueller Stand nationaler und internationaler Regelwerke	19
2.2 Aktueller Stand der Forschung	19
2.3 Eingesetzte Prüfgeräte	21
2.4 Datenverarbeitung und -auswertung	29
2.4.1 Übersicht	29
2.4.2 Datenerfassung und Messprotokoll	30
2.4.3 Weiterverarbeitung	30
2.4.4 Laborversuche zur Bestimmung der Bodenkennwerte	30
2.4.5 Visualisierung und statistische Auswertung	31
3 Laborversuche	32
3.1 Vorversuche	33
3.1.1 Scherfestigkeitsmessung	33
3.1.2 Wassergehaltsbestimmung	33
3.2 Herstellung der Versuchsfläche	35
3.2.1 Aufbau der Versuchsfläche	35
3.2.2 Herstellung der Versuchsbedingungen in der Tretschicht	38
3.3 Versuche in der Versuchshalle	40
3.3.1 Versuchsmatrix	40
3.3.2 Messergebnisse	40
3.4 Auswahl der Prüfgeräte für die Feldversuche	51
4 Feldversuche	53
4.1 Material und Methode	54
4.1.1 Prüfgeräte	54
4.1.2 Aufstellung der untersuchten Tretschichten	54
4.1.3 Körnungslinien der Tretschichtmaterialien	56
4.1.4 Lage der Messstellen	56
4.2 Ergebnisse	57
4.2.1 Beobachtung: Sperrschichtbildung	57
4.2.2 Subjektive Einschätzungen zum Einsatz der Geräte	57
4.2.3 Messergebnisse	59

4.3	Bewertung	66
4.4	Weiterführende Auswertung	68
4.4.1	Unterschiede zwischen viel und wenig frequentierten Punkten	68
4.4.2	Vergleich zwischen berittenem und gepflegtem Zustand einer Reithalle	69
5	Auswertung vorhandener Daten des modifizierten dynamischen Plattendruckversuchs ...	71
5.1	Methodik	72
5.2	Ergebnisse	72
5.3	Bewertung der Datenlage	74
6	Eignung der Prüfgeräte und Ausblick	76
6.1	Fazit	77
6.2	Zusammenfassung für die Praxis	79
6.3	Weiterer Forschungsbedarf	80
7	Quellen	81
7.1	Literaturverzeichnis	82
7.2	Regelwerksverzeichnis	84
	Anhang 1: Sportfunktionelle, schutzfunktionelle und technische Begriffe	85
	Anhang 2: Informationen zu den Reitanlagen aus den Feldversuchen	87

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Aufstellung der eingesetzten Prüfgeräte	22
Tabelle 2:	Überblick über die Datenerfassung und -verarbeitung	29
Tabelle 3:	Versuchshalle – Einbautustände Tretschicht	38
Tabelle 4:	Versuchshalle – Einteilung der Versuchsreihen	40
Tabelle 5:	Versuchshalle – Einordnung der Ergebnisse	52
Tabelle 6:	Feldversuche – Überblick der Versuchsbedingungen	54
Tabelle 7:	Feldversuche – Beurteilung der Prüfgeräte	67
Tabelle 8:	Übersicht über die zur Verfügung stehenden Daten aus dem modifizierten dynamischen Plattendruckversuch	73
Tabelle 9:	Fazit – Eignung der Prüfgeräte für die Bestimmung von Tretschichteigenschaften	77
Tabelle 10:	Feldversuche – Informationen der Betreibenden zu ihren Anlagen	87

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Rammsonde (Minisonde)	22
Abbildung 2:	Ausstechzylinder und Entnahmezubehör	22
Abbildung 3:	Delta-Feuchtesonde und POGO-Feuchtesonde	23
Abbildung 4:	Flügelsonde	23
Abbildung 5:	Pocket Vane Tester CL 102 und mittlerer Scherkranz	24
Abbildung 6:	Modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät	24
Abbildung 7:	Clegg Impact Soil Tester	25
Abbildung 8:	Vienna Surface Tester	25
Abbildung 9:	HIC-Gerät	26
Abbildung 10:	Prüfkegel	27
Abbildung 11:	Weiterentwickelter künstlicher Sportler	28
Abbildung 12:	Drehwiderstandsmessgerät	28
Abbildung 13:	Vorversuche Feuchtesonden – Versuchsaufbau im Versuchszylinder (in Anlehnung an Brandt, 2023)	34
Abbildung 14:	Versuchshalle – Die Versuchsfläche an der Hochschule Osnabrück	36
Abbildung 15:	Versuchshalle – Schichtaufbau der Versuchsfläche	36
Abbildung 16:	Versuchshalle – Kornverteilung der Tragschicht	37
Abbildung 17:	Versuchshalle – Kornverteilung der Trennschicht	37
Abbildung 18:	Versuchshalle – Kornverteilung der Tretschicht	38
Abbildung 19:	Versuchshalle – Herstellung des mit Folie abgedichteten Bereichs der Versuchsfläche (Borchers, 2023)	39
Abbildung 20:	Versuchshalle – Ergebnisse Rammsondierung mit Minisonde	41
Abbildung 21:	Versuchshalle – Ergebnisse Wassergehaltsbestimmung Ausstechzylinder	42
Abbildung 22:	Versuchshalle – Ergebnisse Delta-Feuchtesonde	43
Abbildung 23:	Versuchshalle – Ergebnisse POGO-Feuchtesonde	44
Abbildung 24:	Versuchshalle – Ergebnisse Flügelsonde	45
Abbildung 25:	Versuchshalle – Ergebnisse mittlerer Scherkranz	45
Abbildung 26:	Versuchshalle – Ergebnisse Setzungsgeschwindigkeit modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät	46
Abbildung 27:	Versuchshalle – Ergebnisse Setzung modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät	47
Abbildung 28:	Versuchshalle – Ergebnisse Clegg-Hammer	48
Abbildung 29:	Versuchshalle – Ergebnisse VST Energierückgewinnung	49
Abbildung 30:	Versuchshalle – Ergebnisse VST Abdruckmessungen	49
Abbildung 31:	Versuchshalle – Ergebnisse Prüfkegel	50
Abbildung 32:	Versuchshalle – Anzeige Drehwiderstandsgerät während einer Messung	50
Abbildung 33:	Versuchshalle – Aufprall weiterentwickelter künstlicher Sportler	51
Abbildung 34:	Feldversuche – Kornverteilungen der untersuchten Tretschichten aus reinem Sand	55
Abbildung 35:	Feldversuche – Kornverteilungen der untersuchten Tretschichten aus Sand mit Zuschlagstoffen	55
Abbildung 36:	Feldversuche – Schematische Darstellung der Messstellen auf einem Standard-Reitplatz	56
Abbildung 37:	Feldversuche – Sperrschicht: Feldversuche – Sperrschicht	57
Abbildung 38:	Sperrschicht – Hufabdruck	58
Abbildung 39:	Feldversuche – Ergebnisse Rammsondierung mit Minisonde: klassische Darstellung	60
Abbildung 40:	Feldversuche – Ergebnisse Rammsondierung mit Minisonde: kumulierte Darstellung	60

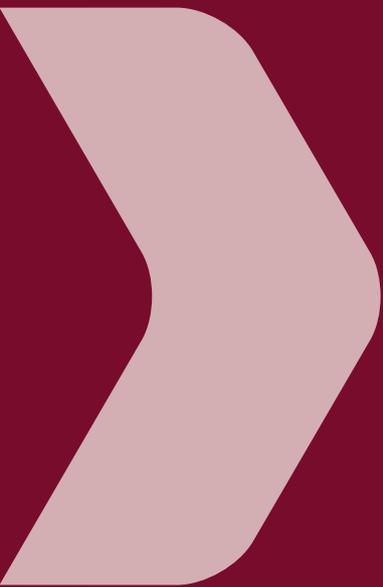
Abbildung 41: Feldversuche – Ergebnisse Dichtebestimmung mit verschiedenen Methoden.	61
Abbildung 42: Feldversuche – Ergebnisse Wassergehaltsbestimmung mittels Ofentrocknung	62
Abbildung 43: Feldversuche – Ergebnisse Feuchtesonden	62
Abbildung 44: Feldversuche – Ergebnisse Modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät	63
Abbildung 45: Feldversuche – Ergebnisse Clegg-Hammer	64
Abbildung 46: Feldversuche – Ergebnisse VST.....	65
Abbildung 47: Feldversuche – Ergebnisse HIC-Gerät.....	66
Abbildung 48: Unterschiede zwischen Messstellen.....	69
Abbildung 49: Unterschied zwischen Pflegezuständen	70

Formelverzeichnis

(1) Umrechnung gravimetrischer in volumetrischer Wassergehalt.....	30
(2) Umrechnung volumetrischer in gravimetrischer Wassergehalt.....	30

Abkürzungsverzeichnis

ANOVA	Analysis of Variance
BGL	Bundesverband Garten-, Landschafts- und Sportplatzbau e. V.
BISp	Bundesinstitut für Sportwissenschaft
DOKR	Deutsches Olympiade-Komitee für Reiterei
FEI	Fédération Équestre Internationale
FLL	Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V.
FN	Deutsche Reiterliche Vereinigung e. V.
HIC	Head Injury Criterion
ö.b.v.	öffentlich bestellt und vereidigt
OBST	Orono biomechanical Surface Tester
OSP NRW	Olympiastützpunkt Nordrhein-Westfalen Warendorf
STABW	Standardabweichung
VST	Vienna Surface Tester
ZSS	Zuschlagstoff



Zusammenfassung

Der Pferdesport findet überwiegend auf Sandböden mit und ohne Zuschlagsstoffe in Reithallen und auf Reitplätzen statt (Egenvall et al., 2021). Diese Reitböden haben jedoch unterschiedliche Eigenschaften. Neben der Materialzusammensetzung spielen auch der Wassergehalt, die Dichte und der allgemeine Aufbau des Platzes eine Rolle für die Tretschichteigenschaften, ebenso wie der Instandhaltungs- und Pflegezustand, das Alter, die Pferdesportdisziplin der Nutzenden und die Nutzungsfrequenz (Hayati et al., 2020; van der Heijden, 2018). Allgemein besteht Einigkeit darüber, dass die funktionellen Eigenschaften eines Sportbodens einen entscheidenden Beitrag zur sportlichen Leistung, wie auch zur Verletzungsgefahr und -vermeidung, leisten (Hayati et al., 2020; Hemker et al., 2022). So wäre die Erfassung der Eigenschaften des Reitbodens von großer Bedeutung für eine individuelle und optimale Gestaltung des Trainings. Trotz der Relevanz für den Sport fehlt ausreichendes Wissen über die sportfunktionellen Eigenschaften von Sandböden (Hayati et al., 2020). Normen und Reglementarien für Reitböden finden sich zwar sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene, spezielle Formulierungen von Anforderungen an die sportfunktionellen Eigenschaften sind aktuell jedoch noch sehr vage. Insgesamt fehlen einheitliche Begriffe, Messgeräte und Messwerte, um die Anforderungen an Reitböden aus sportlicher Sicht zu definieren (Hemker et al., 2022). Mag diese Problematik im ersten Eindruck eher nachrangig erscheinen, so wird auf den zweiten Blick deutlich, wie komplex und vielschichtig die aussagekräftige Beprobung und Untersuchung von Böden sowie die spätere Einordnung der Messergebnisse ist.

Es gibt bereits eine Vielzahl verschiedener Versuche, um die Bodeneigenschaften im Feld und im Labor zu bestimmen. Gerade Prüfverfahren, welche versuchen die Bewegung des Pferdes zu imitieren, erfordern sehr unhandliche Prüfgeräte und nur mit Hilfsmitteln wie Pkw oder

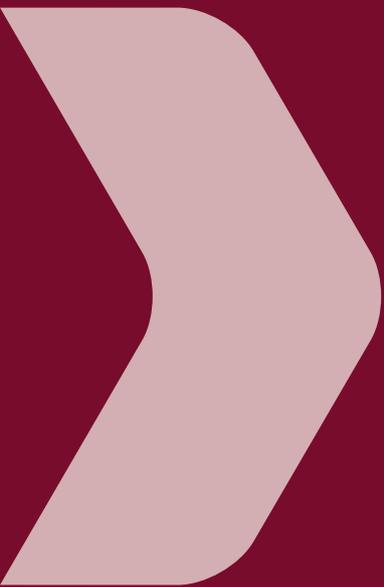
Traktor zu bewegen und einzusetzen sind. Bei den handlicheren Geräten gibt es oft Unsicherheiten bzgl. der Qualität der Messergebnisse (Hemker et al., 2022). Die indirekte Beprobung des Untergrundes mittels Bewegungsanalysen mit Kraftmessplatten, Kraftmesshufschuhen, Beschleunigungssensoren oder Videoanalysen ist für eine schnelle Einschätzung der Bodenqualität zu aufwendig und zu komplex (Hemker et al., 2022).

Aus dieser Problematik entsteht der Wunsch nach möglichst einfach anwendbaren Messverfahren, um die funktionellen Eigenschaften von Tretschichten beschreiben und bewerten zu können. Ziel der vorliegenden Forschungsarbeit ist es, unterschiedliche Prüfgeräte aus beispielsweise dem Straßenbau oder der Sportplatzprüfung auf ihren Einsatz auf Reitböden (Tretschicht als oberste Schicht eines Reitbodens) hin zu untersuchen. Im Vordergrund steht hier neben der Validierung über Messergebnisse unter Labor- und Feldbedingungen auch die Handhabung der Geräte in der Praxis.

In den Laborversuchen auf der eigens dafür angelegten Reitbodenfläche in der Versuchshalle der Hochschule Osnabrück zeigte sich, dass die meisten Geräte bei unterschiedlichen Wassergehalten und Dichtezuständen auch unterschiedliche Messergebnisse liefern. Dies konnte in den Feldversuchen auf Reitplätzen ebenfalls beobachtet werden. Einige Geräte entsprechen jedoch in den produzierten Daten und/oder der Handhabung nicht den formulierten Ansprüchen.

Auf Basis der durchgeführten Versuche und Analysen können insbesondere das modifizierte dynamische Plattendruckgerät und der Vienna Surface Tester empfohlen werden, um die funktionellen Eigenschaften einer Reitfläche zu bestimmen. Im Bereich der Dichte- und Was-

sergehaltsbestimmung im Feld konnte jedoch keine praktikable In-situ-Lösung gefunden werden. Im Bereich der Scherfestigkeitsbestimmung erwiesen sich alle eingesetzten Geräte als ungeeignet. Alle Messungen können durch das Phänomen der Sperrschichtbildung beeinflusst werden. Hierzu ist weitere gezielte Forschung vonnöten, um ein besseres Verständnis über das Entstehen und den Einfluss dieser Schicht zu erlangen.



Vorbemerkungen

Das vorliegende Projekt beinhaltet vorwiegend die Beurteilung verschiedener Prüfgeräte auf ihre Eignung für den Einsatz auf Reitboden-Tretschichten. Die Beurteilung erfolgt auf Basis der vorgestellten Versuchsreihen in Labor und Feld.

Die Durchführung übernahmen Prof. Dr. Olaf Hemker, Alexandra Rauch, Sigrid Bertelmann und Julia Bartke von der Hochschule Osnabrück. Der Projektzeitraum erstreckte sich vom 1. Juni 2022 bis zum 30. September 2024.

Der Projektbeirat hat das Projekt intensiv begleitet. Mitglieder des Projektbeirates waren aktive und ehemalige Vertretungen

- der Deutschen Reiterlichen Vereinigung e. V. (FN),
- der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. (FLL),
- des Bundesverbands Garten-, Landschafts- und Sportplatzbau e. V. (BGL)
- der Fachhochschule Erfurt,
- der Universität Stuttgart.

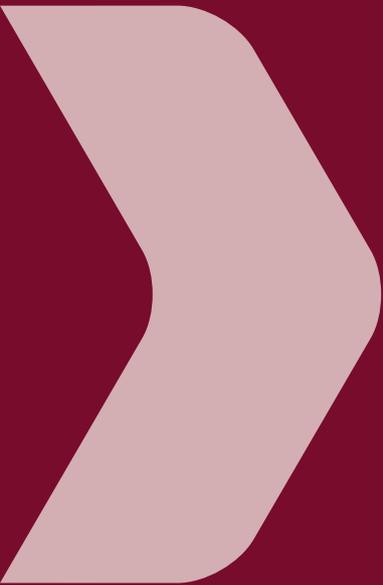
Das Bearbeitungsteam der Hochschule Osnabrück dankt

- dem Projektbeirat,
- den Fachleuten, die an Diskussionen mitgewirkt haben,
- der Betriebswerkstatt der Hochschule Osnabrück,
- dem Lehr- und Versuchsbetrieb Landschaftsarchitektur der Hochschule Osnabrück und
- den Studierenden der Hochschule Osnabrück, die durch hilfwissenschaftliche Tätigkeiten oder Projekt- und Abschlussarbeiten beteiligt waren,

für die Unterstützung.

Besonderer Dank gilt allen Baustofflieferanten, Reitplatzfachpersonen und Anlagenbetreibern, welche ihre Expertise im Reitplatzbau, ihre Materialien und ihre Anlagen für dieses Forschungsprojekt zur Verfügung gestellt haben. Ebenso gilt der Dank den Prüflaboren und Forschungsgruppen anderer Universitäten für die Leihgabe ihrer Prüfgeräte sowie für die Weitergabe ihrer Erfahrungen und Erkenntnisse. Das Bearbeitungsteam dankt hierfür u. a.:

- Fink Reitanlagen, ö.b.v. Sachverständiger für Reitanlagen und Stallbau in der Pferdehaltung
- Prüflabor Morbach, Prüflabor für Freisportanlagen
- Materialprüfinstitut und Ingenieurbüro Münster, ö.b.v. Sachverständiger für Sport-, Golf- und Reitplatzbau sowie für Schotterrasenflächen
- Die Reitsand GmbH
- DISPO Enregis Group
- Baustoffe & Logistik Bergschneider
- Concept Reitplatzbau GmbH & Co. KG, Reiterhof Dirkes
- Landgut Papenhausen
- Veterinärmedizinische Universität Wien



1 Zielstellung und Forschungssystematik

1.1 Zielstellung

Sportfunktionelle Anforderungen an Sportsande, insbesondere an Reitböden, sind bisher oft nur vage formuliert (Hemker et al., 2022, S. 11; Hruza & Peham, 2023). Die qualitative Bewertung einer Reitfläche basiert in erster Linie auf subjektiven Wahrnehmungen der Reitenden und Anlagenbetreibenden sowie dem Instandhaltungs- und Pflegepersonal der Böden (Tranquille et al., 2014). Somit fehlt es in vielen Anwendungen für alle Beteiligten an einer objektiven und verlässlichen Einschätzung, beispielsweise bei veterinärmedizinischen Fragestellungen (Hruza & Peham, 2023) oder auch in Streitfragen vor Gericht (Fink, 2022). Der Pferdesport würde von objektiven Bewertungsmethoden für die sportfunktionellen Bodeneigenschaften in mehrfacher Hinsicht profitieren. Zum einen könnten die Böden gezielt hinsichtlich des Verletzungsrisikos und der Performance optimiert werden (Hayati et al., 2020; Hernlund et al., 2017), zum anderen steigern gleiche Bodenbedingungen über den Wettkampfverlauf den fairen Wettbewerb (Tranquille et al., 2014).

Um die Eigenschaften eines Reitbodens objektiv beurteilen zu können, sind Prüfgeräte und Messverfahren nötig. Ziel dieser Forschung ist es, verschiedene bestehende Prüfgeräte aus anderen Bereichen der Bodenmechanik und des Erdbaus auf ihre Anwendbarkeit auf Reitboden-Tretschichten zu untersuchen. Das Augenmerk liegt neben einer ausreichenden Datenqualität auch auf der anwenderfreundlichen Handhabung der Geräte.

1.2 Themenabgrenzung

Um das ideale Geläuf für den Sport- und Freizeitpartner Pferd bereitstellen zu können, muss zunächst geklärt werden, wodurch sich dieses auszeichnet. Hier muss die Bandbreite der Ansprüche Berücksichtigung finden. Eine zunächst wertfreie Kategorisierung mit Festlegung einheitlicher Parameter erlaubt eine Vergleichbarkeit der Tretschichteigenschaften.

Die Prüfung soll folgende Kriterien erfüllen:

- › Das benötigte Material für die Prüfungen ist mit einem Pkw transportierbar.
- › Die Untersuchungen sind von einer einzelnen Person durchführbar.
- › Eine einfache, schnelle Durchführung ermöglicht, dass in angemessenem Zeitaufwand mehrere Prüfungen ausführbar sind.
- › Die Gleichförmigkeit der Bodenreaktion kann festgestellt werden (Reitsicherheit).
- › Der Kostenrahmen ist akzeptabel.
- › Die Auswertung ist einfach und nachvollziehbar.

Diese Anforderungen sollen sicherstellen, dass die Prüfmethode nicht nur für einen ausgewählten Personenkreis, sondern für die breite Masse an Sachverständigen, Reitanlagenbetreibenden und Turnierveranstaltenden zugänglich und anwendbar ist.

Hemker et al. (2022) stellen fest, dass die Trittfestigkeit, die Scherfestigkeit und die Gleichförmigkeit die wesentlichen Kriterien zur Beschreibung der Tretschicht sind.

Die Trittfestigkeit kann anhand verschiedener Parameter bewertet werden. Es bleibt daher zu prüfen, mit welchem Prüfgerät, anhand welcher Parameter, eine zufriedenstellende Einordnung getroffen werden kann. Auch zur Überprüfung der Scherfestigkeit ist eine geeignete Methode zu finden. Um die Gleichförmigkeit festzustellen, werden die an unterschiedlichen Prüfpunkten auf dem Reitplatz aufgenommenen Werte miteinander verglichen.

Es bedarf systematischer Versuchsreihen mit einer Auswahl vielversprechender Prüfgeräte. Vor den Versuchen sind eine Recherche und die Zusammenstellung geeigneter Prüfmethoden erforderlich.

- Der **dynamische Plattendruckversuch** soll hier in jedem Fall in das Forschungsvorhaben eingebunden werden. Der Versuch wird standardmäßig zur Qualitätsprüfung von Erdbauleistungen herangezogen und wird in modifizierter Form von Prüflaboren im Reitplatzbau eingesetzt. Hier sind bereits einige Messreihen und Erfahrungen vorhanden, welche im Rahmen dieses Vorhabens zusammengeführt und ausgewertet werden sollen. Das Messgerät wird von Sachverständigen als gut geeignet eingeschätzt (Münster, 2011), es wurden jedoch noch nicht ausreichend Daten für allgemeine Empfehlungen ermittelt.
- Ergänzt werden könnte das dynamische Plattendruckmessgerät durch den „**Künstlichen Sportler**“. Hier liegen in begrenztem Umfang Daten vor, da das Gerät bereits in einem vorangegangenen Forschungsvorhaben genutzt wurde (Große Erdmann, 2011).
- Außerdem wurde an der Veterinärmedizinischen Universität Wien eine **Prüfkugel** entwickelt, um sportfunktionelle Eigenschaften einer Oberfläche mit einem handlichen, unkompliziert zu verwendenden Gerät zu ermitteln (Vetmeduni, 2015).

Weitere Geräte könnten das Untersuchungsprogramm ergänzen.

Den Versuchsreihen mit den Messgeräten müssen weitere Untersuchungen hinzugefügt werden. So ist eine Überprüfung des Wassergehaltes und der Dichte notwendig, um die Ergebnisse einordnen zu können. Auch hier besteht Forschungsbedarf bei praktikablen In-situ-Lösungen, beispielsweise bei speziellen Feuchtesonden oder Rammsonden.

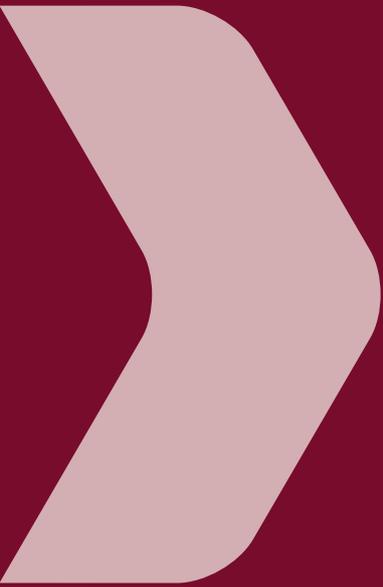
Weiterhin ist bei der Prüfung des Reaktionsverhaltens von Tretschichten bei Belastung ein besonderes Augenmerk auf die Zusammensetzung der Tretschicht zu richten. Dabei muss die Verwendung von Zuschlagstoffen berücksichtigt werden. Hier sind Art, Menge und Veränderun-

gen der Zuschlagstoffe von Bedeutung. Sowohl die Sande als auch die Zuschlagstoffe stehen in einer breit gefächerten Palette bezüglich Größe, Form, Material und deren Zusammensetzung zur Verfügung.

1.3 Forschungssystematik

Zuerst sollen die Geräte unter kontrollierten Bedingungen auf einer eigens hergestellten Versuchsfläche in der Versuchshalle der Hochschule Osnabrück eingesetzt werden. Die Versuchsfläche wird entsprechend den Empfehlungen der Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V. [FLL, 2014] für einen Reitplatzaufbau vorbereitet. In der Tretschicht sollen verschiedene Wassergehalte von trocken bis nass jeweils in lockerem und verdichtetem Zustand eingestellt werden. Anschließend werden die Erkenntnisse aus den Versuchsreihen in der Versuchshalle auf die Feldversuche übertragen. Hierbei wird der Einsatz der Geräte auf realen Reitplätzen und Bedingungen in der Praxis untersucht. Aufgrund der Vielzahl an angebotenen Materialien und Materialkombinationen wird es nicht möglich sein, alle Varianten zu betrachten. Die Auswahl der Plätze zielt darauf ab, einen guten Überblick über Plätze mit typischen Tretschichtmaterialien abzudecken. In jedem Fall müssen alle Prüfgeräte mit Wiederholungsversuchen zum Einsatz kommen.

Die Auswertung erfolgt mittels explorativer Datenanalyse und visueller Analyse der Daten. Aufgrund bereits vorhandener Untersuchungen anderer Materialien mit den vorgesehenen Prüfgeräten, insbesondere dem modifizierten dynamischen Plattendruckversuch, und bekannter bodenmechanischer und physikalischer Zusammenhänge werden für jeden Versuch bestimmte Ergebnisse erwartet. Die Messergebnisse werden mit den erwarteten Ergebnissen und Werteverläufen verglichen und so Aussagen zur Eignung der Versuche auf Reitsand abgeleitet.



2 Grundlagen

2.1 Aktueller Stand nationaler und internationaler Regelwerke

Regelwerke für Reitböden finden sich sowohl auf nationaler als auch auf internationaler Ebene. Auf nationaler Ebene gibt es die „Empfehlungen für Planung, Bau und Instandhaltung von Reitplätzen“ der FLL. Hier werden allgemeine Anforderungen an Reitplätze definiert (FLL, 2014). Konkrete Anforderungen an die sportfunktionellen Eigenschaften sind jedoch kaum enthalten. Ähnlich verhält es sich auch auf internationaler Ebene. Seitens der Fédération Equestre Internationale (FEI) gibt es das „Equine Surfaces White Paper“ sowie „Equestrian Surfaces – A Guide“. In beiden wird über die Anforderungen an Reitsportböden geschrieben (Hobbs et al., 2014; Tranquille et al., 2014), doch auch hier werden keine konkreten Werte, Messverfahren oder Beurteilungsparameter genannt. Insgesamt fehlen einheitliche Begriffe, Messgeräte und Messwerte, um die Anforderungen an Reitböden aus sportlicher Sicht zu definieren (Hemker et al., 2022, S. 11).

In der Beschreibung der Qualität eines Reitplatzes ist eine Vielzahl an Begriffen im Gebrauch, welche sich zum Teil nur wenig unterscheiden oder gar äquivalent verwendet werden. Im Rahmen des vorliegenden Projektes wurden die bisher verwendeten Begriffe der FLL und FEI sowie Begriffe aus Sportplatz- oder Gerätenormen zusammengetragen und sortiert (s. Anhang 1). Auf dieser Grundlage werden in der kommenden Neuauflage des FLL-Regelwerkes einheitliche Begriffe mit klaren Definitionen aufgenommen.

Während in Deutschland und Europa bisher keine Normen für Reitböden formuliert sind, stellt die ASTM International in den Vereinigten Staaten von Amerika bereits erste Standards für Versuche auf und mit Reitböden zur Verfügung. Dies umfasst acht Standards, welche sich überwiegend auf die Anwendung bereits etablierter Laborversuche mit Reitböden beziehen (ASTM

International, 2024). Der einzige Standard, welcher in-situ-Prüfungen aufgreift, arbeitet mit einem unhandlichen und kaum verfügbaren Gerät, dem Orono biomechanical Surface Tester (OBST) (s. Kapitel 2.2). Ein Angebot an praktikablen in-situ-Lösungen zur zuverlässigen Einschätzung von Reitböden ist auch hier nicht gegeben.

2.2 Aktueller Stand der Forschung

Die Forschung zu den sportfunktionellen Eigenschaften besteht aus zwei fundamentalen Bereichen. Zum einen ist es unabdingbar, die Bewegung des Pferdes in allen Einzelheiten erfassen und verstehen zu können. Zum anderen müssen auch die Eigenschaften des Bodens und deren Einflussfaktoren möglichst genau bekannt sein. Nur bei ausreichendem Wissen über beides, die Eigenschaften des Bodens und die Bewegungsabläufe des Pferdes, können Verbindungen und mögliche Wechselwirkungen erkannt werden.

Zwar kann die Forschung an der Pferdebewegung auf eine verhältnismäßig lange Tradition zurückblicken. Die erste Bewegungsanalyse eines galoppierenden Pferdes nahm Eadweard Muybridg im Jahr 1878 mittels Serienbildern vor. (Mitchell, 2001; Wank, 2021, S. 5–6). Biomechanische Bewegungsanalysen, die Veränderungen und Belastungen in der Pferdebewegung objektiv abbilden könnten, haben sich bisher noch nicht routinemäßig im Pferdesport durchgesetzt. Grund dafür ist nicht das mangelnde Interesse, sondern die hohen Anforderungen, die der Reitsport durch das gemeinsame Handeln von Pferd und Reiter mit sich bringt. Die erschwerten Umgebungs- und Diagnostikbedingungen, wie große Messvolumina, unterschiedliche Outdoor-Bedingungen und technische Herausforderungen, haben ein valides und praktikables Messverfahren bislang erheblich erschwert (Clayton & Schamhardt, 2013; Pfau, 2011).

Auch die Untersuchung der Böden, welche im Reitsport Verwendung finden, ist seit Jahren immer wieder Gegenstand der Forschung. So ist bekannt, dass der Untergrund eine entscheidende Rolle bei der Entstehung von Verletzungen im Sport spielt. Hernlund et al. (2013) verglichen bereits die Belastungsunterschiede verschiedener Reitböden in Springprüfungen und Skowronek und Hertsch untersuchten die Abbruchhäufigkeit bei großen Vielseitigkeitsprüfungen im Zusammenhang mit dem Geläuf (Skowronek & Hertsch, 2003). Obwohl auch in Sportarten wie Beachvolleyball, Leichtathletik und Windhunderennen Sanduntergründe zum Einsatz kommen und eine repräsentative Untersuchung unter Reitplatzverantwortlichen und Reitern in Schweden zu dem Ergebnis kommt, dass die Mehrheit an Reithallen und Plätzen eine Sandtrettschicht besitzt (Egenvall et al., 2021), fehlt ausreichendes Wissen über die sportfunktionellen Eigenschaften von Sandböden (Hayati et al., 2020). Sande werden über die Größe, Form und Verteilung der einzelnen Sandkörner unterschieden (Hayati et al., 2020), welche in spezifischen Laborversuchen festgestellt werden können. Neben Trettschichten aus reinem Sand werden auch Materialgemische aus Sand und Zuschlagstoffen (z. B. Vlies, Fasern, Holz) oder reine Holzhäcksel- oder Synthetikhäckselplätze im Reitsport eingesetzt. Neben der Materialzusammensetzung spielen auch der Wassergehalt, die Dichte und der Aufbau des Platzes eine Rolle für die Trettschichteigenschaften, ebenso wie der Pflegezustand, das Alter, die Pferdesportdisziplin der Nutzenden und die Nutzungsfrequenz (Hayati et al., 2020; van der Heijden, 2018). Für einen umfassenden Überblick über alle vorhandenen Forschungsbeiträge zur Reitbodenthematik wird die Zusammenstellung „Objektive Messverfahren zur Bestimmung von Reitbodeneigenschaften und deren Einfluss auf den Bewegungsapparat des Pferdes – Ein Überblick“ von Hruza und Peham (2023) empfohlen.

Bei der Beschäftigung mit Regelwerken und Forschungsarbeiten zur Trettschichtprüfung findet sich in verschiedensten Zusammenhängen

ein bestimmtes Prüfgerät, der sogenannte Oro-no biomechanical Surface Tester (OBST). Dieses Gerät wurde ursprünglich für die Testung von Renngeläufen für Vollblutrennen entwickelt (Peterson et al., 2008). Seither wurde das Gerät weiterentwickelt und der Einsatz auch auf anderen Pferdesportböden, z. B. bei Springturnieren, erprobt (Hernlund et al., 2017). Einige Institutionen wie die FEI oder die ASTM International haben das Gerät bereits als Prüfstandard für Reitböden aufgenommen oder planen die Aufnahme. Trotz dessen ist zum einen die Zahl an verfügbaren Geräten weltweit stark limitiert und zum anderen Handhabung des OBST mit einigem Aufwand verbunden. Aufgrund seiner Masse und Konstruktion kann der OBST nur in Verbindung mit einem geeigneten Fahrzeug verwendet werden.

Gerade in den letzten Jahren wenden sich verschiedene Publikationen daher vermehrt möglichen handlicheren Geräten der Reitbodenprüfung zu. So beschäftigte sich eine Arbeitsgruppe um Herholz mit dem modifizierten dynamischen Plattendruckversuch zur Erfassung funktioneller Eigenschaften von Reitböden (Herholz et al., 2023). Neben der Auswertung von jeweils fünf Messstellen auf zehn Reitplätzen stellten sie auch eine neue Methodik zur Auswertung der Messergebnisse vor, welche u. a. Rückschlüsse auf die Energierückgewinnung zulässt (Herholz et al., 2023). Eine Forschungsgruppe um Peham und Schramel entwickelte unterdessen das Gerät Vienna Surface Tester (VST). Dieses eignet sich allgemein zur Erfassung verschiedener Bodeneigenschaften und konnte sich sowohl in der Trettschichtforschung (Graydon et al., 2023) als auch in der Erforschung anderer Böden (Weimar et al., 2022) etablieren.

2.3 Eingesetzte Prüfgeräte

Zum Einsatz kommen verschiedenste Prüfgeräte u. a. aus dem Erd- und Straßenbau, der Sportplatz- oder der Spielplatzprüfung. Dies sind:

- › Rammsondierung (Minisonde)
- › Ausstechzylinder
- › Zwei Feuchtesonden
- › Flügelsonde
- › Scherkränze
- › Modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät
- › Clegg-Hammer
- › Vienna Surface Tester (VST)
- › HIC-Gerät
- › Prüfkegel
- › Weiterentwickelter künstlicher Sportler
- › Drehwiderstandsmessgerät

Tabelle 1: Aufstellung der eingesetzten Prüfgeräte

Name	Informationen	Abbildung
Rammsondierung (Minisonde)	<p>Regelwerk: in Anlehnung an DIN EN ISO 22476-2 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Teil 2: Rammsondierungen</p> <p>Prüfgerät: Minisonde, Eigenbau (Länge: 60 cm, Fallgewicht: 242,6 g, Markierungsabstände: 1 cm)</p> <p>Prüfparameter: Schlagzahl n pro 1 cm Eindringtiefe => Eindringwiderstand</p> <p>Versuchsdurchführung: lotrechtes Aufsetzen der Minisonde, Stabilisieren der Sonde mit einer Hand, Anheben des Fallgewichts mit der anderen Hand, Zählen der Schläge bis zur ersten Markierung und zu den folgenden Markierungen, Ende des Versuchs spätestens bei 50 Schlägen pro cm</p>	<p>The image shows a vertical metal rod (Minisonde) with a scale on the right side, used for soil penetration tests. The rod is positioned against a light-colored soil surface.</p>
Ausstechzylinder	<p>Regelwerk: DIN 18125-2 Baugrund – Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte des Bodens</p> <p>Prüfgerät: Ausstechzylinder, $H = 12\text{ cm}$ oder 6 cm, $\varnothing 10\text{ cm}$</p> <p>Prüfparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ Wassergehalt w ➤ Feuchtdichte ρ ➤ Trockendichte ρ_d <p>Versuchsdurchführung: nach DIN 18125-2</p>	<p>The image shows a collection of tools used for soil sampling, including a metal cylinder (Ausstechzylinder), a hammer, a trowel, and a small container, all resting on a sandy surface.</p>

Abbildung 1: Rammsonde (Minisonde)

Abbildung 2: Ausstechzylinder und Entnahmezubehör

Name	Informationen	Abbildung
Feuchtesonden	<p>Regelwerk: nicht vorhanden</p> <p>Prüfgerät: Delta-Feuchtesonde/Wet-2 KIT (Delta-T Devices Ltd, Cambridge, United Kingdom) mit vier Metallfühlern (Länge ca. 6 cm) und POGO-Feuchtesonde/Pogo® Pro mit HydraProbe™ Messfühler (Stevens Water Monitoring Systems Inc. Portland, Oregon, United States of America) mit drei Metallfühlern (Länge ca. 4 cm)</p> <p>Prüfparameter: volumetrischer Wassergehalt</p> <p>Versuchsdurchführung: vollständiges Einstecken der Messfühler in den Boden</p>	 <p>Abbildung 3: Delta-Feuchtesonde (links) und POGO-Feuchtesonde (rechts)</p>
Flügelsonde	<p>Regelwerk: in Anlehnung an DIN EN ISO 22476-9 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Flügelscherversuche</p> <p>Prüfgerät: Flügelsonde FL1407 (Wille Geotechnik/APS Antriebs-, Prüf- und Steuertechnik GmbH, Götzenbreite, Germany) mit einer Flügellänge von ca. 5 cm und einer Flügelbreite von ca. 2,5 cm</p> <p>Prüfparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ direkt: Drehmoment ➤ indirekt: Scherfestigkeit <p>Versuchsdurchführung: lotrechtes Eindrücken der Flügel bis zum unteren Beginn des sechseckigen Stabteils, Drehen des Flügels mit beiden Händen bis zum Abscheren</p>	 <p>Abbildung 4: Flügelsonde</p>

Name	Informationen	Abbildung
Scherkränze	<p>Regelwerk: in Anlehnung an DIN 18035-5 Sportplätze – Tennenflächen und ASTM D8121-19 Standard Test Method for Approximating the Shear Strength of Cohesive Soils by the Handheld Vane Shear Device</p> <p>Prüfgerät: kleiner Scherkranz „Pocket Vane Tester CL 102“ (Ø = 48 mm) (Royal Eijkelkamp, Giesbeck, The Netherlands) und mittlerer Scherkranz, Eigenbau (Ø = 73 mm, 12 Dornen mit h = 20 mm und Ø = 5 mm)</p> <p>Prüfparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ direkt: Drehmoment ➤ indirekt: Scherfestigkeit <p>Versuchsdurchführung: nach ASTM D8121-19, lotrechtes Eindringen des Scherkranzes bis zur Grundplatte, Drehen des Scherkranzes bis zum Abscheren</p>	

Abbildung 5: Pocket Vane Tester CL 102 (links) und mittlerer Scherkranz (rechts)

Modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät	<p>Regelwerk: in Anlehnung an TP BF-StB Teil 8.3 Technische Prüfvorschrift Boden und Fels im Straßenbau</p> <p>Prüfgerät: Leichtes Fallgewichtsgesetz ZFG 3.1 mit Lastplatte Ø 150 mm (Zorn Instruments GmbH & Co KG, Stendal, Germany)</p> <p>Prüfparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ dynamisches Verformungsmodul: E_{vd} ➤ maximale Setzung: s_{max} ➤ maximale Verformungsgeschwindigkeit: v_{max} <p>Versuchsdurchführung: in Anlehnung an TP BF-StB Teil 8.3, neun Stöße ohne Vorbelastung auf einer Stelle</p>	
--	---	--

Abbildung 6: Modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät

Name	Informationen	Abbildung
<p>Clegg-Hammer</p>	<p>Regelwerk: DIN EN 14954 Sportböden – Bestimmung der Härte von Naturrasen und ungebundenen mineralischen Belägen für Sportböden für den Außenbereich</p> <p>Prüfgerät: Clegg Impact Soil Tester/Clegg Hammer 2,25 kg CIST/883 (SD Instrumentation Ltd, Bath, United Kingdom) mit einer Höhe von 60 cm</p> <p>Prüfparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ direkt: Aufprallmessung mittels Beschleunigungssensor ➤ indirekt: Ableitung von Härtewerten <p>Anwendungsbereich nach Norm: Naturrasen (2,25 kg) und ungebundene mineralische Beläge (4,5 kg)</p> <p>Versuchsdurchführung: nach DIN EN 14954, fünf Aufschläge auf einer Stelle</p>	 <p style="text-align: center;">Abbildung 7: Clegg Impact Soil Tester</p>
<p>Vienna Surface Tester</p>	<p>Regelwerk: nicht vorhanden</p> <p>Prüfgerät: Vienna Surface Tester Mark2 (Ø = 20,4 cm, m = 6,15 kg) (V1.1 June 2022, JP Schramel, C Peham, Vetmeduni Vienna, Wien, Austria)</p> <p>Prüfparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ direkt: Beschleunigungsverlauf ➤ indirekt: Fallhöhe, Aufprallgeschwindigkeit, Eindringtiefe, Kraftabbau, Energierückgewinnung, Steifigkeit, Resonanzfrequenz <p>Versuchsdurchführung: nach Gebrauchsanweisung mind. 14 Aufschläge aus verschiedenen Fallhöhen (Schramel, 2022), wenn möglich Messung der Abdruckdurchmesser auf 0,5 cm genau</p>	 <p style="text-align: center;">Abbildung 8: Vienna Surface Tester</p>

Name	Informationen	Abbildung
HIC-Gerät	<p>Regelwerk: DIN EN 1177 Stoßdämpfende Spielplatzböden – Prüfverfahren zur Bestimmung der Stoßdämpfung</p>	
	<p>Prüfgerät: Platinum HIC-Meter (Ø = 160 mm, m = 4,6 kg) (wirelessvalue, Emmen, The Netherlands)</p> <p>Prüfparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ direkt: Aufprallmessung mittels Beschleunigungssensor ➤ indirekt: HIC-Kriterium (head injury criterion) für Kopfverletzungen <p>Anwendungsbereich nach Norm: natürliche und synthetische Materialien (z. B. Rasen, Sand, Holzschnitzel, Rinde, Kies, gummibasierte Produkte)</p> <p>Versuchsdurchführung: zehn Aufschläge mit Aufprallgeschwindigkeiten zwischen 2 m/s und 5 m/s, auf direkt benachbarten Flächen</p>	

Abbildung 9: HIC-Gerät

Name	Informationen	Abbildung
Prüfkegel	<p>Regelwerk: nicht vorhanden</p> <p>Prüfgerät: Messing-Prüfkegel an Gestänge, Eigenbau ($\varnothing = 120 \text{ mm}$, $h = 127,3 \text{ mm}$, $\alpha = 60^\circ$, $m = 5.496,3 \text{ g}$)</p> <p>Prüfparameter: Eindringtiefe</p> <p>Versuchsdurchführung: waagrechtes Ausrichten des Gestells, Positionierung der Ausgangsstellung mit der Spitze des Kegels unmittelbar auf der Bodenoberfläche, Auslösen der Kegelhalterung, Ablesen der Eindringtiefe auf der digitalen Anzeige</p>	 <p>Abbildung 10: Prüfkegel</p>

Name	Informationen	Abbildung
Weiterentwickelter künstlicher Sportler	<p>Regelwerk: DIN CEN/TS 16717 Sportböden – Bestimmung des Kraftabbaus, der vertikalen Verformung und der Energierückgabe mit dem weiterentwickelten künstlichen Sportler</p> <p>Prüfgerät: weiterentwickelter künstlicher Sportler/ Advanced Artificial Athlete Tester (3A), (Deltec Equipment, Duiven, The Netherlands)</p> <p>Prüfparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ direkt: Beschleunigungsverlauf, Kraftabbau ➤ indirekt: Verformung, Energierückgabe <p>Versuchsdurchführung: nach DIN CEN/TS 16717</p>	 <p>Abbildung 11: Weiterentwickelter künstlicher Sportler</p>
Drehwiderstandsmessgerät	<p>Regelwerk: DIN EN 15301-1 Sportböden – Bestimmung des Drehwiderstands</p> <p>Prüfgerät: Prüffuß mit Ø 15 cm Sonderanfertigung nach DIN EN 15301-1 und DIN EN 15330-1</p> <p>Prüfparameter:</p> <ul style="list-style-type: none"> ➤ direkt: Drehmoment ➤ indirekt: Scherfestigkeit <p>Anwendungsbereich nach Norm: Sportböden</p> <p>Versuchsdurchführung: nach DIN EN 15301-1</p>	 <p>Abbildung 12: Drehwiderstandsmessgerät</p>

2.4 Datenverarbeitung und -auswertung

2.4.1 Übersicht

In Tabelle 2 sind die verwendeten Methoden der Datenaufnahme und -verarbeitung zusammengefasst. Das Vorgehen ist in den anschließenden Kapiteln genauer beschrieben.

Tabelle 2: Überblick über die Datenerfassung und -verarbeitung

Prüfgerät	Datenerfassung	Weiterverarbeitung	Auswertung Versuche in der Versuchshalle	Auswertung Feldversuche
Rammsondierung (Minisonde)	Protokoll	Excel	Excel	RStudio
Ausstechzylinder	Protokoll	Excel	Excel	RStudio
Delta- Feuchtesonde	Protokoll	Excel	Excel	RStudio
POGO- Feuchtesonde	Protokoll	Excel	Excel	RStudio
Flügelsonde	Protokoll	Excel	Excel	
Scherkränze	Protokoll	Excel	Excel	
Modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät	Speicherkarte	Zorn Web App	Excel	RStudio
Clegg-Hammer	Protokoll	Excel	Excel	RStudio
Vienna Surface Tester (VST)	Speicherkarte	Excel	Excel	RStudio
HIC-Gerät	Smartphone	Desktop-Anwendung Blue Impact	-	RStudio
Prüfkegel	Protokoll	Excel	Excel	RStudio
Weiterentwickelter künstlicher Sportler	Laptop	-	-	-
Drehwiderstands- messgerät	Protokoll	-	-	-

2.4.2 Datenerfassung und Messprotokoll

Für jeden Versuchsdurchlauf, in der Halle je hergestellter Fläche und im Feld je Tretschicht, wird ein schematischer Lageplan erstellt. In diesen werden die Positionen der Messstellen eingetragen. In der Halle wird die Versuchsfläche durch seitliche Markierungen in ein Raster unterteilt, um die Lage der Messstellen möglichst genau bestimmen zu können. Im Feld wird sich an vorhandenen Bahnmarkierungen und Hindernissen orientiert. Die Werte werden größtenteils von Hand in einem standardisierten Prüfprotokoll eingetragen. Das modifizierte dynamische Plattendruckgerät, der VST und das HIC-Gerät speichern die Messdaten auf einem Speichermedium. Im Büro werden die Daten aus dem Protokoll in Microsoft Excel® 2016 (Version 16.0.5443.1000, Microsoft Corporation, Redmond, Washington, United States of America) übertragen. Die gespeicherten Daten werden mit der von den Herstellern zur Verfügung gestellten Software ausgelesen und in Excel exportiert. Dies sind die Zorn Web App (Version 1.6.8, Zorn Instruments GmbH & Co KG, Stendal, Germany) für das modifizierte dynamische Plattendruckgerät, die Desktop-Anwendung Blue Impact (wirelessvalue, Emmen, The Netherlands) für das HIC-Gerät und ein Excel-Sheet (V2.0, JP Schramel, Vetmeduni Vienna, Wien, Austria) für den VST.

2.4.3 Weiterverarbeitung

Für die Werte von den Ausstechzylindern, Densitometerversuchen, Feuchtesonden und dem HIC-Gerät ist eine weitere Verarbeitung der Daten notwendig, bevor mit der eigentlichen Auswertung begonnen werden kann.

Prinzipiell werden mit unterschiedlichen Verfahren zur Bestimmung des Wassergehalts Werte mit unterschiedlichen Bezugsgrößen ermittelt. Die mit den Feuchtesonden ermittelten Werte beziehen sich auf den volumetrischen Wassergehalt, die mittels Ofentrocknung

ermittelten Werte aus den Ausstechzylinder- und Densitometerversuchen auf den gravimetrischen Wassergehalt. Für einen direkten Vergleich müssen die Werte jeweils über die errechnete Dichte in die andere Bezugsgröße umgerechnet werden. Die Umrechnung erfolgt über die Formeln:

$$w_{\text{vol}} = w_{\text{grav}} \cdot \rho_d / \rho_w \quad (1)$$

$$w_{\text{grav}} = w_{\text{vol}} \cdot \rho_w / \rho_d \quad (2)$$

mit

w Wassergehalt
(volumetrisch oder gravimetrisch)

ρ_d Trockendichte des Bodens

ρ_w Dichte des Wassers.

Bei dem HIC-Gerät wurde aus allen Messwerten einer Messstelle eine lineare Regression über die Aufprallgeschwindigkeit modelliert, um die maximale Aufprallbeschleunigung bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 4 m/s zu errechnen. Dies verbessert die Vergleichbarkeit innerhalb des Prüfverfahrens, aber auch die Vergleichbarkeit mit dem VST. Dieser basiert auf einem vergleichbaren Auswertungsverfahren und gibt ebenfalls die maximale Aufprallgeschwindigkeit bei 4 m/s aus.

2.4.4 Laborversuche zur Bestimmung der Bodenkennwerte

Die Laborversuche zur Bestimmung der Bodenkennwerte der Tretschichten sind im Labor für Tiefbau der Hochschule Osnabrück auf Grundlage der Normen für Erdarbeiten bzw. geotechnische Untersuchungen durchgeführt worden.

Die Korngrößenverteilung wurde nach DIN EN ISO 17892-4 bestimmt. Die Bestimmung des Glühverlustes nach DIN EN 17685-1 ist heran-

gezogen worden, um den Massenanteil der Zuschlagstoffe in den Tretschichten zu ermitteln.

Zu den Verfahren ist anzumerken, dass diese standardmäßig für die Untersuchung der mineralischen Bestandteile (Ton, Schluff, Sand, Kies) von Böden sowie des Anteils an natürlich vorkommender organischer Substanz verwendet werden. Der bei Tretschichten vorliegende Reitsand enthält teilweise zusätzliche organische oder synthetische Zuschlagstoffe sowie ggf. organische Anteile aus Pferdeäpfeln. (s. auch Hemker et al., 2022) Für die vorliegende Arbeit sei deshalb hieraus zusammenfassend auf drei Punkte hingewiesen:

- Der Wert des Glühverlusts zur Ermittlung des Massenanteils an Zuschlagstoffen in Tretschichten beinhaltet auch einen unbekannten Anteil an organischer Substanz.
- Aufgrund der stark unterschiedlichen Dichte von Sanden und Zuschlagstoffen spiegelt der ermittelte Massenanteil der Zuschlagstoffe nicht den Volumenanteil wider, dieser ist größer als der Massenanteil.
- Die Körnungslinien der Sande mit Zuschlagstoffen enthalten im Bereich zwischen 4 und 16 mm ausschließlich Zuschlagstoffe. Die Sande dieser Tretschichten haben ein Größtkorn von 4 mm.

2.4.5 Visualisierung und statistische Auswertung

Die Auswertung und die Interpretation der Daten erfolgten im Sinne der explorativen Datenanalyse mittels visueller Darstellung der Daten und statistischer Methoden. Das Vorgehen und die Umsetzung orientiert sich dabei an der Arbeit von Tukey (1977) und Kruppa-Scheetz (2024). Bei den Versuchen in der Versuchshalle wurde die Auswertung in Excel vorgenommen, für die Auswertung der Feldversuche wurde die

Statistik-Software R (Version 4.3.2, The R Foundation for Statistical Computing, Wien, Austria) mittels der Desktop-Anwendung RStudio (Version 2023.12.0+369, Posit Software PBC, Boston, Massachusetts, United States of America) genutzt.

Die Ergebnisse der Versuche in der Versuchshalle wurden mittels Excel grafisch in Diagrammen dargestellt und anhand einer visuellen Analyse bewertet.

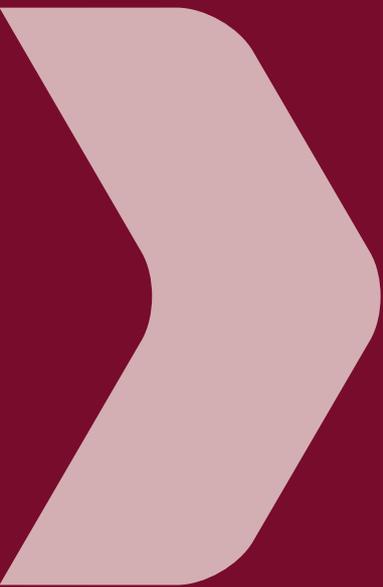
Für die Auswertung der Feldversuche kamen unterschiedliche Verfahren zum Einsatz:

Für die Fragestellung „Erzeugen wir im Feld sinnvolle Messwerte?“ wurden die Mittelwerte aus den drei Messstellen auf dem Hufschlag (häufig genutzte Bereiche) herangezogen, um eine bessere Vergleichbarkeit und geringere Streuung zu erreichen. Wie auch bei den Versuchen in der Versuchshalle wurden die Daten visualisiert und optisch auf schlüssige Erscheinung geprüft.

Bei den erweiterten Fragestellungen wurden alle Messstellen einbezogen und neben der visuellen Darstellung auch statistische Tests auf Gruppenunterschiede durchgeführt. Das Signifikanzniveau wurde standardmäßig für alle Tests auf 95 % festgelegt.

In die Auswertung der Unterschiede zwischen den Messstellen wurden an jeder Messstelle alle neun Schläge des modifizierten dynamischen Plattendruckversuchs einbezogen. Nach der Transformation der Daten in eine Normalverteilung wurde eine ANOVA-Varianzanalyse gerechnet.

Der Unterschied des Instandhaltungs- und Pflegezustands wurde ebenfalls unter Einbezug aller neun Schläge des modifizierten dynamischen Plattendruckversuchs mittels Wilcoxon-Test untersucht.



3 Laborversuche

Um die Prüfgeräte unter möglichst kontrollierten Bedingungen testen zu können und die Zahl an unbekanntem Einflussfaktoren zu minimieren, wurden Versuche auf einem eigens hergestellten Reitplatznachbau in der Versuchshalle der Hochschule Osnabrück durchgeführt. Es wurden im kleineren Maßstab Versuchsreihen im Labor durchgeführt. Vorteile hier sind eine noch bessere Kontrolle der Versuchsbedingungen sowie die Möglichkeit, die Versuche bereits während des Einbaus der Versuchsfläche durchführen zu können. Z. T. dienen die Versuche im Labor auch zur Ergänzung der Versuche in der Versuchshalle und im Feld.

3.1 Vorversuche

Durch die geringe Größe der Geräte eignen sich insbesondere die Feuchtesonden sowie die Scherkränze und die Flügelsonde für Versuchsreihen im Labor. Auch wirken diese Geräte nur in einem geringen Bodenvolumen und können daher ohne Störeinflüsse in kleineren Gefäßen verwendet werden. Schnellverfahren zur Wassergehaltsbestimmung benötigen ebenfalls nur geringe Probenmengen und können gut in Laborumgebung durchgeführt werden. Die Versuche im Labor sind nachfolgend beschrieben. Ziel ist es, eine erste Einschätzung der Prüfverfahren für den Einsatz auf Reitsanden zu gewinnen.

3.1.1 Scherfestigkeitsmessung

In die Versuche einbezogen wurden die Flügelsonde sowie der Vane Tester und der mittlere Scherkranz.

Alle Versuche wurden in einem mittleren Versuchszyylinder gemäß Proctorversuch ($\varnothing = 150 \text{ mm}$) durchgeführt. Die ersten Versuchsreihen wurden mit einem Reitsand (0/1) aus einem vorangegangenen Projekt sowie einem Füllsand (0/4) absolviert. Versuche mit dem auf der Prüffläche verwendeten Tretschichtmaterial (0/1) wurden nach Anlieferung ergänzt. Es wurden verschiedene Wassergehalts- und Dichte-

zustände eingestellt, um unterschiedliche Versuchsbedingungen zu schaffen. Die Dichtezustände bestehen aus „locker“ und „dicht“, und die verschiedenen Wassergehalte betragen 5 %, 10 % und 14 %.

Die Versuchsbedingung „locker“ wurde hergestellt, indem der Versuchszyylinder mit einer Schaufel möglichst locker mit dem Versuchsmaterial gefüllt und anschließend glatt abgezogen wurde. Für die Bedingung „dicht“ wurde der Versuchszyylinder mit Aufsatzring gefüllt und das Material mittels 25 Schläge mit einem Proctor-Verdichtungsgerät ($m = 2,5 \text{ kg}$, $h = 30 \text{ cm}$) verdichtet. Nach Herstellen der jeweiligen Versuchsbedingung wurde die Scherfestigkeit in der Mitte des Zylinders gemessen. Pro Gerät und Versuchsbedingung wurden drei bis fünf Wiederholungsmessungen durchgeführt.

Für die drei untersuchten Böden wurde festgestellt: Bei allen Geräten konnten unabhängig vom Dichtezustand die unterschiedlichen Wassergehalte nicht voneinander unterschieden werden. Bei den Ergebnissen der Flügelsonde und des mittleren Scherkranzes konnten die zwei Dichtezustände bei allen Wassergehalten in den Messwerten eindeutig voneinander differenziert werden. Beim kleinen Scherkranz war dies nicht der Fall. Daher wurde der kleine Scherkranz nicht in den Versuchen in der Halle eingesetzt.

3.1.2 Wassergehaltsbestimmung

Der Wassergehalt einer Tretschicht wird als einer der relevanten Parameter für gute sportfunktionelle Eigenschaften einer Tretschicht angesehen (FLL, 2014, S. 45). Der Wassergehalt kann im Labor durch Ofentrocknung gemäß DIN EN ISO 17892-1 bestimmt werden. Die Bestimmung mittels Ofentrocknung liefert erst nach mehreren Stunden Ergebnisse. Daher werden weitere Verfahren für die Wassergehaltsbestimmung in-situ gesucht. Hier gibt es mit speziellen Feuchtesonden oder den in der DIN 18121-1 für Baugrund genormten Schnellverfahren zur Wassergehaltsbestimmung verschiedene Ansätze. Die Eignung dieser Bestimmungsverfahren

für Tretschicht-Sande soll vorab im Labor überprüft werden.

Wassergehaltsbestimmung mit Feuchtesonden

Die Problematik der Wassergehaltsbestimmung mittels Feuchtesonden tritt generell bei Sportsanden auf. Hier wurden mit einem Sand 0/4 Versuche in einem großen Versuchszylinder gemäß Proctorversuch ($\varnothing = 250$ mm) durchgeführt. Zum Einsatz kamen die POGO-Feuchtesonde und die Delta-Feuchtesonde. Es wurden zwei Dichtezustände und drei Feuchtezustände eingestellt. Je Sonde und eingebautem Bodenzustand konnten sechs Messwerte erhoben werden (Abbildung 13), bei zwei Versuchsdurchgängen je Zustand ergeben sich somit 72 Messwerte je Sonde. Die Lage der Messpunkte wurde so gewählt, dass sich drei Messpunkte im mittigen Bereich des Versuchszylinders befanden und drei Messpunkte im Randbereich, um einen möglichen Randeinfluss zu untersuchen. Außerdem wurden beim ersten Durchgang erst alle Messungen mit der einen Sonde durchgeführt und im zweiten Versuchsdurchgang wurde mit der anderen Sonde begonnen. So soll ermittelt werden, ob bereits vorhandene Messstellen einen Einfluss auf das Ergebnis haben. Von jedem eingestellten Zustand wurde zur Kontrolle eine Probe mittels Ofentrocknung getrocknet (Brandt, 2023).

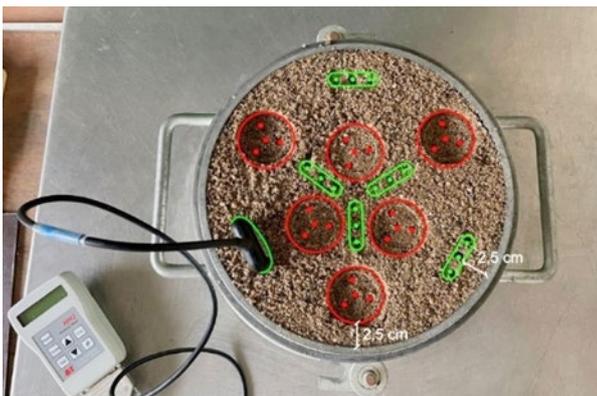


Abbildung 13: Vorversuche Feuchtesonden – Versuchsaufbau im Versuchszylinder ($\varnothing = 250$ mm) (in Anlehnung an Brandt, 2023)

Legende: Rot = POGO-Feuchtesonde
Grün = Delta-Feuchtesonde

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Lage der Messung zum Rand als auch die Reihenfolge der Messungen keinen Einfluss haben. Auffallend ist der Effekt, dass die volumetrischen Messwerte der POGO-Feuchtesonde näher an den gravimetrischen Werten der Ofentrocknung liegen, als wenn die Messwerte in den gravimetrischen Wassergehalt umgerechnet werden. Bei der Delta-Feuchtesonde tritt dieser Effekt nicht auf (Brandt, 2023).

Wassergehaltsbestimmung mit alternativen Schnellverfahren

In den genormten Schnellverfahren zur Wassergehaltsbestimmung nach DIN 18121-2 für Baugrund werden folgende mögliche Schnellverfahren genannt:

- › Infrarotstrahler
- › Elektroplatte oder Gasbrenner
- › Mikrowellenherd
- › Luftpyknometerverfahren

Zalas (2023) hat vergleichende Untersuchungen mit einem Gasbrenner (handelsüblicher Campingbedarf), einem Mikrowellenherd (handelsübliches Haushaltsgerät) und einem Luftpyknometer Typ 7306 (TESTING Bluhm & Feuerherdt GmbH, Berlin) durchgeführt. Hierfür sind zunächst unter Laborbedingungen sieben verschiedene Wassergehalte in 2-%-Schritten zwischen 4 % und 16 % eingestellt und mit den oben genannten Verfahren überprüft worden. Zusätzlich ist als Referenz eine Bestimmung durch Ofentrocknung erfolgt. Im Anschluss an die Laborversuche hat eine Versuchsreihe im Feld auf einem Reitplatz mit einer Sandtretschicht stattgefunden, um die Schnellverfahren auf Handhabung in der Praxis zu testen.

Zusammenfassend werden für die Labor- und Feldversuche folgende Ergebnisse genannt (Zalas, 2023):

- › Die Verfahren mit Gasbrenner und Mikrowellenherd werden als geeignet angesehen, den Wassergehalt von den untersuchten

Reitsanden im Schnellverfahren im Feld zu bestimmen, da sie einfach zu handhaben und auszuwerten sind sowie reproduzierbare Ergebnisse mit akzeptablen Abweichungen liefern.

- Beide Verfahren ergeben in der Regel geringfügig höhere Wassergehalte als bei der Ofentrocknung. Darauf wird in der DIN 18121-1 hingewiesen mit der Begründung, dass die Trocknungstemperatur höher ist als bei der Ofentrocknung. Auch können so durch das Verbrennen von organischer Substanz (z. B. Pferdeäpfel, Laub) höhere Werte entstehen.
- Gasbrenner und Mikrowellenherd sind leicht zu beschaffen (handelsüblich) und zu transportieren.
- Das Luftpyknometer wird als weniger geeignet angesehen, den Wassergehalt von den untersuchten Reitsanden im Schnellverfahren im Feld zu bestimmen, da die Handhabung und die Auswertung aufwendiger sind bzw. mehr Präzision und Erfahrung erfordern. Zudem sind in diesen Versuchsreihen instabile Ergebnisse erzielt worden.

Zalas (2014) hat nur Reitsande ohne Zuschlagstoffe untersucht. Auf Reitsande mit Zuschlagstoffen können die Ergebnisse nicht übertragen werden. Bei Gasbrenner und Mikrowellenherd würden die Zuschlagstoffe (Holz, Vlies) aufgrund der hohen Trocknungstemperaturen von bis zu 400 °C ggf. anfangen zu brennen oder sich zu verändern. Somit wäre die Ermittlung des Wassergehalts auf Grundlage der Massendifferenz vor und nach dem Trocknen nicht möglich. Bei dem Verfahren mit dem Luftpyknometer wird von einer einheitlichen Korndichte des Materials ausgegangen, diese liegt bei der Zumischung von Zuschlagstoffen nicht vor. Daher werden diese Verfahren in den weiteren Untersuchungen dieses Vorhabens nicht verfolgt.

3.2 Herstellung der Versuchsfläche

Die Herstellung der Versuchsfläche in der Versuchshalle kann in zwei Arbeitspakete unterteilt werden. Zuerst muss der Reitplatz-Schichtaufbau der Versuchsfläche nach Vorgaben der FLL (2014) eingebaut werden. Anschließend muss vor jedem Versuchsdurchgang die Tretschicht vorbereitet werden, um einen bestimmten Wassergehalt und Verdichtungsgrad für die Versuche zur Verfügung zu haben. Das Vorgehen bei beiden Arbeitspaketen ist im Nachfolgenden dargestellt.

3.2.1 Aufbau der Versuchsfläche

Um möglichst realistisch die Bedingungen eines Reitplatzes nachzubilden, wurde eine entsprechende Versuchsfläche in der Versuchshalle der Hochschule Osnabrück hergestellt (Abbildung 14). Über den QR-Code in Abbildung 14 kann der Einbau in Zeitraffer-Darstellung verfolgt werden. Durch die Lage in der Halle und ausschließliche Nutzung für die Versuche können Bedingungen wie Dichte und Feuchtigkeitsgehalt gezielt gesteuert und hergestellt werden.

Der Aufbau der Versuchsfläche stellt ein Dreischichtsystem nach den Anforderungen der FLL dar (FLL, 2014, Abschnitt 7.2.1). Unter der Tragschicht wurde ein Füllsand in mehreren Lagen aufgebracht und verdichtet, um die sonst entstehende Höhendifferenz zwischen Grubenrand und Versuchsfläche auszugleichen. Der Aufbau des Reitplatzsystems in der Versuchshalle oberhalb der 50 cm dicken Schicht Füllsand ist in Abbildung 15 maßstabsgetreu abgebildet. Auf den Füllsand wurde eine 18 cm dicke Tragschicht 0/32, eine 10 cm dicke Trennschicht 0/16 und abschließend die Tretschicht 0/1 mit ca. 12–15 cm Dicke aufgebracht. Die Dicke der Tretschicht variiert je nach eingestelltem Verdichtungsgrad.

Jede Schicht wurde vor und nach Einbau beprobt, um die Konformität der Materialien mit den Empfehlungen der FLL (FLL, 2014, Abschnitt 7.3–7.9) zu überprüfen. Alle Werte bilden



Abbildung 14: Versuchshalle – Die Versuchsfläche an der Hochschule Osnabrück



Abbildung 15: Versuchshalle – Schichtaufbau der Versuchsfläche

Durchschnittswerte mehrerer durchgeführter Versuche. Um auch die Homogenität der Fläche sicherzustellen, fanden die Beprobungen immer an mehreren Stellen über die Fläche verteilt statt. Ebenfalls wurden von jedem Material im Liefer- und Einbauzustand jeweils Teilproben entnommen und entsprechende Sieblinien

mittels Nasssiebung erstellt. Abbildung 16 bis Abbildung 18 zeigen die Körnungslinien der in der Versuchsfläche eingebauten Materialien. In die Abbildungen ist ebenfalls der Empfehlungsbereich der FLL (2014) für den eingebauten Zustand eingezeichnet. Wenn die Körnungslinien des Materials im eingebauten Zustand inner-

halb dieses Bereichs der rot gestrichelten Linien liegen, entspricht das Material den Empfehlungen der FLL (2014). Es zeigt sich somit, dass die Tragschicht im Einbauzustand (Abbildung 16) und die Trennschicht (Abbildung 17) sowohl im Liefer- als auch im Einbauzustand den Empfehlungen entspricht. Die Unterschiede in den Kör-

nungslinien eines Materials sind auf Veränderungen durch den Einbau und die Verdichtung zurückzuführen. Für die Trettschicht ist in Abbildung 18 lediglich der Lieferzustand dargestellt, da durch den losen Einbau des Sandes keine Veränderung der Kornverteilung zu erwarten ist.

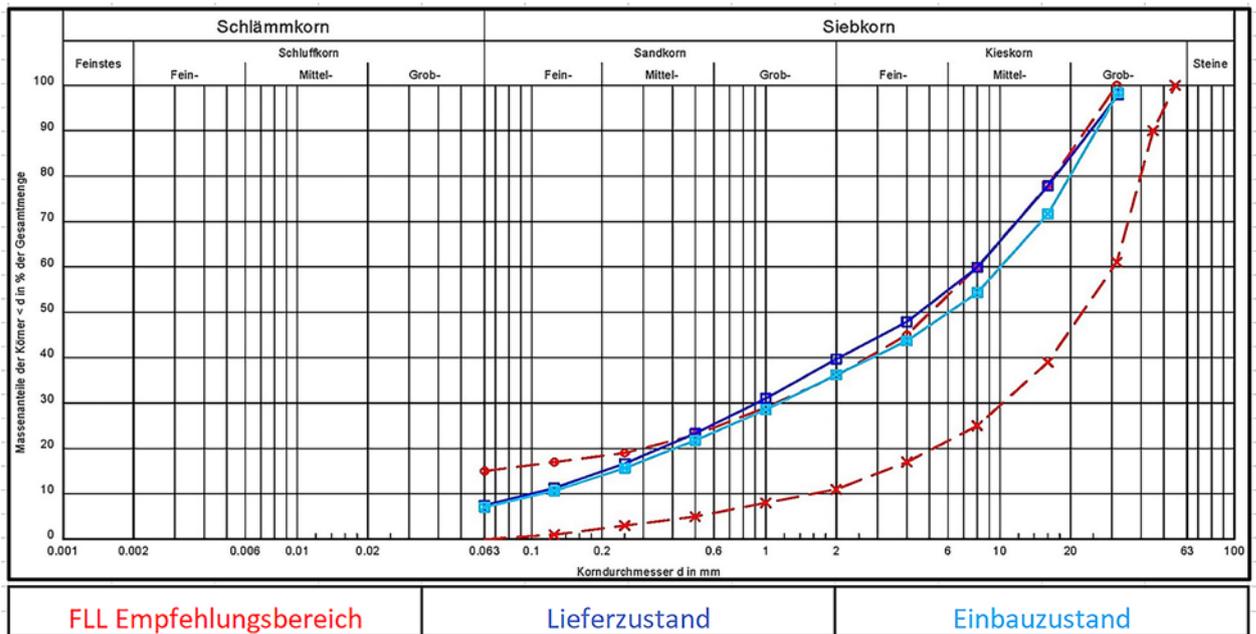


Abbildung 16: Versuchshalle – Kornverteilung der Tragschicht

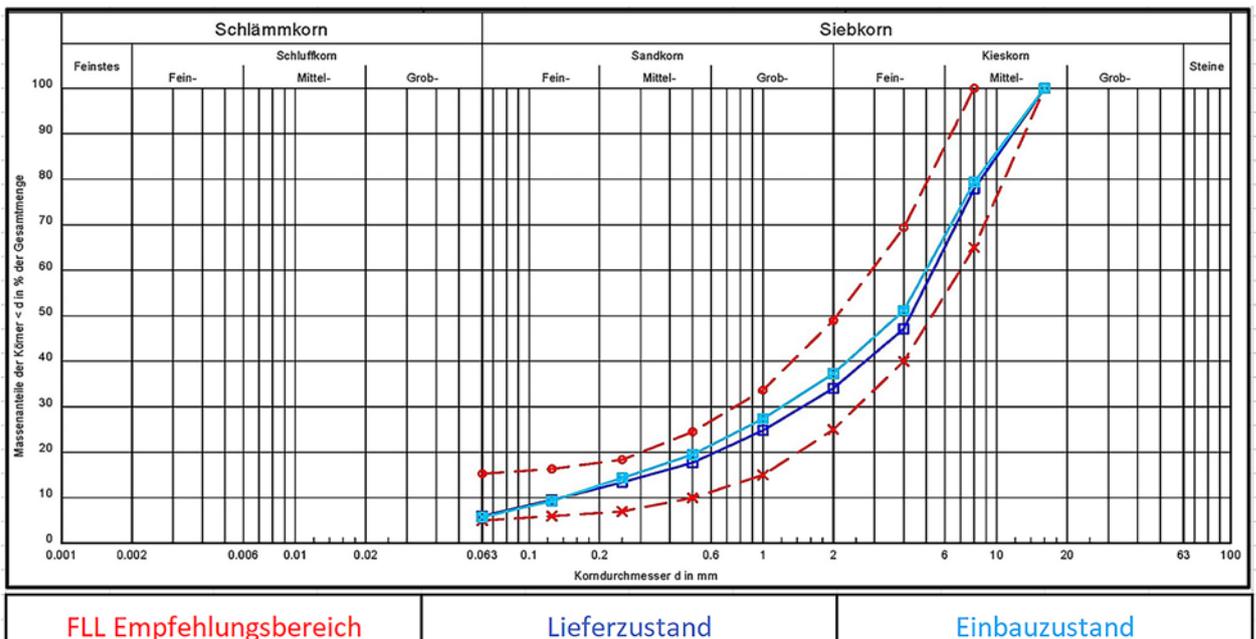


Abbildung 17: Versuchshalle – Kornverteilung der Trennschicht

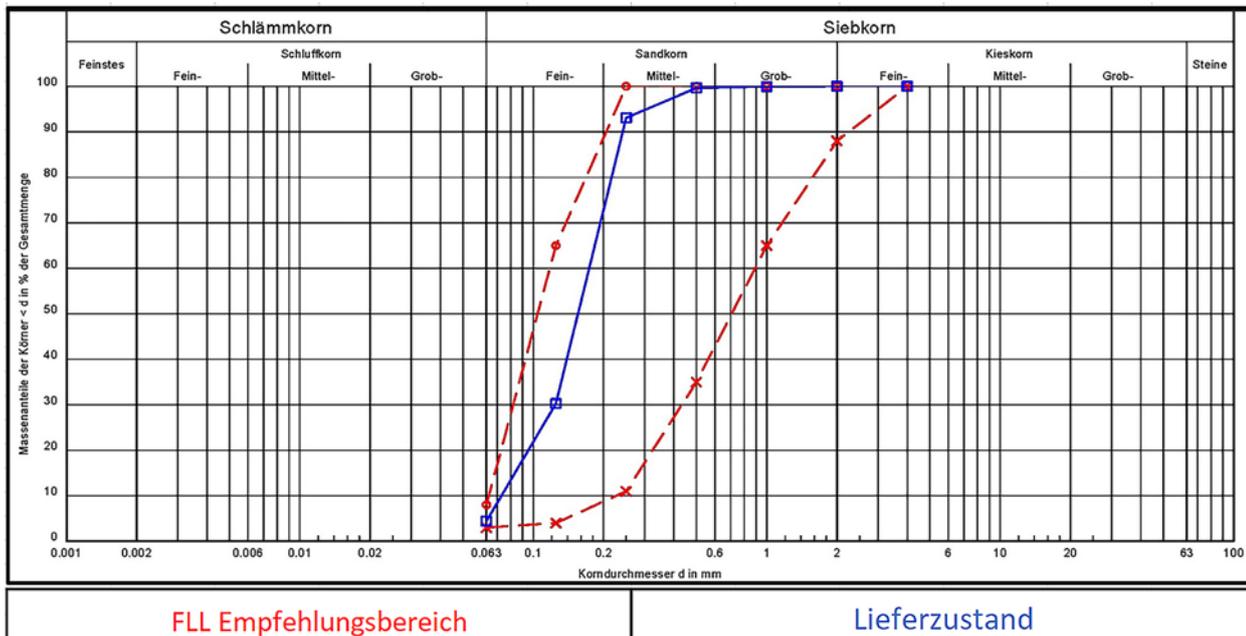


Abbildung 18: Versuchshalle – Kornverteilung der Trettschicht

In Abbildung 17 zeigt sich für die Trennschicht, dass der Lieferzustand leicht unterhalb des Einbauzustandes liegt und beide im Empfehlungsbereich platziert sind.

3.2.2 Herstellung der Versuchsbedingungen in der Trettschicht

Auf der Versuchsfläche wurden in der Trettschicht vier verschiedene Wassergehaltsbereiche (erdfeucht, nass, sehr nass, geflutet) mit zwei verschiedenen Dichtezuständen (locker, dicht) kombiniert. In dem Einbauzustand mit dem

höchsten Wassergehalt konnte die Verdichtung technisch nicht mehr umgesetzt werden, weswegen hier nur der lockere Zustand beprobt wurde. Daraus ergeben sich insgesamt sieben verschiedene Einbauzustände (Tabelle 3). Die Einteilung der Feuchte- und Dichtezustände entspricht der Forschungssystematik und wurde vom Forschungsbeirat befürwortet.

Alle Zustände der Versuchsfläche wurden während der Versuche und Arbeitsschritte durch regelmäßige Entnahme von Ausstechzylindern kontrolliert und überprüft.

Tabelle 3: Versuchshalle – Einbauzustände Trettschicht

Abkürzung	Einbauzustand		Wassergehalt w [%]		Verdichtungsgrad D_{pr} [%]	
	Feuchte	Dichte	Mittel	STABW	Mittel	STABW
EL	Erdfeucht	Locker	9,5	2,4	95,4	1,4
ED	Erdfeucht	Dicht	9,9	0,9	98,3	1,2
NL	Nass	Locker	15,6	1,4	95,0	2,1
ND	Nass	Dicht	17,1	1,5	99,1	1,4
SNL	Sehr Nass	Locker	20,0	0,5	97,7	1,6
SND	Sehr Nass	Dicht	18,0	0,4	100,7	0,8
GL	Geflutet	Locker	20,9	0,8	102,0	0,4



Abbildung 19: Versuchshalle – Herstellung des mit Folie abgedichteten Bereichs der Versuchsfläche (Borchers, 2023)

Ursprünglich war ein trockener Zustand für die Versuche vorgesehen. Nach Abstimmungen im Projektbeirat wurde auf einen trockenen Zustand verzichtet, da dies nicht den optimalen Reiteigenschaften entspricht.

Bei der Herstellung der Einbauzustände wurde aus praktikablen Gründen mit dem Liefer-Wassergehalt (erdfeucht) und dem lockeren Dichtezustand begonnen. Dazu wurde der Sand locker auf der Versuchsfläche verteilt, festgetreten und so lange geharkt, bis eine gleichmäßige Schichtdicke hergestellt war. Vor den Versuchen wurde der Boden jeweils wieder durch Harken eingeebnet und anschließend mit einer leichten Gartenwalze durch dreimaliges Überfahren leicht angedrückt. Der zwischenzeitlich entstandene Wasserverlust durch Verdunstung wurde durch Wässern ausgeglichen. Der erdfeuchte dichte Zustand wurde mithilfe einer Rüttelplatte hergestellt.

Nach Abschluss der Versuche im erdfeuchten dichten Zustand wurde der Boden gezielt bewässert, um den nassen dichten Zustand zu erreichen. Um abschließend auch bei nassem Wassergehalt den lockeren Dichtezustand zu erreichen, wurde die Fläche mit einer Motorfräse aufgefräst (ca. 2 cm Abstand zu Trennschicht, um Vermischung der Schichten zu vermeiden), festgetreten und vor den Versuchen wieder mit einer leichten Gartenwalze dreimal überfahren.

Um die Fläche nach mehreren Monaten für Versuche im sehr nassen lockeren Zustand vorzubereiten, wurde die Tretschicht mit einem Grubber vollständig auf ca. 13 cm Tiefe aufgelockert, gewässert und mit einer Harke neu eingeebnet. Eine erneute Verdichtung für den dichten Zustand erfolgte wieder mittels Rüttelplatte. Bei der Herstellung des sehr nassen Zustands konnte der angestrebte Wassergehalt von ca. 25 % trotz ausreichender Wasserzugabe auf der Versuchsfläche nicht erreicht werden. Die Wassergehalte betragen zwischen 18 % und 20 % (Borchers, 2023). Es ist davon auszugehen, dass überschüssiges Wasser vertikal durch den Reitplatzaufbau abgeführt wurde.

Daraufhin wurde auf einem ca. 13 m² großen Bereich der Versuchsfläche die Tretschicht abgetragen, eine Art Wanne mit wasserdichter Folie ausgelegt und anschließend die Tretschicht wieder eingebaut (Abbildung 19). So konnte in diesem Bereich die Tretschicht bis zur größtmöglichen Wassersättigung bewässert werden (geflutet, locker). Durch den hohen Wassergehalt war eine Verdichtung in diesem Zustand nicht möglich (Borchers, 2023).

3.3 Versuche in der Versuchshalle

Die Prüfgeräte werden zuerst in der Halle unter kontrollierten Bedingungen getestet, um die Eignung für den späteren Einsatz auf Reitböden in den Feldversuchen zu beurteilen.

3.3.1 Versuchsmatrix

Alle Geräte, welche in der Forschungssystematik aufgeführt wurden, kamen in den Versuchen zum Einsatz. Ausnahme bildet das HIC-Gerät, welches zu dem Zeitpunkt der Versuche in der Versuchshalle noch nicht zur Verfügung stand.

Um die Versuchsabläufe zu optimieren, wurden die Geräte in Tabelle 4 in Gruppen (Versuchsreihen) unterteilt:

Einige Geräte aus Versuchsreihe C erwiesen sich bereits in den ersten Versuchen als ungeeignet (s. Abschnitt 3.3.2 Messergebnisse). Daher wurden die restlichen Geräte aus C in den nächsten Versuchen in Versuchsreihe B integriert.

3.3.2 Messergebnisse

Folgende Geräte liefern in den Messungen in der Versuchshalle Ergebnisse, die in Form von Diagrammen dargestellt und erläutert werden können:

- › Rammsondierung (Minisonde)
- › Ausstechzylinder
- › Zwei Feuchtesonden
- › Flügelsonde
- › Mittlerer Scherkranz
- › Modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät
- › Clegg-Hammer
- › Vienna Surface Tester (VST)
- › Prüfkegel

Aufgrund des unterschiedlichen Zeitbedarfs der verschiedenen Versuchsreihen und da einige Versuchszustände beispielsweise im Rahmen von Abschlussarbeiten bearbeitet wurden, ergeben sich unterschiedliche Versuchszahlen für die einzelnen Zustände.

Tabelle 4: Versuchshalle – Einteilung der Versuchsreihen

Prüfgerät	Versuchsreihe A	Versuchsreihe B	Versuchsreihe C
Rammsondierung (Minisonde)	x	x	
Ausstechzylinder	x	x	x
Zwei Feuchtesonden	x		
Flügelsonde	x		
Mittlerer Scherkranz	x		
Modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät	x		
Clegg-Hammer		x	
Vienna Surface Tester (VST)		x	
Prüfkegel		x (außer Zustand EL)	x (Zustand EL)
weiterentwickelter künstl. Sportler			x
Drehwiderstandsmessgerät			x

Rammsondierung

In den Ergebnissen der Rammsondierung mit Minisonde in Abbildung 20 wird deutlich, dass

- die Ergebnisse der lockeren Zustände bis zu einer Tiefe von 11 cm nahe beieinanderliegen.
- die Ergebnisse der dichten Zustände bis zu einer Tiefe von 11 cm nahe beieinanderliegen.
- sich die Zustände locker und dicht in den Schlagzahlen eindeutig voneinander unterscheiden.
- sich die Schlagzahlen des gefluteten Zustands stark von allen anderen Zuständen unterscheiden.

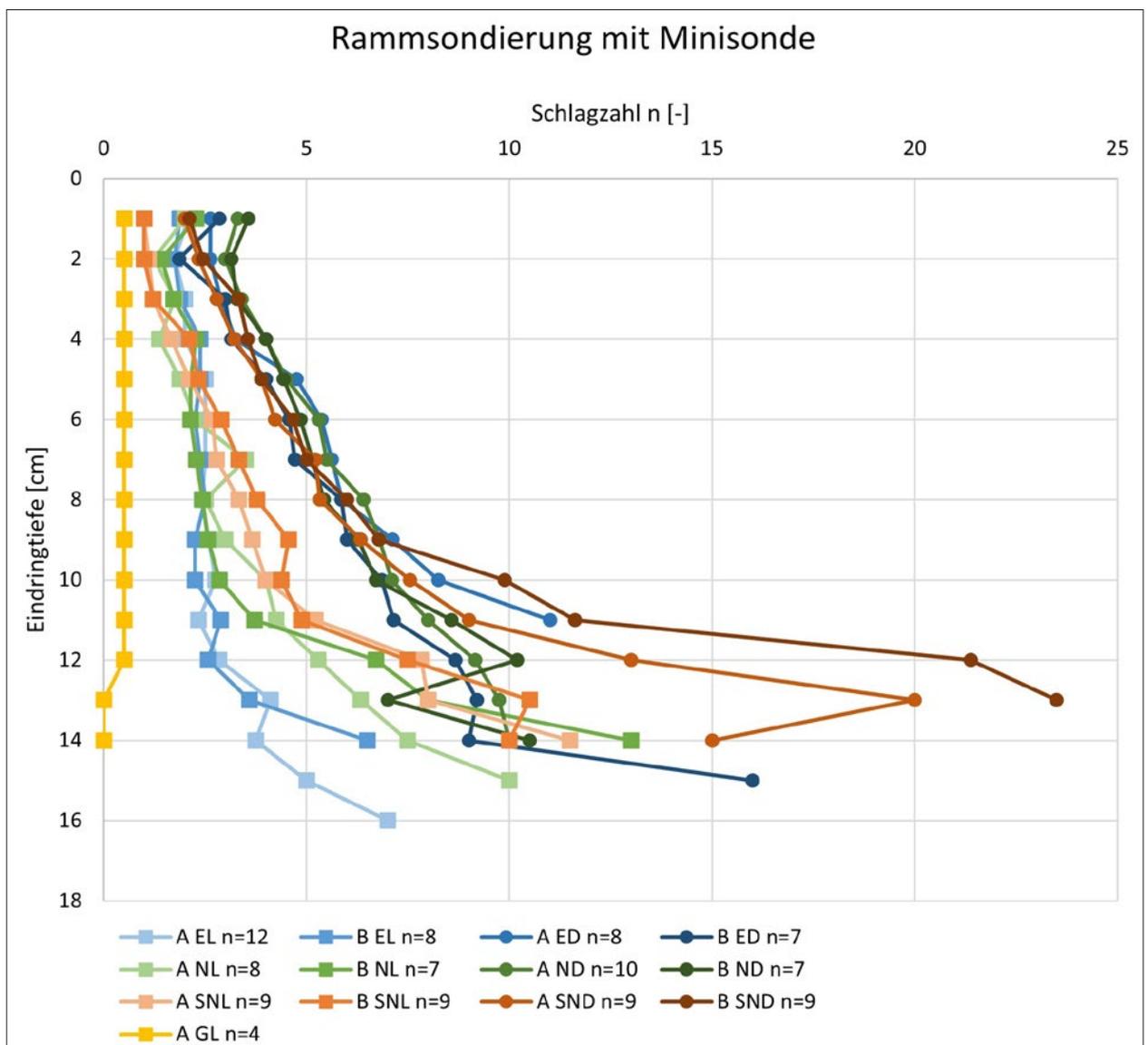


Abbildung 20: Versuchshalle – Ergebnisse Rammsondierung mit Minisonde

Ausstechzylinder

Die Wassergehaltsbestimmung mittels Ausstechzylinder in Abbildung 21 zeigt links den tatsächlich ermittelten gravimetrischen Wassergehalt und rechts den mittels Trockendichte errechneten volumetrischen Wassergehalt. Die Abbildung macht deutlich, dass

- › der erdfeuchte Zustand messbar trockener ist als die nassen Zustände.

- › mit dem sehr nassen Zustand der Wassergehalt im Vergleich zum nassen Zustand nicht wesentlich erhöht werden konnte.
- › auch die im gefluteten Zustand ermittelten Wassergehalte keine deutliche Steigerung zum nassen und sehr nassen Zustand darstellen.

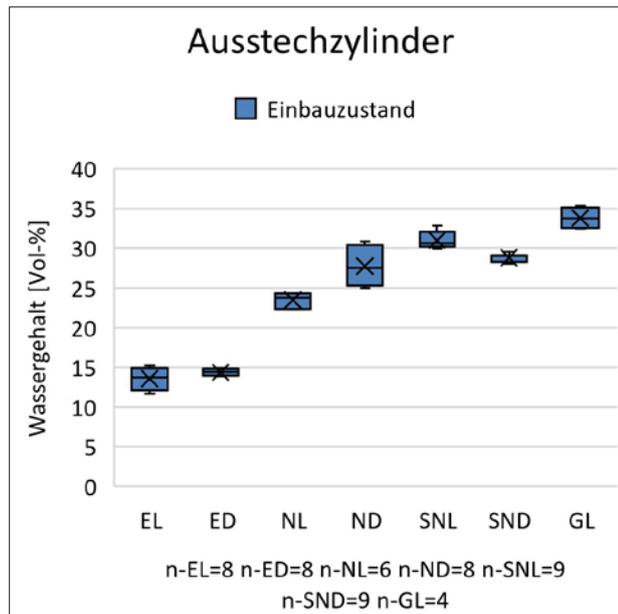
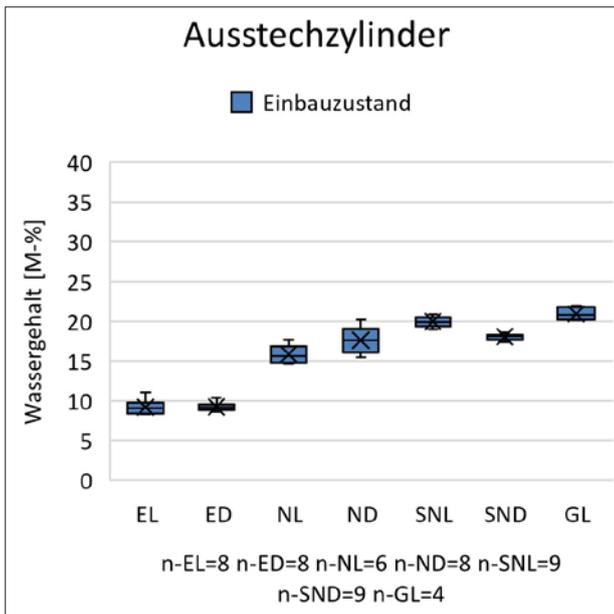


Abbildung 21: Versuchshalle – Ergebnisse Wassergehaltsbestimmung Ausstechzylinder

Die Ergebnisse aus Ausstechzylinder (Abbildung 21) und Sondierung mit der Minisonde (Abbildung 20) zeigen, dass es gelungen ist, die Fläche in mehreren eindeutig voneinander unterscheidbaren Zuständen (Wassergehalt und Dichte) herzustellen. Es ist außerdem gelungen, einen einzelnen Zustand mehrmals möglichst ähnlich wiederherzustellen.

Feuchtesonden

In Abbildung 22 sind die Ergebnisse der Delta-Feuchtesonde dargestellt. In Abbildung 23 sind die Ergebnisse der POGO-Feuchtesonde dargestellt. Es zeigt sich, dass

- der erdfeuchte Zustand niedrigere Feuchtigkeitswerte generiert als die anderen Zustände.
- in den Werten der Feuchtesonden der geflutete Zustand mit erkennbar höheren Werten vom sehr nassen und nassen Zustand abgegrenzt werden kann.
- die Werte im Plattenabdruck (nach vorhergehenden Untersuchungen mit dem modifizierten dynamischen Plattendruckgerät) und außerhalb des Abdrucks wenig variieren, mit Ausnahme des Zustands SNL.
- im Vergleich mit den mittels Ausstechzylinder ermittelten Werten in Abbildung 21, die Beobachtungen aus den Vorversuchen (Kapitel 3.1.2) bestätigt werden. (Die volumetrischen Messwerte der POGO-Feuchtesonde liegen näher an den gravimetrischen Werten der Ofentrocknung als nach der Umrechnung der Messwerte in den gravimetrischen Wassergehalt. Bei der Delta-Sonde ist dies nicht so.)

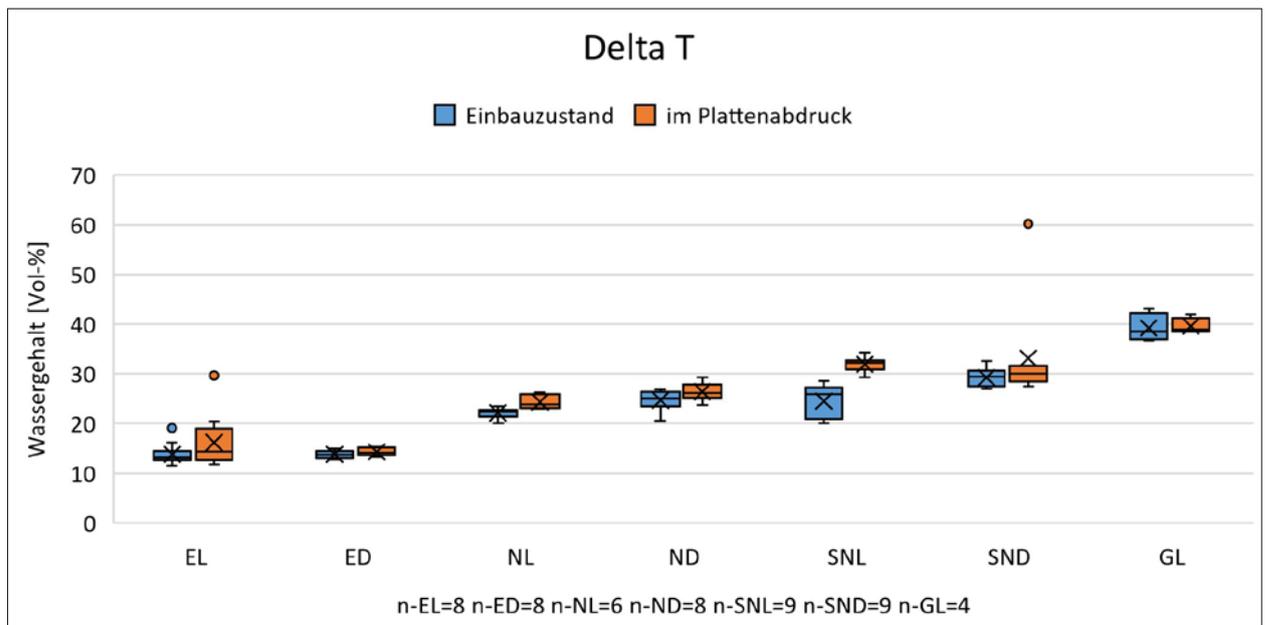


Abbildung 22: Versuchshalle – Ergebnisse Delta-Feuchtesonde

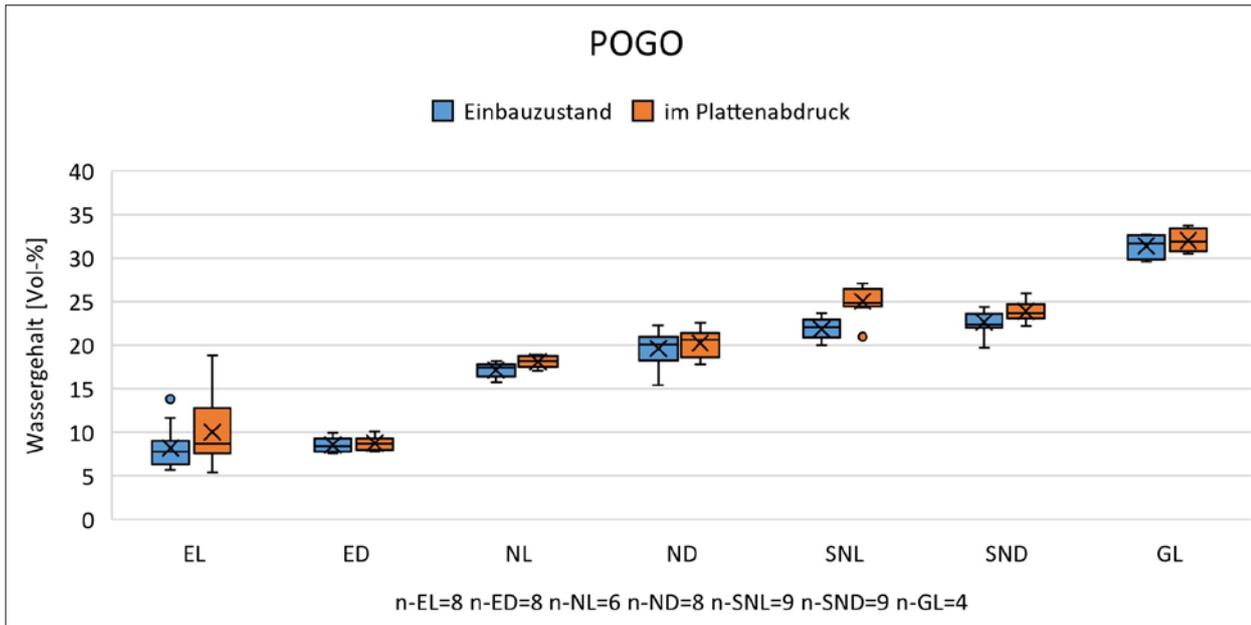


Abbildung 23: Versuchshalle – Ergebnisse POGO-Feuchtesonde

Flügelsonde und Scherkranz

Abbildung 24 zeigt die Werte der Flügelsonde, Abbildung 25 die Werte des mittleren Scherkranzes. Es lässt sich erkennen, dass

- die absoluten Werte deutlich unterschiedlich sind (Max.-Flügelsonde: 7 Nm, Max.-Scherkranz: 2,25 Nm).
- bei beiden Geräten die verschiedenen Einbauzustände der Tretschicht sowohl bei Messungen außerhalb als auch innerhalb des Plattenabdrucks nicht klar voneinander abgegrenzt werden können.
- beim Scherkranz die Werte im Plattenabdruck durchschnittlich höher sind als außerhalb des Abdrucks.
- bei der Flügelsonde die Werte im Plattenabdruck sowohl über als auch unter oder gleichauf mit den Werten außerhalb der Abdrücke liegen.
- das Verhältnis zwischen den Einbauzuständen bei beiden Geräten parallel verläuft. Höhere Scherfestigkeitswerte in einem Zustand zeigen sich sowohl bei Messungen mit der Flügelsonde als auch mit dem mittleren Scherkranz.

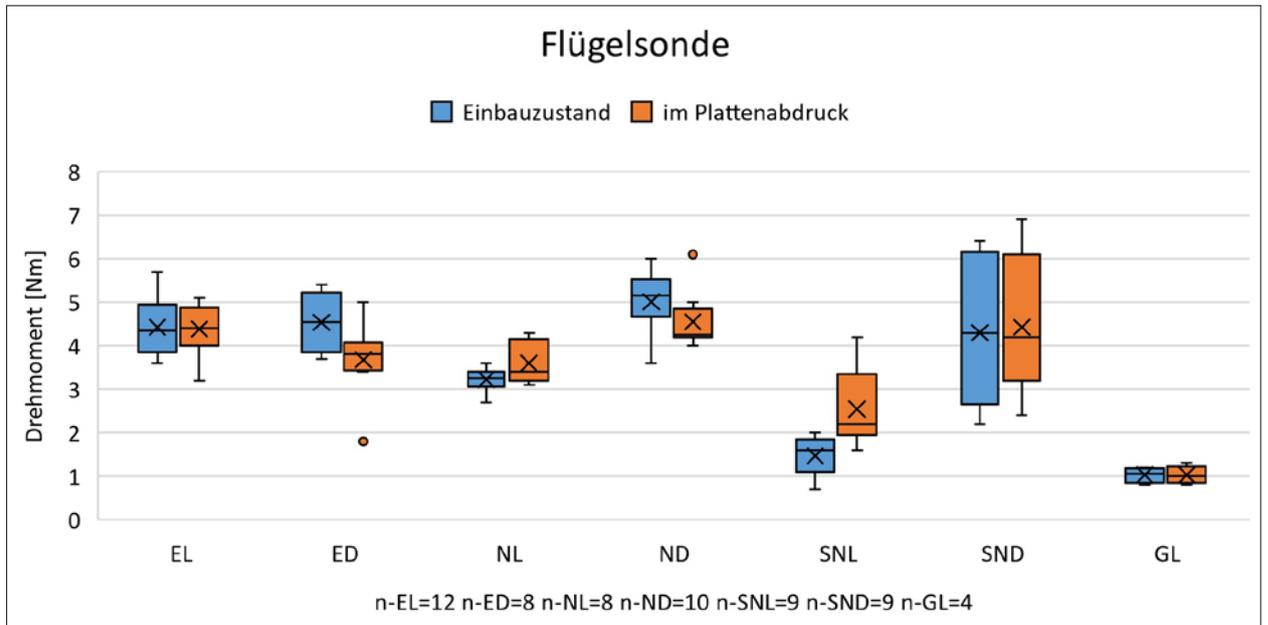


Abbildung 24: Versuchshalle – Ergebnisse Flügelsonde

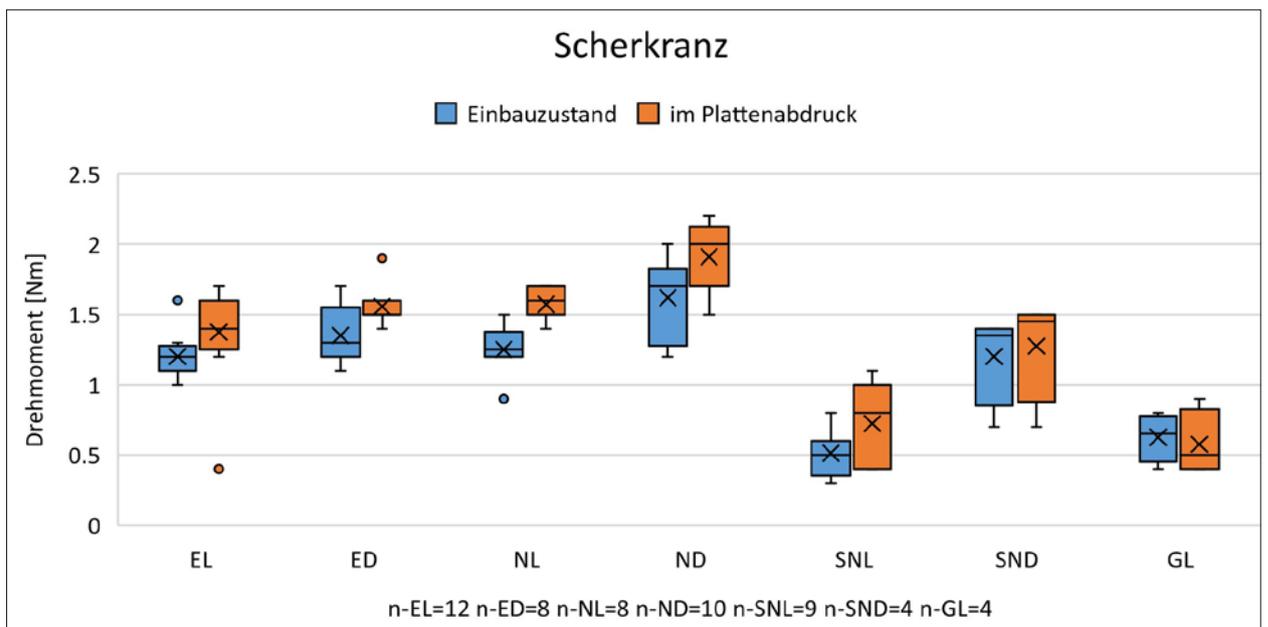


Abbildung 25: Versuchshalle – Ergebnisse mittlerer Scherkranz

Modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät

Bei den Messungen mit dem modifizierten dynamischen Plattendruckgerät traten aufgrund zu hoher Setzungen vor allem im lockeren Zustand häufig ungültige Werte beim ersten Stoß auf. Bei diesen Messpunkten wurde trotzdem der Messwert des zweiten und der folgenden Stöße einbezogen. Abbildung 26 zeigt die mittleren Setzungsgeschwindigkeiten inklusive Standardabweichung für jeden der neun Stöße je Zustand. In Abbildung 27 ist dieses für die Setzung dargestellt. Setzung und Setzungsgeschwindigkeit sind nach unten aufgetragen. Zu sehen ist, dass

- sowohl die Setzungsgeschwindigkeit als auch die Setzung beim ersten Stoß am größten ist und bei den darauffolgenden Stößen abnimmt bzw. sich einer Konstanten annähert.
- die Streuung in Setzungsgeschwindigkeit und Setzung meist beim ersten Stoß am größten und beim neunten Stoß am geringsten ist.
- die unterschiedlichen Verdichtungen sich in den Werten eindeutig unterscheiden, während der Wassergehalt kaum Einfluss auf die Messwerte zu haben scheint.
- der Verlauf der Setzungsgeschwindigkeit mehr Abweichungen zu einem stetigen Trend aufweist als der Verlauf der Setzung.

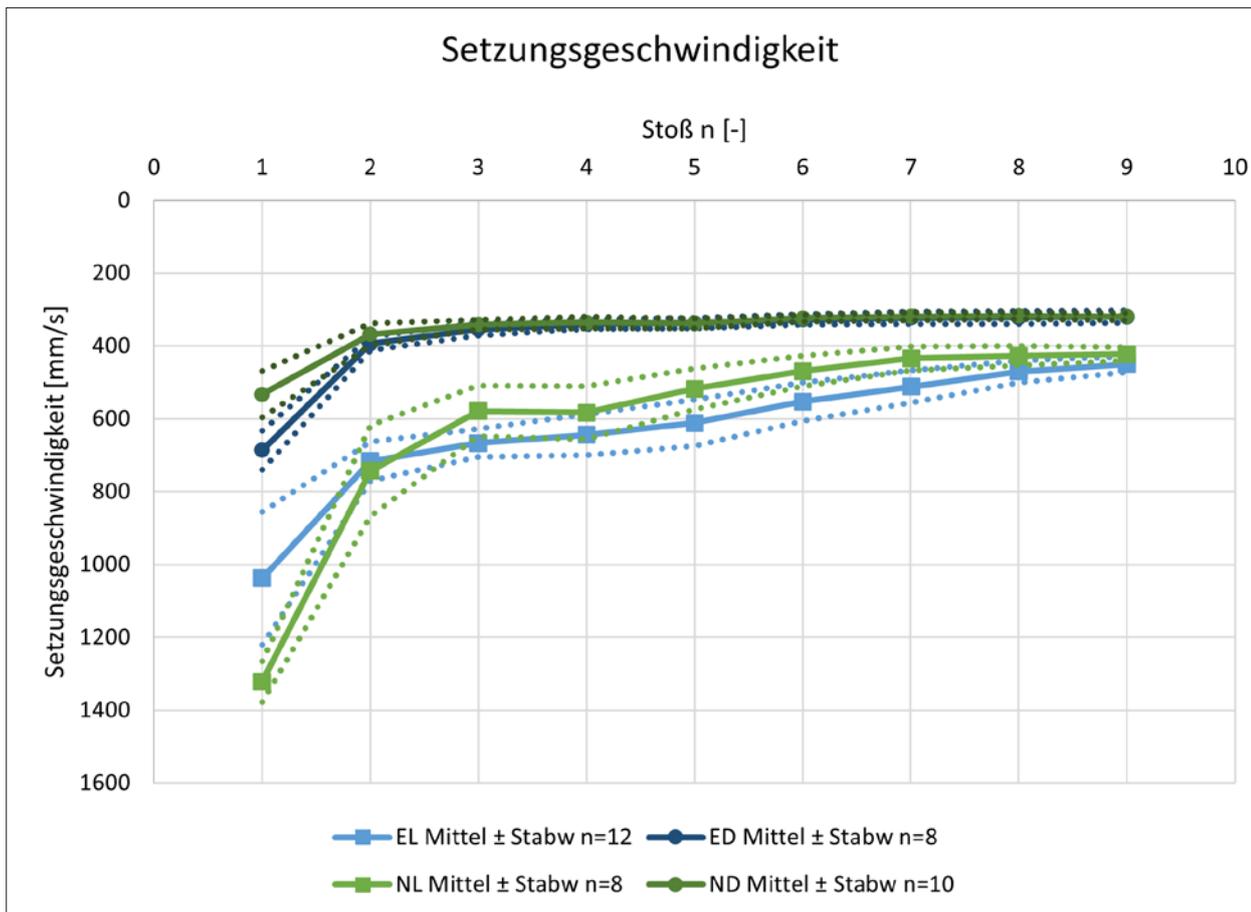


Abbildung 26: Versuchshalle – Ergebnisse Setzungsgeschwindigkeit modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät

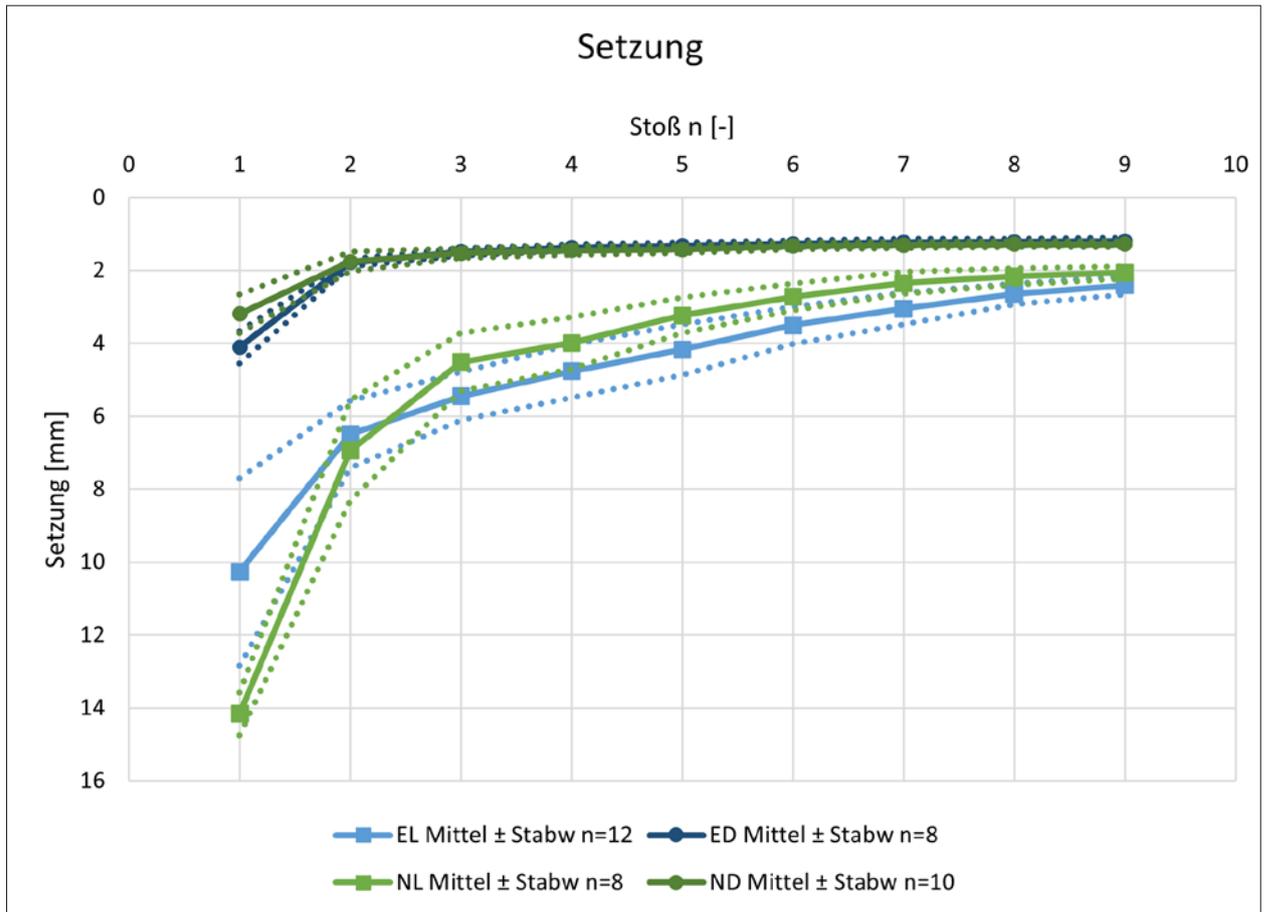


Abbildung 27: Versuchshalle – Ergebnisse Setzung nodifiziertes dynamisches Plattendruckgerät

Clegg-Hammer

Die Ergebnisse des Clegg-Hammers sind in Abbildung 28 visualisiert. U. a. im Vergleich zu den Ergebnissen des modifizierten dynamischen Plattendruckversuchs fällt auf, dass

- die Aufprallbeschleunigung beim ersten Aufschlag am geringsten ist, jedoch mit den folgenden Aufschlägen zunimmt und sich später einer Konstanten annähert.
- die Streuung überwiegend bei allen Aufschlägen ähnlich groß ist.
- die unterschiedlichen Verdichtungen sich in den Werten ebenfalls eindeutig unterscheiden, während der Wassergehalt kaum Einfluss auf die Messwerte zu haben scheint.
- die Werte der Aufprallbeschleunigung im sehr nassen Zustand bei den Aufschlägen eins bis fünf stärker ansteigen als bei den anderen Zuständen.
- die Aufprallbeschleunigung im gefluteten Zustand kaum ansteigt.

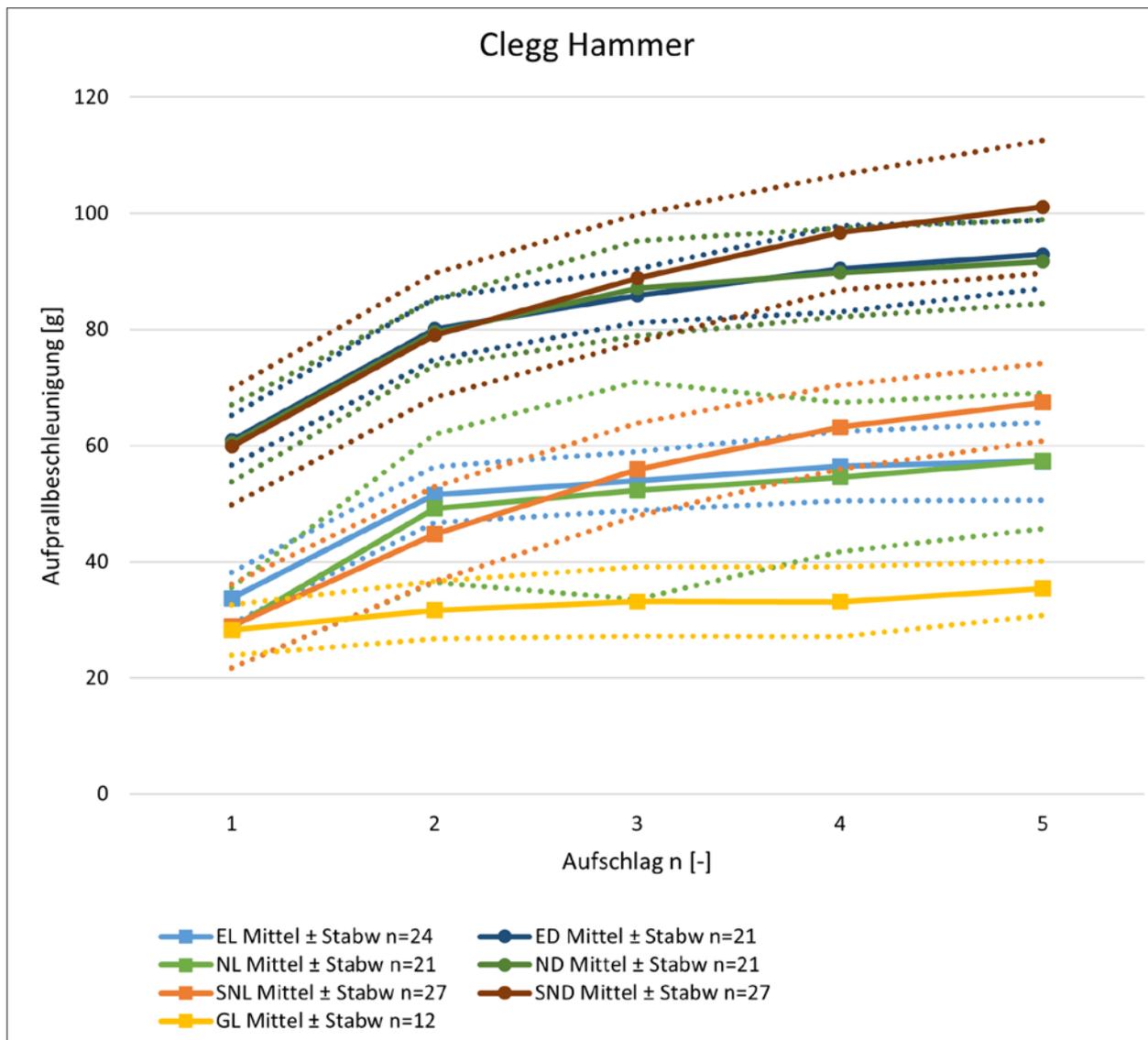


Abbildung 28: Versuchshalle – Ergebnisse Clegg-Hammer

Vienna Surface Tester

Die Prüfkugel, der Vienna Surface Tester, ermittelt eine Vielzahl an Werten. Beispielhaft ist in Abbildung 29 die mittlere Energierückgewinnung bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 2 m/s (ER2) und 4 m/s (ER4) an jeder Messstelle der einzelnen Einbauzustände dargestellt. Hier zeigt sich, dass

- sich die Dichtezustände deutlich differenzieren lassen.
- im lockeren Zustand die Messwerte unterhalb des Messbereichs des Geräts liegen (< 0,1).

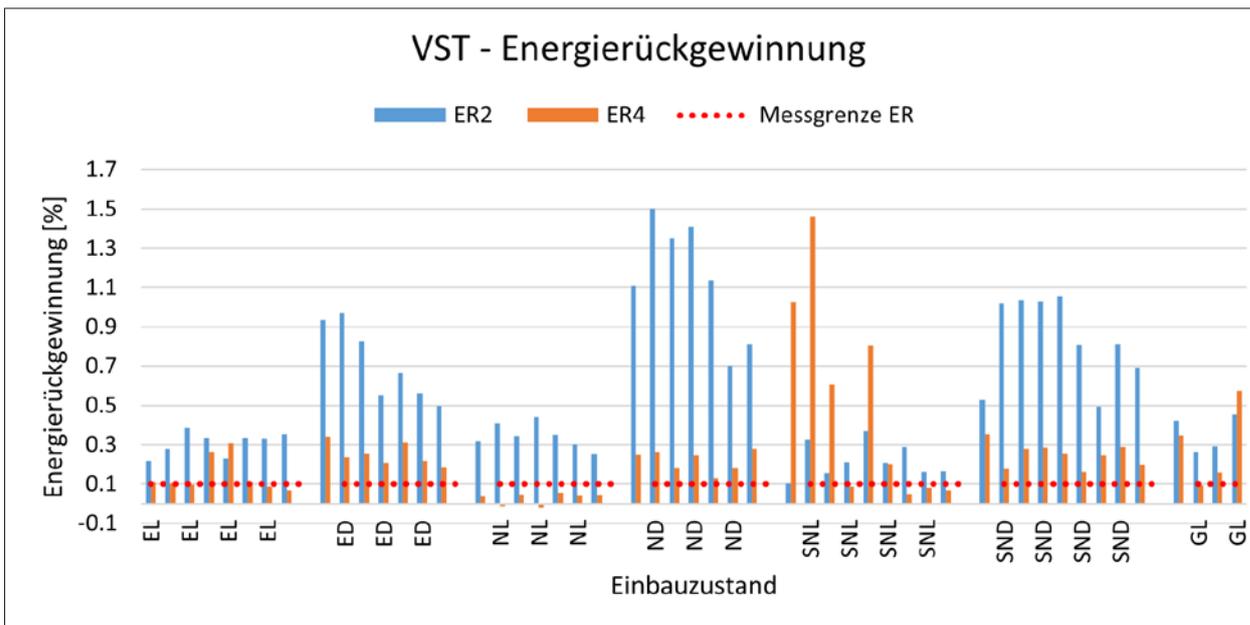


Abbildung 29: Versuchshalle – Ergebnisse VST Energierückgewinnung

In Abbildung 30 sind jeweils die kleinsten und größten im Sand gemessenen Kugelabdrücke abgebildet. Dichte und lockere Zustände unterscheiden sich deutlich voneinander.

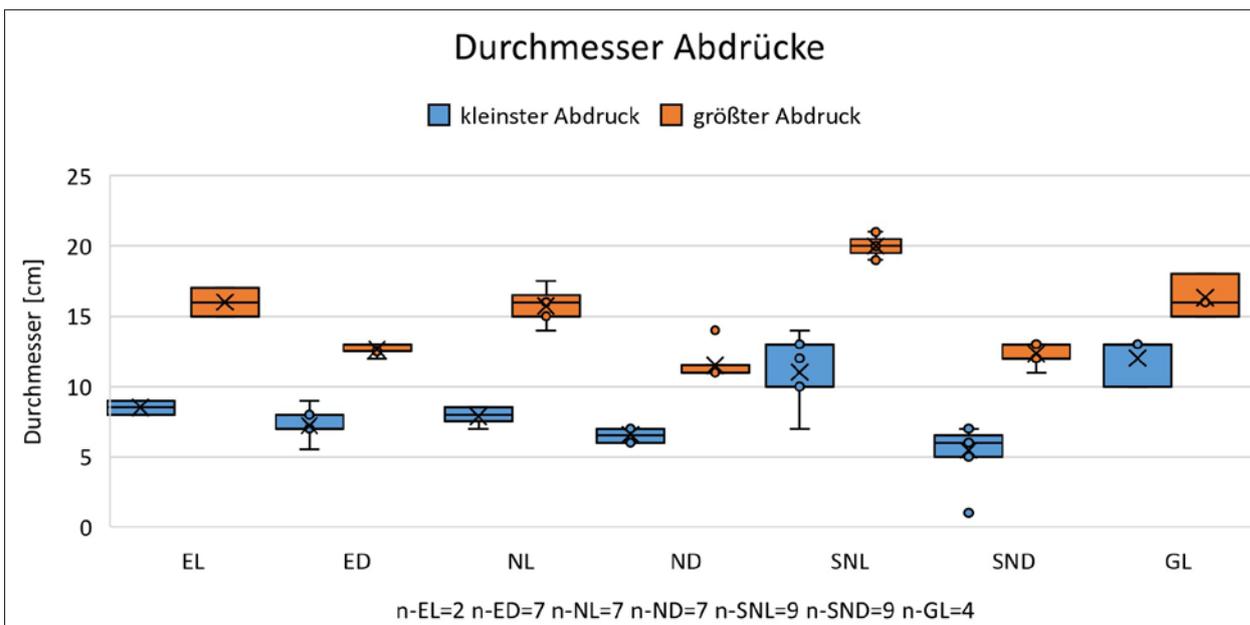


Abbildung 30: Versuchshalle – Ergebnisse VST Abdruckmessungen

Prüfkegel

Die Messergebnisse, welche mit dem Prüfkegel ermittelt wurden, sind in Abbildung 31 zu sehen. Während der Messungen im erdfeuchten und nassen Zustand traten technische Probleme am Gerät auf. Daher sind die Ergebnisse bei diesen Zuständen möglicherweise verfälscht und können nicht korrekt interpretiert werden. Es finden sich in den Ergebnissen dennoch Hinweise, dass

- sich im nassen, sehr nassen und gefluteten Feuchtigkeitsbereich die einzelnen Dichtezustände in den Messergebnissen klar voneinander abgrenzen.
- im lockeren Zustand meist größere Eindringtiefen erzielt werden als im verdichteten Zustand.
- die Streuung im lockeren Zustand größer ist als im dichten Zustand.

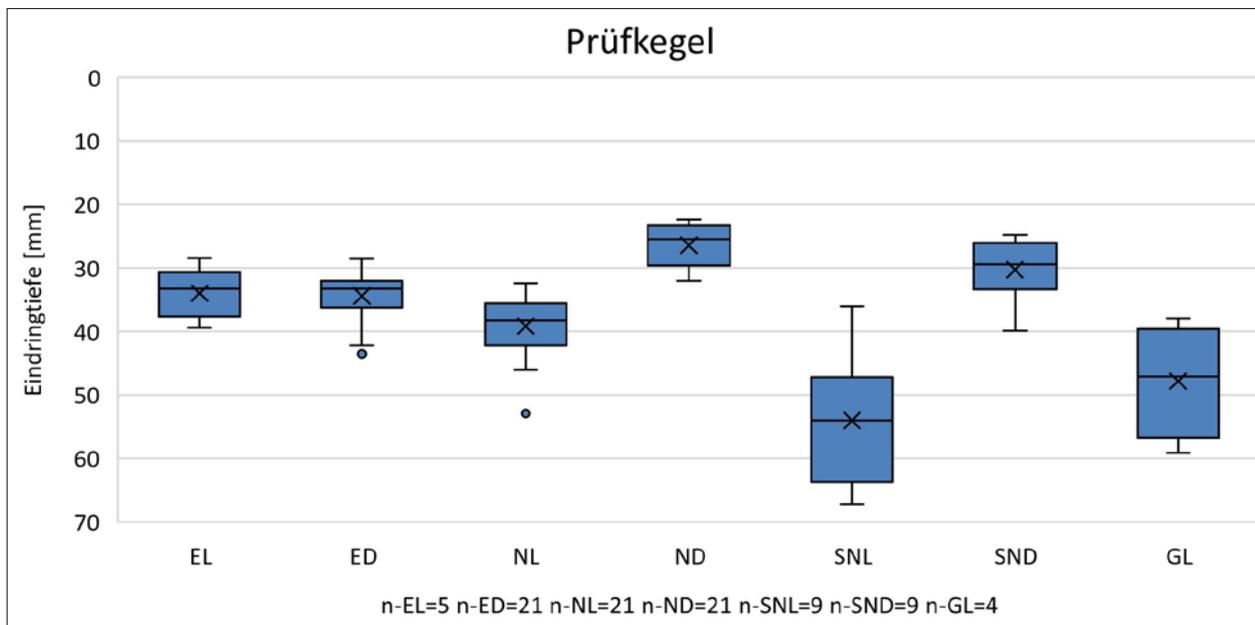


Abbildung 31: Versuchshalle – Ergebnisse Prüfkegel

Drehwiderstandsmessgerät

Mit dem Drehwiderstandsmessgerät konnte unabhängig vom eingestellten Zustand auf der Fläche kein Messwert innerhalb des Messbereichs der Anzeige erzielt werden. Der Schleppzeiger (rot) liegt im Bereich ohne Skaleneinteilung, wie in Abbildung 32 zu sehen.



Abbildung 32: Versuchshalle – Anzeige Drehwiderstandsgerät während einer Messung

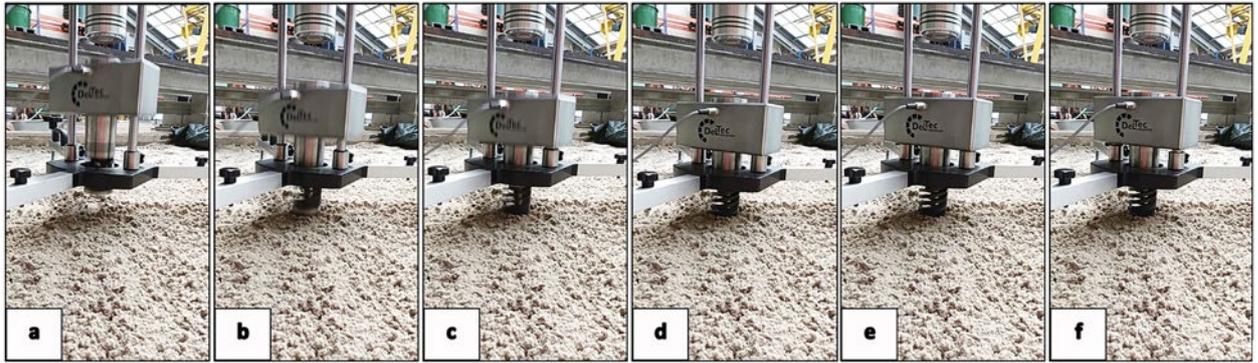


Abbildung 33: Versuchshalle – Aufprall weiterentwickelter künstlicher Sportler

Weiterentwickelter künstlicher Sportler

Bei der Anwendung des weiterentwickelten künstlichen Sportlers auf Sand fiel auf, dass das fallende Gewicht mit Prüffuß nicht etwa durch den Boden gebremst wird und somit die Bodeneigenschaften ermittelt werden können. Stattdessen fällt das Gewicht aufgrund des geringen Eindringwiderstandes von Sand ungebremst, bis die Fallbewegung durch die bauliche Konstruktion des Geräts gestoppt wird. In der Bildserie in Abbildung 33 ist zu erkennen, wie in c) zuerst der Prüffuß auf dem Boden aufkommt und in diesen eindringt, gefolgt von dem Aufprall des Gewichts auf der Konstruktion in d). Auf den Aufprall auf der Konstruktion folgt ein Rückprall des Gewichts. Der Widerstand des Bodens ist folglich nicht groß genug, um die Fallbewegung abzustoppen oder gar umzukehren, der Aufprall auf die Konstruktion hingegen schon. Das Gerät misst die maximale verzögernde Kraft, diese ist in diesem Fall die bremsende Eigenschaft seiner eigenen Konstruktion und nicht die des Bodens.

Außerdem zeigte sich je nach Zustand des Bodens, dass die waagrechte Aufstellung durch Einsinken der Standfüße in den Boden behindert wurde. Dies beeinflusst die Reproduzierbarkeit der Versuche und die Fallhöhe und wirkt sich dadurch ebenfalls auf die Messergebnisse aus.

3.4 Auswahl der Prüfgeräte für die Feldversuche

Für die Prüfgeräte der Feldversuche wurden folgende Anforderungen definiert:

- Das benötigte Material ist mit einem Pkw transportierbar.
- Die Untersuchungen sind von einer einzelnen Person durchführbar.
- Eine einfache, schnelle Durchführung ermöglicht, dass in angemessenem Zeitaufwand mehrere Prüfungen ausführbar sind.
- Die Gleichförmigkeit der Bodenreaktion kann festgestellt werden (Reitsicherheit).
- Der Kostenrahmen ist akzeptabel.
- Die Auswertung ist einfach und nachvollziehbar.

Prüfgeräte, die diese Anforderungen in der Praxis bereits in der Versuchshalle nicht erfüllen, werden für die Feldversuche ausgeschlossen. In den Feldversuchen werden nur Prüfgeräte eingesetzt, die sich in den Versuchen in der Versuchshalle bewähren konnten. Tabelle 5 zeigt einen Überblick über die Geräte, die in den Versuchen in der Versuchshalle eingesetzt wurden, mit einer Einschätzung der Ergebnisse hinsichtlich der Anwendbarkeit bei den Feldversuchen.

Tabelle 5: Versuchshalle – Einordnung der Ergebnisse

Prüfgerät	Ergebnisse Versuchshalle	Fazit
Rammsondierung (Minisonde)	Gute Abschätzung des Dichteverhaltens innerhalb einer Schicht, handlich, direkt neben anderen Versuchsstellen möglich	Feldversuche
Ausstechzylinder	Sehr genau, aber aufwendig	Feldversuche
Feuchtesonden	Handlich, schnelle Ergebnisse, Auswertung nur mit Dichtebestimmung möglich	Feldversuche
Flügelsonde Scherkranz	In der Versuchshalle unzureichende Differenzierung zw. untersch. Wassergehalten und Dichtezuständen, in Vorversuchen bessere Differenzierbarkeit, immer wieder ungültige Messungen	Ausschluss
Mod. dyn. Platten-druckgerät	Deutliche Unterscheidung zw. Dichtezuständen, geringe Streuung (bei „locker“ z. T. ungültiger 1. Stoß)	Feldversuche
Clegg-Hammer	Sehr handlich, hohe Wiederholungszahl möglich, Ergebnisse mit Plattendruck vergleichbar	Feldversuche
Vienna Surface Tester (VST)	Deutliche Unterscheidung zw. Dichtezuständen, handlich, nachvollziehbare Auswertung, max. Abdruckdurchmesser als Ersteinschätzung? (bei „locker“ z. T. Werte außerhalb des Messbereichs)	Feldversuche
HIC-Gerät	Gerät noch nicht verfügbar	Versuche folgen
Prüfkegel	Sehr unhandlich, technische Probleme, Ergebnisse nicht eindeutig	Weitere Versuche nötig => Feldversuche
weiterentwickelter künstl. Sportler	Zu unhandlich, ungeeignet	Ausschluss
Drehwiderstands-messung	Ergebnisse nicht im Messbereich	Ausschluss

Weiterentwickelter künstlicher Sportler

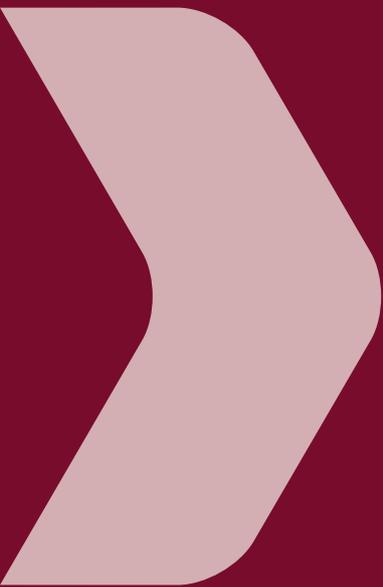
Der weiterentwickelte künstliche Sportler erfüllt allein aufgrund seiner Form, Größe und Handhabung nicht die vorab definierten Anforderungen. Er ist nicht von einer Person aufzubauen und zu versetzen. Somit können auch nicht innerhalb eines akzeptablen Zeitrahmens mehrere Versuche durchgeführt werden. Laut der zugehörigen Norm DIN CEN/TS 16717 2015-05 ist das Gerät zudem für die Prüfung von elastischen Sportböden (z. B. Sporthallenbeläge, Kunststoffrasensysteme) ausgelegt. In den Testläufen in der Versuchshalle zeigte sich, dass das Gerät aufgrund seiner Konstruktion nicht für die Untersuchung von (Reit-)Sanden geeignet ist.

Drehwiderstandsmessgerät

In den Versuchen in der Versuchshalle erwies sich dieses Gerät als unhandlich und aufwendig im Transport. Außerdem konnten in keinem eingestellten Zustand Messwerte innerhalb des Messbereiches erzeugt werden.

Scherkränze und Flügelsonde

Bei dem mittleren Scherkranz und der Flügelsonde zeigte sich ein widersprüchliches Bild. Während die Ergebnisse der Vorversuche im Labor vielversprechend wirkten, konnte sich dies in den Versuchen in der Versuchshalle nicht abbilden. In Absprache mit dem Projektbeirat wurden diese Geräte daher für die Feldversuche ausgeschlossen.



Feldversuche

In den Feldversuchen wird die Praxistauglichkeit der Prüfgeräte getestet.

4.1 Material und Methode

Die Prüfgeräte für die Feldversuche werden anhand der Ergebnisse aus den Versuchen in der Versuchshalle ausgewählt. Es werden verschiedene Reitplätze und -hallen mit unterschiedlichen Tretschichtmaterialien untersucht.

4.1.1 Prüfgeräte

Nach den Erkenntnissen der Versuchsreihen in der Versuchshalle kamen bei den Feldversuchen folgende Prüfgeräte zum Einsatz:

- › Rammsondierung (Minisonde)
- › Ausstechzylinder
- › Densitometer
- › Zwei Feuchtesonden

- › Modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät
- › Clegg-Hammer
- › Vienna Surface Tester (VST)
- › HIC-Gerät
- › Prüfkegel

4.1.2 Aufstellung der untersuchten Tretschichten

Um die Eignung der Prüfgeräte in der Praxis beurteilen zu können, wurden Tretschichten mit verschiedenen Tretschichtmaterialien beprobt. Dies umfasst Tretschichten aus reinem Sand, aus Sand mit den Zuschlagstoffen (ZSS) Vlies oder Holz und auch Sonderformen wie Tretschichten rein aus Holzhäckseln oder Synthetikhäckseln. Tabelle 6 gibt einen Überblick über die untersuchten Reitplätze (P), Reithallen (H) und Sonderformen wie Roundpens und Führanlagen (R). Ebenfalls aufgeführt sind das Tretschichtmaterial, der Versuchstag

Tabelle 6: Feldversuche – Überblick der Versuchsbedingungen

ID	Tretschichtmaterial	Tagestemperatur [°C]	Tagesniederschlag [mm]	Ø Windgeschwindigkeit [km/h]	Pflegezustand	Viereck	Anteil ZSS/Organik [M.-%]
H_1	Sand (ehemals Jute)	9,2-20,2	0	14,2	Gepflegt	Ja	1,0
H_2	Sand Vlies	4,5-8,4	10,5	5	Beritten/ Gepflegt	Ja	3,0
H_3	Sand Holz	12,5-21,1	0	8,5	Beritten	Ja	16,5
P_1	Holzhäcksel	2,6-10,8	11,7	17,5	Beritten	Ja	100
P_2	Sand Vlies	11,4-26,4	0	11,9	Beritten	Ja	1,0
P_3	Sand	4,5-8,4	10,5	5	Ungenutzt	Ja	0,8
P_4	Sand Vlies	9,3-14,3	2,1	15,7	Ungenutzt	Nein	3,0
P_5	Sand Vlies	9,3-14,3	2,1	15,7	Beritten	Ja	3,0
P_6	Sand Vlies	12,5-21,1	0	8,5	Gepflegt	Ja	1,35
P_7	Sand Vlies	9,3-14,3	2,1	15,7	Ungenutzt	Nein	3,0
P_8	Sand	12,8-21,7	0	13,8	Beritten	Nein	0,6
R_1	Teppichhäcksel	2,6-10,8	11,7	17,5	Beritten	Nein	100
R_2	Sand	11,4-26,4	0	11,9	Gepflegt	Nein	0,0

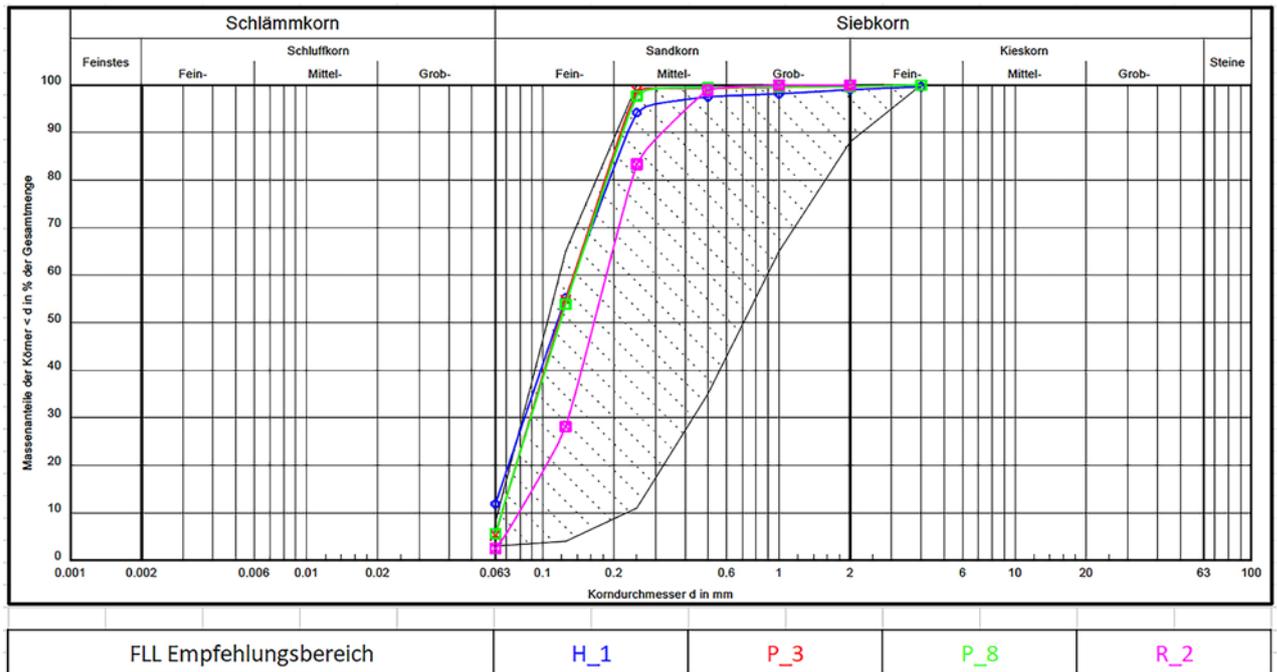


Abbildung 34: Feldversuche – Kornverteilungen der untersuchten Tretschichten aus reinem Sand

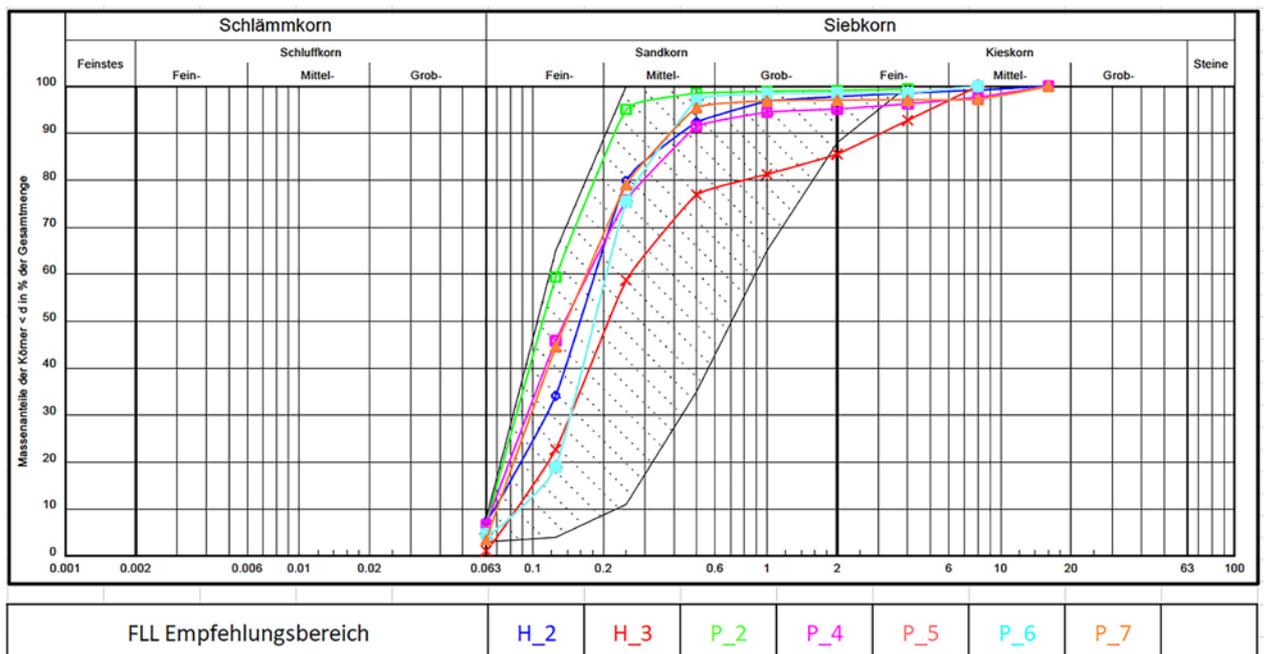


Abbildung 35: Feldversuche – Kornverteilungen der untersuchten Tretschichten aus Sand mit Zuschlagstoffen

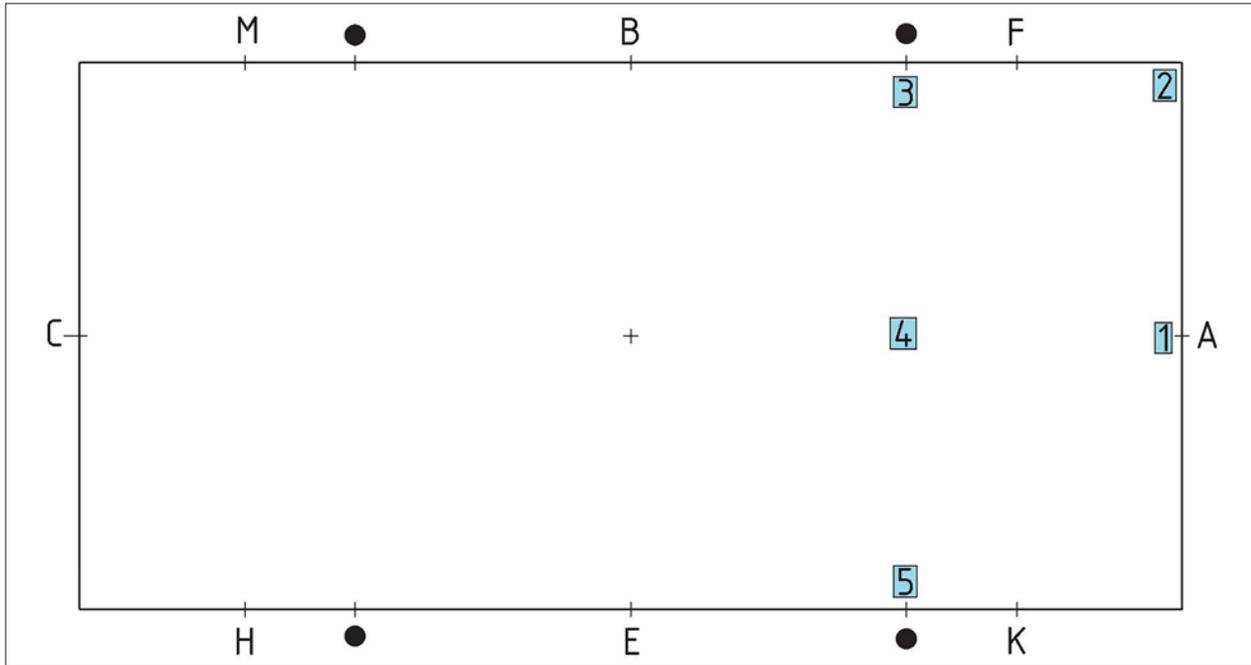


Abbildung 36: Feldversuche – Schematische Darstellung der Messstellen auf einem Standard-Reitplatz

und die Versuchsbedingungen. Die Wetterdaten sind für die jeweiligen Orte und Tage von Meteostat übernommen (Meteostat, 2024). Zur besseren Einordnung der Versuchsergebnisse wurden zusätzliche Informationen bei den Anlagenbetreibern abgefragt, wie beispielsweise die verbauten Materialien, die übliche Pflege und Nutzung sowie eigene Einschätzungen zu den sportfunktionellen Eigenschaften (s. Anhang 2, Tabelle 10).

4.1.3 Körnungslinien der Tretschichtmaterialien

Abbildung 34 zeigt die Kornverteilungen der untersuchten Tretschichten aus reinem Sand sowie den FLL-Empfehlungsbereich (2014) für den eingebauten Zustand. Die Sande liegen größtenteils im Empfehlungsbereich der FLL (2014). Es ist lediglich bei H_1 ein geringfügig höherer Feinkornanteil vorhanden.

Abbildung 35 zeigt die Kornverteilungen der untersuchten Tretschichten aus Sand mit Zuschlagstoffen sowie den FLL-Empfehlungsbereich (2014) für den eingebauten Zustand. Dieser

Empfehlungsbereich bezieht sich jedoch nur auf das Material Sand und nicht auf eine Kombination mit Zuschlagstoffen. Die Sande dieser Tretschichten liegen im Empfehlungsbereich, das wurde bei der Betrachtung des Materials auf den Sieben festgestellt. Bei den in der Körnungslinie auftretenden größeren Körnungen handelt es sich um die Zuschlagstoffe (Holz oder Vlies). Weitere auftretende Problematiken sind in Kapitel 2.4.4 zur Bestimmung der Bodenkennwerte dargelegt.

4.1.4 Lage der Messstellen

Es wurden in der Regel fünf Messstellen je Reitfläche gewählt, die möglichst stark und weniger stark belastete Stellen der Fläche abbilden. Bei standardmäßig rechteckigen Plätzen und Hallen wurden die Messstellen wie in Abbildung 36 gewählt. Auf Tretschicht H_3 war anhand der Spuren offensichtlich zu erkennen, dass longiert wurde. Daher wurden in diesem Fall zusätzlich zu den Messstellen aus Abbildung 36 zwei weitere Messstellen, einmal auf dem Longierzirkel und einmal in der Zirkelmitte, gewählt.

Bei anderweitig geformten Plätzen wurde sich bei der Wahl der Messstellen an vorhandenen Hufspuren und der Art der Nutzung orientiert.

4.2 Ergebnisse

4.2.1 Beobachtung: Sperrschichtbildung

Während der Feldversuche wurde auffällig oft das Phänomen der Sperrschichtbildung beobachtet. Dieses beschreibt die Bildung eines harten bis sehr harten Horizonts. An diesem lassen sich die Schichten der Trettschicht eindeutig voneinander trennen (Abbildung 37, links). Oftmals besteht die Trettschicht somit aus einer oberen lockeren Schicht und einer unteren sehr festen Schicht. Z. T. wurde die Bildung mehrerer übereinanderliegender Schichten und Unterteilungen innerhalb einer Trettschicht festgestellt (Abbildung 37, rechts).

Oftmals waren die Sperrschichten so hart, dass sie auch beim Einschlagen des Ausstechzylinders nicht durchdrungen werden konnten. Auf berittenen Trettschichten war an einigen Hufabdrücken deutlich zu sehen, dass auch die Pferdehufe mit Hufeisen nicht in diese Schicht eindringen konnten (Abbildung 38).

Das Auftreten mindestens einer solchen Schicht konnte bei 10 von 13 Trettschichten beobachtet werden. Der lockere Teil der Trettschicht an der Oberfläche betrug auf den beprobten Trettschichten zwischen 1,5 cm und 10 cm bis zur ersten Sperrschicht.

4.2.2 Subjektive Einschätzungen zum Einsatz der Geräte

Die Feldversuche wurden von fünf Personen durchgeführt. Hierbei hat sich folgende subjektive Einschätzung ergeben:

Rammsondierung (Minisonde)

- › Funktioniert auf den meisten Plätzen gut
- › Teilweise Probleme bei Zuschlagstoffen

Ausstechzylinder

- › Funktioniert mit Zuschlagstoffen nicht (kein Anwendungsbereich nach DIN 18125-2)
- › Trettschichtstärke durch Sperrschichtbildung meist zu gering (Abbildung 37), auch Zylinder mit 6 cm Höhe lassen sich aufgrund des Eindringwiderstandes nicht vollständig einschlagen
- › Zerstörung des ursprünglichen Schichtaufbaus, Wiederherstellung oft nicht möglich



Abbildung 37: Feldversuche – Sperrschicht: deutliche Trennung zwischen lockerer oberer Schicht und fester Sperrschicht (links), mehrere Sperrschichten (rechts)



Abbildung 38: Sperrschicht – Hufabdruck

Densitometer

- › Exaktes Ausheben der Tretschicht bis zur Sperrschicht mit großen Ungenauigkeiten: Zuschlagstoffe am Rand lassen sich nicht klar abgrenzen, Nachrieseln trockener Tretschichten.
- › Trockene Tretschichten werden bei Eindringen des Ballons zur Seite hin verdrängt, dadurch ist das gemessene Volumen größer als das Volumen der zuvor ausgehobenen Masse
- › Eine Dichtebestimmung der Sperrschicht ist nicht möglich, weil sich diese nicht händisch ausheben lässt und meist keine klare Abgrenzung zur Trennschicht besteht

Wassergehalt mittels Ofentrocknung

- › Materialentnahme funktioniert gut, schnell und mit wenig Aufwand
- › Ergebnisse frühestens am nächsten Tag verfügbar
- › Möglicherweise Ungenauigkeiten bei Tretschichten mit Zuschlagsstoffen durch hitzebedingte Veränderungen der Zuschlagstoffe und durch ungleiche Mischungsverhältnisse der Probe, da Einzelbestandteile unterschiedlich viel Wasser enthalten können

Feuchtesonden

- › Lassen sich öfter nicht vollständig in den Boden drücken (geringe Tretschichtdicken oberhalb Sperrschicht, Zuschlagstoffe), Werte dann unbrauchbar
- › Werte evtl. sehr abhängig von zufälligem Kontakt (bei Zuschlagstoffen evtl. deutlich anderer Wassergehalt in Sand und Zuschlagstoff)
- › Werte variieren, abhängig von verwendeter Sonde => allgemeine Empfehlungen lassen sich nur schwer ableiten

Modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät

- › Boden unter der Platte entscheidend (Ungleichmäßigkeiten, unterschiedlich tiefe Hufabdrücke, tlw. erheblich unterschiedliche Tretschichtdicken auf geringer Fläche)
- › „Abziehen“ des Bodens aufgrund fehlender Schichtstärke nicht zielführend, verändert u. U. auch Bodeneigenschaften zu stark
- › Datenaufnahme und -auswertung über Herstellersoftware umständlich, es können nicht 9 Stöße zu einer Reihe zusammengefügt oder am Stück aufgenommen werden, dies muss nachträglich manuell geschehen

Clegg-Hammer

- › Z. T. auch in benachbarten Bodenstellen sehr unterschiedliche Werte
- › Teilweise keine kontinuierlichen Werteverläufe
- › Schnelle und einfache Handhabung und Datenaufnahme sowie -verarbeitung

Vienna Surface Tester (VST)

- › Einfaches und schnelles Verfahren, Datenauswertung simpel und ohne großen Aufwand und eigene Programme möglich

- › Prototyp, hat zu Ende der Versuche nicht mehr richtig funktioniert (Aktivieren des Messmodus, Abwurfmechanismus und Detektion der Abwürfe nicht zuverlässig)
- › Messen der Abdrücke oft nicht möglich (Abdrücke nicht erkennbar und inhomogen auf berittenen Tretschichten, Einfallen der Randbereiche auf trockenen Belägen)

HIC-Gerät

- › geringer Messaufwand
- › Auswertung nur mit spezieller Software, Export nach Excel nur über Umwege
- › bei sehr nassem Boden häufige Fehlmessungen

Prüfkegel

- › Prototyp: unhandlich, schwer zu bewegen, lässt sich nicht lotrecht aufstellen, kann während der Messung bei unebenem Boden kippen
- › Betrachtet nur den oberen Bereich der Tretschicht, Ergebnisse daher möglicherweise nicht repräsentativ für gesamten Aufbau
- › Möglicherweise Weiterentwicklung der Konstruktion nötig

4.2.3 Messergebnisse

Folgende Geräte liefern in den Feldversuchen Ergebnisse, die in Form von Diagrammen dargestellt und erläutert werden können:

- › Rammsonde (Mini)
- › Ausstechzylinder/Densitometer
- › Feuchtesonden
- › Plattendruckgerät
- › Clegg-Hammer
- › VST
- › HIC-Gerät

Einbezogen werden jeweils die Werte der Messstellen eins, drei und fünf (Abbildung 36).

Rammsondierung (Minisonde)

Die Rammsondierungen aus den Feldversuchen sind in Abbildung 39 präsentiert. Es ist jeweils das Mittel aus den Werten der drei Messstellen je Tretschicht ($n = 13$) abgebildet und diese zeigen, dass

- › die Bandbreite bereits in den ersten Zentimetern der Tretschichten deutlich größer ist als bei den Versuchen in der Versuchshalle.
- › sich Tretschichten mit reinem Sand nicht von Tretschichten mit Sand und Vlies unterscheiden lassen.
- › Tretschichten aus Holzhäckseln oder mit Holzanteil in der Gesamtbetrachtung eher rechts, also im Bereich der höheren Schlagzahlen je Zentimeter liegen.
- › kein eindeutiger Unterschied zwischen den Messungen im Plattenabdruck und neben dem Plattenabdruck auszumachen ist.

In Abbildung 40 wurden die Schlagzahlen nicht klassisch je Zentimeter Eindringtiefe dargestellt, sondern aufsummiert. Eher horizontale Kurvenverläufe weisen auf einen hohen Eindringwiderstand hin, eher vertikal nach unten verlaufende Kurven auf einen geringen Eindringwiderstand. Es zeigt sich, dass:

- › Sondierungen im Plattenabdruck eher einen höheren Eindringwiderstand aufweisen als Sondierungen neben dem Plattenabdruck.
- › die Verläufe im Plattenabdruck eher parallel verlaufen und neben dem Plattenabdruck eher gefächert erscheinen.
- › sich auch in dieser Darstellung die verschiedenen Materialien nicht differenzieren lassen.

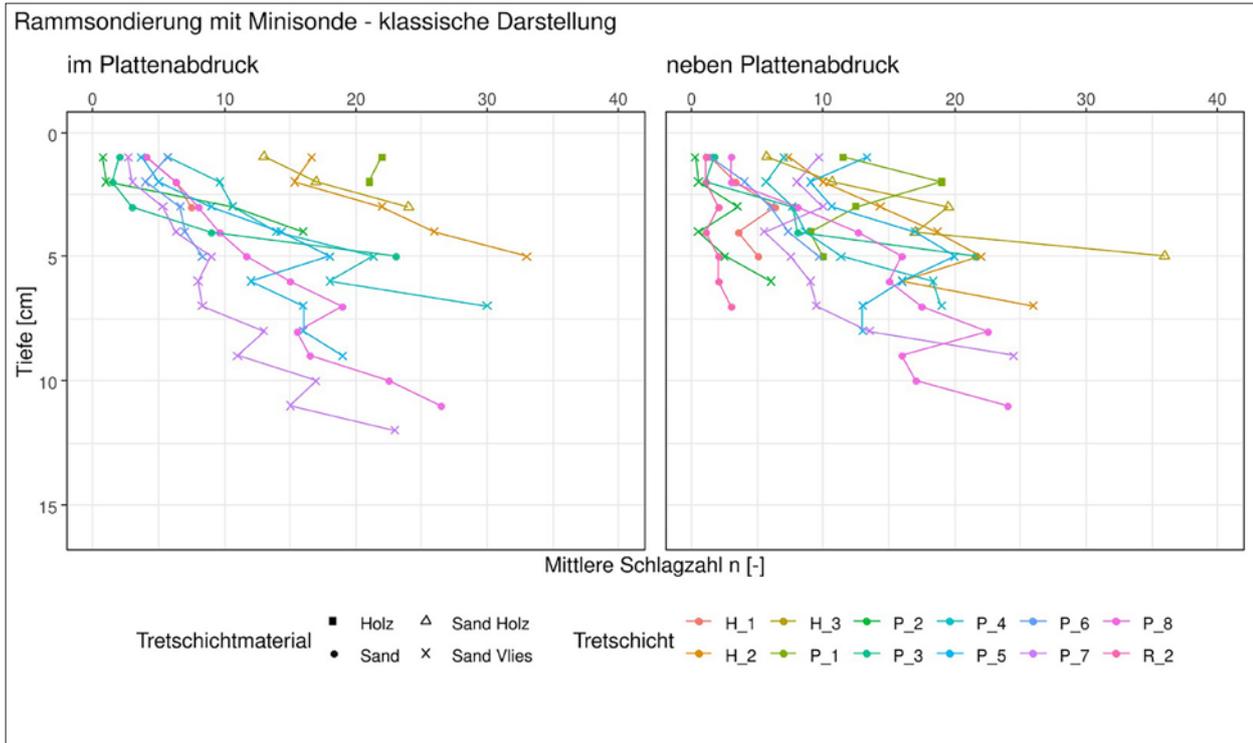


Abbildung 39: Feldversuche – Ergebnisse Rammsondierung mit Minisonde: klassische Darstellung

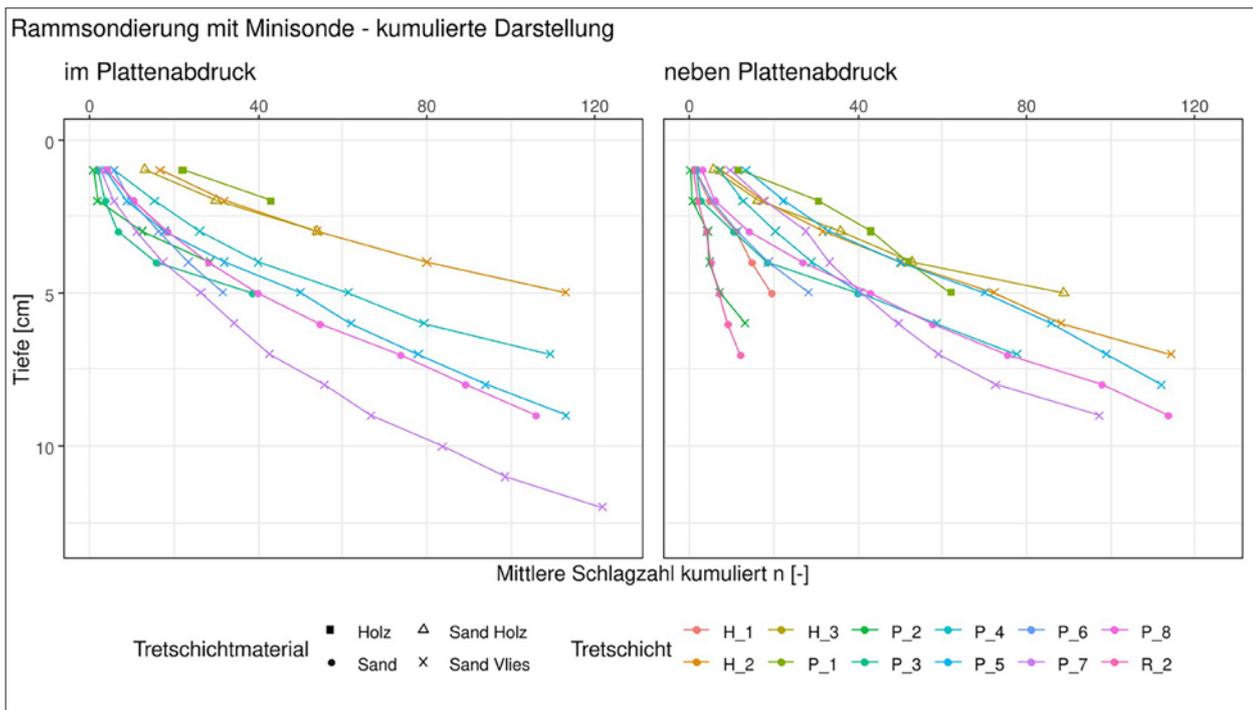


Abbildung 40: Feldversuche – Ergebnisse Rammsondierung mit Minisonde: kumulierte Darstellung

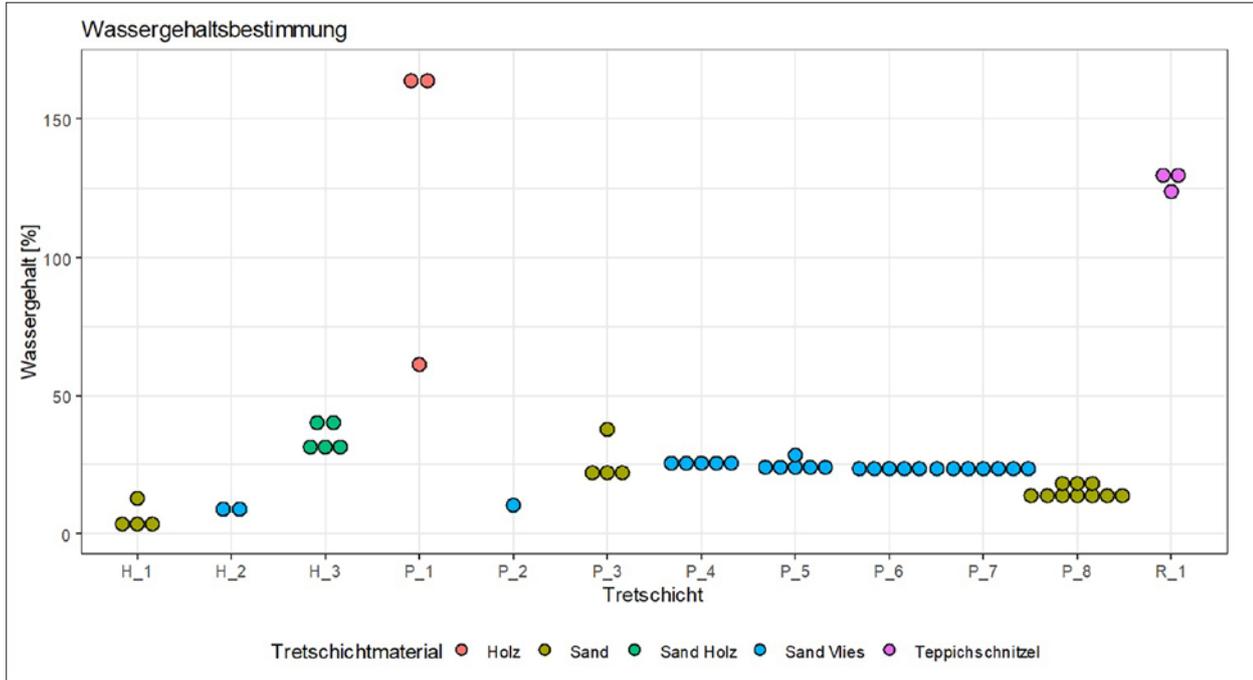


Abbildung 42: Feldversuche – Ergebnisse Wassergehaltsbestimmung mittels Ofentrocknung

Feuchtesonden

In Abbildung 43 sind die Ergebnisse der Messungen mit den Feuchtesonden abgebildet. Je Tretschicht und Sonde sind es drei Werte. Es lässt sich erkennen, dass

- › die Werte der POGO-Feuchtesonde insgesamt niedriger sind.
- › die Tendenzen zwischen den einzelnen Tretschichten mit beiden Sonden vergleichbar abgebildet werden.
- › keine Gruppierung in Abhängigkeit von dem Tretschichtmaterial erkennbar ist.
- › sich kein eindeutiger Unterschied zwischen den Messungen neben und im Plattenabdruck abzeichnet.

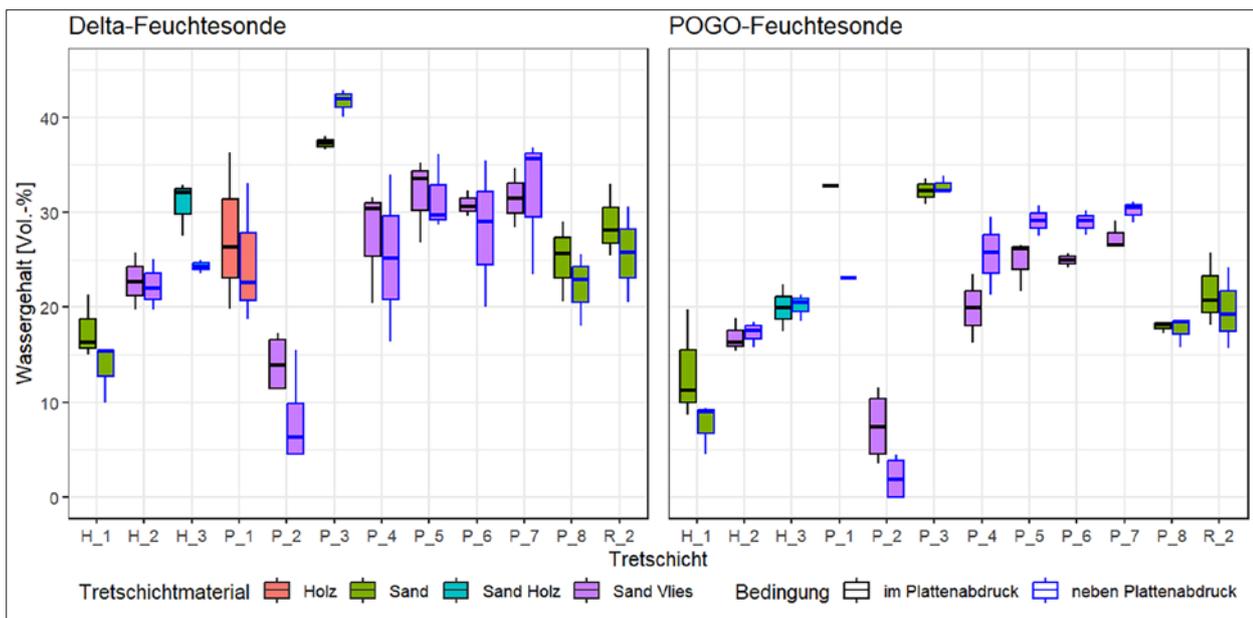


Abbildung 43: Feldversuche – Ergebnisse Feuchtesonden

Modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät

Bei der gegenüberstellenden Betrachtung der Setzungen und Setzungsgeschwindigkeiten einmal mit den Einzelmessungen je Messstelle ($n = 13 \times 3 = 39$) und einmal als gemittelte Werte je Tretschicht ($n = 13$) in Abbildung 44 fällt auf, dass

- die Setzungsgeschwindigkeiten mehr Schwankungen und weniger lineare Verläufe aufweisen als die Setzungen.
- beim ersten Stoß kaum nennenswerte Unterschiede zwischen verschiedenen Materialien feststellbar sind und dieser die größte Bandbreite aufweist.

- die Setzungen und Geschwindigkeiten von Tretschichten aus reinem Sand in den Schlägen 2 bis 9 überwiegend am geringsten sind, gefolgt von Tretschichten aus Sand mit Vlies.
- die Setzungen und Geschwindigkeiten von Sand mit Holz, Holz und Teppichschnitzeln im Vergleich dazu größer sind und auch die größte Streuung zwischen den drei Einzelmessungen aufweisen.
- ab dem vierten Aufschlag die Veränderungen der Werte nur noch sehr gering sind.

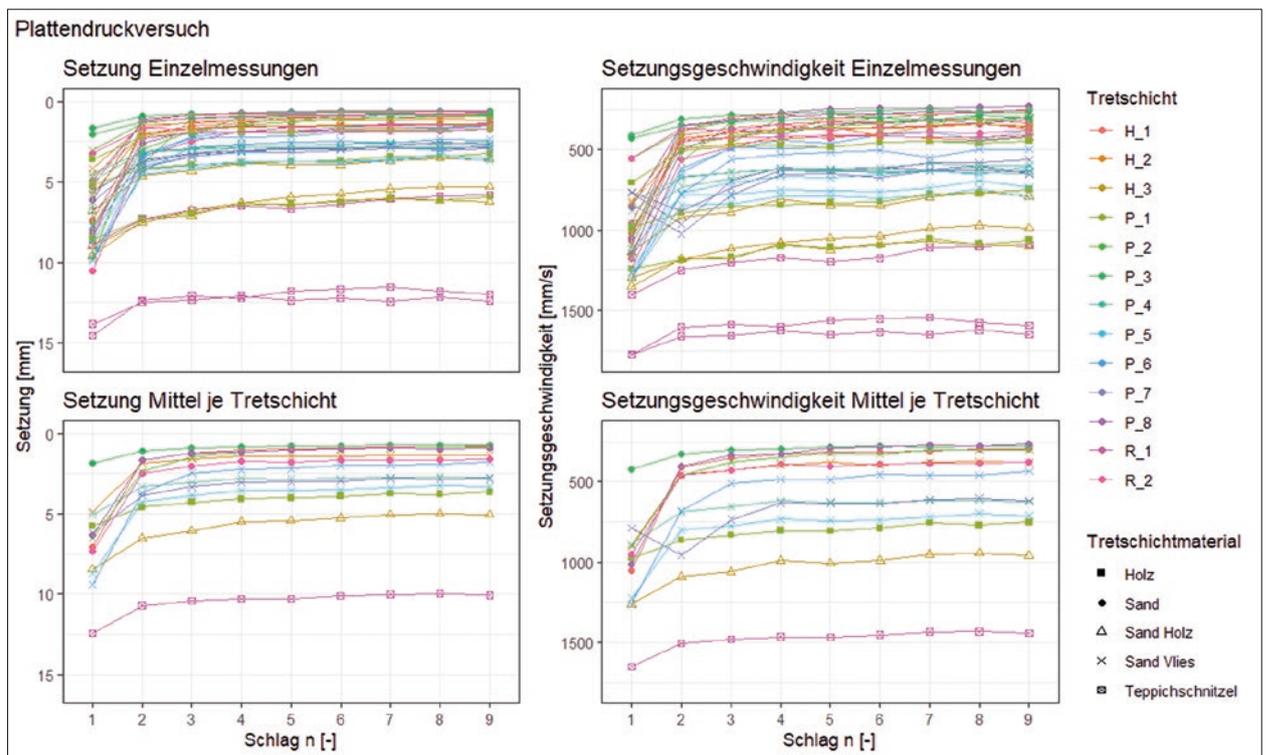


Abbildung 44: Feldversuche – Ergebnisse Modifiziertes dynamisches Plattendruckgerät

Clegg-Hammer

Abbildung 45 zeigt vergleichend die Messungen auf einem Reitplatz mit Sand-Vlies-Tretschicht, auf welchem parallel Messungen mit den zwei verschiedenen Kabeln aufgenommen wurden¹. Je Messstelle wurden zwei Messungen je Kabel durchgeführt, sodass insgesamt $2 \times 3 = 6$ Messungen je Kabel in die Darstellung einfließen. Deutlich zu erkennen ist, dass

- sowohl in den Einzelmessungen als auch in den gemittelten Werten aus zwei Einzelmessungen je Messstelle eine höhere Varianz in den Werten des neuen Kabels zu finden ist.
- die Mittelung aller Werte für die Tretschicht je Kabel auf einen systematischen Unterschied von ca. 30 g zwischen den verwendeten Kabeln hinweist.

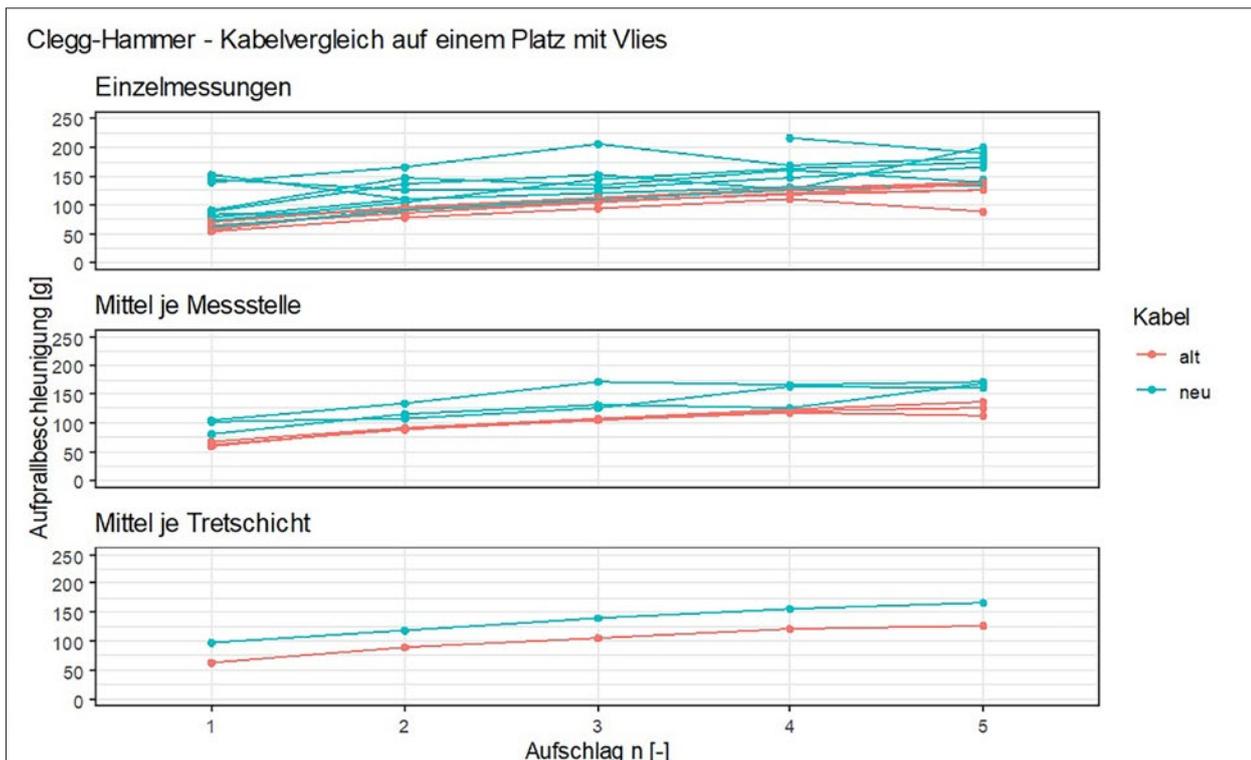


Abbildung 45: Feldversuche – Ergebnisse Clegg-Hammer

¹ Da der Anschluss des Verbindungskabels defekt war, wurde das Kabel ersetzt. In den folgenden Feldversuchen fanden sich jedoch Hinweise, dass ein relevanter Unterschied in den Ergebnissen zwischen den beiden Kabeln vorliegen könnte. Daher wurden auf einem weiteren Reitplatz die Messungen sowohl mit dem alten als auch mit dem neuen Kabel durchgeführt.

Vienna Surface Tester (VST)

Die Betrachtung der Messwerte für Energie-rückgewinnung und Steifigkeit, welche mit dem VST bei 4 m/s Aufprallgeschwindigkeit ermittelt wurden, zeigt die Werte der drei Messstellen je Tretschicht. Zusätzlich wurden für Sand und Sand-Vlies statistische Ellipsen mit einem Konfidenzintervall von 95 % berechnet und eingezeichnet. Durch die geringe Datenlage bei Holz und Teppichschnitzeln war das für diese Materialien nicht möglich. Aus der doppellogarithmischen Darstellung (Abbildung 46) lässt sich schließen, dass

- › Teppichschnitzel im Vergleich zu anderen Materialien in einem mittleren Steifigkeitsbereich liegen, jedoch deutlich höhere Werte in der Energierückgewinnung erzielen.

- › Holz und Sand mit Vlies in einem ähnlichen Bereich liegen und bei beiden Parametern höhere Werte aufweisen als reiner Sand. Dies wird durch die statistischen Ellipsen mit einem Konfidenzintervall von 95 % noch deutlicher.
- › ein einzelner Platz mit Sand und Vlies im Wertebereich der reinen Sandplätze liegt.

Die Ergebnisse decken sich mit den Daten und Erfahrungen, welche von den Entwicklern des Geräts bereitgestellt wurden (C. Peham & J. P. Schramel, 2023).

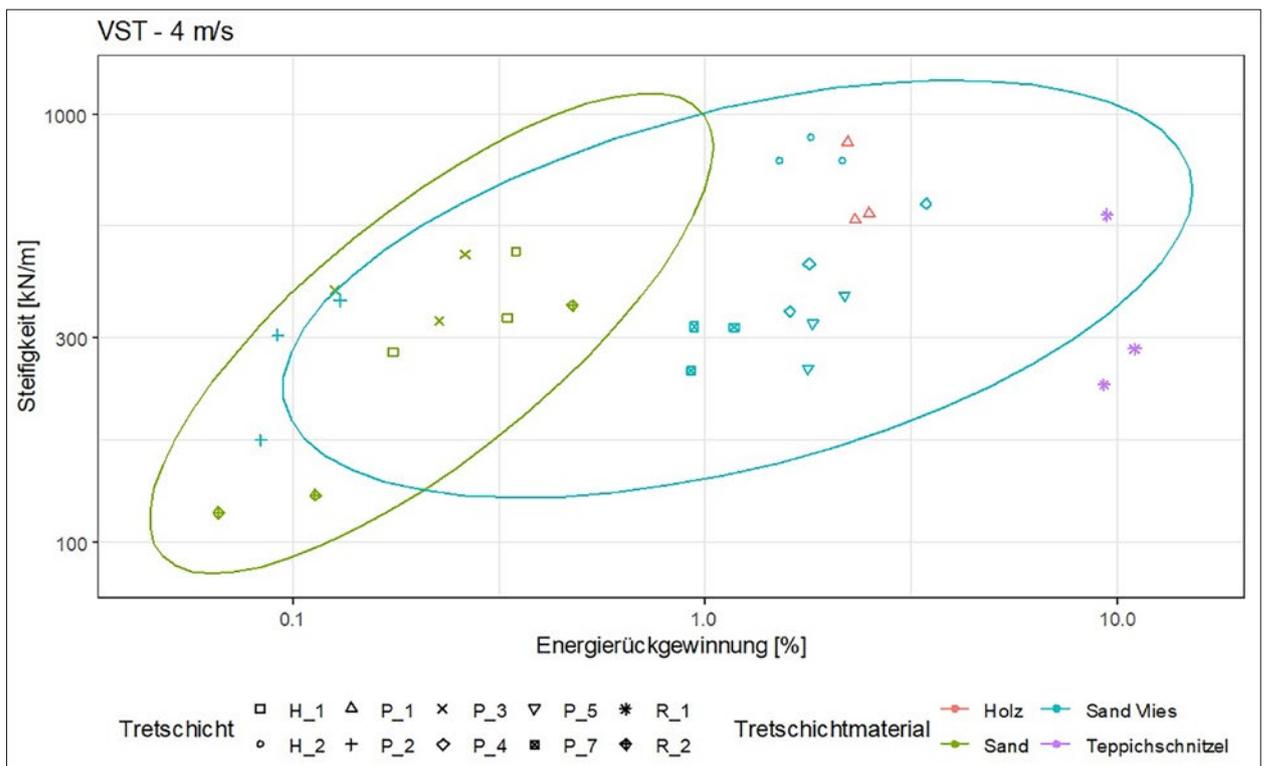


Abbildung 46: Feldversuche – Ergebnisse VST

HIC-Gerät

Für das HIC-Gerät wurden ebenfalls die drei Werte je Tretschicht bei einer Aufprallgeschwindigkeit von 4 m/s betrachtet. Im Vergleich der max. Aufprallbeschleunigungen für die einzelnen Böden verglichen mit den Werten des VST (Abbildung 47) zeigt sich, dass:

- die Werte beider Geräte in ähnlichen Bereichen liegen.
- bei den meisten Tretschichten der Median des HIC-Geräts über dem Median des VSTs liegt, in einigen Fällen ist es jedoch auch andersherum.

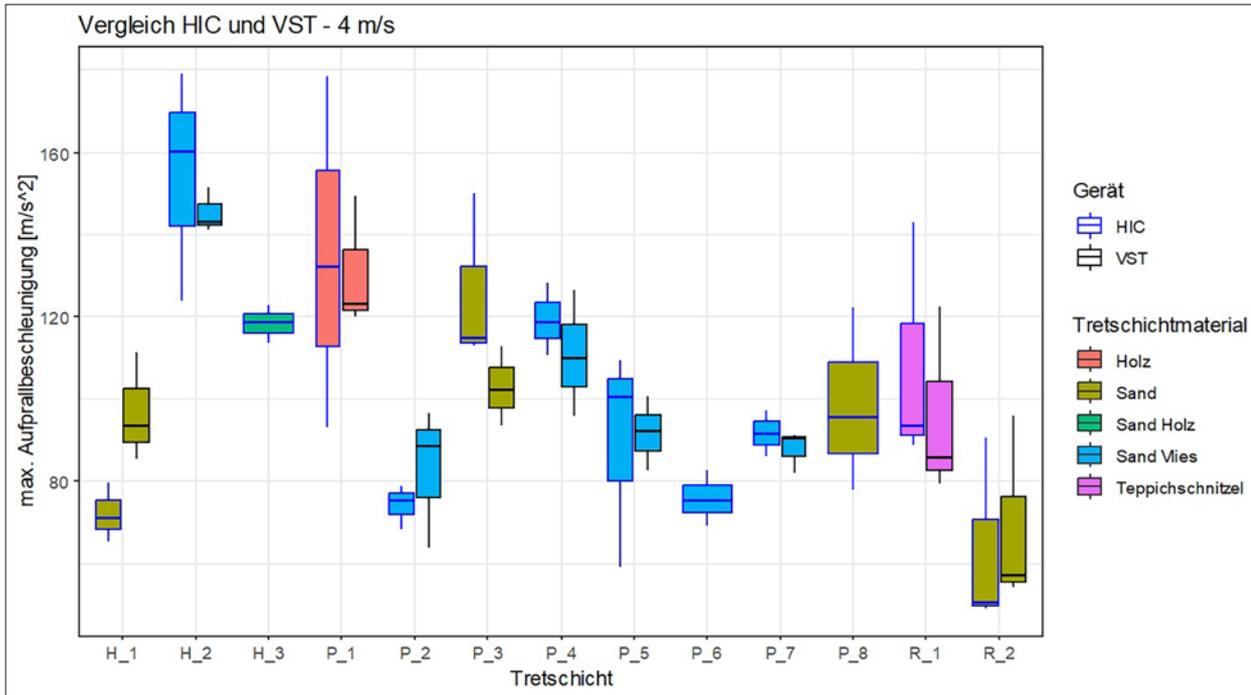


Abbildung 47: Feldversuche – Ergebnisse HIC-Gerät

Prüfkegel

Aufgrund der beschriebenen Schwierigkeiten in der Handhabung des Gerätes im Feld wurde die weiterführende Auswertung der erhobenen Daten für nicht zielführend erachtet. Da die Konstruktion zumeist nicht waagrecht aufgestellt werden konnte und immer wieder während der Messungen kippte, war eine korrekte Datenaufnahme kaum möglich.

4.3 Bewertung

Tabelle 7 enthält eine Zusammenfassung zur Handhabung, zur Auswertung und zu den Ergebnissen der verschiedenen Prüfgeräte bei den Reitböden Sand und Sand mit Zuschlagstoffen. Die Geräte müssen sowohl hinsichtlich der Handhabung als auch hinsichtlich ihrer Messergebnisse geeignet sein.

Tabelle 7: Feldversuche – Beurteilung der Prüfgeräte

Prüfgerät	Sand pur			Sand mit Zuschlagstoffen		
	Handhabung	Auswertung	Ergebnisse	Handhabung	Auswertung	Ergebnisse
Rammsonde (Minisonde)	Handlich, bei hohen Schlagzahlen zeitaufwendig	Einfach und nachvollziehbar	Gute Abschätzung der Verdichtung innerhalb der Trettschicht	Zuschlagstoffe behindern teils das Eindringen	Einfach und nachvollziehbar	Zuschlagstoffe behindern Eindringen und führen so unkontrolliert zu höheren Schlagzahlen
Ausstechzylinder	Aufwendig, zerstörende Prüfung	Einfach und nachvollziehbar, erst im Labor möglich	Durch Sperrschicht oft nicht durchführbar, sonst gute Ergebnisse	Aufwendig, zerstörende Prüfung	Einfach und nachvollziehbar, erst im Labor möglich	Durch Sperrschicht oft nicht durchführbar, sehr ungenau durch Zuschlagstoffe
Densitometer	Aufwendig, zerstörende Prüfung	Einfach und nachvollziehbar, erst im Labor möglich	Durch Sperrschicht oder bei trockenen Sanden ungenaue Ergebnisse	Aufwendig, zerstörende Prüfung	Einfach und nachvollziehbar, erst im Labor möglich	Zuschlagstoffe verstärken Ungenauigkeiten
Ofentrocknung	Schnell, handlich	Einfach und nachvollziehbar, erst im Labor möglich	Exakte Bestimmung des Wassergehalts	Schnell, unaufwendig	Einfach und nachvollziehbar, erst im Labor möglich	Exakte Bestimmung des Wassergehalts
Feuchtesonden	Schnell, handlich	Einfach, Wert wird direkt angezeigt	Nicht unmittelbar vergleichbar mit anderen Verfahren oder Sonden	Schnell, handlich, Zuschlagstoffe behindern Einstecken der Messstäbe	Einfach, Wert wird direkt angezeigt	Nicht unmittelbar vergleichbar mit anderen Verfahren oder Sonden
Plattendruckgerät	Akzeptabel	Werte werden z. T. direkt angezeigt, Auswertung der Speicherkarte etwas umständlich	Gute Einschätzung der Bodeneigenschaften	Akzeptabel	Werte werden z. T. direkt angezeigt, Auswertung der Speicherkarte etwas umständlich	Gute Einschätzung der Bodeneigenschaften
Clegg-Hammer	Schnell, handlich	Einfach, Werte werden direkt angezeigt	Hohe Varianz erfordert höhere Wiederholungszahl	Schnell, handlich	Einfach, Werte werden direkt angezeigt	Hohe Varianz erfordert höhere Wiederholungszahl
VST	Handlich	Wenig Aufwand, nur mit PC/Laptop möglich	Gute Einschätzung der Bodeneigenschaften, viele Parameter verfügbar	Handlich	Wenig Aufwand, nur mit PC/Laptop möglich	Gute Einschätzung der Bodeneigenschaften, viele Parameter verfügbar

Prüfgerät	Sand pur			Sand mit Zuschlagstoffen		
	Handhabung	Auswertung	Ergebnisse	Handhabung	Auswertung	Ergebnisse
HIC-Gerät	Handlich	Aufwendig, müsste verbessert werden	Valide Werte	Handlich	Aufwendig, müsste verbessert werden	Valide Werte
Prüfkegel	Sehr aufwendig, unhandlich, technisch nicht ausgereift	Werte werden direkt angezeigt	Nicht reproduzierbar	Sehr aufwendig, unhandlich, technisch nicht ausgereift	Werte werden direkt angezeigt	Nicht reproduzierbar

4.4 Weiterführende Auswertung

Die Eigenschaften einer Tretschicht „verändern sich durch atmosphärische und biologische Einflüsse sowie durch Benutzung und Pflege“ (FLL, 2014, S. 21). Die sportfunktionellen Eigenschaften eines Bodens sind maßgeblich abhängig von dem Feuchtigkeitsgehalt und der Dichte sowie der Ebenheit des Bodens (FLL, 2014). Über die Abhängigkeit der Tretschichteigenschaften von verschiedensten Faktoren besteht weithin Einigkeit (Hayati et al., 2020; Tranquille et al., 2014), während die Ausprägung dieser Abhängigkeiten bislang weitgehend nur vermutet werden kann, nicht jedoch messtechnisch erfasst ist. Obgleich eine Anzahl an 13 untersuchten Tretschichten Fragen nach diversen Einflüssen nicht statistisch relevant oder abschließend beantworten kann, sollen im Folgenden anhand der Daten des modifizierten dynamischen Plattendruckversuchs erste Untersuchungen bzgl.

- der Unterschiede zwischen viel und wenig frequentierten Punkten
- des Vergleichs zwischen berittenem und gepflegtem Zustand einer Reithalle

vorgenommen werden.

4.4.1 Unterschiede zwischen viel und wenig frequentierten Punkten

Ein wichtiger Aspekt für optimale Reiteigenschaften ist die Homogenität einer Reitfläche (Tranquille et al., 2014, S. 48). Durch die übliche Nutzung bleibt es nicht aus, dass gewisse Bereiche der Fläche beim Reiten mehr frequentiert oder anders genutzt werden als andere Flächen. Im folgenden Abschnitt sollen die Daten auf statistische Unterschiede zwischen den Messstellen und mehr und weniger berittenen Flächen untersucht werden.

Methodik

Zum einen wurden die Messdaten der verschiedenen Messstellen 1 bis 5 (Abbildung 36) miteinander verglichen, zum anderen wurden die Messstellen in „Hufschlag/Zirkel“ (Messstelle 1, 3, 5), „Ecke“ (Messstelle 2) und „Zirkelmitte“ (Messstelle 4) unterteilt und nach diesen drei Kategorien analysiert.

Ergebnisse

Der ANOVA-Test auf signifikante Mittelwertunterschiede zwischen den verschiedenen Messstellen ist für die Setzung mit $p = 0,0456$ schwach signifikant. Für die Setzungsgeschwindigkeit wurde mit $p = 0,0747$ kein signifikanter Unterschied festgestellt. Es kann davon ausgegangen werden, dass sich bei den Setzungen zumindest eine Messstelle von den anderen Messstellen unterscheidet. Weitere Untersuchungen zeigen

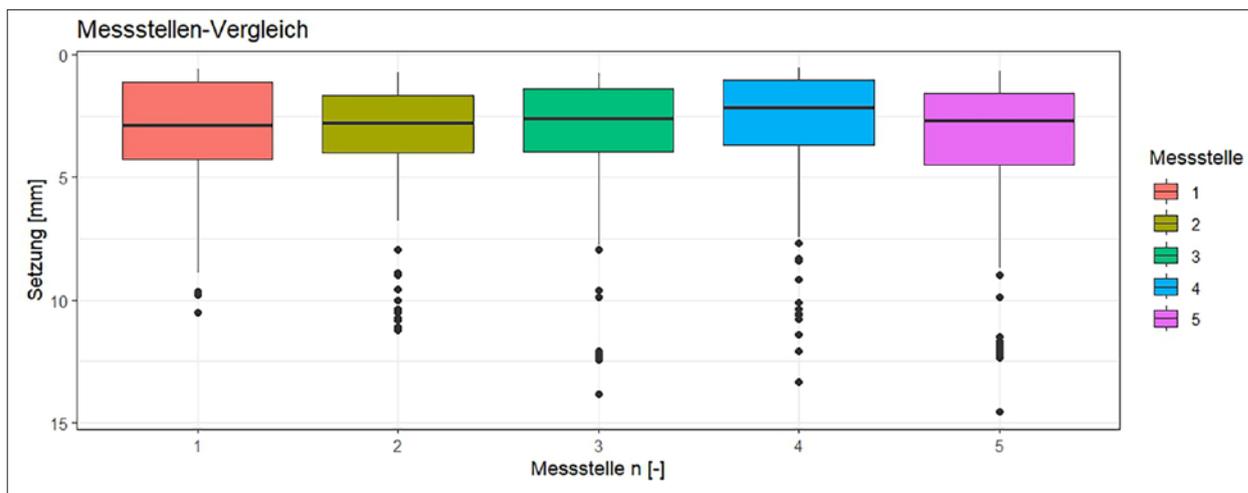


Abbildung 48: Unterschiede zwischen Messstellen

den relevantesten Unterschied zwischen Messstelle 2 und Messstelle 4. Wie die p-Werte zeigen und in Abbildung 48 auch optisch zu erkennen ist, sind die Unterschiede zwischen den Messstellen jedoch gering.

Bei der Einteilung der Messstellen nach Kategorien ergaben sich mit $p = 0,0366$ für die Setzung und $p = 0,0469$ für die Setzungsgeschwindigkeiten Hinweise auf schwach signifikante Unterschiede zwischen den Kategorien. Weitere Untersuchungen ergaben, dass sich in beiden Fällen die Bereiche „Ecke“ und „Zirkelmitte“ schwach signifikant unterscheiden. Die Kategorie „Hufschlag/Zirkelmitte“ unterscheidet sich von keiner der anderen Kategorien signifikant.

Diskussion

Die Auswertung der Daten des modifizierten dynamischen Plattendruckversuchs zeigt keine signifikanten Unterschiede in den Messwerten zwischen den gewählten Messstellen und mehr oder weniger berittenen Stellen. Aufgrund der geringen Stichprobe und der fehlenden einheitlichen Bedingungen (manche Tretschichten waren frisch gepflegt, manche intensiv beritten, manche über Wochen ungenutzt) sollten die Ergebnisse jedoch nicht als allgemeingültig betrachtet werden. Weitere systematische Untersuchungen zu dieser Fragestellung werden empfohlen. Insbesondere der Einbezug des Platzmittelpunktes X wird von Fachleuten als

erforderlich betrachtet. Von weiterem Interesse wären die Auswirkungen des Longierens, durch Stand der longierenden Person und Zirkelspuren, auf die Eigenschaften der Tretschicht.

4.4.2 Vergleich zwischen berittenem und gepflegtem Zustand einer Reithalle

Ein immer wieder diskutierter und gerade für den Turniersport relevanter Punkt ist der Einfluss der Instandhaltung und Pflege auf die Eigenschaften der Tretschicht (Tranquille et al., 2014). Auf Turnieren bestimmt die Reihenfolge der Startenden, ob die Prüfung auf einer frisch gepflegten oder schon von vorherigen Teilnehmenden berittenen Fläche geritten werden muss. In dem folgenden Abschnitt wird einem möglichen Unterschied in den Messergebnissen zwischen frisch gepflegtem und berittenem Zustand nachgegangen.

Methodik

Eine der Reithallen wurde in berittenem Zustand vorgefunden und beprobt. Nach Abschluss der Versuche pflegte der Betreibende die Halle nach dem üblichen Vorgehen mit seinen Pflegegeräten. Auf der nun frisch gepflegten Tretschicht wurden die Messungen mit einigen Prüfgeräten an den Messstellen 4 und 5 wiederholt, um einen direkten Vergleich zwischen berittenem und gepflegtem Zustand ziehen zu können.

Ergebnisse

Ein Wilcoxon-Test auf Unterschiede zwischen den Medianen verdeutlicht für die Setzung (Abbildung 49) einen schwach signifikanten Unterschied zwischen den Messwerten auf der gepflegten und berittenen Tretschicht. Für die Setzungsgeschwindigkeiten kann ganz knapp kein Unterschied festgestellt werden. Der p-Wert liegt für die Setzungen bei $p = 0,04708$ und bei den Setzungsgeschwindigkeiten bei $p = 0,05915$.

Die Setzungen auf der Tretschicht im gepflegten Zustand sind höher als die Setzungen im berittenen Zustand, wie in Abbildung 49 zu sehen ist.

Diskussion

Die Daten des modifizierten dynamischen Plattendruckversuchs zeigen unterschiedliche Mediane in den Setzungen zwischen einer Tretschicht im berittenen und gepflegten Zustand. Dies gibt einen ersten Hinweis, dass sich die sportfunktionellen Eigenschaften tatsächlich durch die Instandhaltung und Pflege des Bodens beeinflussen lassen. Weitere Untersuchungen auf unterschiedlichen Tretschichten sowie nach unterschiedlichen Pflegemaßnahmen werden empfohlen. Durch qualitative Untersuchung der Pflegemaßnahmen könnten diese optimiert werden.

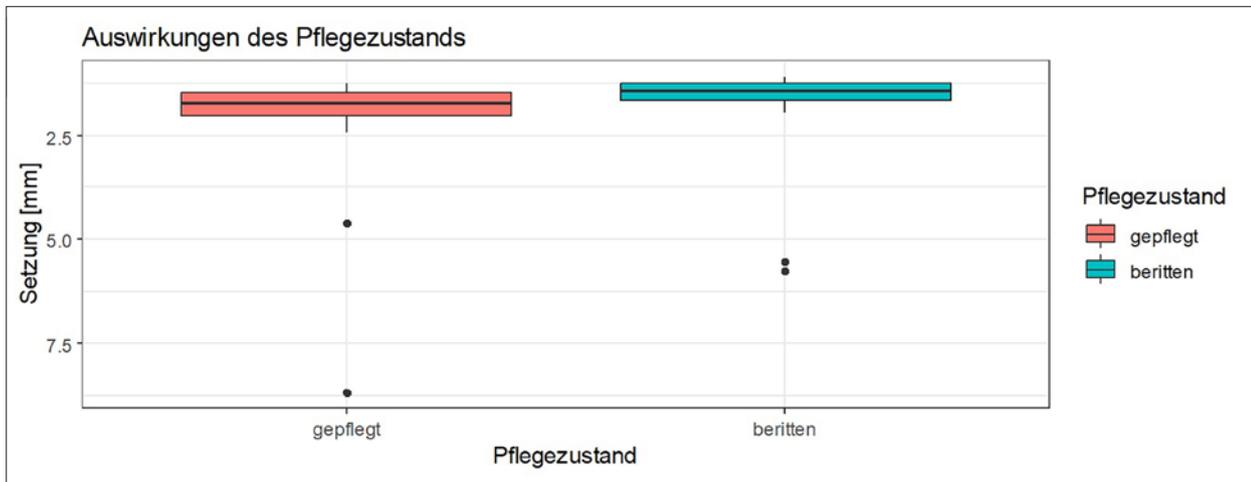
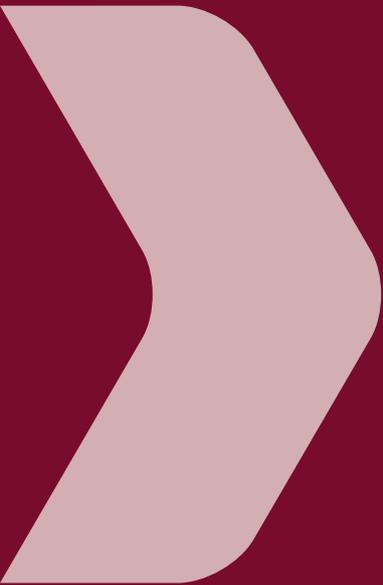


Abbildung 49: Unterschied zwischen Pflegezuständen



5 Auswertung vorhandener Daten des modifizierten dynamischen Plattendruck- versuchs

Das modifizierte dynamische Plattendruckgerät wird bereits seit Jahren von mehreren Prüflaboren zur Beurteilung von Reitplätzen eingesetzt. Im Rahmen des Projekts wurden Daten der Kooperationseinrichtungen ausgewertet.

5.1 Methodik

Für die Auswertung wurden alle übermittelten Datensätze gesichtet (n = 505).

Um einen ersten Überblick zu erhalten, wurden alle Daten in Excel zusammengetragen. Doppelte Datensätze sowie Datensätze, bei denen die Rohdaten nicht eindeutig den einzelnen Messpunkten und Plätzen zugeordnet werden konnten, wurden aussortiert. Auch wurden nur solche Messreihen einbezogen, welche zweifelsfrei auf einem Reitboden erzeugt wurden. Messreihen auf Paddocks, Fußballfeldern etc. wurden aussortiert. Bei den verbliebenen 290 Messungen wurden mehrere Messstellen eines Platzes zu einem Mittelwert für diese Anlage zusammengefasst. Somit wurden die Messwerte von 112 verschiedenen Tretschichtprüfungen in die Auswertung einbezogen. Zu dem überwiegenden Teil der Datensätze stehen keine Zusatzinformationen wie z. B. Material der Tretschicht, Kornverteilung, Wassergehalt, Bauweise, Disziplin, Pflegezustand, Nutzung oder Qualität zur Verfügung. Die Daten wurden anonymisiert und vorhandene GPS-Daten entfernt, um Rückschlüsse auf Anlagen und Gutachten zu verhindern.

In Absprache mit dem Forschungsbeirat wurde eine Auswertung nach den folgenden Kategorien angestrebt:

- Anlagenart (Reitplatz, Reithalle etc.)
- Material (Sand, Zuschlagstoffe etc.)
- Kornverteilung
- Wassergehalt
- Bauweise
- Reitsportdisziplin (Springen, Dressur etc.)

Die betrachteten 112 Tretschichtprüfungen wurden anhand der vorhandenen Informationen den verschiedenen Kategorien zugeordnet.

5.2 Ergebnisse

Tabelle 8 gibt eine Übersicht über die vorhandenen Daten in den einzelnen Kategorien. Es zeigt sich, dass der überwiegende Teil der Tretschichten einer bestimmten Anlagenart zugeordnet werden kann. Die meisten Tretschichten gehören zu Reitplätzen (n = 51), gefolgt von den nicht zugeordneten Tretschichten (n = 26) und Reithallen (n = 23). In allen anderen Kategorien (Material, Kornverteilung, Wassergehalt, Bauweise, Disziplin) konnten 63 % (n = 71, Material) bis 95 % (n = 106, Bauweise) der Tretschichten nicht näher zugeordnet werden. Dies entspricht mehr als der Hälfte der Tretschichten.

Tabelle 8: Übersicht über die zur Verfügung stehenden Daten aus dem modifizierten dynamischen Plattendruckversuch

Kategorie	Anlagenart								
	Gesamt	Reitplatz	Reithalle	Longier- halle	Trabrenn- bahn	Führ- anlage	Ovalbahn	Round- pen	Unbe- kannt
	n = 112	n = 51	n = 23	n = 5	n = 3	n = 2	n = 1	n = 1	n = 26
Material	Bekannt	41							
	Sand mit Vlies	19	9	0	1	0	0	0	9
	Sand	11	4	1	0	1	1	0	4
	Rasen	6	3	0	0	0	0	0	3
	Sand mit Holz	2	0	2	0	0	0	0	0
	Sand mit Jute	1	0	0	0	0	0	0	1
	Sand mit Wachs	1	0	1	0	0	0	0	0
	Teppich	1	1	0	0	0	0	0	0
	Unbe- kannt	71	34	19	4	2	1	1	9
Korn- verteilung	Bekannt	32	11	6	3	3	0	1	8
	Unbe- kannt	80	40	17	2	0	2	0	18
Wasser- gehalt	Bekannt	26	14	6	3	0	0	0	3
	Unbe- kannt	86	37	17	2	3	2	1	23
Bauweise	Bekannt	6							
	Ebbe-Flut	3	3	0	0	0	0	0	0
	2-Schicht	2	2	0	0	0	0	0	0
	1-Schicht	1	1	0	0	0	0	0	0
	Unbe- kannt	106	45	23	5	3	2	1	26

		Anlagenart								
Kategorie	Gesamt	Reitplatz	Reithalle	Longier- halle	Trabrenn- bahn	Führ- anlage	Ovalbahn	Round- pen	Unbe- kannt	
	n = 112	n = 51	n = 23	n = 5	n = 3	n = 2	n = 1	n = 1	n = 26	
	Bekannt	39								
Disziplin	Dressur	16	12	0	0	0	0	0	4	
	Springen	10	10	0	0	0	0	0	0	
	Longieren	6	1	0	5	0	0	0	0	
	Trab- rennen	3	0	0	0	3	0	0	0	
	Führen	2	0	0	0	0	2	0	0	
	Dres- sur und Springen	1	1	0	0	0	0	0	0	
	Gang- reiten	1	0	0	0	0	0	1	0	
	Unbe- kannt	73	27	23	0	0	0	0	1	22

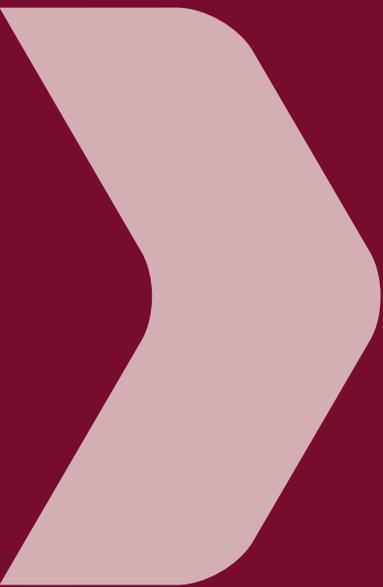
5.3 Bewertung der Datenlage

Im Ergebnis zeigt sich, dass bisher keine einheitliche Durchführung und Dokumentation der Messungen mit dem modifizierten dynamischen Plattendruckgerät etabliert wurde. Beispielsweise variiert der Umgang mit Fehlversuchen von Wechsel der Messstelle, Wiederholung der Versuche an selbiger Stelle bis hin zu Abbruch der Messung. Manche Messungen entstanden direkt auf der Oberfläche, bei anderen wurde die oberste Schicht abgezogen. Auch werden Zusatzinformationen nicht systematisch erfasst, sondern eher zufällig nach Fragestellung erhoben. Hier empfiehlt sich die Ausarbeitung eines einheitlichen Protokolls, um die Vergleichbarkeit der Daten zwischen den einzelnen Anwendenden zu gewährleisten.

Eine Einordnung nach den Kategorien „hart“, „mittelhart“ und „weich“ nach Herholz et al. (2023) konnte aufgrund fehlender Informationen zu den Böden nicht durchgeführt werden. Auch fehlten die Daten der Setzungskurven, mit denen weitere Analysen durchgeführt werden könnten.

Eine Interpretation der vorhandenen Daten ist nicht möglich. Durch fehlende Zusatzinformationen und womöglich unterschiedliche Handhabung in der Versuchsdurchführung ist eine Beurteilung der Bodenverhältnisse allein aufgrund der Datenlage nicht realisierbar. Durch den Versuch, die Daten trotzdem zu interpretieren und einzuordnen, könnten falsche Schlüsse gezogen werden. Mögliche Effekte sind nicht zwangsläufig repräsentativ für die Grundgesamtheit und würden als allgemeingültig fehlinterpretiert.

Zudem gilt es kritisch zu hinterfragen, ob die zur Verfügung stehenden Datensätze eine geeignete Stichprobe darstellen (Einbock, 2018). Es ist anzunehmen, dass v. a. neu eingebaute Tretschichten und solche mit unzureichenden sportfunktionellen Eigenschaften enthalten sind. Somit steht die Stichprobe möglicherweise nicht repräsentativ für die Gesamtheit an Reitplätzen. Da jedoch diesbezüglich keine Zuordnung möglich ist, gestaltet sich eine objektive Einschätzung schwierig.



6 Eignung der Prüfgeräte und Ausblick

Das Forschungsprojekt hat gezeigt, dass es mit verschiedenen Prüfgeräten möglich ist, valide Messwerte auf Reitböden zu erzeugen. Mithilfe dieser Messergebnisse ist es außerdem möglich, Einschätzungen zu den sportfunktionellen Eigenschaften des Bodens zu treffen. Besonders Prüfgeräte, welche einen definierten Aufprall mittels Beschleunigungssensoren aufnehmen, haben sich als geeignet erwiesen.

6.1 Fazit

In Tabelle 9 werden die eingesetzten Prüfgeräte hinsichtlich ihrer Eignung sowohl in den Versuchen in der Versuchshalle als auch in den Versuchen im Feld nach diesen drei Kriterien beurteilt.

Tabelle 9: Fazit – Eignung der Prüfgeräte für die Bestimmung von Tretschichteigenschaften

Prüfgerät	Versuche in der Versuchshalle			Feldversuche (Sand/ZSS)		
	Handhabung	Auswertung	Ergebnisse	Handhabung	Auswertung	Ergebnisse
Rammsonde (Minisonde)	+	+	+	o/-	+/+	+/-
Ausstechzylinder	+	+	+	o/-	o/o	o/-
Densitometer	k. A.	k. A.	k. A.	o/-	o/o	o/-
Ofentrocknung	+	o	+	+/+	o/o	+/o
Feuchtesonden	+	+	o	o/o	+/+	o/o
Plattendruckgerät	o	o	+	o/o	o/o	+/+
Clegg-Hammer	+	+	o	+/+	+/+	o/o
Vienna Surface Tester (VST)	+	o	+	+/+	o/o	+/+
HIC-Gerät	k. A.	k. A.	k. A.	+/+	-/-	+/+
Prüfkegel	-	+	k. A.	-/-	+/+	k. A.
weiterentwickelter künstlicher Sportler	-	-	-	k. A.	k. A.	k. A.
Drehwiderstandsmessgerät	-	+	-	k. A.	k. A.	k. A.
Flügelsonde Scherkränze	+	+	-	k. A.	k. A.	k. A.

Legende: + gut geeignet o eingeschränkt geeignet - nicht geeignet

Verdichtung

Rammsondierungen mit der Minisonde sind ein praktikables in-situ-Verfahren, um ein Maß für die Verdichtung innerhalb der Tretschicht zu erhalten. Die Bestimmung des Wertes der Dichte ist damit nicht möglich. Das Verfahren kann schnell und ohne Aufwand angewandt werden,

ohne die Tretschicht zu zerstören. Zuschlagstoffe wie Vlies oder Holz können die Schlagzahl erhöhen und die Ergebnisse verfälschen, was in den Ergebnissen der Feldversuche zu sehen ist.

Ungelöst ist die Problematik der Bestimmung eines Dichtewertes für die Tretschicht. Zu-

nächst ist darauf hinzuweisen, dass sowohl die Entnahme mit Ausstechzylinder als auch die Anwendung des Densitometers den vorhandenen Schichtaufbau zerstören und eine exakte Rekonstruktion der vorhandenen Schichtverhältnisse nicht immer garantiert werden kann. Das Densitometer kam ausschließlich dann zum Einsatz, wenn die Entnahme von Ausstechzylindern nicht möglich war. Bei Vorhandensein einer Sperrschicht wird das Ausstechzylinderverfahren oft unanwendbar. Zuschlagstoffe wie Vlies oder Holz und ungünstige Bedingungen wie sehr trockener oder sehr nasser Boden beeinträchtigen die Genauigkeit beider Verfahren erheblich. Die deutlich unterschiedlichen Dichten der Einzelbestandteile bei Materialgemischen mit Zuschlagstoffen erhöhen die Ungenauigkeit der berechneten Gesamtdichte. Auf Tretschichten rein aus Holzhäckseln oder Synthetikhäckseln können diese Messverfahren zur Dichtebestimmung nicht angewandt werden.

Aufgrund der überwiegend beobachteten Sperrschichtbildung sollte auch die Aussagekraft eines Dichtewertes aus der Tretschicht hinsichtlich der funktionellen Eigenschaften des Reitbodens kritisch hinterfragt werden.

Wassergehalt

Die Feuchtesonden überzeugen in der in-situ-Anwendung, eignen sich jedoch bestenfalls für die Ermittlung von Feuchtigkeitsveränderungen, gemessen immer mit der gleichen Sonde. Für vergleichbare Feuchtigkeitswerte ist bisher die Wassergehaltsbestimmung mittels Ofentrocknung unerlässlich, diese bietet aber keine in-situ-Ergebnisse. Schnelltrochnungsverfahren nach DIN 18121-2 eignen sich nur bei Sanden ohne Zuschlagstoffe.

Härte, Elastizität, Energierückgewinnung, Kraftabbau

Auf Basis der durchgeführten Versuchsreihen wird das modifizierte dynamische Plattendruckgerät zur Untersuchung der funktionellen Eigenschaften eines Reitbodens empfohlen. Die Handhabung ist durch Abmaß und Gewicht

des Geräts besonders für kleinere Personen etwas umständlich und die externe Bedieneinheit lässt sich nicht gleichzeitig mit dem Gerät halten und bedienen. Dennoch ist es mit angemessenem Aufwand möglich, Aussagen über die Härte, den Kraftabbau und die Elastizität an mehreren Stellen eines Platzes zu tätigen. Während der erste Stoß aufgrund der vielfältigen Umwelteinflüsse nicht repräsentativ zu sein scheint, lassen der zweite und dritte Stoß auf die plastische Verformbarkeit des Bodens und somit auf die Härte schließen. Aus den nachfolgenden Stößen lässt sich auf die elastische Verformung des Bodens schließen. Hier zeigte sich erwartungsgemäß reiner Sand als am wenigsten elastisch, gefolgt von Sand mit Vlies und Holz. Die höchsten elastischen Werte erzielte die reine Teppichhäckseltretschicht. Durch die serienmäßige Produktion ist die Verfügbarkeit auf dem Markt gegeben. Lediglich bei der Software wäre eine Adaption wünschenswert, sodass neun Schläge am Stück erfassbar wären. Ein vielversprechender neuer Ansatz zur Auswertung des Geräts könnte die Aussagemöglichkeiten der Messungen noch erweitern (Herholz et al., 2023). Der feine Sand in Tretschichten kann sich in den Kugellagern des Fallgewichts absetzen und die Messungen beeinflussen – hier ist besondere Sorgfalt seitens der versuchsdurchführenden Person erforderlich.

Der Clegg-Hammer erwies sich im Handling als sehr angenehm, es sind viele Versuche in kurzer Zeit möglich. Auch gibt es erste Hinweise, dass größere Varianzen in den Werten durch Mittelung mehrerer Versuche ausgeglichen werden könnten und so der Vorteil im Handling überwiegen könnte. Aufgrund der aufgetretenen technischen Probleme können die Messwerte jedoch nicht abschließend beurteilt werden. Das Gerät ist auch in verschiedenen Fallgewichtsklassen erhältlich. Hier sind weitere Untersuchungen mit verschiedenen Typen möglich.

Ebenso wie das modifizierte dynamische Plattendruckgerät liefert der VST valide Ergebnisse. Die Einordnung von Sand als eher härter und

plastisch verformbar und Sand mit Zuschlagstoffen als eher weicher und elastischer deckt sich mit den Ergebnissen des modifizierten dynamischen Plattendruckversuchs. Hinsichtlich der Handhabung und der Auswertungsmöglichkeiten wird dieses Gerät sogar bevorzugt, da noch eine Vielzahl anderer Parameter aufgenommen wird. Zudem ist es kleiner und leichter, was Transport und Anwendung vereinfacht. Die Bedienung ist intuitiv und direkt im Gerät integriert. Für die Auswertung ist keine weitere Software nötig, die Daten werden jedoch nicht direkt angezeigt, sondern müssen am Computer ausgelesen werden. Allerdings ist der VST bisher nicht standardmäßig auf dem Markt erhältlich und somit nicht frei verfügbar.

Das HIC-Gerät wiederum gleicht im Handling stark dem VST, wird jedoch über ein Smartphone bedient. Mittels weiterer Rechenschritte kann auch aus den Daten des HIC-Geräts die Steifigkeit und Energierückgewinnung berechnet werden. Da die Daten ausschließlich über die herstellereigene Software ausgelesen werden können, erfordert dies aber einen erheblichen Mehraufwand seitens des Exports und der Verarbeitung der Daten. Sollte dieses Gerät weiter für Reitplätze eingesetzt werden, wird eine Anpassung der Software empfohlen.

Alle drei Geräte bilden die Eigenschaften des Gesamtaufbaus des Bodens ab. Diese können durch unterschiedliche Aufbauten und Schichten beeinflusst werden. Eine Aussage über die Auswirkungen einzelner Schichten kann nicht getroffen werden.

Der weiterentwickelte künstliche Sportler erwies sich als ungeeignet für die Tretschichtprüfung. Zum einen konnten keine sinnvollen Messwerte generiert werden, zum anderen entsprach der Aufwand in der Handhabung nicht den Anforderungen.

Eindringwiderstand

Der Prüfkegel könnte aufgrund seiner Kegelform wichtige Bodeneigenschaften, wie den Eindringwiderstand, ermitteln. Für die Einsatz-

tauglichkeit in der Praxis muss die Konstruktion jedoch grundlegend überarbeitet werden.

Scherfestigkeit

Für die Erfassung der Scherfestigkeit des Reitbodens konnte bisher kein geeignetes Gerät identifiziert werden. Das Drehwiderstandsgerät ist nicht sensitiv genug für den Wertebereich von Tretschichten. Flügelsonde und Scherkranz konnten bereits unter kontrollierten Bedingungen in der Versuchshalle keine validen Werte ermitteln.

Dennoch ist die Scherfestigkeit, der „Grip“ der Hufe, eine für die Sicherheit im Pferdesport wichtige Bodeneigenschaft.

6.2 Zusammenfassung für die Praxis

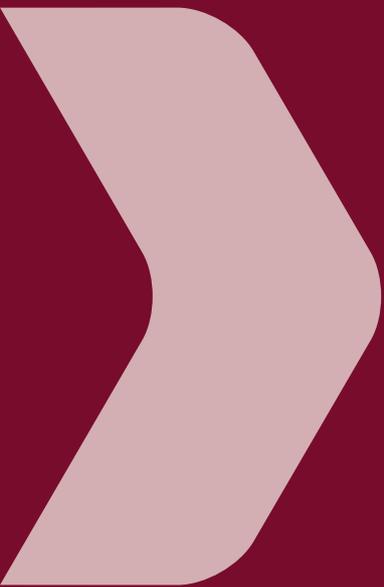
Die sportfunktionellen Eigenschaften einer Tretschicht können in der Praxis mit verschiedenen einfach zu bedienenden Prüfgeräten abgeschätzt werden. Besonders geeignet sind das modifizierte dynamische Plattendruckgerät sowie der VST. Beide Geräte überzeugen sowohl in der Anwendung als auch bei den Interpretationsmöglichkeiten. Es ist zu erwarten, dass für diese Geräte in Zukunft disziplinspezifische Grenzbereiche zur Qualitätseinstufung des Reitbodens festgelegt werden.

Für die in-situ-Bestimmung des Wassergehalts einer Tretschicht könnten sich Feuchtesonden als nützliches Instrument erweisen. Zwar genügen die absoluten Messwerte nicht wissenschaftlichen Ansprüchen zur Bestimmung des Wassergehalts, doch können relative Veränderungen des Wassergehalts zuverlässig abgebildet werden. So bieten die Geräte Anlagenbetreibern die praktikable und kostengünstige Möglichkeit, den Wassergehalt auf der eigenen Anlage regelmäßig zu überprüfen und gezielt zu steuern. Aufgrund der fehlenden Vergleichbarkeit absoluter Ergebnisse verschiedener Geräte und Verfahren werden hier jedoch keine allgemeingültigen Grenzbereiche erwartet.

6.3 Weiterer Forschungsbedarf

Weiterer Forschungsbedarf besteht bei den Prüfgeräten zur Bestimmung der Dichte und des Wassergehalts sowie der Scherfestigkeit der Tretschicht. Da bisher der Einfluss der Dichte und des Wassergehalts der Tretschicht auf die sportfunktionellen Eigenschaften des Reitbodens nicht hinreichend untersucht sind, sollten diese Zusammenhänge ebenfalls Gegenstand der Forschung sein. Somit kann die Relevanz für das Finden geeigneter Prüfverfahren besser abgeschätzt werden. Ebenfalls untersucht werden sollten die Zusammenhänge zwischen den sportfunktionellen Eigenschaften und klassischen Bodenkennwerten wie der Körnung und Art und Anteil der Zuschlagstoffe. Nur wenn all diese Zusammenhänge bekannt sind, kann der Reitboden durch gezielte Anpassung der Eigenschaften hinsichtlich des Pferdewohls, des Trainings und der Performance optimiert werden.

Ein orthopädisch, ökonomisch und ökologisch wichtiger Aspekt ist ebenso die Alterung des Reitbodens. Dies umfasst zum einen Änderungen in der Homogenität der Reitfläche, z. B. durch unterschiedlich stark genutzte Bereiche, zum anderen auch die Veränderung der sportfunktionellen Eigenschaften über die Zeit, z. B. durch Zerkleinerung oder Veränderung der verwendeten Materialien. In diesem Zusammenhang scheint insbesondere die Ausbildung einer oder mehrerer Sperrschichten relevant zu sein. Bisher fehlt aber jegliches Wissen über diese Abläufe. Wären die Mechanismen bei der Alterung des Reitbodens bekannt, könnte der Alterung durch gezielte Materialwahl... entgegengewirkt werden und somit die Lebensdauer des Bodens verlängert werden.



7 Quellen

7.1 Literaturverzeichnis

- ASTM International (2024, Mai 3). Search results for: „equine surfaces“. ASTM International. <https://www.astm.org/catalogsearch/result/?q=equine+surfaces>
- Borchers, B. L. (2023). Vergleich von Untersuchungsmethoden im Labor zur Prüfung von Tretschichteigenschaften eines Reitplatzsandes im nassen Zustand [Bachelorarbeit]. HS Osnabrück.
- Brandt, L. A. A. (2023). Anwendbarkeit von Feuchtemesssonden zur Bestimmung des Wassergehaltes für geotechnische oder bodenmechanische Fragestellungen [Unveröffentlichte Studienarbeit]. HS Osnabrück.
- Clayton, H. M., & Schamhardt, H. C. (2013). Measurement Techniques for Gait Analysis. In W. Back & H. M. Clayton (Hrsg.), *Equine locomotion* (Second edition). Saunders Elsevier.
- Egenvall, A., Roepstorff, L., Peterson, M., Lundholm, M., & Hernlund, E. (2021). The Descriptions and Attitudes of Riders and Arena Owners to 656 Equestrian Sport Surfaces in Sweden. *Frontiers in Veterinary Science*, 8, 798910. <https://doi.org/10.3389/fvets.2021.798910>
- Einbock, S. (2018). Statistik für Ingenieure (mit Excel): Datenauswertung schnell verstehen & anwenden. BoD - Books on Demand.
- Fink, G. (2022, September). Hospitanz bei Fink Reitanlagen [Persönliche Kommunikation].
- FLL (Hrsg.). (2014). Reitplatzempfehlungen: Empfehlungen für Planung, Bau und Instandhaltung von Reitplätzen (2. Ausg.). FLL.
- Graydon, R., Northrop, A. J., Martin, J. H., Lucey, M., Schramel, J. P., Peham, C., Roepstorff, L., Sinclair, J., & Hobbs, S. J. (2023). The Development of a Standardized Protocol for Quantifying Equestrian Eventing Cross-Country Ground. *Biomechanics*, 3(3), 343–361. <https://doi.org/10.3390/biomechanics3030029>
- Große Erdmann, P. (2011). Dynamik im Reitplatz, Kraft- und Energiefluss. In T. Heinrich & O. Hemker (Hrsg.), *Sportpferde: Boden + Gesundheit* (S. 13–15).
- Hayati, H., Eager, D., Peham, C., & Qi, Y. (2020). Dynamic Behaviour of High Performance of Sand Surfaces Used in the Sports Industry. *Vibration*, 3(4), 410–424. <https://doi.org/10.3390/vibration3040026>
- Hemker, O., Vornholt, C., & Bertelmann, S. (2022). Sondierung zu Zuschlagstoffen in Reitböden (Bundesinstitut für Sportwissenschaft, Hrsg.). Bundesinstitut für Sportwissenschaft.
- Herholz, C., Siegwart, J., Nussbaum, M., Studer, M. H.-P., & Burgos, S. (2023). Large Temporal Variations of Functional Properties of Outdoor Equestrian Arena Surfaces and a New Concept of Evaluating Reactivity With Light Weight Deflectometer Settlement Curves. *Journal of Equine Veterinary Science*, 129, 104909. <https://doi.org/10.1016/j.jevs.2023.104909>
- Hernlund, E., Egenvall, A., Hobbs, S. J., Peterson, M. L., Northrop, A. J., Bergh, A., Martin, J. H., & Roepstorff, L. (2017). Comparing subjective and objective evaluation of show jumping competition and warm-up arena surfaces. *The Veterinary Journal*, 227, 49–57. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2017.09.001>
- Hernlund, E., Egenvall, A., Peterson, M. L., Mahaffey, C. A., & Roepstorff, L. (2013). Hoof accelerations at hoof-surface impact for stride types and functional limb types relevant to show jumping horses. *The Veterinary Journal*, 198, e27–e32. <https://doi.org/10.1016/j.tvjl.2013.09.029>
- Hobbs, S., Northrop, A., Mahaffey, C., Martin, J., Clayton, H., Murray, R., Roepstorff, L., & Peterson, M. (2014). *Equine Surfaces White Paper*.

- Hruza, J., & Peham, C. (2023). Objektive Messverfahren zur Bestimmung von Reitbo-deneigenschaften und deren Einfluss auf den Bewegungsapparat des Pferdes – Ein Überblick. *Wiener Tierärztliche Monatszeitschrift*, 110. <https://doi.org/10.5680/wtm000025>
- Kruppa-Scheetz, J. (2024, April 24). *Bio Data Science*. <https://jkruppa.github.io/>
- Meteostat. (2024). *Wetterrückblick und Klimadaten*. <https://meteostat.net/de/>
- Mitchell, L. (2001). *The Man Who Stopped Time*. *Stanford Magazine*. <https://stanfordmag.org/contents/the-man-who-stopped-time>
- Münster, M. (2011). Objektive Kontrollmöglichkeiten von Reitplatzeigenschaften. In T. Heinrich & O. Hemker (Hrsg.), *Sportpferde: Boden + Gesundheit* (S. 18–19).
- Peham, C., & Schramel, J. P. (2023). *Persönliche Korrespondenz [Persönliche Kommunikation]*.
- Peterson, M. L., Wayne McIlwraith, C., & Reiser, R. F. (2008). Development of a system for the in-situ characterisation of thoroughbred horse racing track surfaces. *Biosystems Engineering*, 101(2), 260–269. <https://doi.org/10.1016/j.biosystem-seng.2008.07.007>
- Pfau, T. (2011). Objektive Ganganalyse des Pferdes – traditionelle und moderne Methoden. *pferde spiegel*, 14(02), 85–89. <https://doi.org/10.1055/s-0030-1271087>
- Schramel, J. P. (2022, Juni). *Vienna Surface Tester (Mark 2)*.
- Skowronek, H., & Hertsch, B. (2003). Einfluss des Geläufs bei „Großen Vielseitigkeitsprüfungen“ auf die Abbruchhäufigkeit. *Pferdeheilkunde Equine Medicine*, 19(3), 253–262. <https://doi.org/10.21836/PEM20030303>
- Tranquille, C., Lönnell, C., Hernlund, E., Roepstorff, L., Murray, R., Clayton, H., Peterson, M., & Martin, J. (2014). *Equestrian Surfaces – A Guide*.
- Tukey, J. W. (1977). *Exploratory data analysis (Repr.)*. Addison-Wesley.
- van der Heijden, R. (2018). *Engineered Equestrian Riding Surfaces [Master's Theses and Capstones, University of New Hampshire]*. <https://scholars.unh.edu/thesis/1196>
- Vetmeduni (Regisseur). (2015, Juni 2). *Vetmeduni Vienna: The BALL – New technology for (equine) surface testing [Video recording]*. <https://www.youtube.com/watch?v=ZQ08ZPXObuo>
- Wank, V. (2021). *Biomechanik der Sportarten: Grundlagen der Sportmechanik und Messtechnik – Fokus Leichtathletik*. Springer Spektrum. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-60525-7>
- Weimar, K. R., Pichlbauer, B., Guse, C., Schramel, J. P., Peham, C., Drillich, M., & Iwersen, M. (2022). Evaluation of an Accelerometer-Based Device for Testing the Softness of Bedding Materials Used for Livestock. *Sensors*, 22(22), 8912. <https://doi.org/10.3390/s22228912>
- Zalas, J. K. (2023). *Wassergehaltsbestimmungen für einen Reitsand – Vergleichende Untersuchungen mit verschiedenen Verfahren [Bachelorarbeit]*. HS Osnabrück.

7.2 Regelwerksverzeichnis

ASTM D8121/D8121M-19 Standard Test Method for Approximating the Shear Strength of Cohesive Soils by the Handheld Vane Shear Device

DIN 18035-5:2021-03 Sportplätze – Teil 5: Tennisflächen

DIN 18121-2:2020-11 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Wassergehalt – Teil 2: Bestimmung durch Schnellverfahren

DIN 18125-2:2020-11 Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte des Bodens – Teil 2: Feldversuche

DIN CEN/TS 16717 (DIN SPEC 18110):2015-05 Sportböden – Bestimmung des Kraftabbaus, der vertikalen Verformung und der Energierückgabe mit dem weiterentwickelten künstlichen Sportler

DIN EN 1177:2018-03 Stoßdämpfende Spielplatzböden – Prüfverfahren zur Bestimmung der Stoßdämpfung

DIN EN 14954:2006-01 Sportböden – Bestimmung der Härte von Naturrasen und ungebundenen mineralischen Belägen für Sportböden für den Außenbereich

DIN EN 15301-1:2007-06 Sportböden – Teil 1: Bestimmung des Drehwiderstands

DIN EN 15330-1:2013-12 Sportböden – Überwiegend für den Außenbereich hergestellte Kunststoffrasenflächen und Nadelfilze – Teil 1: Festlegungen für Kunststoffrasenflächen für Fußball, Hockey, Rugbytraining, Tennis und multifunktionale Kunststoffrasenflächen

DIN EN 17685-1:2023-04, Erdarbeiten – Chemische Prüfverfahren – Teil 1: Bestimmung des Glühverlusts

DIN EN ISO 17892-1:2022-08 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts

DIN EN ISO 17892-4:2017-04, Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Laborversuche an Bodenproben – Teil 4: Bestimmung der Korngrößenverteilung

DIN EN ISO 22476-2:2012-03 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Teil 2: Rammsondierungen (ISO 22476-2:2005 + Amd 1:2011)

DIN EN ISO 22476-9:2021-01 Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen – Teil 9: Flügelscherversuche (FVT und FVT-F) (ISO 22476-9:2020)

Reitplatzempfehlungen: Empfehlungen für Planung, Bau und Instandhaltung von Reitplätzen (2. Ausg. 2014), Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung Landschaftsbau e. V.

TP BF-StB Teil B 8.3 Technische Prüfvorschrift Boden und Fels im Straßenbau – Teil B 8.3: Dynamischer Plattendruckversuch mit leichtem Fallgewicht (FGSV 591 B 8.3, Ausgabe 2012)

Anhang 1: Sportfunktionelle, schutzfunktionelle und technische Begriffe²

Sportfunktionelle Eigenschaften

Eigenschaft des Reitbodens, die der bestmöglichen Anwendung der verschiedenen Techniken einzelner Disziplinen dient; unter Vermeidung von zu großen Risiken bei der Belastung des Bewegungsapparates und zu hohem Energieverbrauch (Ermüdung).

- **Energierückgewinnung**
Die Energierückgewinnung bezeichnet den prozentualen Anteil der Eingangsenergie, der von dem Reitboden zurückgegeben wird.
- **Kontinuität des Bodens**
Erhalt der sportfunktionellen Eigenschaften des Reitbodens über die Zeitdauer eines Pflegeintervalls.
- **Rutschfestigkeit**
Rutschfestigkeit bezeichnet den Widerstand eines Reitbodens, um ein Wegrutschen zu verhindern. Die Trettschicht muss das Eindringen des Pferdehufes ermöglichen, ohne dass es zu einer Rutschphase kommt. Sie muss jedoch nachgiebig genug sein, um bei Wendungen Verletzungen zu vermeiden. Rutschsicherheit ist gegeben, wenn der Boden die für jeweilige Disziplin erforderliche Rutschfestigkeit aufweist.
- **Trittfestigkeit**
Eigenschaft einer Trettschicht, das Eindringen des Pferdehufes zu ermöglichen bei gleichzeitigem Aufbau der erforderlichen Festigkeit und Stabilität für das Abhufen. Trittfestigkeit und die Eindringtiefe des Hufes sind unter anderem abhängig von Kornform, Sieblinie, Lagerungsdichte, Verdichtungsgrad, Wassergehalt. Trittsicherheit ist gegeben, wenn der Boden die für die jeweilige Disziplin erforderliche Trittfestigkeit aufweist.

2 Formulierungsentwurf

Schutzfunktionelle Eigenschaften

Eigenschaft des Reitbodens, die der Entlastung des Bewegungsapparates des Pferdes und der Sportlerin und des Sportlers sowie der Verringerung der Verletzungsgefahr bei Stürzen dient.

- **Kraftabbau**
Fähigkeit eines Reitbodens, die Stoßkraft eines auf die Oberfläche fallenden Körpers zu reduzieren. Es handelt sich um die physikalische Größe der Stoßdämpfung und Nachgiebigkeit infolge eines bestimmten Aufpralls.
- **Stoßdämpfung**
Eigenschaft der Oberfläche, durch die die kinetische Aufprallenergie durch örtlich begrenzte Verformung oder Verdrängung abgebaut wird, sodass die Beschleunigung des aufprallenden Objektes verringert wird.

Technische Eigenschaften

Eigenschaft des Sportbodens, die der langfristigen Erhaltung seiner sportfunktionellen und schutzfunktionellen Eigenschaften sowie seiner Gebrauchstauglichkeit für den Transport und die Benutzung von Geräten und Einrichtungen sowie seiner außersportlichen Nutzung dient.

- **Bereitbarkeit bei Frost**
Erhalt der sport- und schutzfunktionellen Eigenschaften des Bodens bei Frost.
- **Haltbarkeit**
Dauer bis zum Verlust der vorgesehenen sport- und schutzfunktionellen Eigenschaften. Die Haltbarkeit ist unter anderem abhängig von der Bauweise, den verwendeten Baustoffen, der Nutzungsintensität, der Pflege und Instandhaltung und externen Faktoren wie z. B. der Witterung.
- **Gleichmäßigkeit**
Gleiche Eigenschaften des Bodens auf dem gesamten Platz innerhalb der einzelnen Schichten an allen Stellen.

- **Scherfestigkeit**
Lagestabilität einer Schicht in sich als auch gegenüber der Schicht darunter.
- **Verformungsmodul**
Technische Kenngröße für das Verformungsverhalten einer Schicht bei definierten Belastungen.
- **Wasserspeicherfähigkeit, Wasserhaltefähigkeit, Wasserkapazität**
Eigenschaft des Bodens, einen gewissen Wassergehalt unter äußeren Bedingungen (Witterungseinflüssen) eine bestimmte Zeit zu bewahren. Diese bezeichnet die Wassermenge, die ein Boden nach 12 Stunden Überstausättigung und anschließendem Abtropfenlassen über eine Dauer von zwei Stunden gegen die Schwerkraft halten kann.
- **Wasserdurchlässigkeit, Wasserinfiltrationsrate**
Wasserdurchlässigkeit bezeichnet die Wassermenge pro Zeiteinheit, die in einem Laborversuch durch eine dafür hergestellte Probe eines Bodens oder eines Körnungsgemisches senkrecht durchgeleitet wird. In DIN EN ISO 17892-11 als Durchflussrate bezeichnet, die mit dem Durchlässigkeitsbeiwert angegeben wird.
Wird die Wasserdurchlässigkeit im Feldversuch ermittelt, wird sie als Infiltrationsrate bezeichnet. Sie bezeichnet die Wassermenge, die bezogen auf eine gegebene Fläche und eine gegebene Zeit senkrecht in den Boden eintritt (DIN EN 12616).

Anhang 2: Informationen zu den Reitanlagen aus den Feldversuchen

Tabelle 10: Feldversuche – Informationen der Betreibenden zu ihren Anlagen

ID	Bauweise			Pflege und Nutzung				Eigene Einschätzung	
	Trettschicht Trennschicht Tragschicht	Baujahr/ Erneuerung	Pflege- intervall	Disziplin	Niveau	Nutzungs- intensität	Be- wässerung	Härte	Elastizität
H_1	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Nordsand ➤ RC 0-5 ➤ k. A. 	2012	täglich werktags	Dressur, Springen	Training	Okt-März 40 Pferde/Tag	täglich 2 Minuten	je feuchter, umso fester	je nach Feuchte
H_2	<ul style="list-style-type: none"> ➤ k. A. 	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
H_3	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Stremmer Sand mit Siebgut mittel ➤ Keine ➤ Hochofenschlacke 	ca. 2016	k. A.	Dressur, Sprin- gen, Voltigieren, Longieren	Training	ganzjährig sehr hoch	trocken	weich	wenig elastisch
P_1	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Siebgut ➤ RC 0-5 ➤ k. A. 	07/2022	Hufschlag 1x wöchentl., komplett 1/4 jährlich	Dressur, Cavaletti	Training	10 Pferde	keine Bewässerung	locker/federnd	federnd
P_2	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Nordsand Vlies ➤ RC 0-5 ➤ k. A. 	2016	Sommer täglich, Winter der Nutzung entsprechend	Dressur, Sprin- gen, Vielseitig- keit, Longieren	Training	April-Okt. 20 Pferde/Tag	Ebbe-Flut	je feuchter, umso fester	je nach Feuchte
P_3	<ul style="list-style-type: none"> ➤ k. A. 	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.	k. A.
P_4	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Stremmer + Heus Sand Vlies ➤ Lava + Kalksplitt ➤ Drainageschächte (sehr tief) gefüllt mit HKS Schotter, Dachprofil 	ca. 2000, ca. 2018 aufgesandet	k. A.	Springen	Training, Turnier	saisonal, hoch	trocken	weich	tief, staubig
P_5	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Stremmer Sand Vlies ➤ Teer angespritzt ➤ Bitumen, Drainageschlit- ze mit Schotter gefüllt 	ca. 2020	k. A.	Dressur	Training, Turnier	ganzjährig sehr hoch	optimal	gute Härte (nachgebend, aber nicht einsinken)	federnd

ID	Bauweise		Pflege und Nutzung					Eigene Einschätzung	
	Trettschicht Trennschicht Tragschicht	Baujahr/ Erneuerung	Pflege- intervall	Disziplin	Niveau	Nutzungs- intensität	Be- wässerung	Härte	Elastizität
	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Stremmer Sand Vlies ➤ Keine ➤ Gummimatten 	ca. 2020	k. A.	Longieren	Training	sehr hoch			
P_6	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Körniger Sand Vlies ➤ Keine ➤ Gummianne (Teich- folie), Drainagerohre mit Strümpfen alle 2 m, aufgefüllt mit Reinsand 	ca. 2013	k. A.	Dressur, Springen	Training, Turnier	saisonal sehr hoch	Ebbe-Flut, optimal	gut nachgebend, aber nicht einsinken	federnd
P_7	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Stremmer Sand Vlies ➤ Lava + Kalksplit ➤ Schotter 	ca. 2009	k. A.	Vielseitigkeit, Springen, Dressur	Training, Turnier	saisonal, punktuell	optimal	nicht zu hart	federnd
P_8	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Stremmer Sand ➤ Lava ➤ Schotter 	ca. 2014	k. A.	Vielseitigkeit, Springen	Training, Turnier	saisonal	eher trocken	weich	tief
R_1	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Volltextil ➤ Reitplatzmatten ➤ Schotter 16-32 	2019	vierteljährlich Harken	nur im Schritt	Training	Ø 2 Pferde/ Tag	automatisch von unten	weich	hoch
R_2	<ul style="list-style-type: none"> ➤ Nordsand (Ebbe-Flut) 	2021	Hufschlag alle 14 Tage	longieren, freilaufen	Training	5 Pferde/Tag ganzjährig	nur durch Regen	fest, weil immer feucht	gering

Bundesinstitut für Sportwissenschaft
Graurheindorfer Straße 198 · 53117 Bonn
Telefon +49 (0) 228 99 640-9026
info@bisp.de
www.bisp.de

ISBN 978-3-96523-105-4
DOI <https://doi.org/10.4126/FRL01-006484155>