



Dragan Rasic, BSc

# **Modellversuche zum dynamischen Eindringverhalten eines Gleisschotter-Einzelkorns in einen feinkörnigen Boden**

## **MASTERARBEIT**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften – Geotechnical and Hydraulic Engineering

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte

betreuender Assistent

Dipl.-Ing. Christopher Krammer, BSc

Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik



## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommene Stellen als solche kenntlich gemacht habe.

Graz, am .....

.....

(Unterschrift)

## **Statutory declaration**

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources / resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources.

Graz, .....

.....

(signature)



## **Danksagung**

Bei dieser Gelegenheit möchte ich allen Personen danken, die mich während meiner Masterarbeit und im Laufe des Studiums unterstützten und mit Rat zur Seite standen.

In erster Linie bedanke ich mich bei meinen Betreuern Herrn Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Marte und Herrn Dipl.-Ing. Christopher Krammer, BSc. Vielen Dank für die erstklassige Betreuung, die diskussionsreichen Besprechungen und die essenziellen Ratschläge in allen Phasen meiner Masterarbeit.

Dank gebührt auch Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Baurat h.c. Helfried Breyman für die Planung, Konstruktion und Bereitstellung des Prüfstandes. Ohne diesem wäre die Durchführung dieser Arbeit nicht möglich gewesen.

Ein vielfaches Dankeschön geht auch an Oberrat Dipl.-Ing. Otto Leibniz und sein Team im Labor für die Zeit während der Durchführung meiner Versuche.

Ich möchte mich auch bei meinem Studienkollegen und Freund Kevin Wiedemaier für die interessanten Diskussionen während unserer Arbeiten und für die Bereitstellung der Böden für meine Versuche herzlichst bedanken.

Ein großes Dankeschön geht auch an meine Freunde und Studienkollegen aus dem Wasserbauzeichensaal. Danke für die wunderschöne und unvergessliche Zeit während des Studiums.

Bei meinen langjährigen Freunden und Mitbewohnern Alexander Eder, Maximilian Moser und Johannes Lerchbaumer bedanke ich mich für einen wunderschönen und unvergesslichen Lebensabschnitt, an den ich mich mein Leben lang in voller Freude erinnern werde.

Der größte Dank gebührt meinen Eltern, Jadranka und Goran, und meinem Bruder Michael für die Unterstützung und den Rückhalt in all den Jahren während des Studiums.

Zu guter Letzt möchte ich mich bei meiner Freundin Regina Böhm herzlichst bedanken. Danke für die liebevolle und verständnisvolle Unterstützung sowie die Geduld und die aufmunternden Worte in den letzten Monaten meiner Masterarbeit.

**DANKE**



## Kurzfassung

„Mud Pumping“ stellt einen Schadensfall in der Eisenbahninfrastruktur dar und beschreibt den Feinteiltransport vom Unterboden in den Gleisschotter. Die „Interlayer Creation“ hängt mit dieser Thematik stark zusammen und ist eine Bezeichnung für das gegenseitige Eindringen und Vermischen von Gleisschotter und Unterboden. Diese Masterarbeit befasst sich mit der detaillierten Betrachtung auf ein Gleisschotter-Einzelkorn im Übergangsbereich zwischen Unterboden und Gleisschotter während einer Zugüberfahrt.

Dabei wird untersucht, wie das Eindringverhalten des Schotterkorns unter dynamischer Belastung stattfindet, wie groß der Einflussbereich im Boden ist und wie sich der Boden innerhalb des Einflussbereichs in Hinblick auf Verdichtung und Verdrängung verhält.

Es werden Versuche mit unterschiedlichen Parametern, wie Kornverteilung, Wassergehalt und Anzahl idealisierter Schotterkörner durchgeführt. Die Methodik zur Versuchsdurchführung beinhaltet den Prüfstand zur Simulierung einer Zugüberfahrt und den Prüfkörper, welcher eine zweidimensionale, vertikale Schnittebene durch die idealisierte Kugel und den umgebenden Boden darstellt.

Die Auswertemethodik umfasst die Quantifizierung der Eindringtiefe mittels induktiver Wegaufnehmer und des Einflussbereichs mithilfe der PIV-Analyse. Um auf ein Verhalten des Bodens bezüglich Verdichtung und Verdrängung zu schließen, wurde ein vereinfachter Flächenvergleich durchgeführt.

Die Ergebnisse präsentieren die Setzungskurven der idealisierten Kugel, die Werte für die Einflussfläche und Einflusstiefe im Boden sowie die Anteile an Verdichtung und Verdrängung.

Die Ergebnisse dieser Arbeit dienen als Grundlage für zukünftige Forschungsprojekte mit dem Fokus auf die Thematik „Mud Pumping“.





## **Abstract**

“Mud Pumping” is a possible failure mechanism in railway infrastructures and describes the migration of fine particles from the subgrade into the ballast layer. The “Interlayer Creation” is significantly dependent on this phenomenon and is a term for the interpenetration and mixing between subsoil and ballast. This master`s thesis will give a detailed analysis of the behaviour of a ballast grain at the subsoil and ballast layer interface during a train crossing.

The conducted tests examine the penetration behaviour of the ballast grain under dynamic loading, the influenced area in the soil and the behaviour within that area relating to compaction and displacement.

A number of tests were carried out while varying parameters such as grain size distribution, water content and the number of idealized ballast grains. The testing method and procedure is designed to simulate a train crossing, whereby the tested specimen represents a two-dimensional, vertical sectional plane through the idealized spherical grain and the surrounding soil.

The applied evaluation method covers the quantification of the penetration depth using inductive displacement sensors as well as the determination of the influenced range within the soil using the PIV analyses. In order to draw conclusions regarding the soil behaviour with respect to compaction and displacement, a simplified comparison of areas was carried out.

The presented results include the settlement curve of the idealized spherical grain, values for the area and depth of influence in the soil and the respective proportions of compaction and displacement.

The results given in this thesis serve as a basis for future research projects focused on the subject of Mud Pumping.



# Inhalt

1	Einleitung .....	1
2	Literaturrecherche zum Thema Mud Pumping.....	3
2.1	Allgemeines .....	3
2.2	Unterteilung in zwei Arten von Mud Pumping .....	6
2.2.1	Oberbau – Mud Pumping („weiße Spritzer“).....	6
2.2.2	Unterbau – Mud Pumping („braune Spritzer“)......	7
2.3	Mud Pumping Entstehungsprozess.....	8
2.3.1	Modell nach Takatoshi .....	8
2.3.2	Modell nach Alobaidi & Hoare .....	9
2.3.3	Mechanismus von Mud Pumping nach Wang et al. 2014 .....	9
2.3.4	Interlayer Creation.....	11
2.4	Einflussfaktoren.....	11
2.4.1	Wasser.....	12
2.4.2	Boden .....	13
2.4.3	Dynamische und zyklische Belastung .....	13
2.5	Detektion von Mud Pumping Zonen .....	14
2.5.1	Visuelle Inspektion .....	14
2.5.2	Georadar.....	14
2.6	Unterbindung des Feinteiltransportes.....	15
2.6.1	Deckschicht.....	15
2.6.2	Geokunststoffe.....	16
2.6.3	Schotterbettreinigung – Bodenaustausch.....	16
2.7	Laborversuch nach Burns et al. 2006 .....	17
3	Versuche.....	21
3.1	Methodik .....	21
3.2	Gleisschotter .....	21
3.3	Prüfstand.....	24
3.3.1	Versuchsmaschine.....	24

3.3.2	Steuerungselement .....	26
3.3.3	Behälter.....	27
3.4	Messtechnik .....	28
3.4.1	Wegmessung .....	28
3.4.2	Kraftmessung.....	29
3.4.3	PIV – Analyse .....	30
3.5	Böden .....	31
3.5.1	Boden 1 – Feinsand, schluffig .....	32
3.5.2	Boden 2 – Schluff, feinsandig.....	33
3.5.3	Boden 3 – Mittelsand, schluffig mit Ausfallkörnung.....	34
3.5.4	Zusammenfassung der Böden .....	35
3.6	Krafteinwirkung auf ein Gleisschotter-Einzelkorn.....	35
3.7	Prüfaufbau und Versuchsvorbereitung .....	38
3.7.1	Hauptversuche 1 .....	38
3.7.2	Hauptversuche 2 .....	39
3.7.3	Kraftbereich.....	40
3.7.4	Frequenzbereich .....	40
3.7.5	Versuchsdauer .....	41
3.7.6	Parametervariation.....	41
3.7.7	Versuchsreihe .....	43
3.8	Vorversuche zur Sättigung .....	45
3.8.1	Versuchsablauf .....	45
3.8.2	Ergebnisse .....	47
3.8.3	Interpretation.....	50
3.9	Hauptversuch 1 .....	50
3.9.1	Versuchsablauf .....	50
3.9.2	Versuchsdauer.....	54
3.9.3	Eindringtiefe .....	57
3.9.4	Einflussbereich.....	61

3.9.5	Verdichtung und Verdrängung.....	66
3.10	Hauptversuch 2.....	70
3.10.1	Versuchsablauf.....	70
3.10.2	Versuchsdauer.....	70
3.10.3	Eindringtiefe.....	73
3.10.4	Einflussbereich.....	77
3.10.5	Verdichtung und Verdrängung.....	82
3.11	Vergleich von Hauptversuch 1 und Hauptversuch 2.....	84
3.11.1	Boden 1.....	84
3.11.2	Versuchsdauer.....	85
3.11.3	Eindringtiefe.....	86
3.11.4	Einflussbereich.....	89
3.11.5	Verdichtung und Verdrängung.....	90
3.12	Feinteilbewegung.....	91
4	Zusammenfassung.....	93
5	Ausblick.....	94
6	Literaturverzeichnis.....	95



# Abbildungsverzeichnis

Abb. 1	Querschnitt einer konventionellen Zugtrasse im Einschnitt (Selig und Waters 1994).....	3
Abb. 2	Querschnitt einer gleisschotterlosen Zugtrasse (Rail.One GmbH 2011) .....	4
Abb. 3	Schlammstellen auf der Gleisschotteroberfläche (Selig und Waters 1994) .	5
Abb. 4	Schotterverschmutzung mit Feinanteil (Veit und Walter 2012/2013) .....	6
Abb. 5	Ursache aller Gleisschotterverschmutzungen (Selig und Waters 1994).....	7
Abb. 6	Braune Spritzer (Wikimedia.org 2018) .....	7
Abb. 7	Mud Pumping Modell nach Takatoshi (1997).....	9
Abb. 8	Bereich für Interlayer Creation und Unterbau-Mud Pumping (Selig und Waters 1994) .....	11
Abb. 9	Filterkriterium nach Selig und Waters (1994) .....	16
Abb. 10	Pump-Index-Apparat nach Burns et al. 2006 .....	18
Abb. 11	Messwerte der Setzungen (Burns et al. 2006) .....	19
Abb. 12	Berechnete Steifigkeit (Burns et al. 2006).....	19
Abb. 13	Gemessene Menge der Feinteile (Burns et al. 2006).....	20
Abb. 14	Gemessene Steifigkeit vor und nach dem Versuch (Burns et al. 2006).....	20
Abb. 15	Gleisschotterkörner in unterschiedlichen Formen .....	22
Abb. 16	Planliche Darstellung der idealisierten Kugel .....	23
Abb. 17	Idealisierte Viertelkugeln.....	23
Abb. 18	Versuchsmaschine .....	25
Abb. 19	Belastungskurve aus der Versuchsmaschine.....	25
Abb. 20	Steuerungselement.....	26
Abb. 21	Spannungsmessung mit digitalem Multimeter .....	26
Abb. 22	Abmessungen des Versuchsbehälters.....	27
Abb. 23	Versuchsbehälter.....	28
Abb. 24	Planliche Darstellung des Wegaufnehmers (HBM 2018b) .....	28
Abb. 25	Wegaufnehmer an der Versuchsmaschine .....	29
Abb. 26	Prinzip Kraftaufnehmer S2M (HBM 2018a).....	29
Abb. 27	Kraftmessdose an der Versuchsmaschine.....	30
Abb. 28	PIV-Kamera Allied Vision Prosilica GX .....	31
Abb. 29	Boden 1 (FSa, si).....	32
Abb. 30	Korngrößenverteilung Boden 1 (FSa, si).....	32
Abb. 31	Boden 2 (Si, fsa).....	33
Abb. 32	Korngrößenverteilung Boden 2 (Si, fsa).....	33
Abb. 33	Boden 3 (MSa, si).....	34

Abb. 34	Korngrößenverteilung Boden 3 (MSa, si) .....	34
Abb. 35	Lastabtragung vom Rad in den Unterbau (Veit und Walter 2012/2013) ....	36
Abb. 36	Versuchsaufbau Hauptversuch 1 .....	38
Abb. 37	Versuchsaufbau Hauptversuch 2 .....	39
Abb. 38	Achsabstände Zugwaggon in Meter .....	40
Abb. 39	Belastungskurve der Versuchsmaschine .....	41
Abb. 40	Kraftbereich für Hauptversuche 1 .....	43
Abb. 41	Kraftbereich für Hauptversuche 2 .....	43
Abb. 42	Versuchsreihe Hauptversuche 1 .....	44
Abb. 43	Versuchsreihe Hauptversuche 2 .....	44
Abb. 44	Acrylglaszylinder für Sättigungsversuche.....	46
Abb. 45	Lagerung der Versuchsbehälter.....	46
Abb. 46	Entnahmewerkzeug für die Bodenproben .....	47
Abb. 47	Wassergehalt Boden 1.....	47
Abb. 48	Wassergehalt Boden 2.....	47
Abb. 49	Wassergehalt Boden 3.....	48
Abb. 50	Sättigungsgrad Boden 1 .....	49
Abb. 51	Sättigungsgrad Boden 2 .....	49
Abb. 52	Sättigungsgrad Boden 3 .....	50
Abb. 53	Lageweiser Einbau des Bodens.....	52
Abb. 54	Verdichtung der Einzelnen Schicht auf eine Dicke von 1,75 cm.....	52
Abb. 55	Aufkratzen der Oberfläche der einzelnen Schichten .....	53
Abb. 56	Versuchskörper nach dem Verdichtungs Vorgang .....	53
Abb. 57	Versuchskörper nach dem Einbringen der Viertelkugeln – HV 1 .....	54
Abb. 58	Ergebnisse Versuchsdauer HV 1 – Vergleich der Kennung Boden .....	55
Abb. 59	Ergebnisse Versuchsdauer HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt	56
Abb. 60	Bezugsniveau für die Eindringtiefe.....	57
Abb. 61	Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Boden – 0 bis 20.000 Lastwechsel .....	58
Abb. 62	Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Boden – 0 bis 600 Lastwechsel.....	58
Abb. 63	Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Boden – 0 bis 300 Lastwechsel inklusive Vorbelastung.....	59
Abb. 64	Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt – 0 bis 20.000 Lastwechsel.....	59
Abb. 65	Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt – 0 bis 600 Lastwechsel .....	60



Abb. 66	Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt – 0 bis 300 Lastwechsel inklusive Vorbelastung .....	60
Abb. 67	Verschiebungsvektoren aus der PIV-Analyse – Beispiel HV1_B2_wP_t2 ..	62
Abb. 68	Geschwindigkeitsfelder aus der PIV-Analyse – Beispiel HV1_B2_wP_t2...	63
Abb. 69	Überlagerung und Ermittlung Einflussbereich-Fläche und -Tiefe – Beispiel HV1_B2_wP_t2.....	63
Abb. 70	Ergebnisse Einflussbereich Fläche HV 1 – Vergleich der Kennung Boden	64
Abb. 71	Ergebnisse Einflussbereich Fläche HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt.....	64
Abb. 72	Ergebnisse Einflussbereich Tiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Boden ...	65
Abb. 73	Ergebnisse Einflussbereich Tiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt.....	65
Abb. 74	Referenzfläche für Verdichtung und Verdrängung – Beispiel HV1_B1_wP_t1 .....	67
Abb. 75	Flächen Verdichtung und Verdrängung – Beispiel HV1_B1_wP_t1 .....	68
Abb. 76	Ergebnisse Verdichtung und Verdrängung HV 1 – Vergleich der Kennung Boden.....	68
Abb. 77	Ergebnisse Verdichtung und Verdrängung HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt.....	69
Abb. 78	Versuchskörper nach dem Einbringen der Viertelkugeln – HV 2.....	70
Abb. 79	Ergebnisse Versuchsdauer HV 2 – Vergleich der Kennung Boden.....	71
Abb. 80	Ergebnisse Versuchsdauer HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt.	72
Abb. 81	Ergebnisse Eindringtiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Boden – 0 bis 20.000 Lastwechsel.....	73
Abb. 82	Ergebnisse Eindringtiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Boden – 0 bis 600 Lastwechsel.....	74
Abb. 83	Ergebnisse Eindringtiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Boden – 0 bis 300 Lastwechsel inklusive Vorbelastung.....	74
Abb. 84	Ergebnisse Eindringtiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt – 0 bis 20.000 Lastwechsel.....	75
Abb. 85	Ergebnisse Eindringtiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt – 0 bis 600 Lastwechsel .....	75
Abb. 86	Ergebnisse Eindringtiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt – 0 bis 300 Lastwechsel inklusive Vorbelastung .....	76
Abb. 87	Verschiebungsvektoren aus der PIV-Analyse – Beispiel HV2_B1_wP_t2 ..	78
Abb. 88	Geschwindigkeitsfelder aus der PIV-Analyse – Beispiel HV2_B1_wP_t2...	78

Abb. 89	Überlagerung und Ermittlung Einflussbereich-Fläche und -Tiefe – Beispiel HV2_B1_wP_t2.....	79
Abb. 90	Ergebnisse Einflussbereich Fläche HV 2 – Vergleich der Kennung Boden 80	
Abb. 91	Ergebnisse Einflussbereich Fläche HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt.....	80
Abb. 92	Ergebnisse Einflussbereich Tiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Boden ..	81
Abb. 93	Ergebnisse Einflussbereich Tiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt.....	81
Abb. 94	Flächen Verdichtung und Verdrängung – Beispiel HV2_B2_wL_t1 .....	82
Abb. 95	Ergebnisse Verdichtung und Verdrängung HV 2 – Vergleich der Kennung Boden .....	83
Abb. 96	Ergebnisse Verdichtung und Verdrängung HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt.....	84
Abb. 97	Herausgedrücktes Wasser bei HV2_B2_wP_t1 .....	85
Abb. 98	Ergebnisse Versuchsdauer HV 1 und HV 2 .....	85
Abb. 99	Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 und HV 2 – 0 bis 20.000 Lastwechsel .....	87
Abb. 100	Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 und HV 2 – 0 bis 600 Lastwechsel.....	87
Abb. 101	Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 und HV 2 – 0 bis 300 Lastwechsel inklusive Vorbelastung .....	88
Abb. 102	Ergebnisse Einflussbereich Fläche HV 1 und HV 2.....	89
Abb. 103	Ergebnisse Einflussbereich Tiefe HV 1 und HV 2 .....	89
Abb. 104	Ergebnisse Verdichtung und Verdrängung HV 1 und HV 2 .....	90
Abb. 105	Drei Phasen-Gemisch bei Versuch HV2_B2_wS_t1 .....	91

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1	Abmessungen Viertelkugel.....	23
Tab. 2	Böden .....	31
Tab. 3	Zusammenfassung der Bodenparameter .....	35
Tab. 4	Berechnung Kraftgröße auf Einzelkorn Teil 1 .....	37
Tab. 5	Berechnung Kraftgröße auf Einzelkorn Teil 2 .....	37
Tab. 6	Kraftbereich.....	40
Tab. 7	Berechnung Bodenmenge.....	51
Tab. 8	Ergebnisse Versuchsdauer HV 1 .....	55
Tab. 9	Ergebnisse Versuchsdauer HV 2 .....	71



# Formelzeichen und Abkürzungen

## Große Buchstaben

$A$	[cm <sup>2</sup> ]	Fläche
$A_{VDI}$	[cm <sup>2</sup> ]	Fläche Verdichtung
$A_{VDR,B}$	[cm <sup>2</sup> ]	Fläche des verdrängten Bodens
$A_{VDR,K}$	[cm <sup>2</sup> ]	Verdrängte Fläche der Kugel
$B1$	[-]	Boden 1
$B2$	[-]	Boden 2
$B3$	[-]	Boden 3
$D_{15}$	[mm]	Durchmesser bei 15 % Siebdurchgang
$D_{50}$	[mm]	Durchmesser bei 50 % Siebdurchgang
$D_{85}$	[mm]	Durchmesser bei 85 % Siebdurchgang
$F$	[N]	Kraft auf Einzelkorn
$G$	[g]	Gewicht idealisierte Viertelkugel
$HV1$	[-]	Hauptversuch 1
$HV2$	[-]	Hauptversuch 2
$I_C$	[%]	Konsistenzzahl
$I_P$	[%]	Plastizitätszahl
$LL$	[%]	Fließgrenze
$PL$	[%]	Ausrollgrenze
$S_r$	[-]	Sättigungsgrad
$V$	[cm <sup>3</sup> ]	Volumen
$W_L$	[%]	Wassergehalt bei der Fließgrenze
$W_P$	[%]	Wassergehalt bei der Ausrollgrenze
$W_{PR}$	[%]	optimaler Wassergehalt / Proctor-Wassergehalt

## Kleine Buchstaben

$a$	[mm]	Abmessung idealisierte Viertelkugel
$b$	[mm]	Abmessung idealisierte Viertelkugel
$c$	[mm]	Abmessung idealisierte Viertelkugel
$d$	[mm]	Durchmesser Kugel
$d_{15}$	[mm]	Durchmesser bei 15 % Siebdurchgang
$d_{85}$	[mm]	Durchmesser bei 85 % Siebdurchgang
$e$	[mm]	Porenzahl
$p$	[kPa]	Flächenpressung
$t1$	[-]	Test 1

$t_2$	[-]	Test 2
$t_E$	[-]	Einflusstiefe unter der Kugel
$w_L$	[-]	Kennung – Versuch mit Wassergehalt bei Fließgrenze
$w_P$	[-]	Kennung – Versuch mit Proctor-Wassergehalt
$w_S$	[-]	Kennung – Versuch mit stehendem Wasser
$w_{gem}$	[-]	Gemessener Wassergehalt
$w_{max}$	[-]	Maximal möglicher Wassergehalt
$x$	[-]	Variable

### Griechische Buchstaben

$\gamma_d$	[kN/m <sup>3</sup> ]	Trockenwichte
$\gamma_S$	[kN/m <sup>3</sup> ]	Kornwichte
$\gamma_W$	[kN/m <sup>3</sup> ]	Wichte Wasser
$\Delta A$	[cm <sup>2</sup> ]	Differenzfläche
$\rho_{PR}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	optimale Dichte / Proctor-Dichte
$\rho_{S,Bx}$	[g/cm <sup>3</sup> ]	Korndichte des jeweiligen Bodentyps

### Abkürzungen

Cl	Ton
FSa	Feinsand
fsa	feinsandig
MSa	Mittelsand
PIV	Particle Image Velocimetry
RB	Randbedingung
Sa	Sand
Si	Schluff
si	schluffig

# 1 Einleitung

Die Eisenbahn zählt nicht nur in Österreich, sondern weltweit zu den wichtigsten Verkehrsmitteln. Die Sicherheit steht dabei an erster Stelle. Um einen risikoarmen Transport von Personen und Gütern gewährleisten zu können, müssen die Zugstrecken kontinuierlich instand gehalten werden. (Duong et al. 2014b)

Es gibt verschiedene Schadensfälle in der Eisenbahninfrastruktur. Dabei zählen Mud Pumping und sogenannte „Schlammgespritzer“ zu den häufigsten Ursachen für unterschiedliche Störungen. Da die Eisenbahnindustrie in der Zukunft Geschwindigkeit, Transportvolumen und Transportgewicht steigern will, muss dem Mud Pumping Phänomen eine hohe Bedeutsamkeit zugeordnet werden. Das Auftreten von Schlammgespritzern und die daraus entstehenden Mängel sind ein hoher Kostenfaktor und ein großes Problem für den sicheren Betrieb. (Wang et al. 2014)

Bereits seit Jahrzehnten widmen sich viele Forscher rund um den Globus dem Thema Mud Pumping. Dabei liegt die Betrachtung häufig auf dem gesamten Querschnittsbereich einer Zugtrasse. Es gibt wenige Untersuchungen, welche sich mit der Thematik des Gleisschotter-Einzelkorns beschäftigen. Dabei ist bereits seit Selig und Waters (1994) bekannt, dass gegenseitiges Eindringen von Gleisschotter und Unterboden einen signifikanten Einfluss auf die Streckeneigenschaften hat. In weiterer Folge hat die gegenseitige Penetration auch einen Einfluss auf die Entstehung des Phänomens Mud Pumping. Aufgrund der geringen Informationen darüber werden in der gegenständlichen Masterarbeit folgende Fragen bearbeitet:

- Wie findet das Eindringverhalten eines Gleisschotter-Einzelkorns unter dynamischer Belastung in einen feinkörnigen Boden statt?
- Wie groß ist der Einflussbereich des Einzelkorns auf den Boden?
- Wie verhält sich der Boden innerhalb des Einflussbereichs des Einzelkorns in Hinblick auf Verdichtung, Verdrängung und Feinteilbewegung?
- Gibt es eine Gruppenwirkung von zwei Einzelkörnern nebeneinander?

Um diese Fragen beantworten zu können werden entsprechende Modellversuche durchgeführt. Mithilfe eines Prüfstandes soll das Eindringverhalten eines Gleisschotter-Einzelkorns unter dynamischer Belastung, wie sie bei einer Zugüberfahrt entsteht, simuliert werden.

Das Ziel ist, einen Vergleich über das Eindringverhalten des Gleisschotter-Einzelkorns in Böden mit unterschiedlicher Kornverteilung und Wassergehalt zu bekommen. Dabei sollen die Ergebnisse der einzelnen Versuche miteinander vergleichbar sein. Hierfür ist eine Quantifizierung des Eindringverhaltens des Gleisschotter-Einzelkorns notwendig. Diese erfolgt durch die Auswertung der Eindringtiefe, dem zweidimensionalen Flächenvergleich von Verdichtung und Verdrängung sowie der zweidimensionalen Flächenermittlung des Einflussbereichs mit Hilfe der Verschiebedatenauswertung aus der PIV-Analyse.



## 2 Literaturrecherche zum Thema Mud Pumping

### 2.1 Allgemeines

Das Auftreten von Mud Pumping betrifft hauptsächlich Zugstrecken in herkömmlicher Bauweise. Dabei wird der Unterbau meistens durch das Zusammenmischen von vor Ort vorhandenen Böden hergestellt. Es folgen darauf Gleisschotter, Schwellen inklusive Schienenbefestigung und Schienen, wie in Abb. 1 dargestellt. Der Gleisschotter dient der Aufnahme von dynamischen Lasten vom Zugverkehr und deren gleichmäßigen Verteilung in den Unterbau. (Kuo et al. 2016)

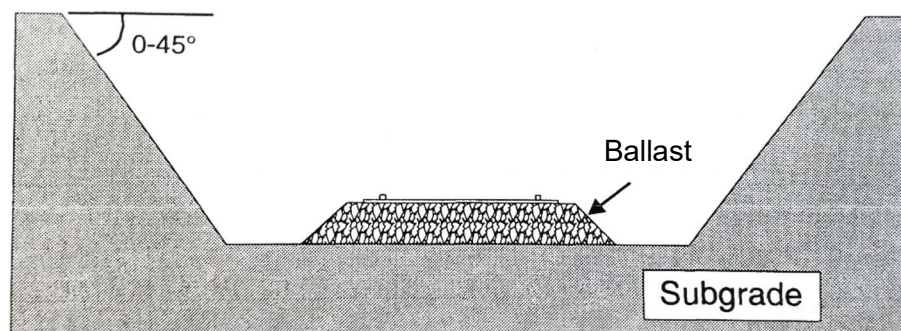


Abb. 1 Querschnitt einer konventionellen Zugtrasse im Einschnitt (Selig und Waters 1994)

Bei neueren Zugstrecken, Hochgeschwindigkeitsstrecken, in Tunnels und auf Brücken bedient man sich oft der gleisschotterlosen Bauweise, welche auch als „feste Fahrbahn“ bezeichnet wird. Dabei wird anstatt des Gleisschotters eine Betonkonstruktion hergestellt. Diese wird als Tragrahmen oder -platte ausgeführt und liegt direkt auf dem Unterbauplanum auf, wie in Abb. 2 dargestellt. Der darauffolgende Aufbau ist abhängig von den jeweiligen Systemen, welche sehr unterschiedlich sein können. Im Vergleich zum konventionellen Gleisschotteraufbau zeigt diese Bauart gewisse Vorteile auf, wie geringerer Instandhaltungsaufwand und niedrigere Einbauhöhe. Als Nachteile gelten insbesondere die höheren Herstellungskosten und bei auftretenden Schäden die schwierigen und zeitaufwendigen Wiederherstellungsarbeiten. (Veit und Walter 2012/2013)

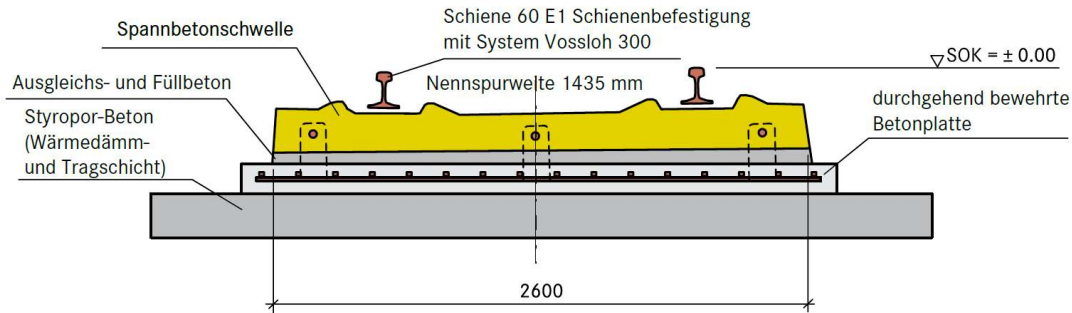


Abb. 2 Querschnitt einer gleisschotterlosen Zugtrasse (Rail.One GmbH 2011)

In einigen Streckenabschnitten mit fester Fahrbahn wurden in der Vergangenheit Spritzstöße registriert. Die Einflussfaktoren sind dieselben wie beim konventionellen Gleisschotteraufbau. Hierbei hat die hohe Frequenz aufgrund der hohen Zuggeschwindigkeiten einen maßgeblichen Einfluss. (Cai et al. 2015)

Mud Pumping ist ein Phänomen, welches den Transport von Feinteilen aus dem Unterboden in den Gleisschotter beschreibt. Dieser Effekt wurde bereits in vielen Forschungsarbeiten untersucht. Vergleicht man die Ergebnisse dieser Arbeiten, so führen sehr viele zu einem ähnlichen Resultat. Eine ungünstige Kombination aus Boden, Wasser und dynamischer Belastung aufgrund von Zugüberfahrten, führt zum Transport von feinen Bodenteilchen. Diese werden aus dem Unterboden durch Hohlräume im Gleisschotter bis zu seiner Oberfläche transportiert. Dort bildet sich eine schlammartige Suspension und es entstehen sogenannte „Schlammstellen“, wie in Abb. 3 zu sehen ist. (Duong et al. 2014b)



Abb. 3 Schlammstellen auf der Gleisschotteroberfläche (Selig und Waters 1994)

Zusätzlich zum Feinteiltransport erfolgt eine Interaktion von Gleisschotter und Unterboden. Durch gegenseitiges Eindringen entsteht eine Zwischenschicht. Diese Vermischung wurde bereits von Selig und Waters (1994) beschrieben. Erst seit kurzem wird sie als „Interlayer Creation“ bezeichnet. (Duong et al. 2014a; Duong et al. 2014b)

Die Konsequenz des Feinteiltransports ist die Verschmutzung und Verschlammung des Gleisschotters. Aufgrund dessen wird die effektive Wirkung der Kanten des Gleisschotters verringert. Daraus resultiert eine Abminderung der Scherfestigkeit im Gleisschotter und es folgt eine Reduzierung der Tragfähigkeit. (Kamalov et al. 2017)

Zusätzlich dazu beschreiben Selig und Waters (1994) die Verringerung des Porenraums im Gleisschotter und die damit verbundene Verschlechterung der Elastizität und Drainagefähigkeit. Wird der Gleisschotter verschmutzt, ist er nur mehr bedingt in der Lage seine Funktionen, wie Widerstandsfähigkeit, Kraftverteilung, Energieabsorption und Drainagefähigkeit zu erfüllen.

Als Resultat von Mud Pumping entsteht eine Serie von Mängeln an der Eisenbahninfrastruktur. Es kommt zu Setzungen und Verschiebungen des Gleisschotters. Dies führt wiederum zu Unebenheiten an der Oberfläche und bewirkt Abweichungen in der Gleislage und Gleisrichtung. Es kann zum Versagen von Eisenbahnschwellen und Gleisen kommen. Das Ergebnis ist die direkte Gefährdung

der Verkehrssicherheit im Eisenbahnwesen und eine signifikante Erhöhung der Instandhaltungskosten von Eisenbahntrassen. (Wang et al. 2014)

Um dies zu vermeiden, widmen sich bereits seit Jahrzehnten etliche Forscher über den gesamten Globus diesem Thema. Sehr repräsentative Ergebnisse liefern vor allem Wissenschaftler aus Japan, Frankreich und Australien. Jedoch ist das Wissen über die (boden-) mechanischen Hintergründe von Mud Pumping sehr rar. (Cai et al. 2015)

## 2.2 Unterteilung in zwei Arten von Mud Pumping

### 2.2.1 Oberbau – Mud Pumping („weiße Spritzer“)

Der Oberbau besteht zu einem Teil aus Gleisschotter. Dieser kann als granulares Haufwerk, bestehend aus Gesteinskörnern mit der Korngröße von 32 mm bis 63 mm, beschrieben werden. Aufgrund der einwirkenden Kräfte auf die einzelnen Körner können diese brechen bzw. abplatzen oder abgerieben werden. Diese unterschiedlichen Versagensmechanismen führen zum Anstieg des Feinkornanteils, wie in Abb. 4 dargestellt, welcher als Schotterverschmutzung (auch „Ballast Fouling“ genannt) bezeichnet wird. Weitere Ursachen sind in Kapitel 2.2.2 beschrieben. (Selig und Waters 1994)

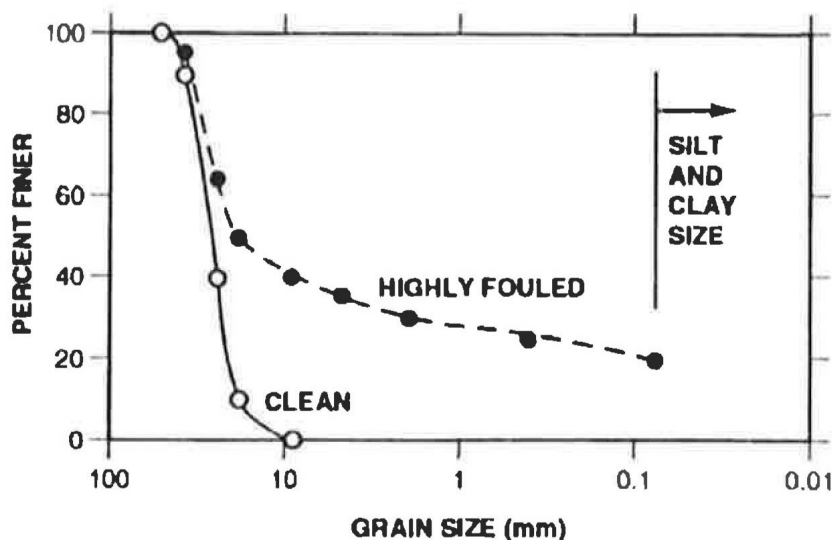


Abb. 4 Schotterverschmutzung mit Feinanteil (Veit und Walter 2012/2013)

Aufgrund dieser Verunreinigung verringert sich die Drainagefähigkeit des Gleisschotters. Durch die zusätzlich ungünstige Wirkung von Wasser und dynamischer Belastung kann es zur Entstehung von einer schlammartigen Suspension im Bereich der Schwellen kommen. (Veit und Walter 2012/2013)

### 2.2.2 Unterbau – Mud Pumping („braune Spritzer“)

Ungefähr 76 % aller Gleisschotterverschmutzungen treten aufgrund von gebrochenen oder abgeriebenen Gleisschotterkörnern auf, wie in Abb. 5 dargestellt. Die restlichen 24 % entstehen aufgrund von sandigen Tragschichten (13 %), der Infiltration aus der Gleisschotteroberfläche (7 %), dem Unterboden (3 %) und der Schwellen (1 %). (Selig und Waters 1994)

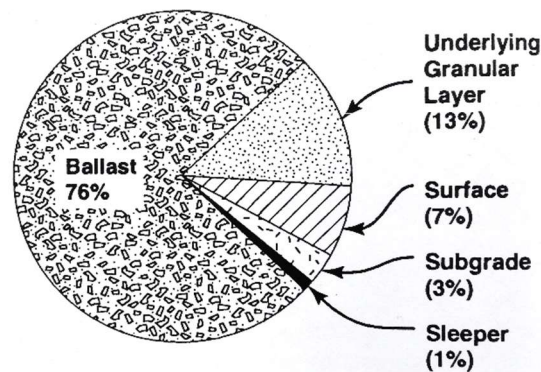


Abb. 5 Ursache aller Gleisschotterverschmutzungen (Selig und Waters 1994)

Ist das Bodenmaterial bereits erodiert und durch Wasser aufgeweicht, so kann der daraus entstandene Schlamm aufgrund der dynamischen Belastung des Zuges in den Gleisschotter hineingepumpt bzw. hineingedrückt werden. Dies kann zu bleibenden Verformungen im Unterbau führen. Wenn die Feinteile die Oberfläche des Schotterbetts erreichen und zusätzlich Einfluss durch Wasser und dynamischer Belastung gegeben ist, entsteht das Phänomen der „braunen Spritzer“, wie man in Abb. 6 sehen kann. (Kamalov et al. 2017)

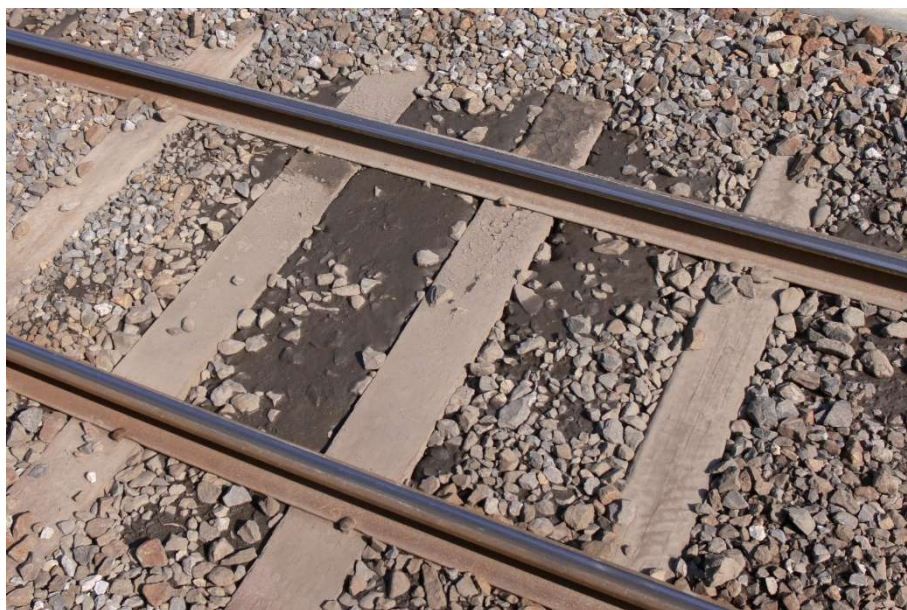


Abb. 6 Braune Spritzer (Wikimedia.org 2018)

## 2.3 Mud Pumping Entstehungsprozess

Etliche Forschungsarbeiten befassten sich mit dem Effekt des Feinteiltransportes aus dem Unterbau in den Gleisschotter. Diese Forschungsfrage ist noch immer aktuell und der Mechanismus über die Entstehung des Prozesses ist weiterhin nicht endgültig erforscht. Während der Analyse verschiedener Literaturquellen wurde ein gewisser Zusammenhang entdeckt. In vielen der durchforsteten Fachzeitschriften bzw. Veröffentlichungen werden wiederholt zwei signifikante Modelle beschrieben. Diese stammen von Takatoshi (1997) und Alobaidi & Hoare (1996, 1999). Viele der Forschungsarbeiten beziehen sich auf diese zwei Modelle. (Kamalov et al. 2017)

### 2.3.1 Modell nach Takatoshi

Es ist vorab anzumerken, dass während der Literaturrecherche das Originalpaper, mit dem Titel „Measure for the Stabilization of Railway Earth Structure“ aus dem Jahr 1997, mit der Beschreibung vom Modell von Takatoshi, nicht auffindbar war. Das Modell von Takatoshi aus dem Jahr 1997 basiert auf dem Prinzip der Saugkraft, welche aufgrund von geringen vertikalen Bewegungen der Eisenbahnschwelle entsteht. Der Prozess wird durch die Entstehung von Porenwasserüberdruck im gesättigten Unterbau und durch den Transport von Feinteilen mit dem Abbau des Porenwasserüberdrucks beschrieben. Takatoshi unterteilt den Prozess in vier Stufen, wie in Abb. 7 ersichtlich. Bevor eine Last auf die Schwelle wirkt, ist bereits eine Kluft zwischen Schwelle und Gleisschotter vorhanden (bewegliche Schwelle). Die Ursache für diesen Spalt ist der Langzeiteinfluss von Zuglasten aus der Vergangenheit (Abb. 7a). Während der Belastung wirken die Zuglasten auf die Schwelle und kreieren einen Porenwasserüberdruck im gesättigten Unterboden (Abb. 7b). Aufgrund der Biegelinie der Schiene hebt sich die Schwelle im Entlastungsvorgang und es vergrößert sich die Lücke zwischen Schwelle und Gleisschotter rapide. Dadurch sinkt der Druck und produziert eine Saugkraft auf die Feinteile im Unterbau (Abb. 7c). Durch die wiederkehrende Belastung wiederholen sich die Phasen (a), (b) und (c) bis Feinteile in Form von „Spritzern“ an der Oberfläche auftreten (Abb. 7d). (Yu et al. 2016)

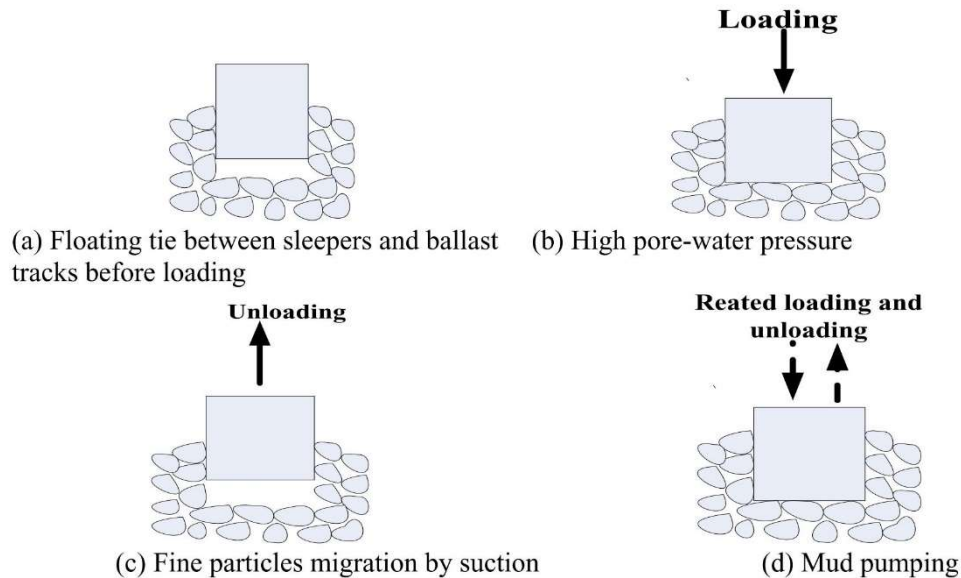


Abb. 7 Mud Pumping Modell nach Takatoshi (1997)

### 2.3.2 Modell nach Alobaidi & Hoare

In ihren Arbeiten wurden Untersuchungen im Übergangsbereich zwischen Unterboden und unterer Tragschicht durchgeführt. Alobaidi und Hoare (1996) beschreiben eine starke Abhängigkeit des Feinteiltransportes vom entstandenen Porenwasserüberdruck. Dabei sind sie zum Schluss gekommen, dass der maßgebende Faktor für den Feinteiltransport das Auftreten von Porenwasserüberdrücken im Übergangsbereich ist.

Weitere Untersuchungen haben ergeben, dass es zu einer Verschlechterung des Unterbodenmaterials kommt, wenn eine Befeuchtung von dessen Oberfläche stattfindet. Wirkt auf den Unterboden eine dynamische Belastung, so kommt es in den Kontaktbereichen zum Scherversagen. Aufgrund dessen dringen die Körner der unteren Tragschicht in den Unterboden ein und es kommt zu einer plastischen Bewegung vom Unterboden in die untere Tragschicht. Zusätzlich dazu entsteht ein rascher Abbau des Porenwasserüberdrucks innerhalb der Belastungsphase eines Zyklus. Dies bewirkt eine rapide Wasserbewegung, welche eine Ursache für die innere und externe Erosion von der Oberfläche des Unterbodens sein könnte. (Alobaidi und Hoare 1999)

### 2.3.3 Mechanismus von Mud Pumping nach Wang et al. 2014

Wie bereits erwähnt, entsteht der Mud Pumping-Effekt durch eine ungünstige Kombination aus Wasser, Boden und dynamischer Belastung. Mehrere Autoren von unterschiedlichen Studien teilen die Entstehung von Mud Pumping in drei Phasen ein:

Quetsch- und Aufstiegsphase (1), Schlammextrusions- und Saugphase (2) und Mud Pumping Entstehungsphase (3).

- **Quetsch- und Aufstiegsphase**

Bei Vorliegen von feinkörnigen Böden als Unterbodenmaterial muss mit einer geringen Durchlässigkeit gerechnet werden. Dadurch kann es bei schlechter Drainage zur Ansammlung von Wasser auf der Oberfläche vom Unterboden kommen. Aufgrund der wiederholenden Interaktion von Gleisschotter und Unterboden kann sich das Unterbodenmaterial lockern (bzw. aufweichen) und mit dem Wasser zu Schlamm vermischen. Dieser Schlamm steigt entlang der Hohlräume des Gleisschotters nach oben bzw. wird in die Hohlräume des Gleisschotters hineingedrückt. Wenn genügend Wasser vorhanden ist, kann zusätzlicher Schlamm entstehen, welcher wiederum in den Gleisschotter gequetscht wird und nach oben steigt. Dies beschreibt die primäre Stufe von Mud Pumping. Bei ungenügender Wasserzufuhr stoppt das Aufsteigen des Wasser-Boden-Gemisches und nach einer gewissen Zeit trocknet dieses aus. Dies führt zu einer Verhärtung vom Gleisschotterkörper und somit zur Verschlechterung seiner dynamischen Eigenschaften.

- **Schlammextrusions- und Saugphase**

Während der Trocknungsperiode können im erhärteten Schlamm innerhalb des Gleisschotters Schrumpfrisse entstehen. Bei Wasserzufuhr, z.B. aufgrund eines Regenereignisses, dringt das Wasser entlang der Risse ein und ändert die Konsistenz des zuvor erhärteten Feinteil-Gleisschotter-Gemisches. Unter dem dynamischen Einfluss von Verkehrslasten wirken zwei Belastungen auf den Schlamm, die Quetsch- und die Saugspannung. Die Ursache für die Entstehung der beiden Spannungen ist die verschlammte Gleisschotterschicht, welche eine relativ hohe Dichte und Festigkeit aufweisen kann. Unter Lasteinwirkung erhöht sich der Druck im Porenraum des Gleisschotters, der mit Schlamm gefüllt ist. Dies bewirkt ein Herausbrechen vom noch harten Material, welches in weichere Bereiche eindringt. Daraus folgt eine nach oben gerichtete Bewegung der Schlammschicht. Die Saugspannungen entstehen, da die verhärtete Gleisschotterschicht unter der zyklischen Belastung auf- und abschwingt und treten auf der Oberfläche des Unterbodens auf, wo sie das umgebende Wasser und die Feinteile anziehen.

- **Mud Pumping Entstehungsphase**

Durch eine zyklische Belastung wiederholen sich die davor beschriebenen Vorgänge, die das Phänomen Mud Pumping entstehen lassen. Der Schlamm kann nur nach oben ausweichen und sammelt sich somit an der Oberfläche des Gleisschotters und bedeckt



auch Teile der Schwellen, wie man in Abb. 3 gut erkennen kann. In diesen Bereichen kann es in weiterer Folge auch zu Pflanzenwachstum kommen.

### 2.3.4 Interlayer Creation

Der Feinteiltransport vom Unterboden in den Oberbau verändert die Zusammensetzung des Gleisschotter. Dies führt zu Spritzern und zusätzlich zur vorher erwähnten Vermischung von Gleisschotter und Unterbodenmaterial, welche unter dem englischen Begriff „Interlayer Creation“ bekannt ist. Dieser Begriff wurde erst kürzlich, zwischen den Jahren 2010 und 2013, eingeführt. Die Interlayer Creation betrifft hauptsächlich herkömmliche Zugstrecken, bei denen der Gleisschotter direkt auf dem Unterboden aufgebracht wird. Der maßgebende Bereich ist in der Abb. 8 (hier als „fouled ballast“ bezeichnet) dargestellt. Bei dynamischen Belastungen interagieren Unterboden und Gleisschotter miteinander. Durch gegenseitige Penetration entsteht diese Zwischenschicht. Es bildet sich eine Mixtur aus Unterboden, mit einem hohen Anteil von Feinteilen und Gleisschotter. Das Vorhandensein dieser Zwischenschicht hat ebenfalls einen signifikanten Einfluss auf die mechanischen Eigenschaften des Streckenaufbaus. Es können Probleme in Bezug auf Streckensetzungen und Stabilität entstehen, welche direkt die Verkehrssicherheit gefährden. Im Bereich der Forschung ist die Entstehung dieser Zwischenschicht noch immer eine offene Frage. (Duong et al. 2014a; Kamalov et al. 2017)

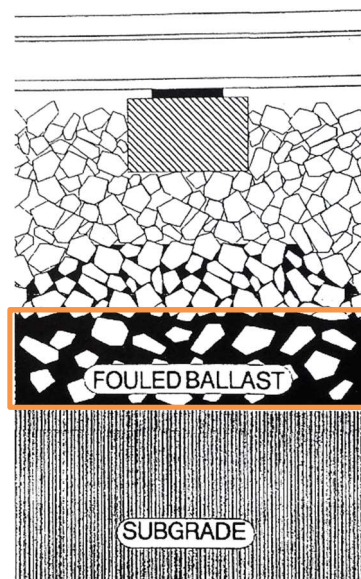


Abb. 8 Bereich für Interlayer Creation und Unterbau-Mud Pumping (Selig und Waters 1994)

## 2.4 Einflussfaktoren

Unterbau-Mud Pumping ist das Ergebnis einer ungünstigen Kombination verschiedener Faktoren. Einzelne Faktoren bilden möglicherweise keine markante Gefahr für die

Entstehung von Mud Pumping, erst das gemeinsame Vorhandensein lässt das Risiko steigen. (Cai et al. 2015; Wang et al. 2014)

Insbesondere sind folgende Einflüsse relevant:

- Wasser
- Bodenzusammensetzung
- Dynamische Belastung aufgrund von Zugüberfahrten (Amplitude, Frequenz)
- Lagerung / Konsistenz vom Boden
- Durchlässigkeit vom Boden
- Temperatur
- Instandhaltungsintervall
- Gleisschotterdicke
- Verschmutzungsgrad vom Gleisschotter
- Entwässerungsvorrichtungen und Drainagen

Im Allgemeinen können drei essenzielle Komponenten hervorgehoben werden, Wasser, Bodenzusammensetzung und die dynamische Belastung, wobei Wasser und Boden interne Faktoren darstellen und die Zugbelastung einen externen Faktor beschreibt. Die restlichen Elemente hängen von diesen drei Hauptfaktoren ab. (Indraratna und Salim 2005; Selig und Waters 1994; Alobaidi und Hoare 1994, 1999)

#### **2.4.1 Wasser**

Viele Forscher kommen zu dem Ergebnis, dass Wasser der maßgebende Faktor für die Entstehung von Mud Pumping ist. Es bildet die Hauptursache für Mängel in Bezug auf das Unterbodenmaterial. Das eindringende Wasser erhöht den Feuchtegehalt vom Unterboden und verringert die Scherfestigkeit, vor allem bei bindigen Materialien. Unter dem Einfluss von externen Lasten können Mud Pumping und andere Schäden auftreten. Basierend auf der Herkunft vom Wasser können verschiedene Typen charakterisiert werden, wie Grundwasser, Oberflächenwasser aus Regenereignissen, bereits vorhandener Feuchtegehalt im Boden und gasförmiges Wasser aufgrund von starken Temperaturschwankungen. (Wang et al. 2014)

### 2.4.2 Boden

Wenn man in diesem Themengebiet von Boden spricht, betrifft dies hauptsächlich das Material, welches als Unterboden vorhanden ist. In der Bodenmechanik kann der Boden in feinkörnige (bindige) und grobkörnige (nicht bindige) Böden unterteilt werden. In Streckenabschnitten mit einer Dammkonstruktion dient der Unterbau dem Ausgleich der ungleichmäßigen Höhenverteilung des Untergrundes. Die Herstellung des Unterbodens erfolgt dann durch Mischen von verschiedenen Böden, meist aus der Umgebung des Baustellengebietes. Um Baukosten einzusparen, erfolgt oftmals auch der Einbau von feinkörnigen Böden. In Einschnittbereichen wird ein Feinplanum erstellt, wo dann der Gleisschotter auf den gewachsenen Boden aufgebracht wird. Dabei sollte man die Eigenschaften des Unterbodenmaterials kennen. (Kuo et al. 2016)

Allgemein kann gesagt werden, dass bei nicht bindigen Böden Mud Pumping weniger wahrscheinlich auftritt, als bei bindigen Böden. Der Grund dafür liegt bei der geringeren Höhe des Kapillaraufstiegs und der allgemein höheren Festigkeit im gesättigten Zustand. Das heißt jedoch nicht, dass bei feinkörnigem Material Mud Pumping auftreten muss. Übersteigt jedoch der Feinkornanteil, also Schluff- und Tonanteil, eine bestimmte Menge, kann dies einen signifikanten Einfluss auf die Entstehung von Mud Pumping haben. Weiters besteht ein Zusammenhang zwischen Boden und seinen chemischen Zusammensetzungen (vor allem Salze und humose Inhaltstoffe), Durchlässigkeit, Lagerung/Konsistenz, Frost- Tauwechselferioden. (Cai et al. 2015; Wang et al. 2014)

### 2.4.3 Dynamische und zyklische Belastung

Durch eine Zugüberfahrt entsteht eine dynamische und zyklische Belastung auf den Gleiskörper, welcher die Kräfte in den Untergrund überträgt. Die dabei auftretenden dynamischen Spannungen im Unterbau können sehr groß und ungleichmäßig verteilt sein. Die Zuglast steht in einer engen Beziehung mit der Achslast, der Zuggeschwindigkeit und der daraus resultierenden Frequenz, der Schwellenverbindungsart und weiteren wichtigen Faktoren. Eine sich wiederholende Belastung ist maßgebend für das Auftreten des Phänomens Mud Pumping. Untersuchungen haben ergeben, dass innerhalb eines bestimmten Verkehrsvolumens eine nahezu lineare Beziehung zwischen Verkehrsvolumen und der Entstehung von Mud Pumping auftritt. (Cai et al. 2015; Wang et al. 2014)

## 2.5 Detektion von Mud Pumping Zonen

Meist wird Mud Pumping erst bemerkt, wenn das verflüssigte Material bereits aus der Oberfläche durch sogenannte Spritzer ausgetreten ist. Hier ist der Gleiskörper bereits in einem kritischen Zustand und ein Austausch des Gleisschotters meist die einzig sinnvolle Sanierungsmaßnahme. Daher müssten schon vor dem Entstehen Inspektionen durchgeführt werden, welche aber hauptsächlich außerhalb der Operationszeiten stattfinden sollten. (Hudson et al. 2016)

### 2.5.1 Visuelle Inspektion

Die visuelle Beurteilung stellt eine Möglichkeit der Untersuchung dar. Hierbei können die betroffenen Bereiche eingegrenzt werden, jedoch ist diese Methode mit vielen Nachteilen verbunden. Eine Untersuchung außerhalb der Operationszeit bedeutet, dass diese Tätigkeiten oft während der Nacht durchgeführt werden müssen. Hierbei ist ein gründliches und genaues Arbeiten von hoher Notwendigkeit. Weiters stellen regnerische Perioden eine Erschwernis für das Auffinden von Fehlstellen dar. Das Hauptproblem dieser Methode ist, dass die Bereiche meistens erst dann erkannt werden, wenn Mud Pumping bereits aufgetreten ist. (Kuo et al. 2016)

### 2.5.2 Georadar

Eine zerstörungsfreie Untersuchungsmethode zur Beurteilung von Gleisschotteranlagen und zur Detektion von Mud Pumping gefährdeten Bereichen stellt das Georadar, im Englischen als „Ground Penetration Radar“ bezeichnet, dar. (Kuo et al. 2016)

Das Georadar ist eine indirekte Erkundungsmethode in der Bodenmechanik und repräsentiert eine Art von geophysikalischen Messungen. Bei dieser Messmethode werden elektromagnetische Impulse in den Boden eingeleitet, dort von Schichten unterschiedlicher Leitfähigkeit reflektiert und am vorhergehenden Ausgangspunkt registriert. (Marte 2015)

Dadurch ergibt sich eine zerstörungsfreie Methode zur Messung des Verschmutzungsgrads des Gleisschotters und somit eine frühzeitige Detektion der Problembereiche, was einen großen Vorteil bei der Ermittlung von Mud Pumping gefährdeten Zonen darstellt. Zur richtigen Interpretation der Ergebnisse wird die zusätzliche Durchführung von visuellen Untersuchungen empfohlen (Kuo et al. 2016)

## 2.6 Unterbindung des Feinteiltransportes

Bei der Erstellung von neuen Zugtrassen berücksichtigt man bereits in der Planung die Mud Pumping Effekte und versucht diese zu unterbinden. Das dabei verfolgte Ziel ist die Verhinderung des Feinteiltransportes, welche auf verschiedene Arten möglich ist.

### 2.6.1 Deckschicht

Eine sehr übliche Lösung zur Verhinderung des Transportes von feinen Bodenteilchen ist der Einbau von verschiedenen Materialien zwischen Gleisschotter und Unterbau, ähnlich der Bauweise im Dammbau. Diese dienen als Filter (Sperrschicht) und verhindern das Ausspülen von Feinteilen, entsprechend der Filterregel, beispielsweise nach Terzaghi. (Kamalov et al. 2017)

$$\frac{D_{15}}{d_{85}} < 4 < \frac{D_{15}}{d_{15}} \quad (1)$$

$D_{15}$  [mm] Durchmesser bei 15 % Siebdurchgang des Filtermaterials

$d_{15}$  [mm] Durchmesser bei 15 % Siebdurchgang des abzufilternden Materials

$d_{85}$  [mm] Durchmesser bei 85 % Siebdurchgang des abzufilternden Materials

Selig und Waters (1994) haben zusätzliche Filterregeln aufgestellt, welche bei einer dynamischen Belastung berücksichtigt werden sollen:

$$D_{15} (\text{Filter}) \leq 5 D_{85} (\text{Unterbodenmaterial}) \quad (2)$$

$$D_{50} (\text{Filter}) \leq 25 D_{50} (\text{Unterbodenmaterial}) \quad (3)$$

$$D_{15} (\text{Filter}) > 4 \text{ bis } 5 D_{15} (\text{drainierten Boden}) \quad (4)$$

$D_{15}$  [mm] Durchmesser bei 15 % Siebdurchgang vom Filtermaterial bzw. vom drainierten Boden

$D_{85}$  [mm] Durchmesser bei 85 % Siebdurchgang vom Unterboden

$D_{50}$  [mm] Durchmesser bei 50 % Siebdurchgang vom Filtermaterial bzw. Unterboden

Zum besseren Verständnis der Filterregel ist in Abb. 9 eine zeichnerische Erklärung ersichtlich.

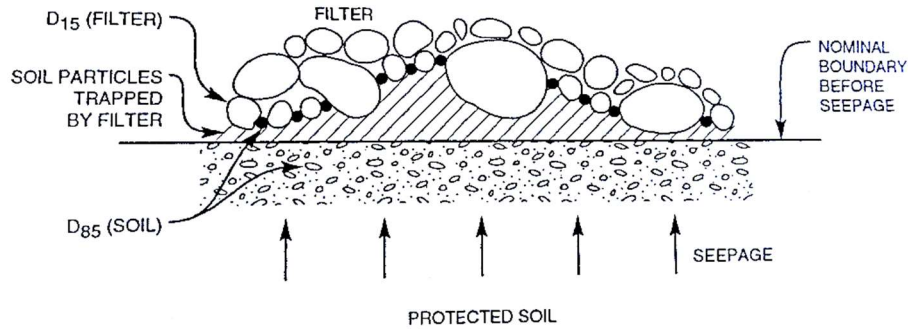


Abb. 9 Filterkriterium nach Selig und Waters (1994)

Die Nachteile dieser Konstruktion sind einerseits die Anlieferung vom Filtermaterial auf die Baustelle und die damit verbundenen höheren Kosten und andererseits der sehr hohe Zeitaufwand zur Herstellung der Trennschichten. (Kamalov et al. 2017)

### 2.6.2 Geokunststoffe

Zur Reduktion von Kosten und Zeitaufwand kommen Verbundwerkstoffe aus Geokunststoffen, z.B. Geotextilien, zum Einsatz. Die Anwendung dieser Materialien soll auf Zonen begrenzt werden, wo kritische Böden aufzufinden sind, da nicht jeder Boden unter einer dynamischen Belastung erodiert. (Kamalov et al. 2017)

Die Forschungsarbeiten von Alobaidi und Hoare aus den Jahren 1994, 1996 und 1999 zeigen, dass eine Zwischenschicht aus Sand bessere Eigenschaften in Bezug auf die Unterbindung des Feinteiltransports vorweisen kann, als es Geokunststoffe können. Ihrer Meinung nach führt jedoch eine Kombination beider Methoden zu einer Verbesserung der gesamten Struktur, vor allem in Bezug auf die Unterbindung des Feinteiltransportes und das gleichzeitig bessere Setzungsverhalten.

Untersuchungen haben ergeben, dass es durch Verwendung von Geokunststoffen zu einer signifikanten Verbesserung der Streckeneigenschaften kommt. Die Anwendungszonen liegen vor allem in Einschnitten mit hohem Wasserandrang und bei weicher Untergrundbeschaffenheit. Weiters führt eine Kombination aus granularer Trennschicht und Geogitter zu einem besseren Setzungsverhalten. (Indraratna und Salim 2005)

### 2.6.3 Schotterbettreinigung – Bodenaustausch

Ist es in bestimmten Bereichen einer Zugtrasse zu Spritzern gekommen, so kann nur noch ein sehr aufwendiger Sanierungsprozess Abhilfe schaffen. Entsprechend der Ursache der Entstehung sollte eine passende Methode gewählt werden. Die Sanierung eines verschmutzten Gleisschotters kann örtliches Ausgraben und Ersetzen

beinhalten. Wird jedoch nicht die zugrundeliegende Ursache behoben, z.B. Drainagewartung, so ist die Wahrscheinlichkeit sehr groß, dass das Problem erneut auftreten wird. Dies bewirkt wiederholende, lokale Sanierungsmaßnahmen und daraus resultierende höhere Kosten, welches im Grunde genommen ein unwirksamer Ansatz zur Lösung des Problems ist. (Hudson et al. 2016)

## 2.7 Laborversuch nach Burns et al. 2006

Wie bereits in Kapitel 2.6.2 beschrieben, ist eine gängige Lösung für die Verhinderung des Feinteiltransportes eine Kombination aus einer sandigen Zwischenschicht und Geokunststoffen. Um dies zu untersuchen, wird durch Burns et al. (2006) ein Pump-Index-Test vorgestellt. Das Ziel dieser Versuche ist es einen Vergleich zwischen einer Sand-Zwischenschicht mit einer Dicke von 40 mm, welche als Referenz dient, und einer „Sand-Geokunststoff-Schicht“ zu bekommen. Dabei werden vier Kriterien bewertet: Setzung, Steifigkeit, Unterboden-Festigkeit und Menge vom transportierten Tonmaterial. Es werden fünf Versuche mit unterschiedlichen Typen des Sand-Geokunststoffes, und ein Versuch mit der Sandschicht durchgeführt.

Der Sand-Geokunststoff wird hierbei beschrieben als eine Sandwich-Bauweise, mit einem mittig liegenden Geotextil, welches ober- und unterhalb von einer Sandschicht umgeben wird, wobei der Sand durch ein Polymer mit einem darin eingebetteten Geogitter zusammengehalten wird. Genauere Beschreibungen liegen für dieses Material aufgrund des Patentgesetzes nicht vor (Anwendungsnummer 061432.9).

Die Versuche wurden mit Hilfe des Pump-Index-Apparats, siehe Abb. 10, ausgeführt. Dieser weist einen Innendurchmesser von 230 mm auf. Hierbei wird der Unterboden (London Clay mit PL = 27 % und LL = 72 %) mit einer Höhe von 200 mm und einer Einbaudichte von  $1,45 \text{ g/cm}^3$ , bei einem Wassergehalt von 30 %, eingebaut. Die Oberfläche des Unterbodenmaterials wird bis zu einer Tiefe von 20 mm bis 30 mm aufgekratzt. Darauf folgt entweder der Einbau des Sand-Geokunststoffes (hier in Abb. 10 als „geocomposite“ beschrieben), oder der Sand-Zwischenschicht mit einer Dicke von 40 mm und einer Einbaudichte von  $1,70 \text{ g/cm}^3$ . Darüber werden die Gleisschotterkörner, mit einer Größe von 25 mm bis 50 mm und einer Mächtigkeit von 75 mm, händisch eingebracht.

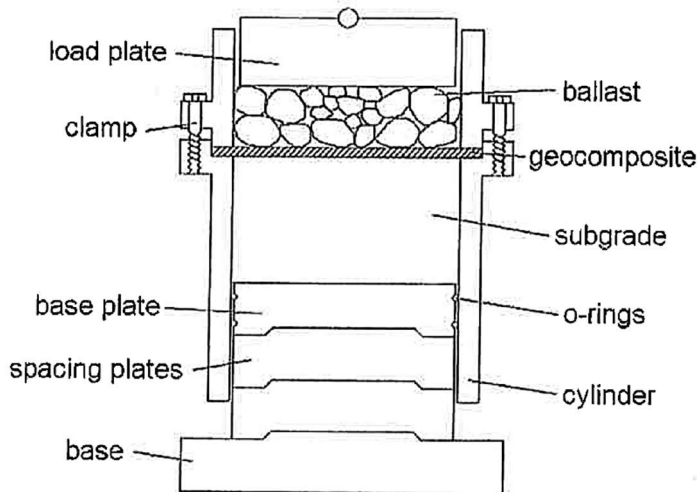


Abb. 10 Pump-Index-Apparat nach Burns et al. 2006

Nach dem Materialeinbau wird die Lastplatte auf den Gleisschotter platziert. Der Gleisschotter wird mittels Zugabe von 500 ml Wasser geflutet. Auf die Lastplatte wird eine dynamische Belastung aufgebracht. Diese Einwirkung entspricht einer Sinuswelle mit einer Frequenz von 3 Hz, innerhalb eines Kraftbereiches von 10 kPa bis 70 kPa. Die Dauer der Belastung liegt zwischen 200.000 und 300.000 Zyklen.

Während der Versuchsdurchführung werden Setzung und Belastung erfasst. Aufgrund dessen kann die Steifigkeit im Unterboden berechnet werden. Nach Beendigung des Versuchs wird die Lastplatte entfernt und es erfolgt eine visuelle Beurteilung durch den Prüfer. Das stehende Wasser wird sorgfältig aufgefangen und für die Bestimmung des Tonanteils getrocknet. Der Gleisschotter und der Sand-Geokunststoff werden entfernt. Danach erfolgt die Messung der Festigkeit des Unterbodens durch die Verwendung eines Penetrometers, „unterhalb“ des Gleisschotterkorns und „neben“ den Gleisschotterkörnern.

Die Ergebnisse der Messungen sind in den Abb. 11 bis Abb. 14 dargestellt. Dabei ist anzumerken, dass das Hauptaugenmerk auf die Ergebnisse des Versuchs mit der Sand-Zwischenschicht gelegt wird, welche die Bezeichnung „Sand“ vorweist. Aus Abb. 11 ist ersichtlich, dass die Setzungen in einem Bereich von ca. 5,4 mm und 6,4 mm liegen. Weiters kann beobachtet werden, dass innerhalb der ersten 100.000 Zyklen die Setzungen rapide zunehmen. Die Ergebnisse mit den Bezeichnungen M10, RT1, TP1, TP2 und TP3 beschreiben die unterschiedlichen Typen der Sand-Geokunststoff-Schicht.



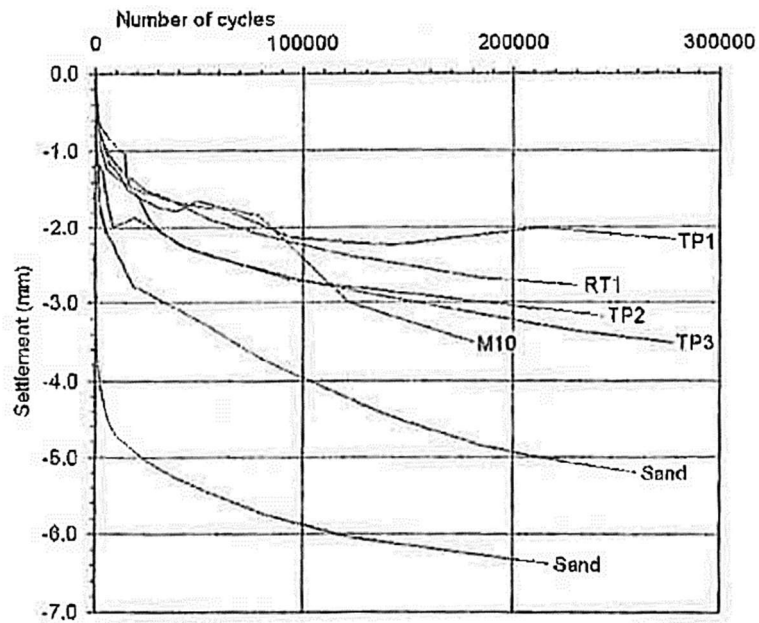


Abb. 11 Messwerte der Setzungen (Burns et al. 2006)

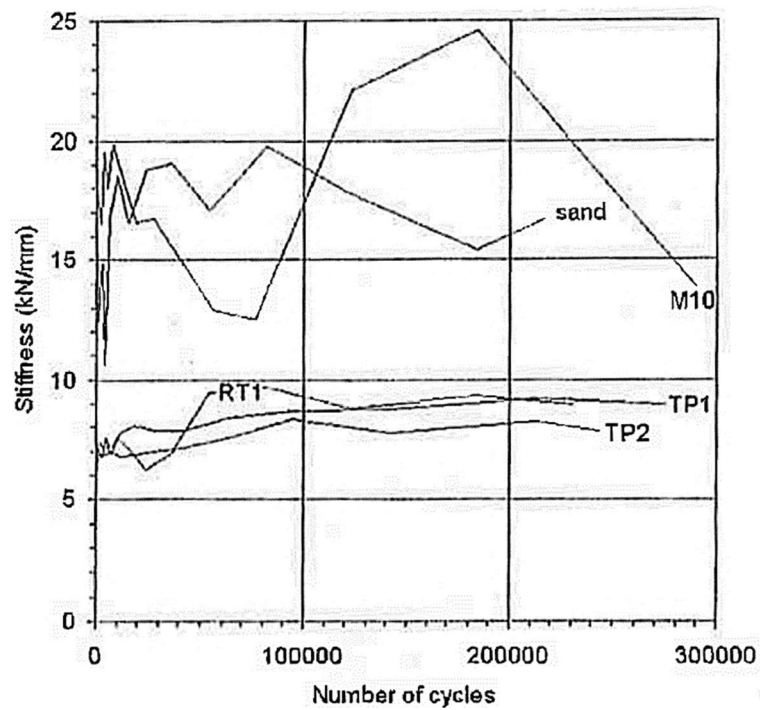


Abb. 12 Berechnete Steifigkeit (Burns et al. 2006)

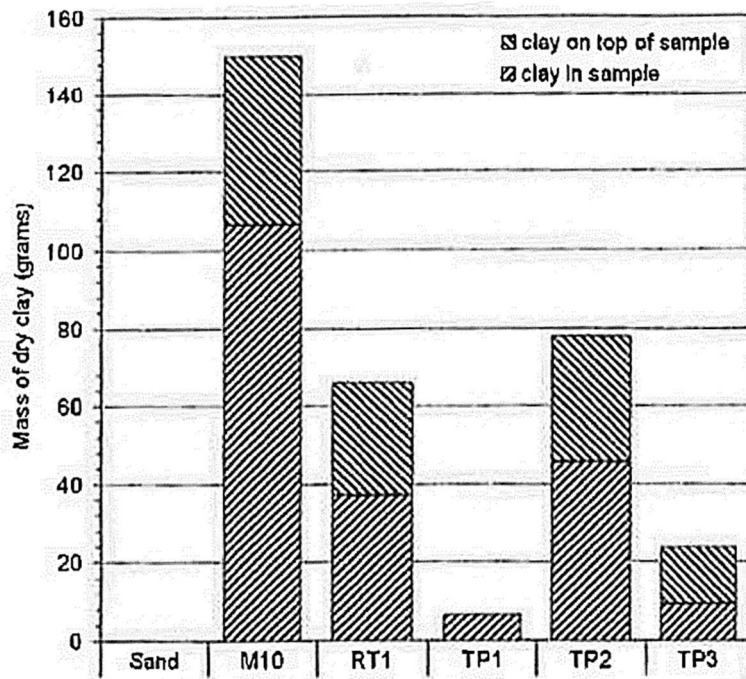


Abb. 13 Gemessene Menge der Feinteile (Burns et al. 2006)

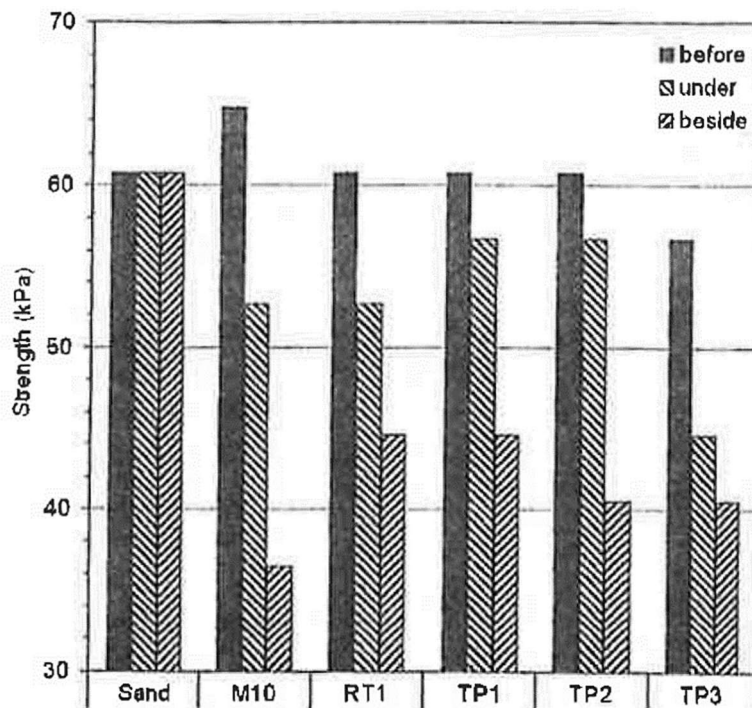


Abb. 14 Gemessene Steifigkeit vor und nach dem Versuch (Burns et al. 2006)

Der Hauptgrund für die Setzungen ist das Eindringen des Gleisschotters in den Untergrund. Das Resultat ist die Verdichtung der Sand-Zwischenschicht und ein proportionaler Anstieg der Steifigkeit in Bezug auf die Setzung.

Eine detaillierte Untersuchung des Eindringverhaltens eines Gleisschottereinkorns wird in weiterer Folge in dieser Arbeit untersucht.

## 3 Versuche

### 3.1 Methodik

Um Vergleiche der Ergebnisse durchführen zu können, werden Vereinfachungen im Vorfeld der Versuche durchgeführt.

Betrachtet man die Gleisschotter-Körner einer beliebigen Zugtrasse, wird man feststellen, dass zwei beliebige Körner nicht exakt die gleiche Form aufweisen. In der gegenständlichen Masterarbeit wird daher das Gleisschotter-Einzelkorn durch eine idealisierte Viertelkugel ersetzt. Mit Hilfe eines Prüfstandes wird die dynamische Belastung auf die Viertelkugeln simuliert. Dabei stellt der Prüfkörper einen vertikalen Schnitt durch die Kugel und den Unterboden dar, wobei die Schnittfläche für eine zweidimensionale Betrachtungsebene herangezogen wird.

Mit Hilfe eines Wegaufnehmers wird die Eindringtiefe der Kugel in den Boden und mit Hilfe einer Kraftmessdose, die Kraftübertragung auf die Kugel, gemessen. Unter Verwendung einer PIV-Kamera werden in gewissen Zeitabständen Fotos gemacht um in weiterer Folge Vergleiche zwischen den einzelnen Zeitpunkten bzw. Zyklen durchführen zu können.

Anhand von visuellen Beurteilungen soll untersucht werden, ob es in vereinfachter Weise möglich ist eine Aussage in Hinblick auf eine prozentuelle Verteilung von Verdichtung und Verdrängung des Bodens zu treffen. Hierbei liegt die Auswertung in der zweidimensionalen, vertikalen Schnittebene, ohne Betrachtung von dreidimensionalen Effekten.

Unter Zuhilfenahme der PIV-Analyse-Methode (siehe Kapitel 3.4.3) soll untersucht werden, wie groß der Einflussbereich im angrenzenden Boden ist und in welche Richtungen sich die Bodenbewegungen ausbreiten. Zusätzlich wird diese Methode zur Auswertung der Einflusstiefe und als Hilfsmittel für die visuelle Beurteilung verwendet.

Die Versuchsdurchführung erfolgt mit einer Parametervariation, wobei unterschiedliche Kornverteilungen, Wassergehalte und Stückzahlen von idealisierten Kugeln untersucht werden.

### 3.2 Gleisschotter

Der Gleisschotter ist ein Hauptbestandteil des Oberbaus von Zugtrassen in herkömmlicher Bauweise. Dieser ist ein granulares Haufwerk, bestehend aus

Gesteinskörnern der Größe von 32 mm bis 63 mm Korngröße, wie in Abb. 15 dargestellt. Wie man dem Begriff „Haufwerk“ entnehmen kann, handelt es sich hierbei um ein willkürliches Aufliegen des Kornes auf dem Unterboden. Dabei kann das Einzelkorn mit einer flachen Seite, mit einer spitzen Ecke oder in einer Mischform beider mit dem Unterboden in Berührung kommen. Aufgrund dieses Zufallsprinzips müssen entsprechende Vereinfachungen getroffen werden.



Abb. 15 Gleisschotterkörner in unterschiedlichen Formen

Wie bereits in Kapitel 3.1 erwähnt, wird statt dem Gleisschotter-Einzelkorn eine idealisierte Viertelkugel, siehe Abb. 16, verwendet. Die Kugel beschreibt dabei eine Mischform aus der flachen Seite und der spitzen Ecke eines Gleisschotters. Der Durchmesser der ganzen Kugel beträgt 35 mm und liegt somit innerhalb der Korngrößenverteilung des Gleisschotters. Das bedeutet, dass keine Modellparameter für die Kugel berücksichtigt werden müssen und die Kugel ohne Maßstab einem Gleisschotterkorn entspricht.

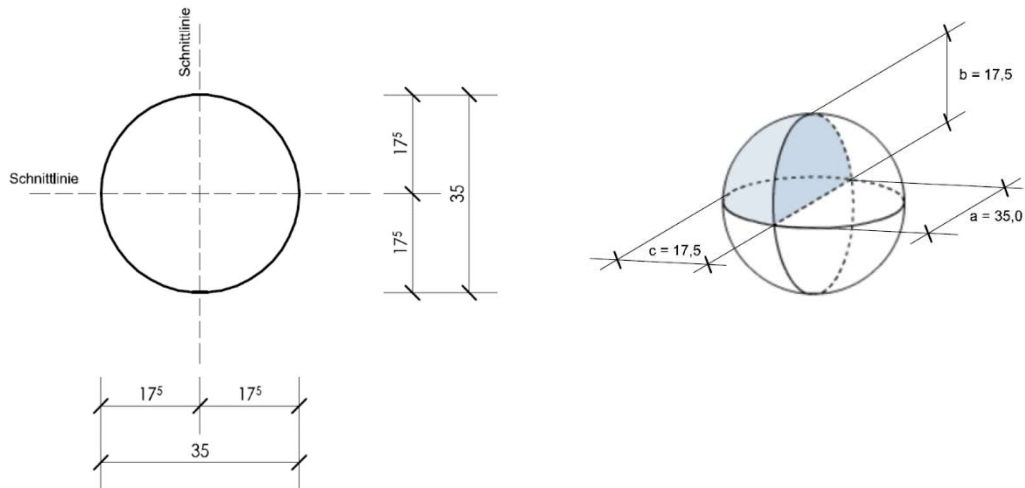


Abb. 16 Planliche Darstellung der idealisierten Kugel

In weiterer Folge wurde die Kugel geviertelt und nummeriert. Abb. 17 zeigt die idealisierten Viertelkugeln und Tab. 1 beschreibt die Abmessungen, das Volumen und das Gewicht der einzelnen Viertelkugeln.



Abb. 17 Idealisierte Viertelkugeln

Tab. 1 Abmessungen Viertelkugel

Kugel Nr.	a	b	c	V	G
	[mm]	[mm]	[mm]	[cm <sup>3</sup> ]	[g]
1	34,75	18,85	16,80	5,782	6,6686
2	34,85	18,80	16,75	5,766	6,6507
3	34,80	17,30	16,75	5,267	5,9652
4	34,85	16,35	16,85	5,032	5,5366

Die Viertelkugeln bestehen aus PVC. Es ist zu berücksichtigen, dass zwischen PVC und Boden ein anderer Reibungskoeffizient vorhanden ist, als zwischen Gleisschotter

und Boden. Um den genauen Unterschied zu bestimmen wurden entsprechende Reibungsversuche durchgeführt.

Hierbei wurden Vorversuche mittels PVC- und Stahlkugel durchgeführt. Idealisierter Gleisschotter in Kugelform wurde nicht verwendet, da seine Herstellung sehr aufwendig ist. Demzufolge wurden nur Vergleiche zwischen PVC und Stahl vorgenommen. Dabei wurden keine Unterschiede in Bezug auf das Eindringen festgestellt und der Reibungskoeffizient folglich vernachlässigt.

### 3.3 Prüfstand

Der Prüfstand besteht aus der Versuchsmaschine, dem Steuerungselement für die Drehzahl, dem Behälter und der Messtechnik und dient der Simulation einer Zugüberfahrt über einen bestimmten Punkt einer Zugtrasse.

#### 3.3.1 Versuchsmaschine

Abb. 18 zeigt die Versuchsmaschine, welche für die Durchführung der einzelnen Versuche verwendet wurde. Diese wurde von Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Baurat h.c. Helfried Breyman geplant sowie zur Herstellung freigegeben und dem Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik an der TU Graz zur Verfügung gestellt. Das Gerät wird dabei wie folgt unterteilt:

- (1) Motor
- (2) kreisförmige Metallscheibe mit Einkerbungen
- (3) Konstruktion für die Kraftweiterleitung
- (4) Einstellschrauben für die Kraftgröße
- (5) Mittelplatte mit dynamischer Vertikalbewegung
- (6) Kraftplatte mit dynamischer Vertikalbewegung
- (7) Wegaufnehmer
- (8) Kraftmessdose

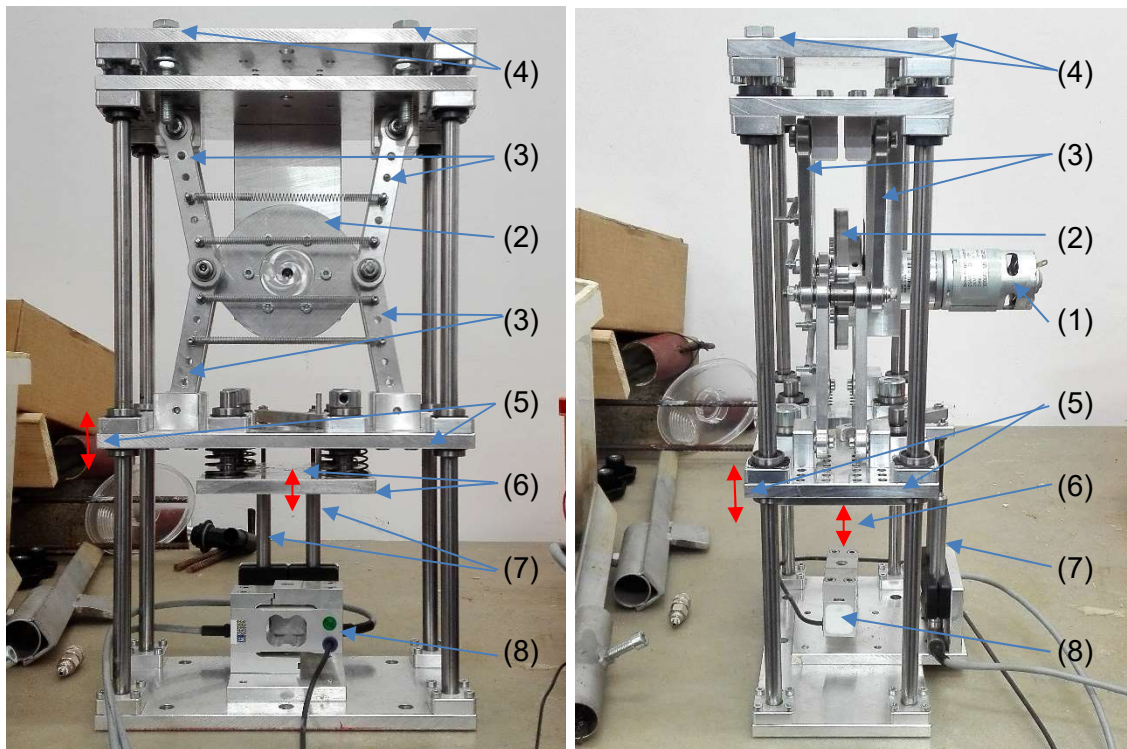


Abb. 18 Versuchsmaschine

Der Motor (1) wird über das Steuerungselement mit elektrischer Energie versorgt und als Folge dessen kann in Abhängigkeit der Spannung, die Drehzahl des Motors geregelt werden (siehe Kapitel 3.3.2). Die Drehbewegung des Motors treibt über eine direkte Verbindung die kreisförmige Metallscheibe mit den Einkerbungen (2) an. Diese Einkerbungen dienen der Simulation einer Achsüberfahrt eines Zugwagons. Bei den Laborversuchen nach Burns et al. (2006) wurde die Einwirkung als Sinuswelle aufgebracht. Solch eine Sinuswelle ist eine idealisierte Modellierung einer Zugüberfahrt. Die in Abb. 19 dargestellte Belastungskurve, welche aufgrund der Einkerbungen in der kreisförmigen Metallscheibe entsteht, bildet eine realistischere Zugüberfahrt nach.



Abb. 19 Belastungskurve aus der Versuchsmaschine

Die Drehbewegung aus der kreisförmigen Metallscheibe (2) wird mit Hilfe der Konstruktion für die Kraftweiterleitung (3) in eine vertikale Bewegung umgewandelt.

Diese wird weitergeleitet in die Mittelplatte (5) und darauffolgend in die Kraftplatte (6). In weiterer Folge werden die Lasten auf die idealisierte Viertelkugel übertragen und in den Boden weitergeleitet. Mittels der Einstellschrauben (4), im oberen Bereich der Versuchsmaschine, kann der Kraftbereich mechanisch eingestellt werden. Die entstehenden vertikalen Bewegungen der Mittelplatte (5) und Kraftplatte (6) werden mittels induktiver Wegaufnehmer (7) gemessen. Die Kraftmessdose (8) dient der Messung der aufgebrauchten Belastung auf die Viertelkugeln.

### 3.3.2 Steuerungselement

Abb. 20 stellt das Steuerungselement dar, welches als Energieversorgung für den Motor dient. Mit Hilfe eines digitalen Multimeters, siehe Abb. 21, kann die genaue Spannung gemessen werden. Mit der zusätzlichen Information aus den Messungen von Kraftmessdose und induktiven Wegaufnehmern können die genaue Drehzahl und Frequenz berechnet werden.



Abb. 20 Steuerungselement



Abb. 21 Spannungsmessung mit digitalem Multimeter



### 3.3.3 Behälter

Entsprechend den begrenzten Abmessungen des Prüfstandes wurde ein Behälter konstruiert, welcher als Abgrenzung für den Versuchskörper verwendet wird (siehe Abb. 23). Die Abmessungen des Metallbehälters wurden entsprechend der Geometrie der Versuchsmaschine gewählt, wie in Abb. 22 dargestellt. Auf der Vorderseite befindet sich eine Öffnung, welche durch eine Acrylglasscheibe begrenzt ist und als zweidimensionale Betrachtungsebene für die Versuchsreihe dient.

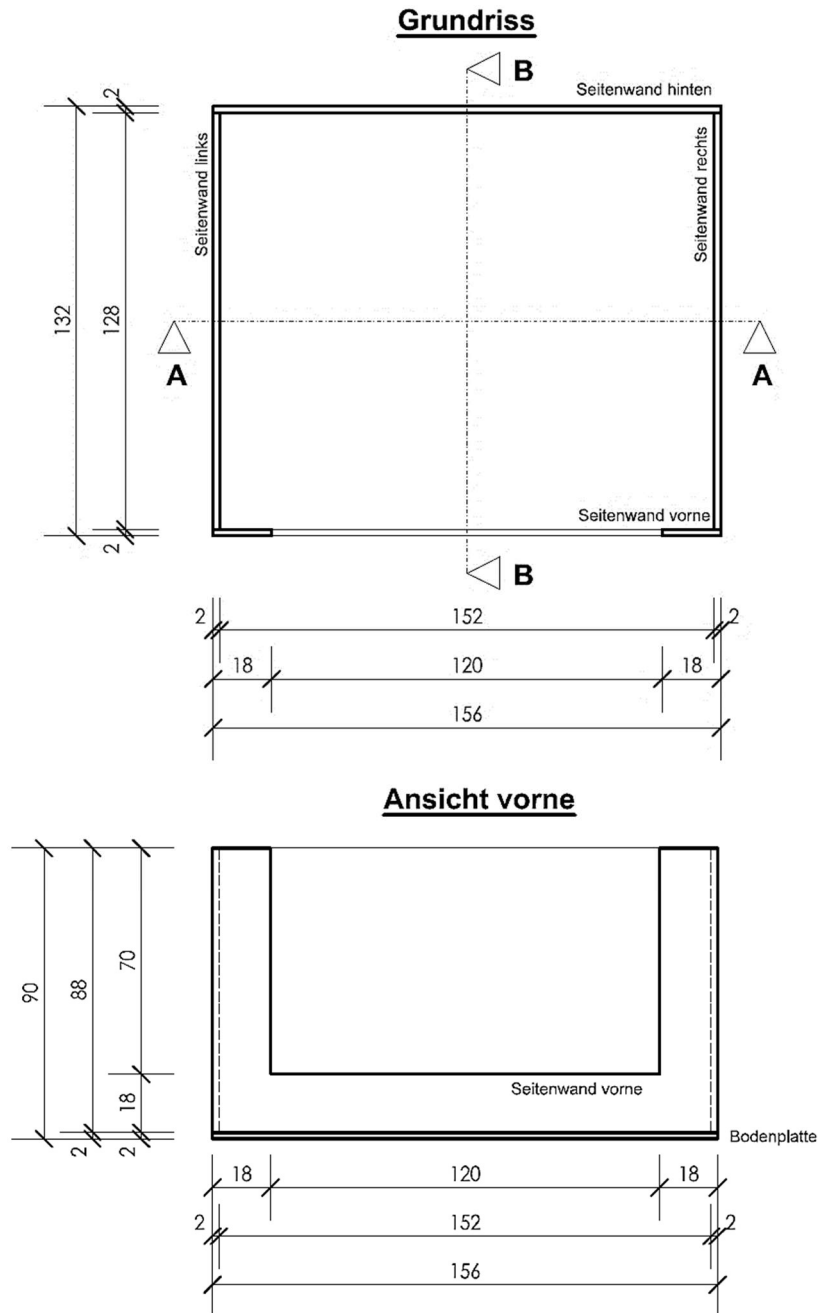


Abb. 22 Abmessungen des Versuchsbehälters

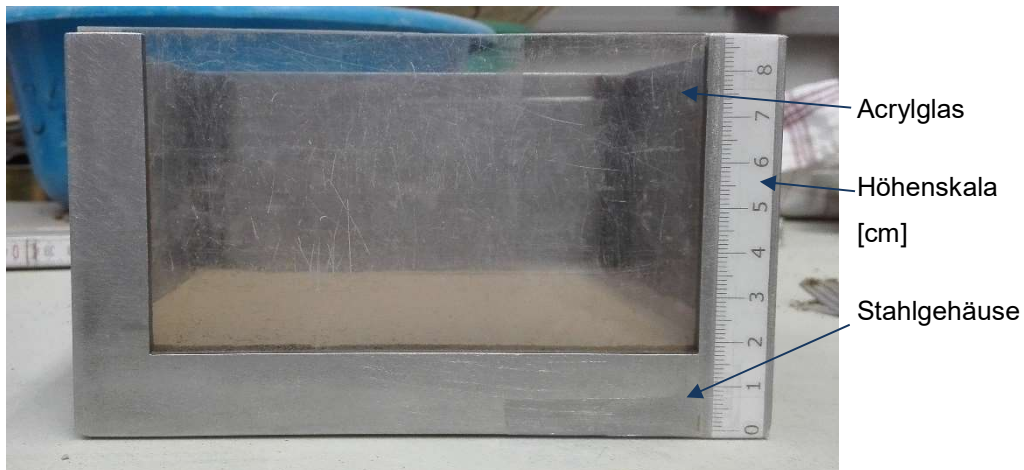


Abb. 23 Versuchsbehälter

### 3.4 Messtechnik

Damit Quantifizierung und Vergleich der einzelnen Versuche möglich sind, muss eine entsprechende Messtechnik vorhanden sein. In der gegenständlichen Arbeit wurden während der Versuche Messsensoren für die Messung von Weg und Kraft sowie eine PIV-Kamera für die Erfassung der einzelnen Zustände zu bestimmten Zeitpunkten mittels Fotografie verwendet.

#### 3.4.1 Wegmessung

Für die Messung der Setzungen wird ein induktiver Standard-Wegaufnehmer, mit losem Tauchanker der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM) verwendet (siehe Abb. 24 und Abb. 25).

K-WA-L-100W – Messbereich 100 mm

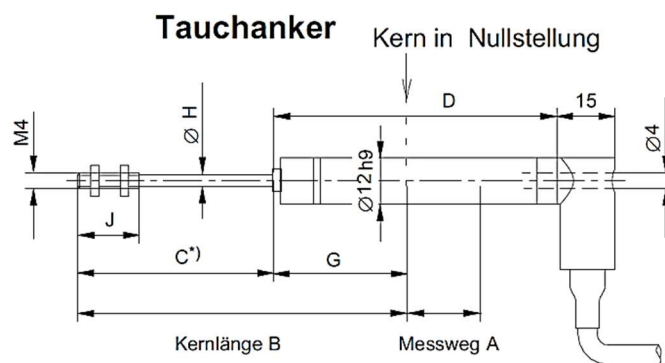


Abb. 24 Planliche Darstellung des Wegaufnehmers (HBM 2018b)

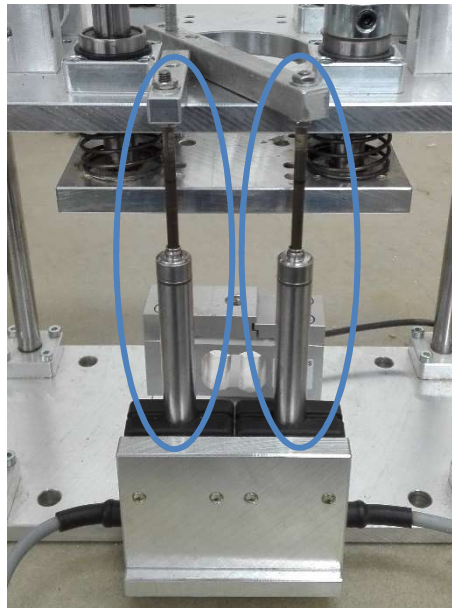


Abb. 25 Wegaufnehmer an der Versuchsmaschine

### 3.4.2 Kraftmessung

Die Messung der einwirkenden Kräfte erfolgt über einen S2M-Kraftaufnehmer der Firma Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH (HBM) (siehe Abb. 26 und Abb. 27).

K-S2M-MONT-001K – Messbereich 0 N bis 1.000 N

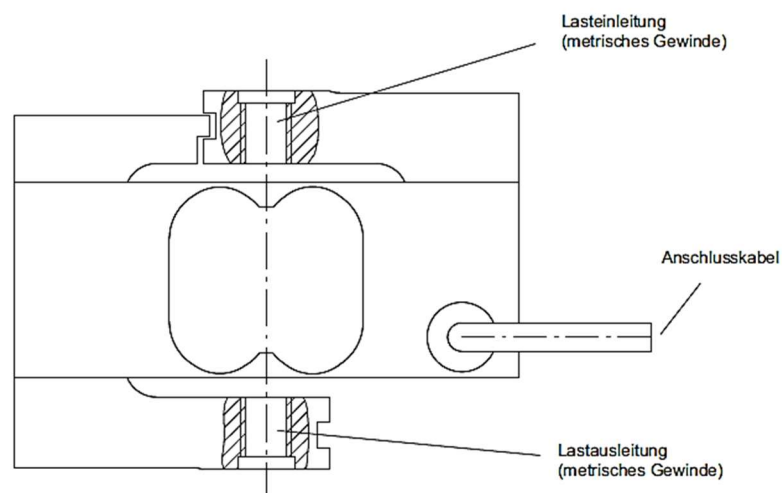


Abb. 26 Prinzip Kraftaufnehmer S2M (HBM 2018a)

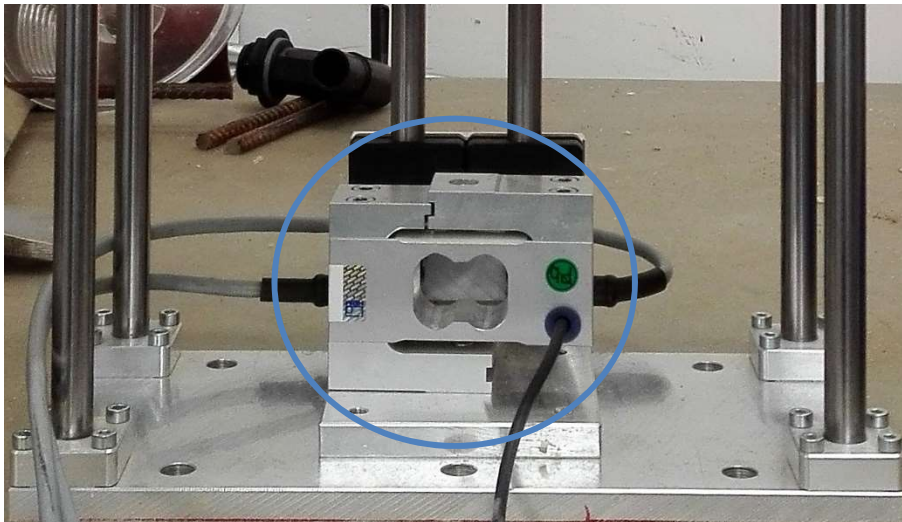


Abb. 27 Kraftmessdose an der Versuchsmaschine

Während der Versuche verläuft die Kraft über die idealisierten Viertelkugeln in den Boden und folgend in den Metallbehälter, wo sie in der Mitte dessen gemessen wird. Dabei wird die Dämpfung des Bodens mitgemessen. Aufgrund des vorliegenden Aufbaues ist es nicht möglich die direkte Kraft auf die Kugel ohne der Dämpfung zu messen.

### 3.4.3 PIV – Analyse

Die Particle-Image-Velocimetry, kurz PIV genannt, ist das in der Praxis am häufigsten verwendete Lichtschnittverfahren. Es werden mithilfe einer Digitalkamera Fotosequenzen in gewissen Zeitabständen aufgenommen und miteinander verglichen, um eine Partikelbewegung zu detektieren. Dieses Analyseverfahren wird vor allem zur Untersuchung von Bewegungen in Fluiden verwendet. Im Bereich des Wasserbaus verwendet man sogenannte Particle-Tracer zur Ermittlung der Bewegungsrichtung. In der vorliegenden Arbeit werden keine zusätzlichen Partikel benötigt, da die Körner des Bodens eine ausreichende Größe für die Auswertung aufweisen. (Woisetschläger 2015)

Die Berechnungen der PIV-Analyse erfolgen mithilfe einer speziellen Software. Hierbei wurde die Freeware PIVlab 1.41 von Thielicke und Stamhuis (2018) verwendet. Dies ist ein EDV-Programm, welches in MATLAB implementiert wird. Dabei werden die Fotosequenzen in die Software geladen und der Suchbereich eingegrenzt. Dieser wird in weiterer Folge in kleine Bildbereiche unterteilt, sogenannte Interrogation-Areas und die Berechnung gestartet. Das Ergebnis sind Verschiebungsvektoren und Geschwindigkeitsfelder der einzelnen Partikel. Durch die Bereichsvalidierung werden fehlerhafte Vektoren aus dem Ergebnis gelöscht. Mit einer zusätzlichen

Berechnungssoftware ist es möglich das Vektorfeld in ein Dehnungsfeld zu transformieren, wobei dies nicht Bestandteil dieser Arbeit ist. (Woisetschläger 2015)

Für die Bilderfassung wird die Kamera Prosilica GX 1920 der Firma Allied Vision verwendet (Abb. 28).





Abb. 28 PIV-Kamera Allied Vision Prosilica GX

### 3.5 Böden

Es ist vorab anzumerken, dass die verwendeten Böden der vorliegenden Masterarbeit durch Herrn Kevin Wiedemaier im Zuge der Ausarbeitung seiner Masterarbeit am Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik zusammengemischt und hergestellt wurden. In weiterer Folge wird die Ermittlung der einzelnen Bodenparameter nicht näher beschrieben, sondern nur die Ergebnisse dieser dargestellt.

Für die Versuche werden drei verschiedene Böden verwendet, wie der Tab. 2 entnommen werden kann. Dabei handelt es sich um feinkörnige Böden mit unterschiedlichem Feinkornanteil. In den nachfolgenden Kapiteln sind die bodenmechanischen Kennwerte der einzelnen Bodentypen zusammengefasst.

Tab. 2 Böden

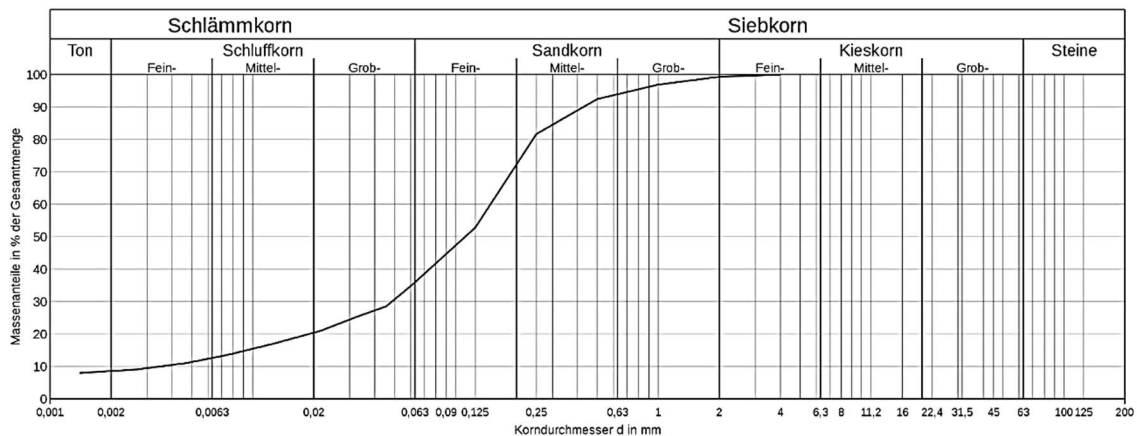
Bodentyp	Bezeichnung	Beschreibung	Bild
1	FSa, si	Feinsand, schluffig	
2	Si, fsa	Schluff, feinsandig	
3	MSa, si	Mittelsand, schluffig mit Ausfallkörnung	

### 3.5.1 Boden 1 – Feinsand, schluffig



Abb. 29 Boden 1 (FSa, si)

- Kornverteilung**



Lab.Nr.	Signatur	Anteile kleiner $\phi$ [mm]					Anteile größer $\phi$ [mm]					Bodenart	D10	D30	D60	Cu	Cc
		Ton	Schluff	Sand	Kies	Steine											
19950-1	—	-	8,6	27,4	63,4	-	-	2: 0,7	cl' si Sa	0,0035mm	0,0486mm	0,1486mm	42,46	4,54			

Abb. 30 Korngrößenverteilung Boden 1 (FSa, si)

- Korndichte**

$$\rho_{S,B1} = 2,78 \text{ g/cm}^3$$

- Konsistenzgrenzen**

$$W_L = 22,5 \%$$

$$W_P = 22,0 \%$$

$$I_P = 0,5 \%$$

$$I_C = -$$

- Ergebnisse aus Proctorversuch**

$$W_{Pr} = 13,7 \%$$

$$\rho_{Pr} = 1,829 \text{ g/cm}^3$$

### 3.5.2 Boden 2 – Schluff, feinsandig



Abb. 31 Boden 2 (Si, fsa)

#### • Kornverteilung

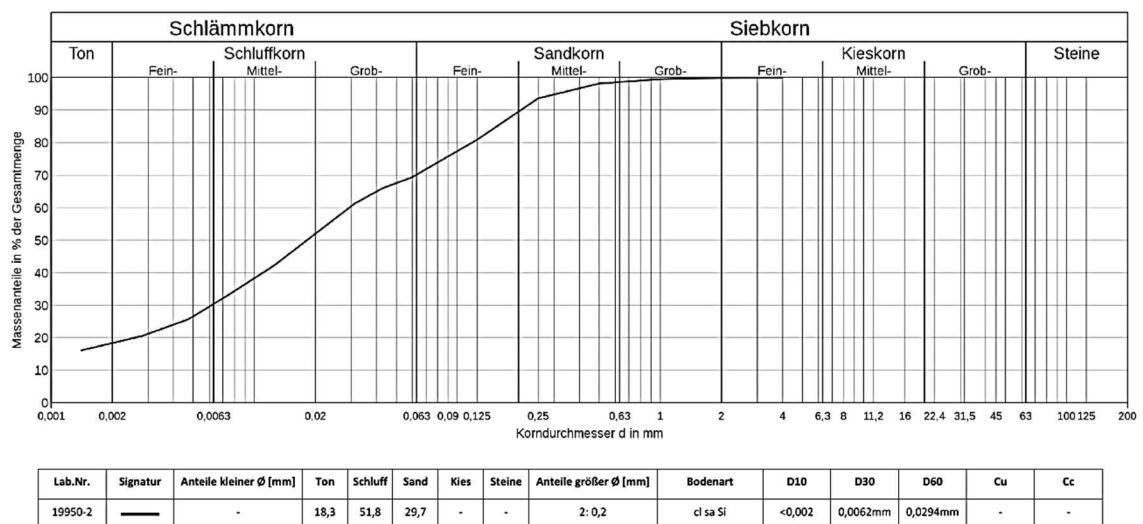


Abb. 32 Korngrößenverteilung Boden 2 (Si, fsa)

#### • Korndichte

$$\rho_{s,B2} = 2,74 \text{ g/cm}^3$$

#### • Konsistenzgrenzen

$$W_L = 22,6 \%$$

$$W_P = 17,6 \%$$

$$I_P = 4,9 \%$$

$$I_C = -$$

#### • Ergebnisse aus Proctorversuch

$$W_{Pr} = 13,1 \%$$

$$\rho_{Pr} = 1,981 \text{ g/cm}^3$$

### 3.5.3 Boden 3 – Mittelsand, schluffig mit Ausfallkörnung



Abb. 33 Boden 3 (MSa, si)

- Kornverteilung**

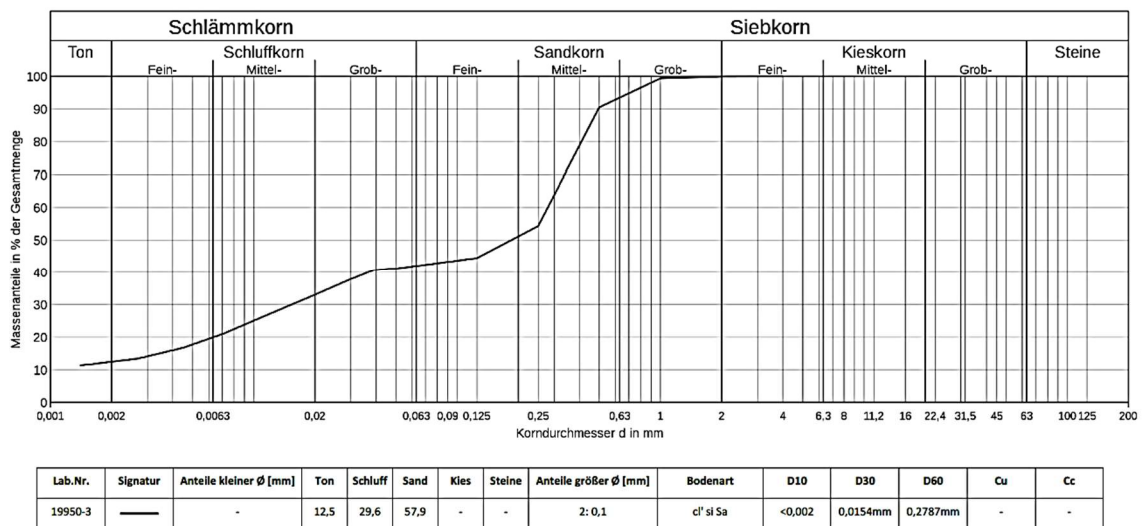


Abb. 34 Korngrößenverteilung Boden 3 (MSa, si)

- Korndichte**

$$\rho_{s,B3} = 2,70 \text{ g/cm}^3$$

- Konsistenzgrenzen**

$$W_L = 18,4 \%$$

$$W_P = 14,2 \%$$

$$I_P = 4,2 \%$$

$$I_C = -$$

- Ergebnisse aus Proctorversuch**

$$W_{Pr} = 10,6 \%$$

$$\rho_{Pr} = 2,050 \text{ g/cm}^3$$



### 3.5.4 Zusammenfassung der Böden

Tab. 3 Zusammenfassung der Bodenparameter

Boden Nr.	Korngrößenverteilung			Korn- dichte	Konsistenzgrenzen			Proctor	
	Cl	Si	Sa	$\rho_s$	W <sub>L</sub>	W <sub>P</sub>	I <sub>P</sub>	W <sub>PR</sub>	$\rho_{PR}$
[-]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]	[%]	[%]	[%]	[%]	[g/cm <sup>3</sup> ]
1	8,6	27,4	63,4	2,78	22,5	22,0	0,5	13,7	1,829
2	18,3	51,8	29,7	2,74	22,6	17,6	4,9	13,1	1,981
3	12,5	29,6	57,9	2,70	18,4	14,2	4,2	10,6	2,050

### 3.6 Krafteinwirkung auf ein Gleisschotter-Einzelkorn

Es gibt kaum Informationen über die Kraftgröße bzw. den Kraftgrößenbereich, welcher auf ein einzelnes Gleisschotterkorn im Übergangsbereich zwischen Gleisschotter und Unterboden wirkt. Für die Versuchsdurchführung wird ein Kraftgrößenbereich benötigt, welcher von der Maschine auf die Viertelkugel aufgebracht werden muss. Dementsprechend wurde eine vereinfachte Berechnung für die Ermittlung der einwirkenden Kraftgröße auf ein einzelnes Gleisschotterkorn durchgeführt.

Aus Abb. 35 kann man entnehmen, dass bei einer Wagenradlast von 125 kN eine Flächenpressung auf das Planum in einer Größe von circa  $p = 10 \text{ N/cm}^2$  wirkt. Das entspricht einer Belastung von  $100 \text{ kN/m}^2$  bzw.  $100 \text{ kPa}$ .

Bei den Versuchen von Duong et al. (2014b) wurde ein Kraftgrößenbereich von 30 kPa bis 100 kPa gewählt. Somit liegt hier die maximale Spannung im selben Bereich wie zuvor beschrieben. Im Vergleich dazu führten Burns et al. (2006) ihre Versuche innerhalb eines Kraftgrößenbereichs von 30 kPa bis 70 kPa durch. Hier ist jedoch anzumerken, dass die Korngrößenverteilung des Gleisschotters im Bereich von 25 mm bis 50 mm liegt und nicht wie üblich zwischen 32 mm und 63 mm.

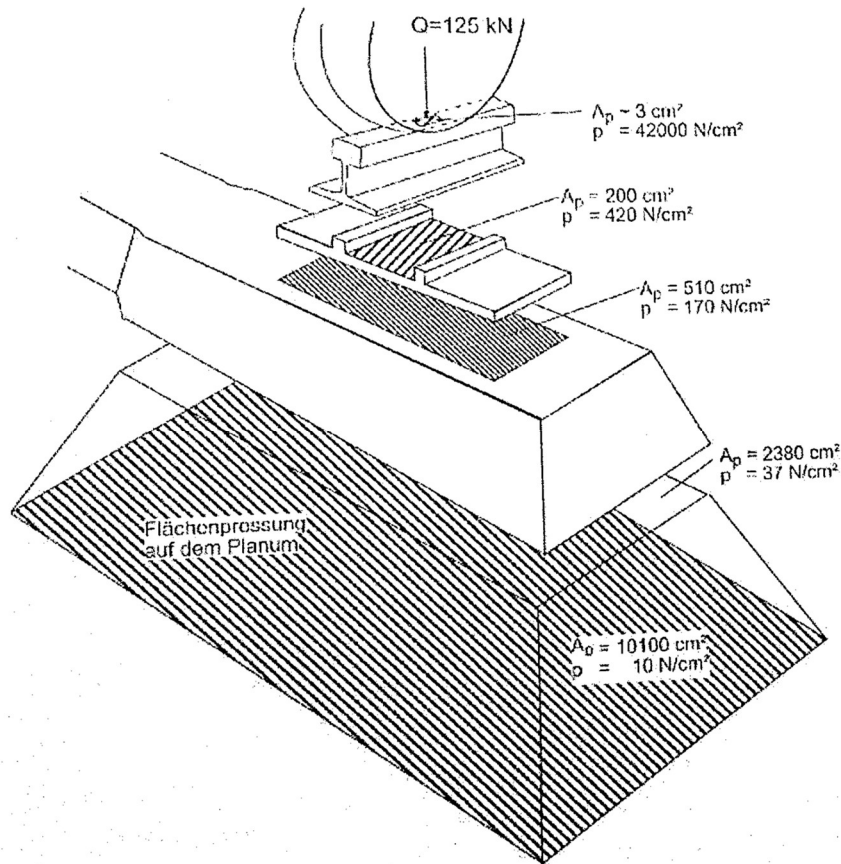


Abb. 35 Lastabtragung vom Rad in den Unterbau (Veit und Walter 2012/2013)

Entsprechend der zuvor beschriebenen Kraftverteilung wird eine Flächenpressung in einem Bereich von 30 kPa (entspricht der Spannung auf dem Planum aus dem Eigengewicht des Oberbaus) bis 100 kPa (entspricht der Spannung auf dem Planum zum Zeitpunkt der Radlast) gewählt.

In weiterer Folge stellt sich die Frage nach der Kraftgröße auf ein einzelnes Gleisschotterkorn im Übergangsbereich des Planums. Hier muss berücksichtigt werden, dass die Anzahl der Gleisschotterkörner auf einer vordefinierten Fläche sehr stark variieren kann. Dabei wird eine Vereinfachung, wie in Tab. 4 dargestellt, durchgeführt. Die Form des Gleisschotterkorns entspricht in diesem Fall einer Kreisfläche mit den Durchmessern von 32 mm, 35 mm bzw. 63 mm. Dabei sollen die Kreisflächen mit den Durchmessern 32 mm und 63 mm die minimal und maximal mögliche Stückanzahl repräsentieren. Zusätzlich muss eine nutzbare Porosität von circa 20 % innerhalb des Gleisschotters berücksichtigt werden.

Die Berechnung erfolgt in Tab. 4 und Tab. 5. Daraus resultiert Folgendes:

Die Kraftgröße, welche auf ein einzelnes Gleisschotterkorn wirkt, kann bei einer Bandbreite von 30 kPa bis 100 kPa der gleichmäßig verteilten Last auf ein Planum und

bei unterschiedlicher Stückanzahl von Kugeln bei einer hohen Lagerungsdichte in einem Bereich von 30 N bis 390 N eingegrenzt werden. Das Ergebnis repräsentiert eine sehr große Bandbreite. Die Abweichungen vom Mittelwert (210 N) betragen circa  $\pm 85\%$ . Der Grund dafür ist die zufällige Streuung der Lage und Form der einzelnen Gleisschotterkörner auf einer vordefinierten Fläche. Für die Versuchsreihe in dieser Arbeit wird diese Berechnung als ausreichend erachtet. Das bedeutet, wenn die einwirkende Kraft auf eine idealisierte Kugel innerhalb des Kraftbereiches von 30 N bis 390 N liegt, so sind dies reale Bedingungen und es müssen keine Modellparameter berücksichtigt werden.

Für den Fall, dass auf der vordefinierten Fläche nur Kugeln mit dem Durchmesser 35 mm zu liegen kommen, würde der Kraftbereich 36 N bis 120 N betragen. Beim Gleisschotter wird davon ausgegangen, dass nicht nur eine bestimmte Korngröße zu liegen kommt, sondern verschiedene Größen in unterschiedlicher Stückanzahl. Somit ist dieser Kraftbereich, von 36 N bis 120 N nicht maßgebend für die weiteren Untersuchungen.

Tab. 4 Berechnung Kraftgröße auf Einzelkorn Teil 1

Gleisschotter	Form	Abmessungen	Fläche Korn	Fläche Planum	Stück	Porosität	Stück
[-]	[-]	[mm]	[cm <sup>2</sup> ]	[cm <sup>2</sup> ]	[Stk.]	[-]	[Stk.]
1	○	32	8,04	10.100	1255	0,2	1.004
2	○	35	9,62	10.100	1049	0,2	839
3	○	63	31,17	10.100	324	0,2	259

Tab. 5 Berechnung Kraftgröße auf Einzelkorn Teil 2

Gleisschotter	Stück	Planum					Einzelkorn	
		A	p <sub>MIN</sub>	p <sub>MAX</sub>	F <sub>MIN</sub>	F <sub>MAX</sub>	F <sub>MIN</sub>	F <sub>MAX</sub>
[-]	[Stk.]	[cm <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[kN/m <sup>2</sup> ]	[N]	[N]	[N]	[N]
1	1.004	10.100	30	100	30.300	101.000	<b>30</b>	101
2	839	10.100	30	100	30.300	101.000	36	120
3	259	10.100	30	100	30.300	101.000	117	<b>390</b>

### 3.7 Prüfaufbau und Versuchsvorbereitung

#### 3.7.1 Hauptversuche 1

Bei den Hauptversuchen 1 wird eine idealisierte Viertelkugel auf den Boden aufgebracht und einer dynamischen Belastung ausgesetzt. Der Aufbau dieses Versuchs ist in Abb. 36 dargestellt.

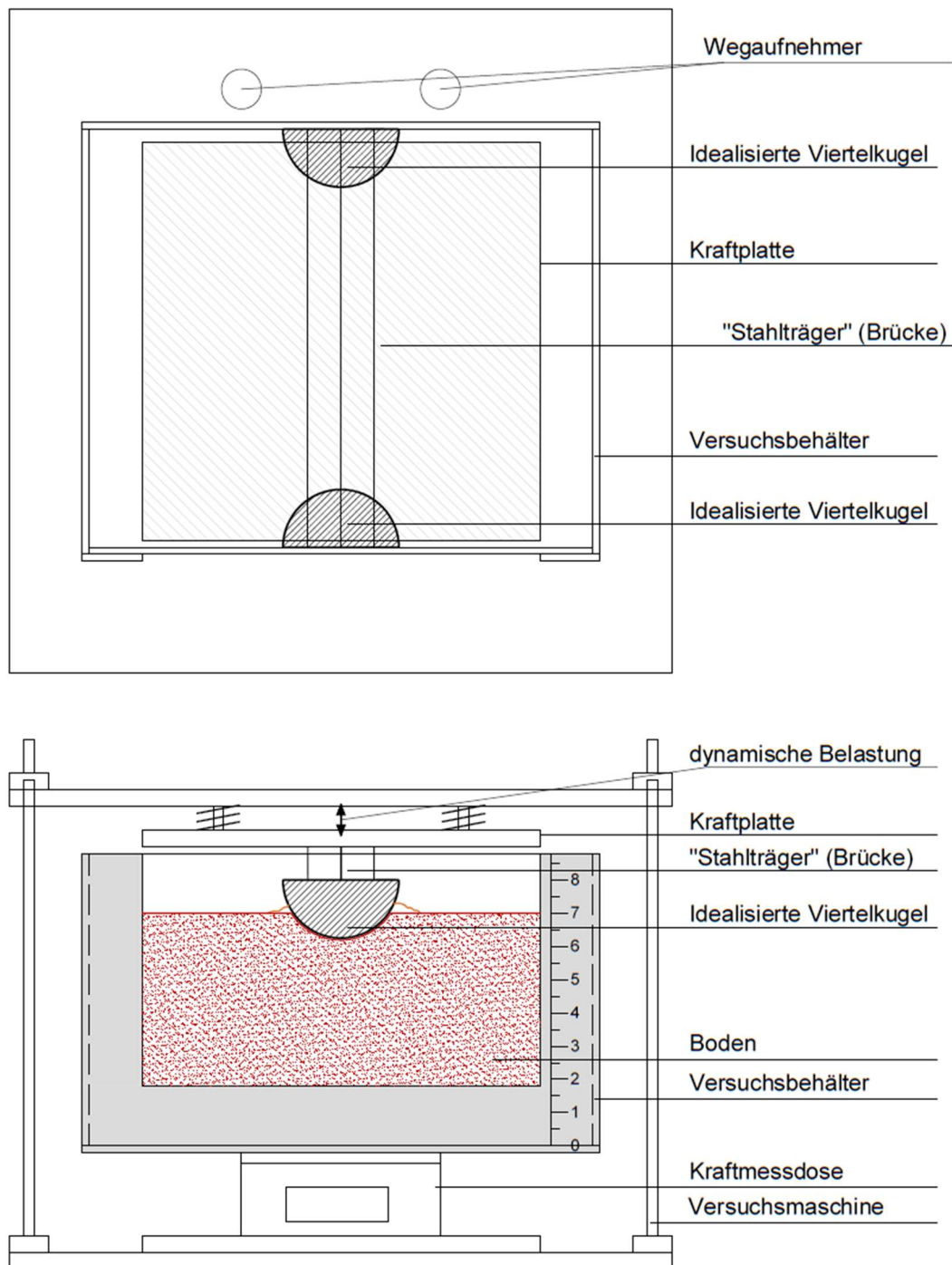


Abb. 36 Versuchsaufbau Hauptversuch 1

### 3.7.2 Hauptversuche 2

Zusätzlich zu den vorher genannten Hauptversuchen 1, werden die Hauptversuche 2 durchgeführt. Abb. 37 zeigt eine Übersicht vom Aufbau des Versuchs. Hierbei soll untersucht werden, ob es zu einer Art „Gruppenwirkung“ bei zwei Viertelkugeln nebeneinander kommt. Dabei werden die Viertelkugeln in einem Abstand von zwei Zentimeter nebeneinander platziert und einer dynamischen Belastung ausgesetzt.

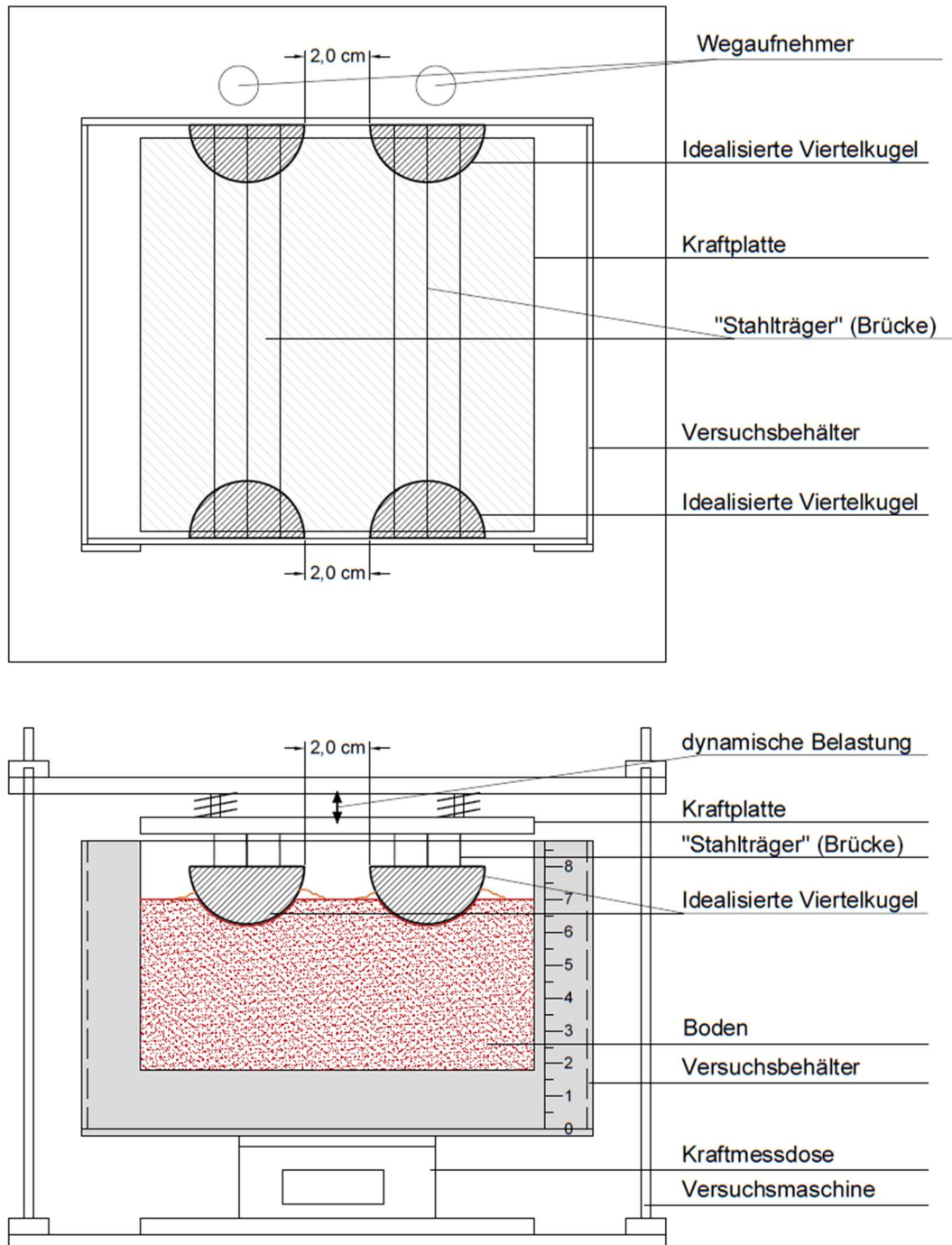


Abb. 37 Versuchsaufbau Hauptversuch 2

### 3.7.3 Kraftbereich

Der in Kapitel 3.6 ermittelte Kraftbereich liegt zwischen 30 N und 390 N. Beim Hauptversuch 1 sind zwei Viertelkugeln, eine liegt auf der Vorderseite und eine auf der Hinterseite des Versuchskörpers, aufgestellt. Diese bilden zusammen eine Halbkugel, welche einem einzelnen Gleisschotterkorn entspricht. Das bedeutet, dass hierbei die gemessene Kraft zwischen 30 N und 390 N liegen muss.

Beim Hauptversuch 2 sind in Summe vier Viertelkugeln vorhanden. Dies entspricht in Summe zwei separaten Halbkugeln und kann zwei einzelnen Gleisschotterkörnern zugeordnet werden. Somit steigt der Kraftbereich bei diesen Versuchen auf das doppelte und liegt zwischen 60 N und 780 N. In Tab. 6 sind die Werte für die Kraftbereiche der Hauptversuche zusammengefasst.

Tab. 6 Kraftbereich

Hauptversuch	Minimal	Maximal	Mittelwert
	[N]	[N]	[N]
1	30	390	210
2	60	780	420

### 3.7.4 Frequenzbereich

Für die Versuchsdurchführung wurde eine Zuggeschwindigkeit von 200 km/h gewählt. Mittels der Achsabstände eines Waggons, vereinfacht dargestellt in Abb. 38, und der Belastungskurve aus der Versuchsmaschine, siehe Abb. 39, kann die Frequenz berechnet werden. Diese beträgt zwischen zwei Achspaaren (Abstand 19 m), bei einer Zuggeschwindigkeit von 200 km/h, in etwa 2,91 Hertz. Ein einzelner Zyklus ist ein Lastwechsel zwischen zwei Achspaaren und dauert 0,344 s.

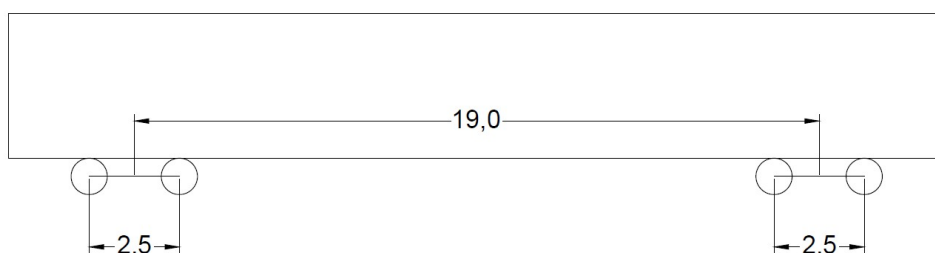


Abb. 38 Achsabstände Zugwaggon in Meter

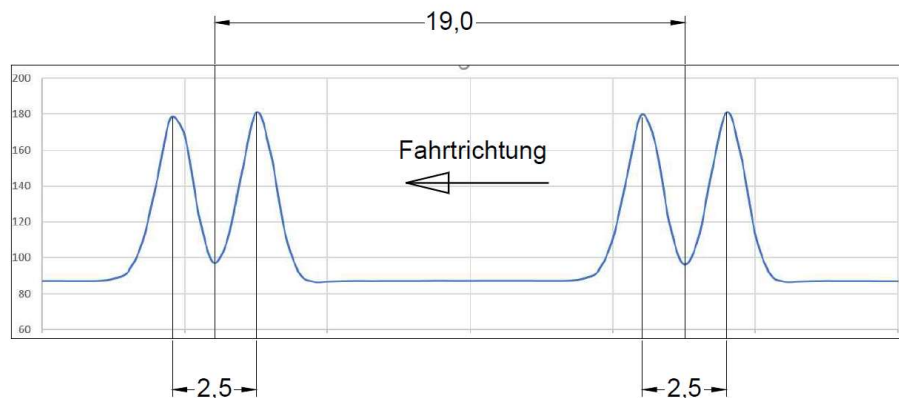


Abb. 39 Belastungskurve der Versuchsmaschine

### 3.7.5 Versuchsdauer

Die Versuche nach Burns et al. (2006), beschrieben in Kapitel 2.7, wurden einer Belastungsdauer von 200.000 bis 300.000 Zyklen ausgesetzt. Hierbei muss jedoch berücksichtigt werden, dass die Belastungskurve durch eine Sinuskurve simuliert wurde. Somit ist ein direkter Vergleich in Bezug auf die Versuchsdauer schwer möglich.

In der gegenständlichen Arbeit wird eine Belastungsdauer von 20.000 Lastwechseln gewählt. Dies entspricht einer Versuchsdauer von 1 h 54 min 40 sek.

Ziel ist es alle Versuche mit dieser Dauer durchzuführen. Es muss dabei berücksichtigt werden, dass die Kraftübertragung auf die Kugel während der gesamten Versuchsdauer gewährleistet ist. Der Test muss vorzeitig abgebrochen werden, wenn die Kraftplatte den Boden berührt, da ab diesem Zeitpunkt keine direkte Kraftweiterleitung auf die Viertelkugeln gegeben ist.

### 3.7.6 Parametervariation

Drei Faktoren, Boden, Wasser und dynamische Belastung haben einen signifikanten Einfluss auf die Entstehung von Mud Pumping. Die selben Faktoren haben ebenfalls einen großen Einfluss auf das Eindringverhalten von Gleisschotterkörnern. Dementsprechend werden folgende Parameter untersucht:

- **Korngrößenverteilung**

Die Variation in der Korngrößenverteilung des Bodens erfolgt durch die Verwendung von verschiedenen Böden (Boden 1, Boden 2 und Boden 3), welche in Kapitel 3.5 beschrieben sind.

- **Einbaudichte**

Es wurden Vorversuche mit unterschiedlichen Einbaudichten, durchgeführt. Ziel ist es eine gleichmäßige Verdichtung des Bodens über die Tiefe sicherzustellen. Die Ergebnisse aus den Vorversuchen zeigen, dass erst ab einer Einbaudichte von  $1,8 \text{ g/cm}^3$  keine Schichtungen mehr sichtbar sind. Somit wurde die Einbaudichte von  $1,8 \text{ g/cm}^3$  für alle drei Böden gewählt.

Weiters ist anzumerken, dass diese Einbaudichte beinahe der Proctordichte von Boden 1 ( $\rho_{Pr, B1} = 1,829 \text{ g/cm}^3$ ) entspricht.

- **Wassergehalt**

Der Wassergehalt ist ein äußerst wichtiger Parameter in Bezug auf das Eindringverhalten einer Viertelkugel. Für die vorliegende Masterarbeit werden Versuche mit unterschiedlichen Wassergehalten durchgeführt. Dabei werden folgende Abkürzungen verwendet:

- wP Wassergehalt Proctor – steht für den Proctor-Wassergehalt des jeweiligen Bodens
- wS Wasser „Stehend“ – steht für den Proctor-Wassergehalt des jeweiligen Bodens mit der Zugabe von 100 ml Wasser auf die Oberfläche des Probekörpers, 1 min vor Versuchsbeginn
- wL Wassergehalt Fließgrenze (LL) – steht für den Proctor-Wassergehalt des jeweiligen Bodens mit der Zugabe von der theoretisch notwendigen Wassermenge bis zum Erreichen der Fließgrenze des jeweiligen Bodens, 24 h vor Versuchsbeginn. Dieser Parameter gilt nur für die Versuchsreihe der Hauptversuche 2.

- **Dynamische Belastung**

Für die Durchführung der Versuche werden Kraftbereiche von etwa 25 N bis etwa 190 N für die Hauptversuche 1, in Abb. 40 dargestellt, und etwa 30 N bis etwa 380 N für die Hauptversuche 2, in Abb. 41 ersichtlich, gewählt. Hier ist anzumerken, dass die untere Grenze der gewählten Kraftbereiche außerhalb der Grenzen der berechneten Werte laut Tab. 6 (Seite 40) liegt. Der Grund dafür liegt in der Konstruktion der Versuchsmaschine. Mit diesem Gerät ist es nicht möglich größere Kräfte in der Entlastungsphase der dynamischen Beanspruchung auf den Versuchskörper aufzubringen.



Die Frequenz während der Versuche beträgt 2,91 Hz, was einer Zuggeschwindigkeit von circa 200 km/h entspricht. Die Krafteinwirkung erfolgt für die Dauer von 20.000 Lastwechseln.

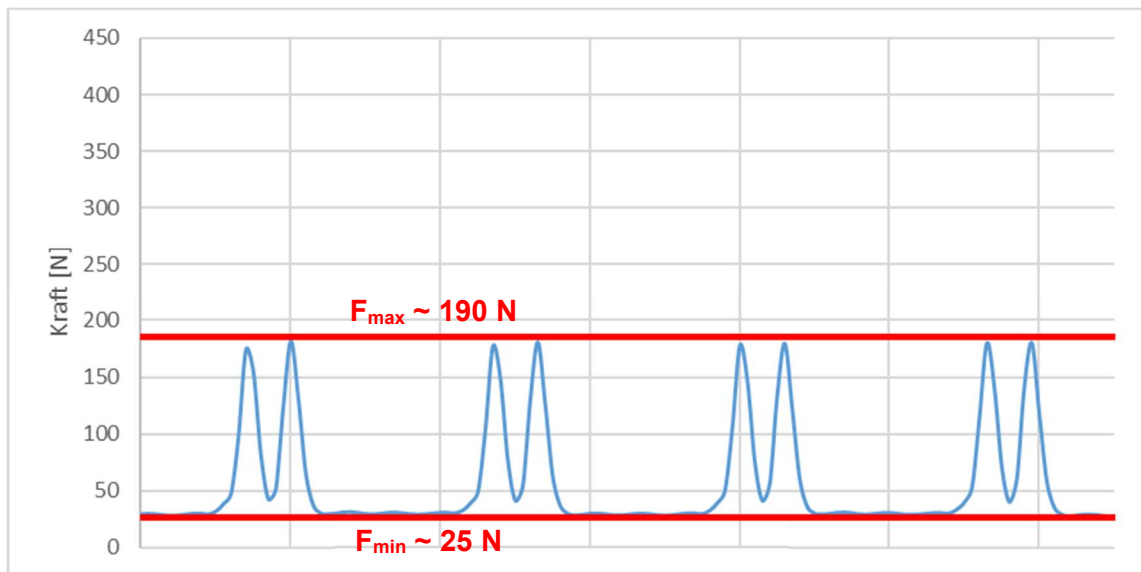


Abb. 40 Kraftbereich für Hauptversuche 1

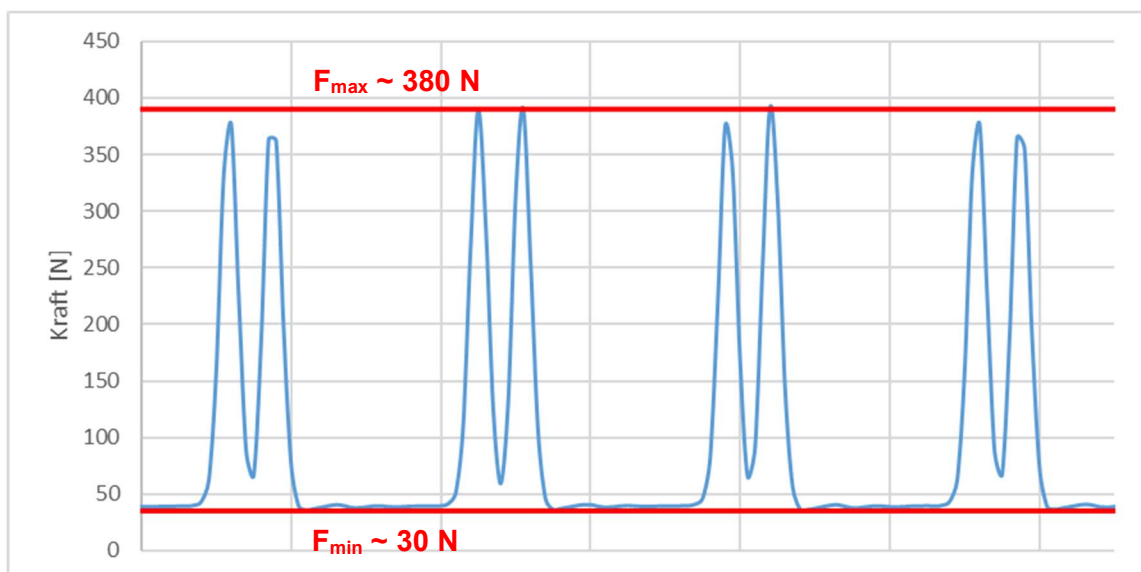


Abb. 41 Kraftbereich für Hauptversuche 2

### 3.7.7 Versuchsreihe

Entsprechend der zuvor beschriebenen Parametervariation kann die Versuchsreihe für die Hauptversuche 1 (Abb. 42) und für die Hauptversuche 2 (Abb. 43) aufgestellt werden. Für die genaue Identifikation der jeweiligen Versuche wird die Kennung wie folgt verwendet:

*HV?\_B?\_w?\_t?*

( 5 )

- HV?* HV1 oder HV2 – Entspricht Hauptversuch 1 oder Hauptversuch 2  
*B?* B1, B2, oder B3 – Entspricht Boden 1, Boden 2 oder Boden 3  
*w?* wP, wS, oder wL – Siehe Kapitel 3.7.6  
*t?* t1 oder t2 – Entspricht Test 1 oder Test 2 unter den gleichen Randbedingungen

Folgendes Beispiel veranschaulicht die Identifikation durch die zuvor beschriebene Kennung: HV2\_B3\_wP\_t2 bedeutet Hauptversuch 2, Boden 3, Proctor-Wassergehalt, Test 2.

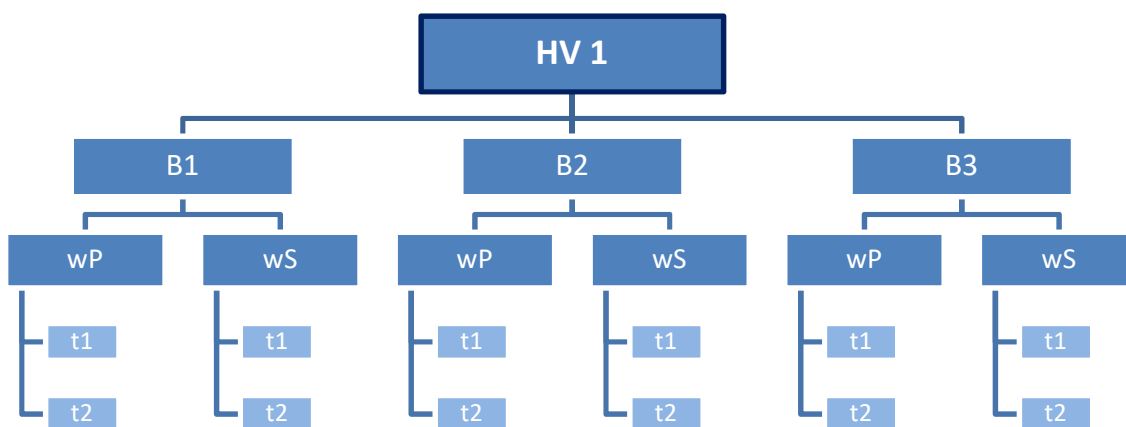


Abb. 42 Versuchsreihe Hauptversuche 1

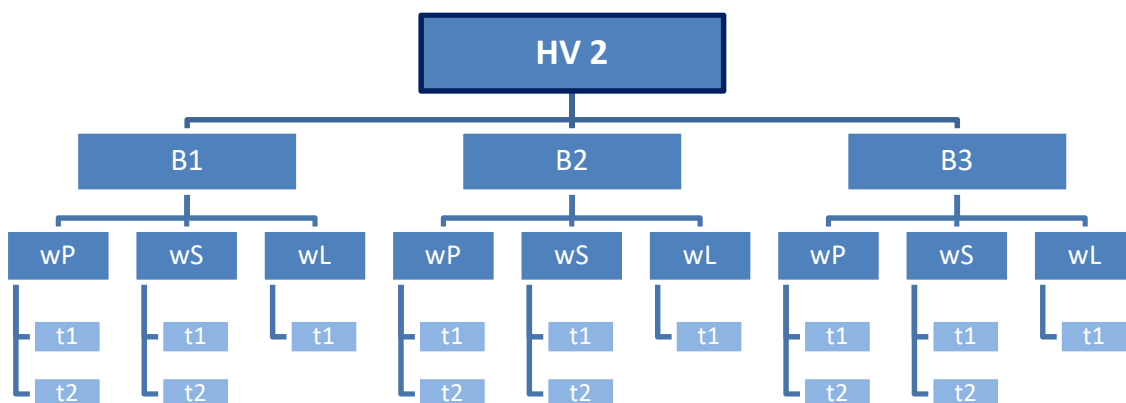


Abb. 43 Versuchsreihe Hauptversuche 2

### 3.8 Vorversuche zur Sättigung

Wie man der Literaturrecherche entnehmen kann, ist Wasser einer der maßgebenden Einflussfaktoren für die Entstehung von Mud Pumping. Es hat ebenfalls eine starke Auswirkung auf die bodenmechanischen Kennwerte. Die Bestimmung des Wassergehaltes ist somit von hoher Bedeutung.

Ziel der Vorversuche ist es Informationen über das Sättigungsverhalten der Böden (B1, B2 und B3) zu bekommen. Dafür ist die Messung des Wassergehaltes für einen quantifizierbaren Vergleich notwendig.

#### 3.8.1 Versuchsablauf

Für den Einbau des Materials muss der entsprechende Boden (B1, B2 und B3) im Ofen bei 105 °C mindestens 24 h getrocknet werden (ÖNORM B4410). Danach wird das Material circa ein bis zwei Stunden bei natürlichem Raumklima zum Auskühlen gelagert. Zum Erreichen des Proctor-Wassergehalts wird die notwendige Wassermenge dem getrockneten Boden zugegeben. Das Material wird so lange gemischt, bis es eine gleichmäßige Farbe vorweist und somit von einem homogenen Wassergehalt ausgegangen werden kann.

Für die Sättigungsversuche wird ein Acrylglas-Zylinder mit einem entfernbareren Zylinder-Boden verwendet (siehe Abb. 44). Das vorbereitete Material wird in vier Lagen in den Zylinder eingefüllt und jede Lage wird auf die Stärke von 2,0 cm verdichtet. Die Oberfläche der unteren drei Schichten wird nach dem Verdichtungsvorgang mit Hilfe einer Gabel aufgekratzt um eine mögliche horizontale Sperrschicht (Anisotropie) zu vermeiden. Der Probekörper weist danach eine Höhe von 8,0 cm und eine Dichte von 1,6 g/cm<sup>3</sup> auf. Hierbei ist anzumerken, dass für die Vorversuche eine andere Einbaudichte gewählt wurde, als für die Hauptversuche.

Es folgt die Zugabe der theoretischen Wassermenge bis zum Erreichen der Fließgrenze des jeweiligen Bodens. Der fertige Probekörper wird mit einem Deckel verschlossen und 24 Stunden in einer Folie aus PVC gelagert (siehe Abb. 45).

Für die Messung des Wassergehaltes müssen Proben vom Material genommen werden. Die Probenentnahme erfolgt mit Hilfe eines PVC-Rohrs (Stechzylinder) und einer Gewindestange (siehe Abb. 46). Das Rohr wird vertikal von oben nach unten in den Boden gedrückt (entspricht der Versuchsreihe x.1). Für die Versuchsreihe x.2 wird der Boden des Behälters entfernt, der Behälter samt Bodenmaterial horizontal abgelegt und das PVC-Rohr waagrecht in die Probe hineingedrückt (Probenentnahme von unten

nach oben). Das Material, welches sich nun innerhalb des Rohres befindet, wird mittels einer Gewindestange herausgedrückt und zentimeterweise abgeschnitten. In weiterer Folge wird der Wassergehalt mittels Ofentrocknung laut ÖNORM B4410 bestimmt.

Als Beispiel für die Benennung dient das Ergebnis von Boden 1 mit der der Bezeichnung „Sätt 3.2“. Dies beschreibt den dritten Versuchsdurchlauf der Sättigung von Boden 1 (erste Zahl), bei dem die Probe entsprechend der Versuchsreihe x.2 entnommen wurde (zweite Zahl).

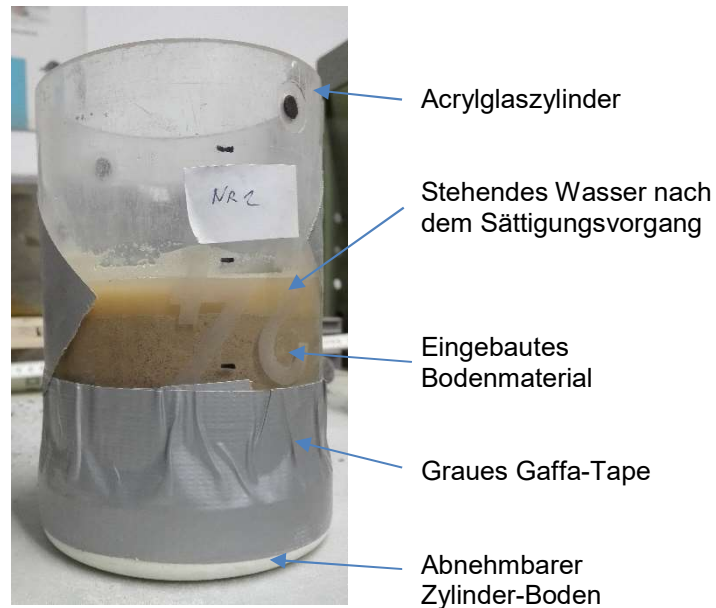


Abb. 44 Acrylglaszylinder für Sättigungsversuche



Abb. 45 Lagerung der Versuchsbehälter



Abb. 46 Entnahmewerkzeug für die Bodenproben

### 3.8.2 Ergebnisse

- **Wassergehalt**

Die Verteilung des Wassergehaltes über die Tiefe für die einzelnen Versuche ist in Abb. 47, Abb. 48 und Abb. 49 ersichtlich.

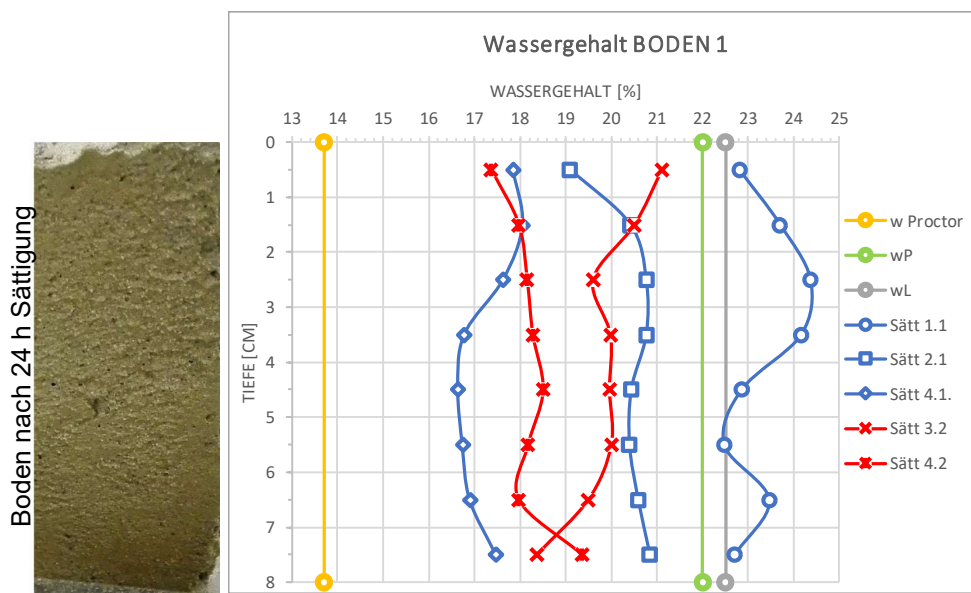


Abb. 47 Wassergehalt Boden 1

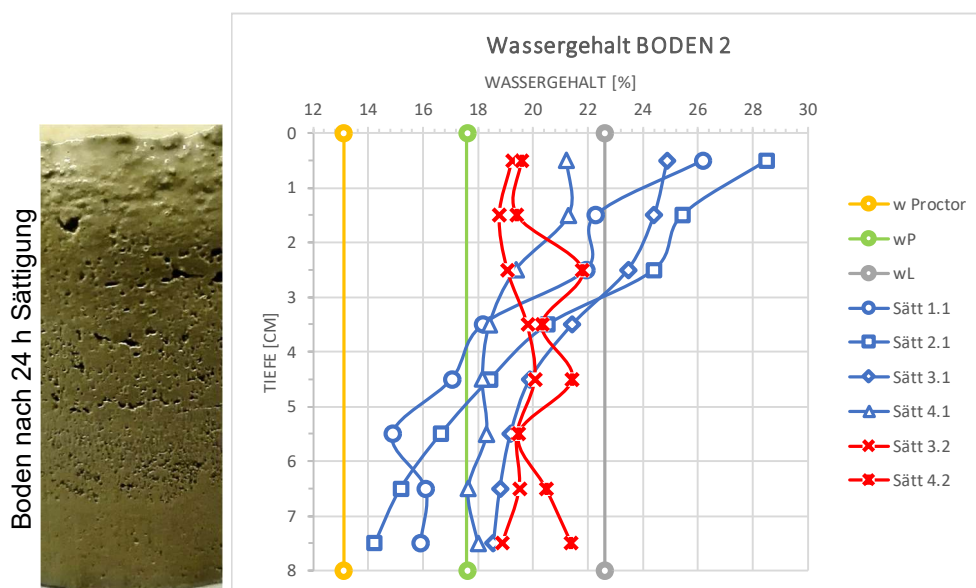


Abb. 48 Wassergehalt Boden 2

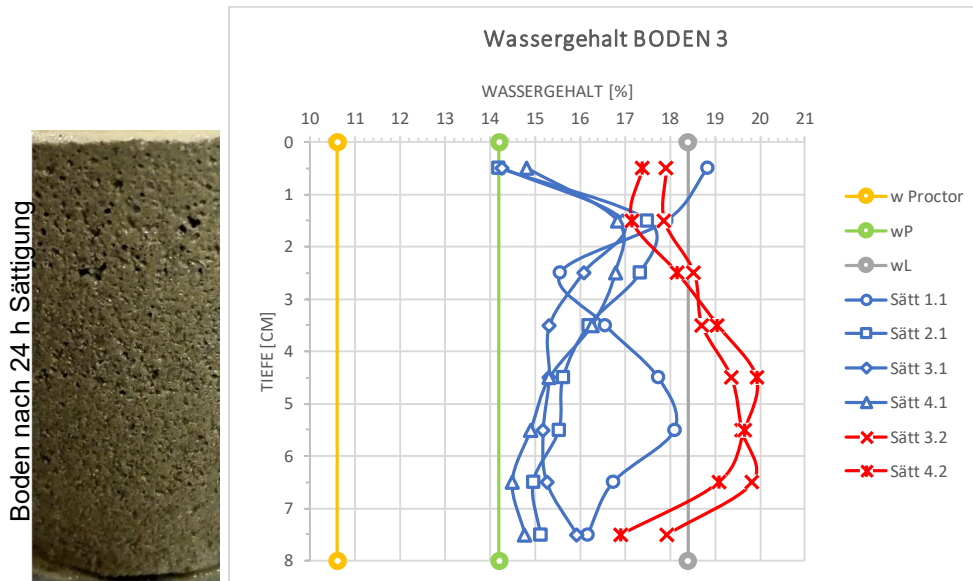


Abb. 49 Wassergehalt Boden 3

- **Sättigungsgrad**

Zusätzlich wurde der Sättigungsgrad entsprechend der nachstehenden Formeln berechnet:

$$e = \frac{\gamma_s}{\gamma_d} - 1 \quad (6)$$

$$w_{max} = e * \frac{\gamma_w}{\gamma_s} \quad (7)$$

$$S_r = \frac{w_{gem}}{w_{max}} \quad (8)$$

$e$	[-]	Porenzahl
$w_{gem}$	[-]	Gemessener Wassergehalt
$w_{max}$	[-]	Maximal möglicher Wassergehalt
$\gamma_d$	[kN/m <sup>3</sup> ]	Trockenwichte des Bodens – hier Einbauwichte von 16 kN/m <sup>3</sup>
$\gamma_w$	[kN/m <sup>3</sup> ]	Wichte Wasser
$\gamma_s$	[kN/m <sup>3</sup> ]	Kornwichte
$S_r$	[-]	Sättigungsgrad

Abb. 50, Abb. 51 und Abb. 52 zeigen die Ergebnisse der Berechnung.

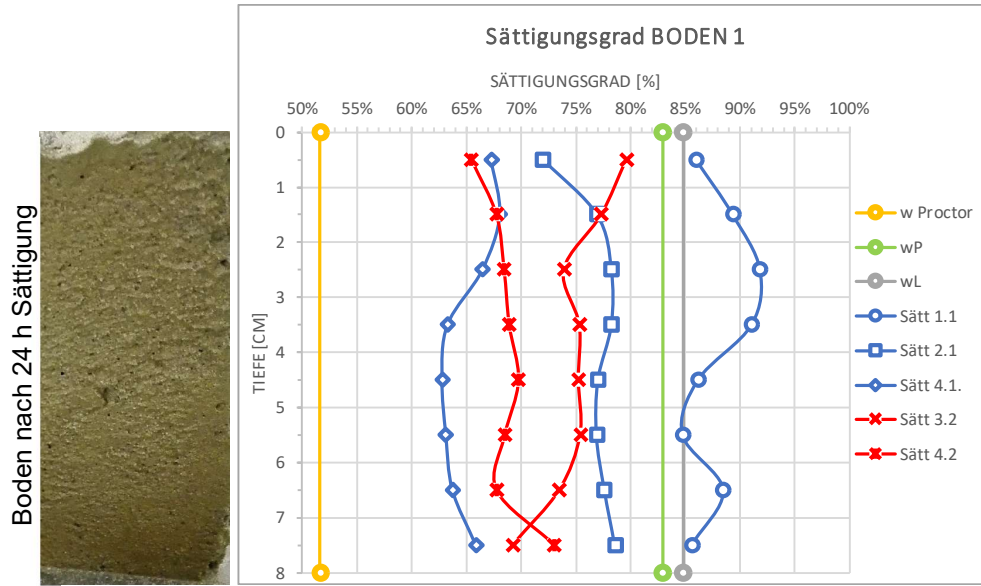


Abb. 50 Sättigungsgrad Boden 1

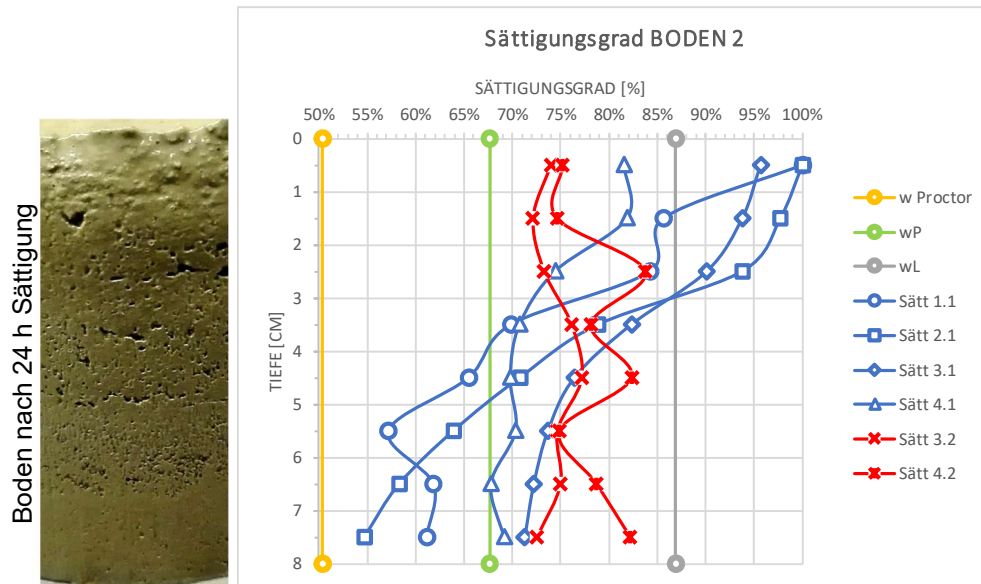


Abb. 51 Sättigungsgrad Boden 2

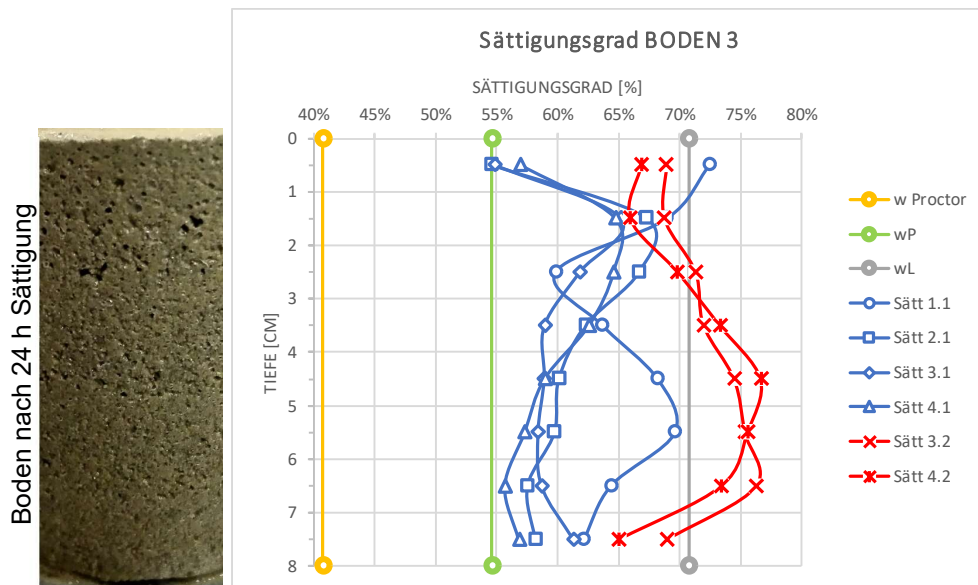


Abb. 52 Sättigungsgrad Boden 3

### 3.8.3 Interpretation

Die Ergebnisse der Wassergehaltmessung weisen eine große Streuung über die Probentiefe bei allen drei Böden auf. Die Entnahmeart der Proben ist wahrscheinlich die wesentliche Ursache für die hohe Streuung. Anscheinend wird die Probe so stark gestört, dass es zu verfälschten Ergebnissen kommt. Aufgrund der vorliegenden Auswertung kann diese These jedoch nicht eindeutig bestätigt werden. In wie weit diese Art der Probenentnahme einen Einfluss auf die ermittelte Veränderung des Wassergehaltes hat, bedarf einer detaillierteren Analyse.

Die Beurteilung des Sättigungsverhaltens kann nur qualitativ erfolgen. Boden 1 und 3 weisen eine eher gleichmäßige Sättigung über die Tiefe auf. Bei Boden 2 nimmt der Wassergehalt von oben nach unten ab. Der Grund hierfür ist die geringere Durchlässigkeit beim Boden 2.

Mit dieser Messmethode kann der Verlauf des Wassergehalts nicht ausreichend genau bestimmt werden. Obwohl die Wassermenge im Boden einen wichtigen Indikator für die Beurteilung von Böden darstellt, muss dieser Wert bei der Untersuchung der Hauptversuche vernachlässigt werden, oder es muss eine andere Art der Wassergehaltsermittlung versucht werden.

## 3.9 Hauptversuch 1

### 3.9.1 Versuchsablauf

Der gewählte Boden wird laut ÖNORM B4410 im Ofen bei 105 °C mindesten 24 Stunden getrocknet. Die Probe wird aus dem Trocknungsofen genommen und für



die Dauer von etwa einer Stunde bei normalem Raumklima zum Auskühlen gelagert. Danach erfolgt die Wasserzugabe bis zum Proctor-Wassergehalt des jeweiligen Bodens. Durch das Mischen entsteht ein gleichmäßiges Wasser-Boden-Gemisch. Dieses wird dann mit der entsprechenden Menge laut Tab. 7 lageweise in vier Schichten in den Versuchsbehälter eingebracht (Abb. 53) und auf eine Schichtdicke von 1,75 cm verdichtet (Abb. 54). Somit ergibt sich eine Mächtigkeit des Bodens von 7,00 cm (Abb. 56) bei einer Einbaudichte von 1,8 g/cm<sup>3</sup>. Die Oberfläche der einzelnen, verdichteten Schichten wird mit einer Gabel aufgekratzt (Abb. 55). Davon ausgenommen ist die vierte und oberste Ebene. Das Aufkratzen soll die Verbindung der einzelnen Schichten verbessern und die Bildung einer nahezu wasserundurchlässigen horizontalen Ebene (Anisotropie) vermeiden.

Danach erfolgt das Einbringen der Viertelkugeln in den Boden. Dies erfolgt mittig an der Vorder- und Rückseite des Versuchsbehälters (Abb. 57). Der fertige Probekörper kommt nun in die Versuchsmaschine. Dabei erfahren die Viertelkugeln eine kurze Vorbelastung, bevor der Versuch startet.

Beinhaltet die Kennung des Versuchs das Kürzel „wS“, so erfolgt eine Minute vor dem Start der dynamischen Belastung die Wasserzugabe von 100 ml.

Tab. 7 Berechnung Bodenmenge

	Einheit	Boden 1	Boden 2	Boden 3
<b>Volumen Behälter bis 7 cm Höhe</b>	[cm <sup>3</sup> ]	1336,7	1336,7	1336,7
<b>Einbaudichte</b>	[g/cm <sup>3</sup> ]	1,8	1,8	1,8
<b>Einbauhöhe</b>	[cm]	7,0	7,0	7,0
<b>Anzahl der Schichten</b>	[-]	4,0	4,0	4,0
<b>Dicke einer Schicht</b>	[cm]	1,75	1,75	1,75
<b>Proctor-Wassergehalt</b>	[%]	13,7	13,1	10,6
<b>Gewicht Boden gesamt</b>	[g]	2735,7	2721,3	2661,1
<b>Gewicht je Schicht</b>	[g]	<b>683,9</b>	<b>680,3</b>	<b>665,3</b>

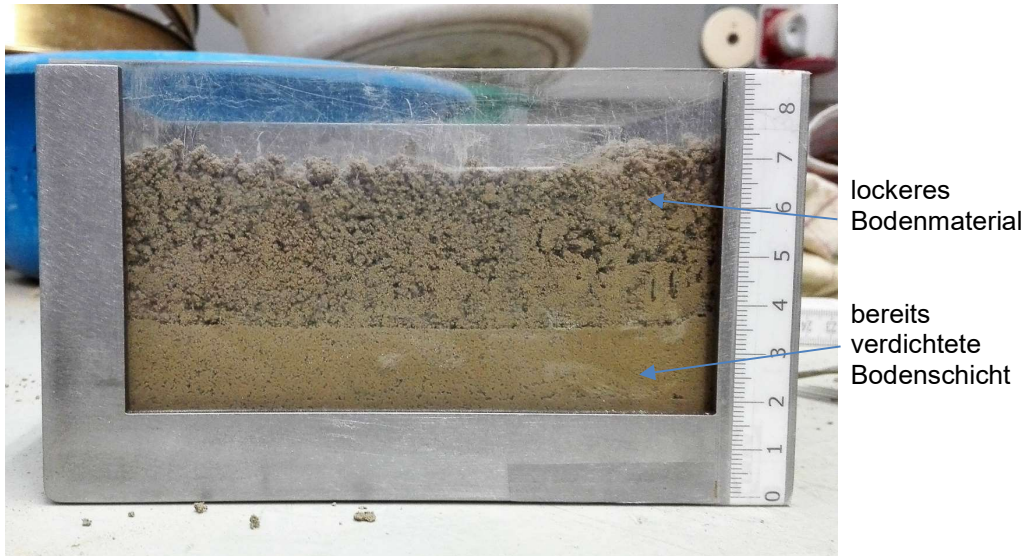


Abb. 53 Lageweiser Einbau des Bodens

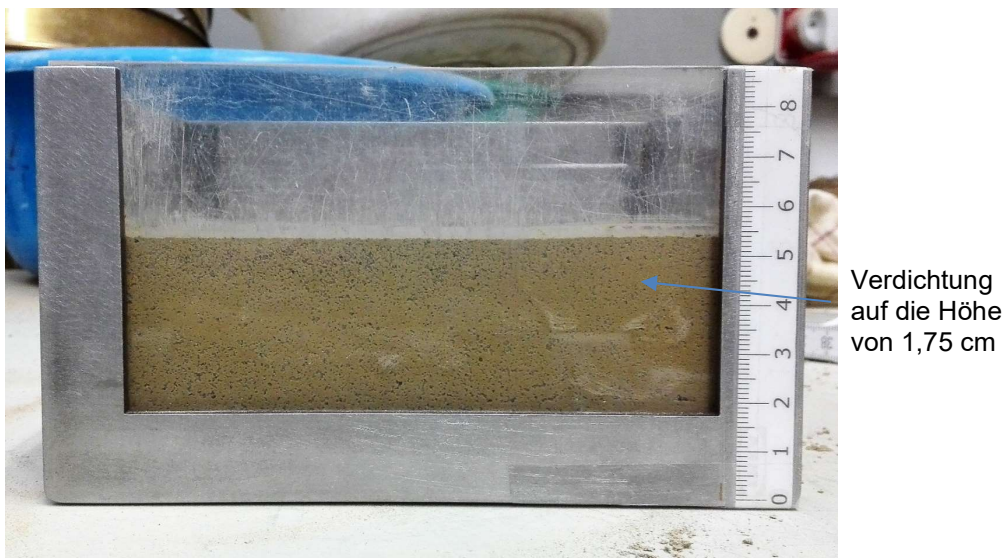


Abb. 54 Verdichtung der Einzelnen Schicht auf eine Dicke von 1,75 cm

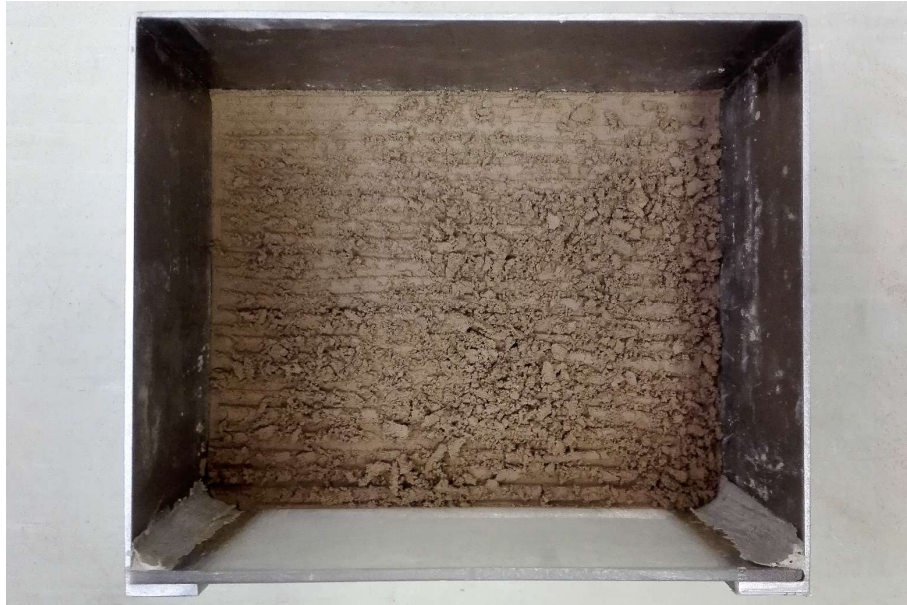


Abb. 55 Aufkratzen der Oberfläche der einzelnen Schichten



Abb. 56 Versuchskörper nach dem Verdichtungsvorgang

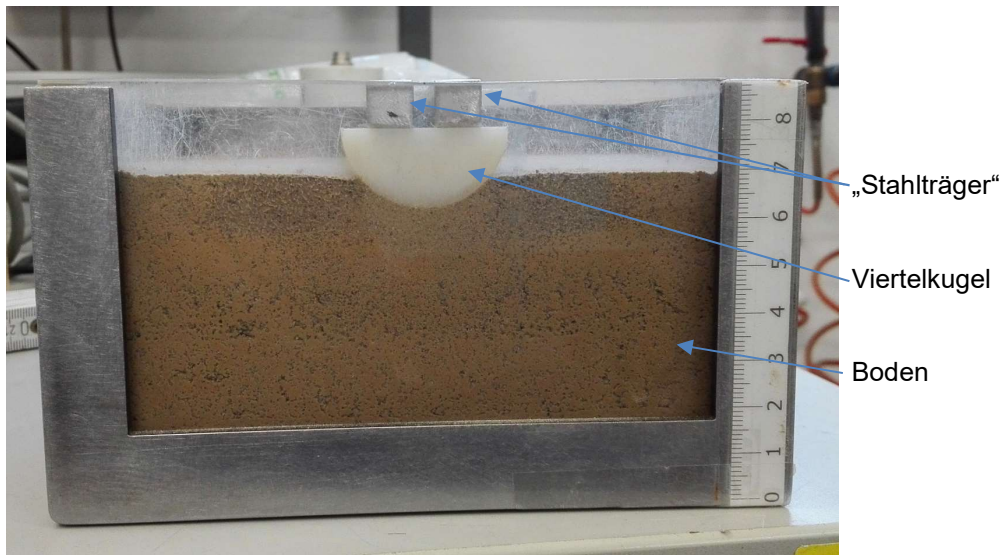


Abb. 57 Versuchskörper nach dem Einbringen der Viertelkugeln – HV 1

### 3.9.2 Versuchsdauer

- **Auswertung**

Die Auswertung der Versuchsdauer erfolgt über die Zeitmessung, mit welcher die genaue Anzahl der Zyklen berechnet werden kann (ein Zyklus entspricht 0,344 Sekunden). Die Angabe der Versuchsdauer durch die Anzahl der Zyklen soll das Vergleichen mit Ergebnissen aus zukünftigen Forschungsarbeiten erleichtern. Die maximale Versuchsdauer wird mit 20.000 Zyklen begrenzt. Kommt es zur Berührung von Kraftplatte und Boden, so muss der Versuch vor dem Erreichen der maximalen Belastungsdauer abgebrochen werden. Somit beschreibt jeder abgebrochene Versuch den Zeitpunkt, ab dem die Kraftplatte den Boden berührt.

- **Ergebnisse**

Tab. 8 zeigt die Anzahl der Zyklen der einzelnen Versuche. Zur besseren Übersicht werden die Ergebnisse in Diagrammen präsentiert. In Abb. 58 werden die Werte der Versuchsdauer dargestellt und erleichtern somit den Vergleich der Versuche mit der Kennung Boden (B1, B2 und B3). Abb. 59 zeigt dieselben Ergebnisse, erleichtert jedoch den Vergleich der Versuche mit der Kennung Wassergehalt ( $w_P$  und  $w_S$ ).

Tab. 8 Ergebnisse Versuchsdauer HV 1

Kennung Wassergehalt	Kennung Test	Hauptversuch1 1		
		B1	B2	B3
		[Lastwechsel]		
wP	t1	20.000	20.000	20.000
	t2	1.134	20.000	20.000
wS	t1	102	349	23
	t2	523	73	15

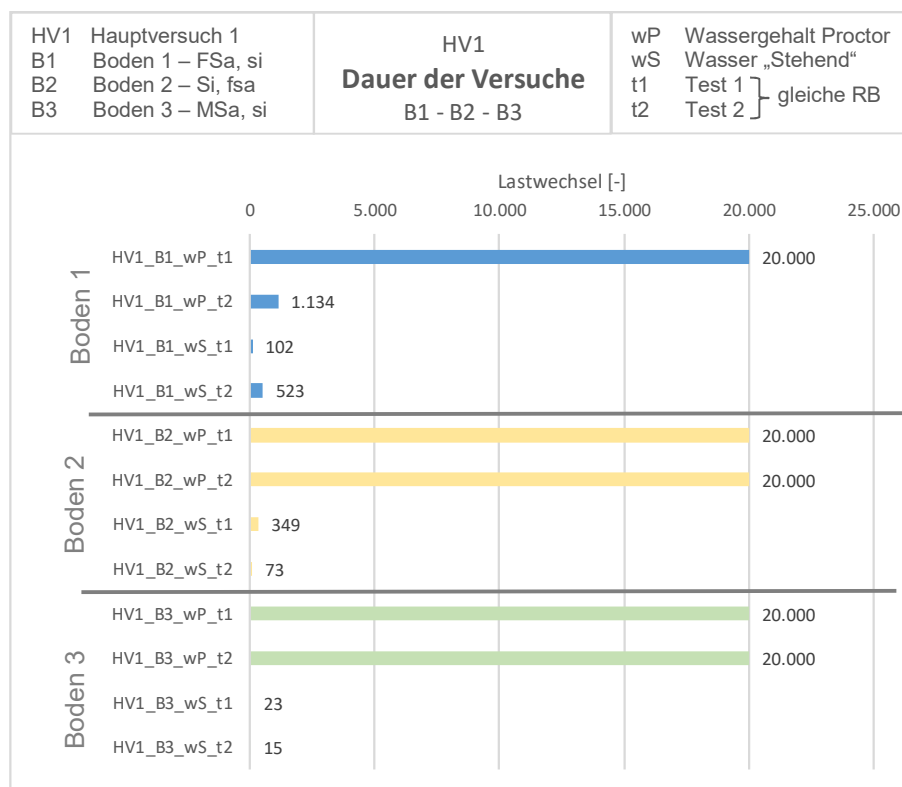


Abb. 58 Ergebnisse Versuchsdauer HV 1 – Vergleich der Kennung Boden

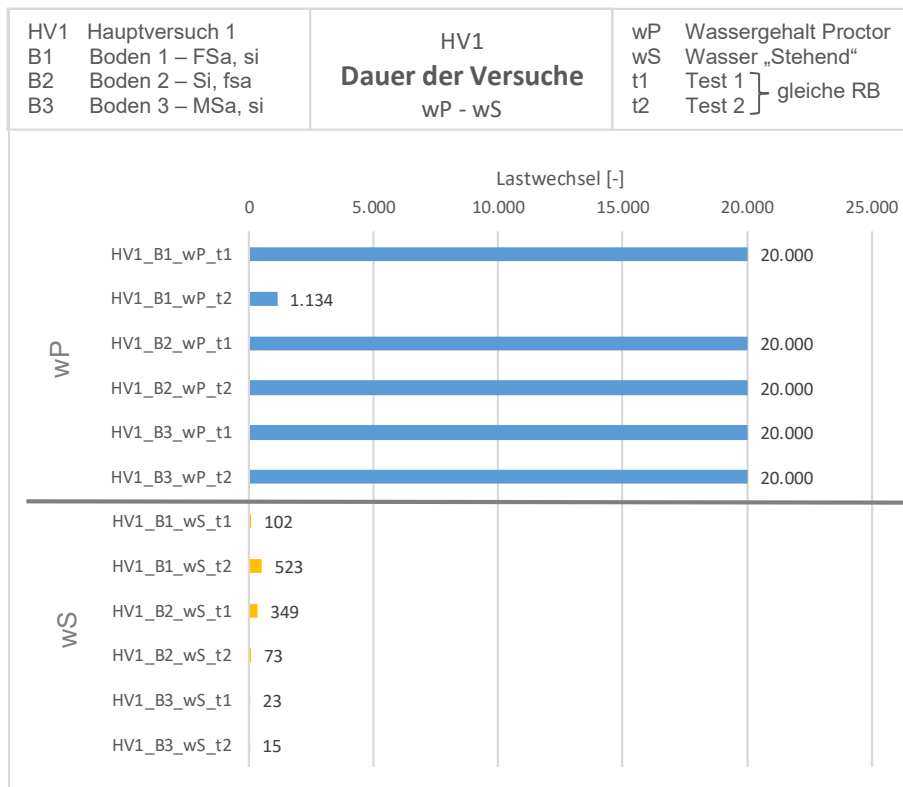


Abb. 59 Ergebnisse Versuchsdauer HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt

- **Interpretation**

Betrachtet man die Ergebnisse und den Vergleich der Böden aus Abb. 58, ist festzustellen, dass alle drei Böden ein ähnliches Bild in Bezug auf die Versuchsdauer zeigen. Ausgenommen davon ist der Versuch bei Boden 1 mit der Kennung HV1\_B1\_wP\_t2 (siehe Kapitel 3.11.1). Ein signifikanter Unterschied bei den Böden kann hierbei nicht eindeutig festgestellt werden. Es hat jedoch den Anschein, dass der Einfluss durch Wasserzugabe bei Boden 3 höher ist, als bei den anderen Versuchs-Böden. Dies ist aus der Anzahl der maximal möglichen Lastwechsel von 15 und 23 bei Boden 3 mit der Kennung \_B3\_wS\_ ersichtlich. Im Vergleich dazu dauerten die Versuche mit der Kennung \_B1\_wS\_ und B2\_wS\_ länger an.

Betrachtet man die Ergebnisse aus Abb. 59, kann man feststellen, dass die Wasserzugabe einen signifikanten Einfluss auf die maximal mögliche Dauer der Versuche hat. Die Versuche mit der Kennung \_wP\_ weisen eine Dauer von 20.000 Lastwechsel auf, ausgenommen der Versuch mit der Kennung HV1\_B1\_wP\_t2. Die Versuche mit der Kennung \_wS\_ mussten frühzeitig abgebrochen werden und die Testdauer kam nicht über 523 Lastwechsel hinaus.

### 3.9.3 Eindringtiefe

- **Auswertung**

Die Messergebnisse aus der Wegmessung liefern die Setzungen der Viertelkugel. Um einen Vergleich der einzelnen Messungen zu ermöglichen, wird die Bodenoberfläche bei 7 cm als Bezugsniveau herangezogen, wie in Abb. 60 zu sehen ist. Die Messwerte beschreiben dabei die positive Eindringtiefe der Viertelkugel nach unten in den Boden.

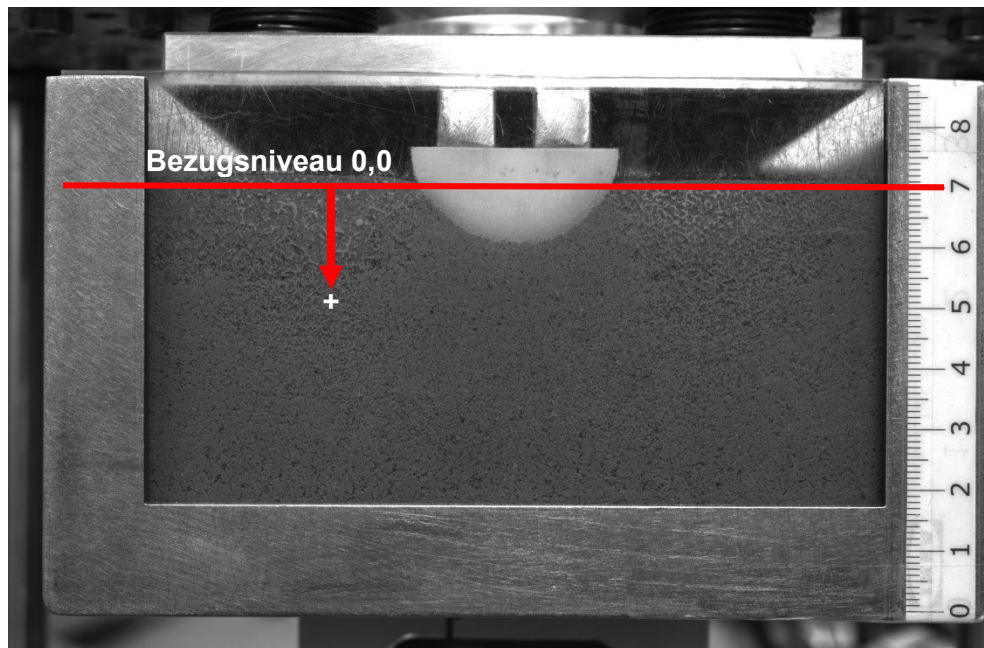


Abb. 60 Bezugsniveau für die Eindringtiefe

- **Ergebnisse**

Die nachstehenden Diagramme repräsentieren die Eindringtiefe der Viertelkugel in den Boden. Dabei beschreibt die Ordinate die Eindringtiefe in Millimeter und die Abszisse die Zyklusdauer. Es ist zu berücksichtigen, dass sämtliche negativen Werte auf der Abszisse der Vorbelastung aus dem Versuchseinbau entsprechen und keine Lastwechsel darstellen.

Das Diagramm in Abb. 61 zeigt die Eindringtiefe der Viertelkugel über die gesamte Belastungsdauer von 20.000 Lastwechseln. Diese Darstellung soll den Vergleich der Versuche mit der Kennung Boden (B1, B2 und B3), welche entsprechend der Legende gefärbt sind, erleichtern. Abb. 62 stellt die Eindringtiefe der ersten 600 Lastwechsel dar. Zusätzlich ist in Abb. 63 die Vorbelastung aus dem Versuchseinbau ersichtlich.

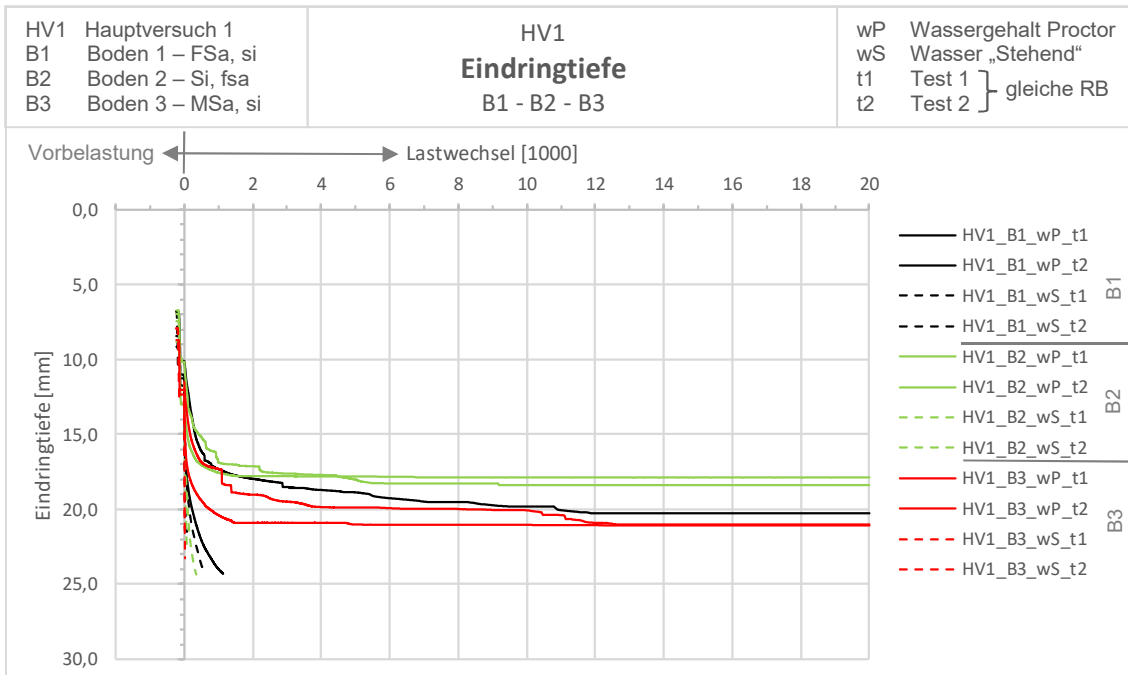


Abb. 61 Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Boden – 0 bis 20.000 Lastwechsel

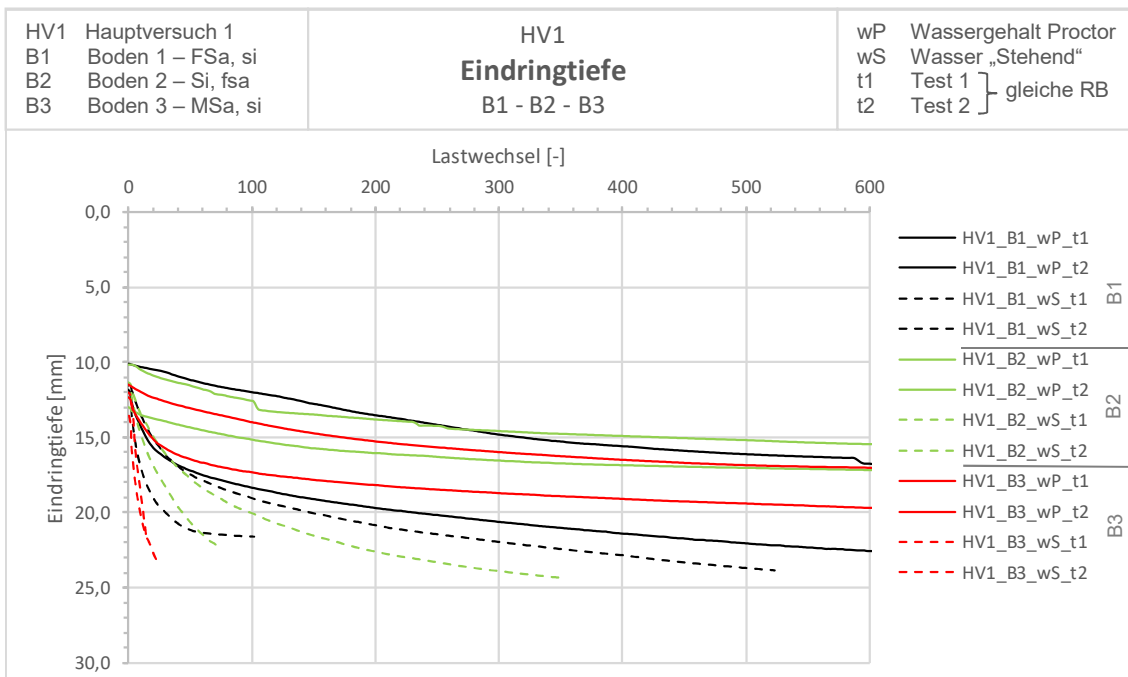


Abb. 62 Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Boden – 0 bis 600 Lastwechsel



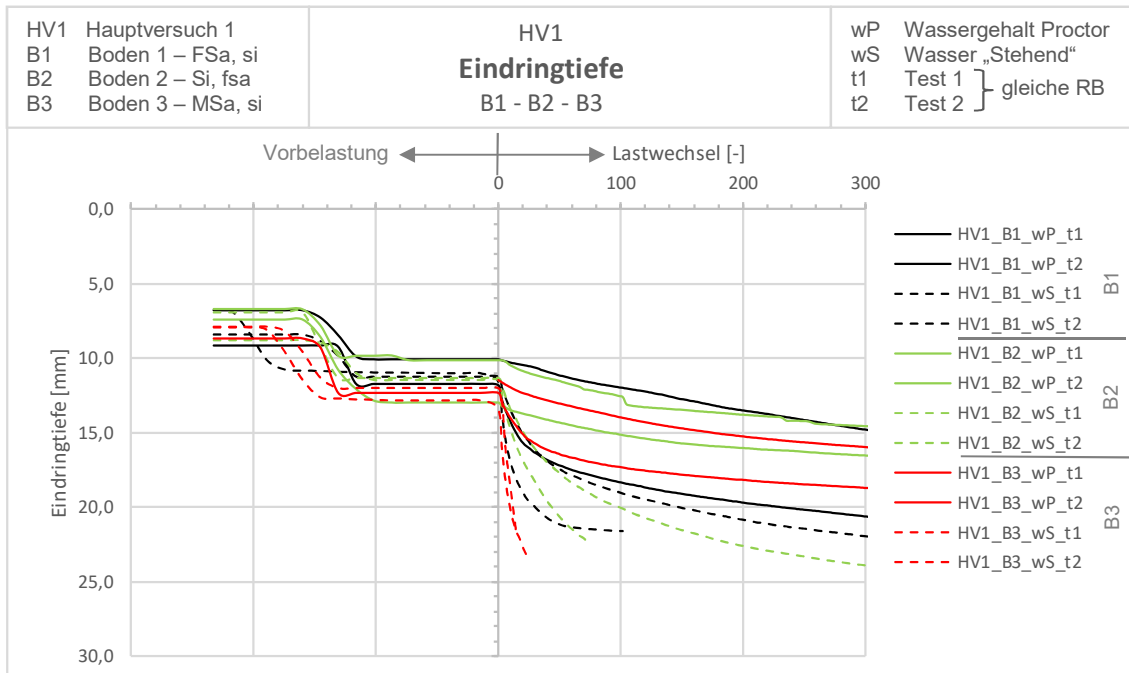


Abb. 63 Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Boden – 0 bis 300 Lastwechsel inklusive Vorbelastung

Abb. 64, Abb. 65 und Abb. 66 sollen den Vergleich der Versuche mit der Kennung Wassergehalt (wS und wP), welche entsprechend der Legende gefärbt sind, erleichtern. Dabei stellt Abb. 64 die Eindringtiefe der Viertelkugel während der gesamten Belastungsdauer von 20.000 Lastwechseln dar. Die detaillierte Betrachtung der ersten 600 Lastwechsel ist in Abb. 65 ersichtlich. Die Vorbelastungsphase und die ersten 300 Lastwechsel sind in Abb. 66 zu sehen.

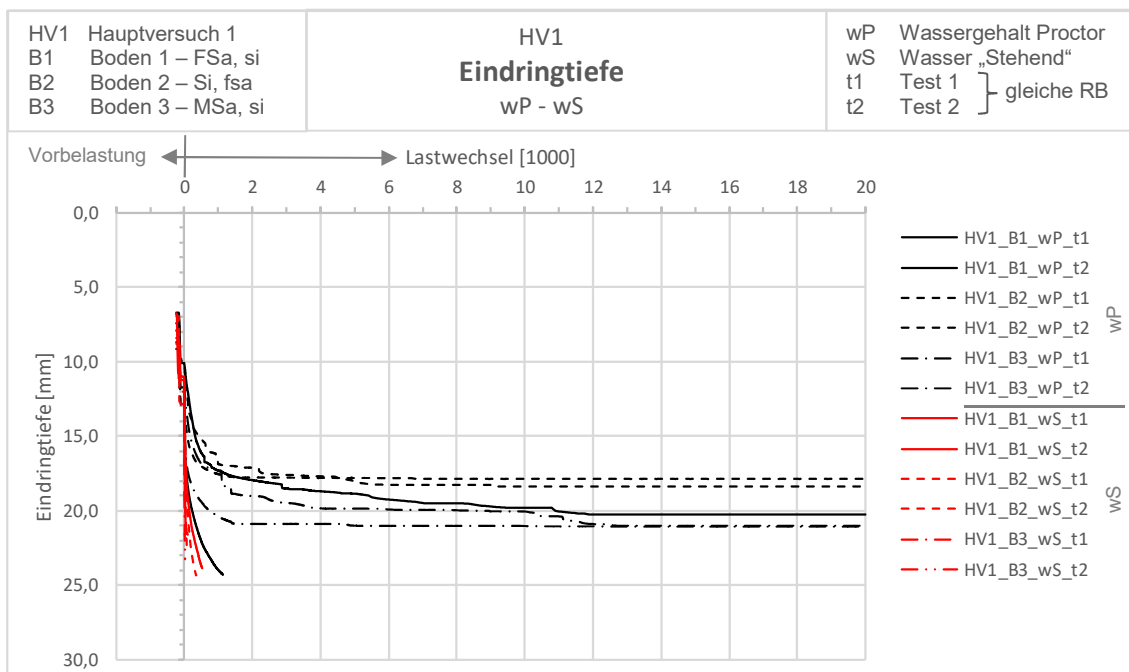


Abb. 64 Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt – 0 bis 20.000 Lastwechsel

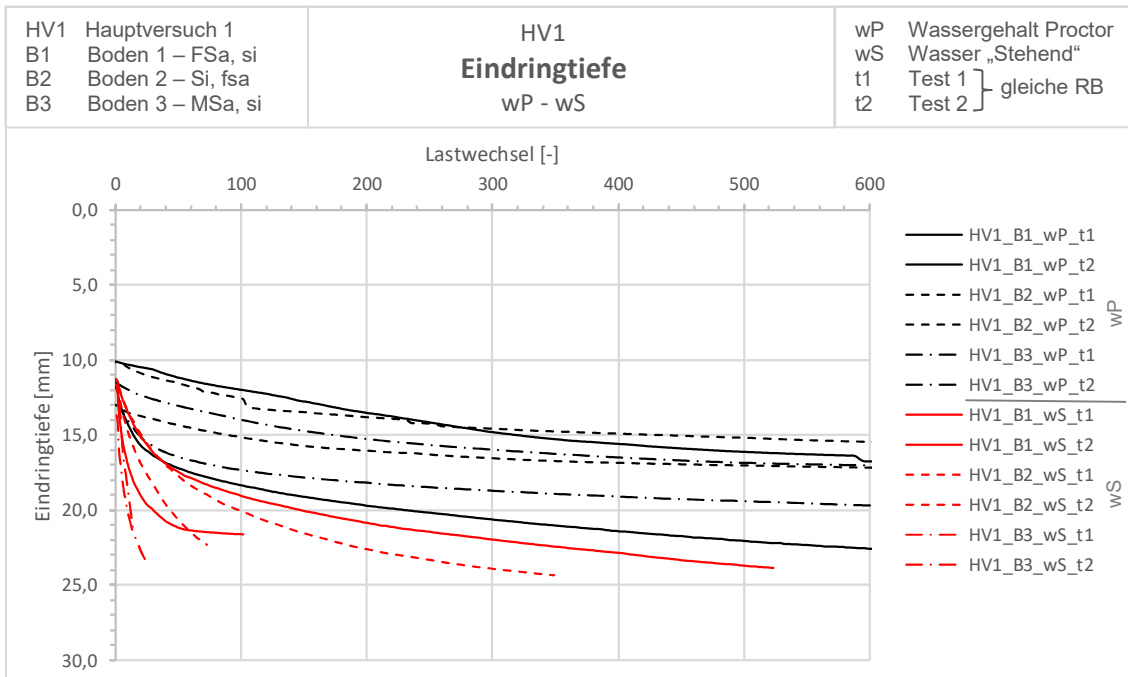


Abb. 65 Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt – 0 bis 600 Lastwechsel

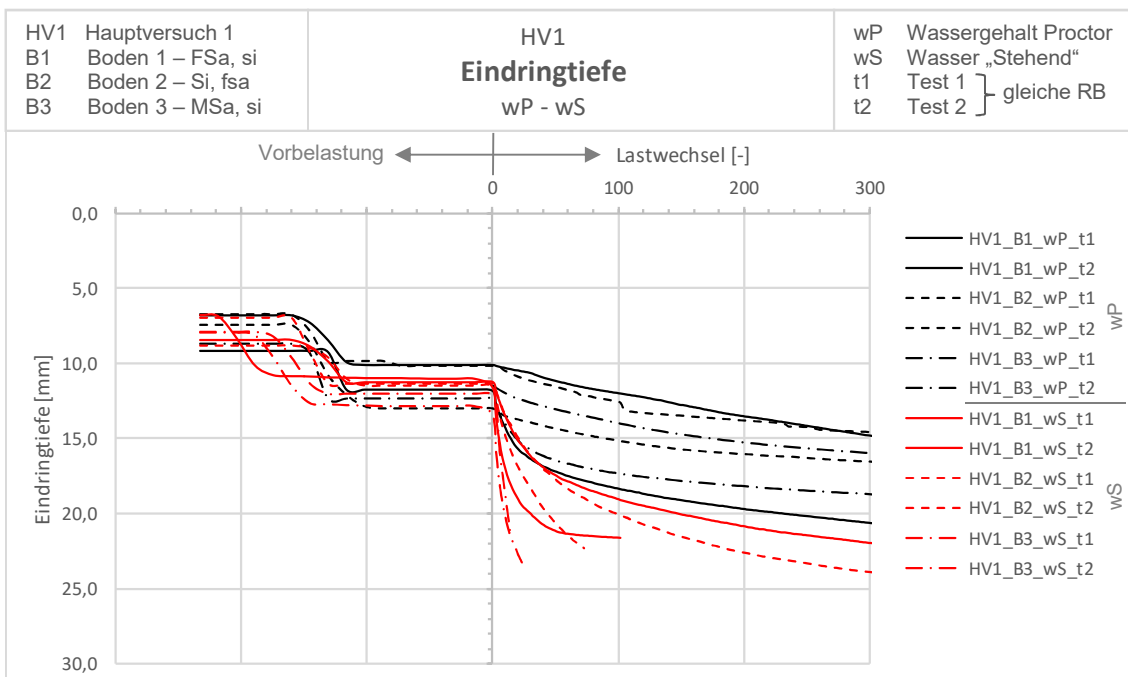


Abb. 66 Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt – 0 bis 300 Lastwechsel inklusive Vorbelastung

• **Interpretation**

In Abb. 61 kann man erkennen, dass Boden 2 geringere Endsetzungen nach 20.000 Lastwechsel aufweist als Boden 1 und Boden 3. Weiters zeigt Boden 1 geringere Setzungen, als Boden 3. Die Ausnahme bildet der Versuch mit Kennung HV1\_B1\_wP\_t2, welcher größere Setzungen innerhalb von 1.134 Lastwechseln aufweist (siehe Kapitel 3.11.1).

Es ist ersichtlich, dass bei den Versuchen mit der Kennung  $\_wP\_$  ab einem gewissen Zeitpunkt keine Setzungen mehr auftreten und die Setzungskurve horizontal verläuft. Dieser Zeitpunkt kann nicht eindeutig eingegrenzt werden, da während der Versuche die Kraftgröße händisch, mittels der Einstellschrauben an der Versuchsmaschine, nachgestellt werden musste. Aufgrund dessen sind die „Sprünge“ in den Setzungskurven entstanden.

Betrachtet man im Detail die ersten 600 Lastwechsel, bemerkt man, dass durch die Zugabe von Wasser auf die Bodenoberfläche die Kugel viel schneller und tiefer eindringt (strichlierte Linien in Abb. 62). Die Versuche mit der Kennung  $\_wS\_$  mussten vorzeitig abgebrochen werden. Da bei diesen Versuchen die Setzungskurven noch keine horizontalen Tangenten vorweisen, kann davon ausgegangen werden, dass die Setzungen noch größer ausfallen würden, wenn es die Möglichkeit gäbe, die Versuche weiter zu führen.

Betrachtet man Abb. 63, bemerkt man, dass der Startpunkt der Setzungen variiert, sowohl beim Einbringen der Viertelkugeln in den Boden, als auch aufgrund der Vorbelastung durch den Versuchseinbau. Aufgrund der ungünstigen Rahmenbedingungen der Versuchsmaschine war es nicht möglich mit dem selben Startpunkt der Setzung von jeder Viertelkugel bei Versuchsbeginn zu starten.

Die Ergebnisse der Setzungen in Abb. 64 und Abb. 65 zeigen, dass durch Wasserzugabe (Versuche mit der Kennung  $\_wS\_$ , hier Linien mit roter Farbe) die Viertelkugeln viel schneller und tiefer eindringen, als bei den Versuchen ohne Wasserzugabe (Versuche mit der Kennung  $\_wP\_$ , hier Linien mit schwarzer Farbe).

Anscheinend führt das stehende Wasser zu einer Zustandsänderung der feinkörnigen Böden und bewirkt eine Verringerung der Festigkeitseigenschaften. Durch die dynamische Belastung führt dies zu einem raschen und tiefen Eindringen der Viertelkugel in den Boden.

### 3.9.4 Einflussbereich

- **Auswertung**

In dieser Arbeit wird der Einflussbereich unterteilt in Fläche und Tiefe. Für die Ermittlung dieser Werte wird die PIV-Analyse zu Hilfe genommen. Dabei wird das Verhalten des Bodens innerhalb der ersten Minute, das heißt zwischen Lastwechsel 0 und 174, untersucht. Bei den vorzeitig abgebrochenen Versuchen werden jene Lastwechsel aus den Ergebnissen der Versuchsdauer (siehe

Kapitel 3.9.2) verwendet. Der Grund für die Wahl dieses Zeitbereichs ist, da innerhalb dieser Phase die größten Verformungen im Boden stattfinden. Aufgrund dessen liefert die PIV-Analyse repräsentative Ergebnisse und dadurch ist es möglich den Einflussbereich, bezogen auf die Verformungen im Boden innerhalb dieses Zeitraumes, genau zu begrenzen.

Das Ergebnis der PIV-Analyse ist die Darstellung der Verschiebungsvektoren im angrenzenden Boden, wie Abb. 67 veranschaulicht. Zusätzlich ermöglicht die Software das Anzeigen der Bereiche mit unterschiedlichen Geschwindigkeiten, wie in Abb. 68 zu sehen ist. Zwar ist die Geschwindigkeit aus der Bewegung des Bodens sehr gering und eigentlich nicht von Bedeutung für diese Analyse, jedoch ermöglicht dieses Werkzeug eine klare Darstellung der Einflussfläche. Durch die Überlagerung dieser Ergebnisse ist es möglich den Rand des Einflussbereichs zu bestimmen, wie Abb. 69 zeigt. Dadurch können die Flächen und die Tiefen mittig unterhalb der Viertelkugel gemessen und in weiterer Folge miteinander verglichen werden.

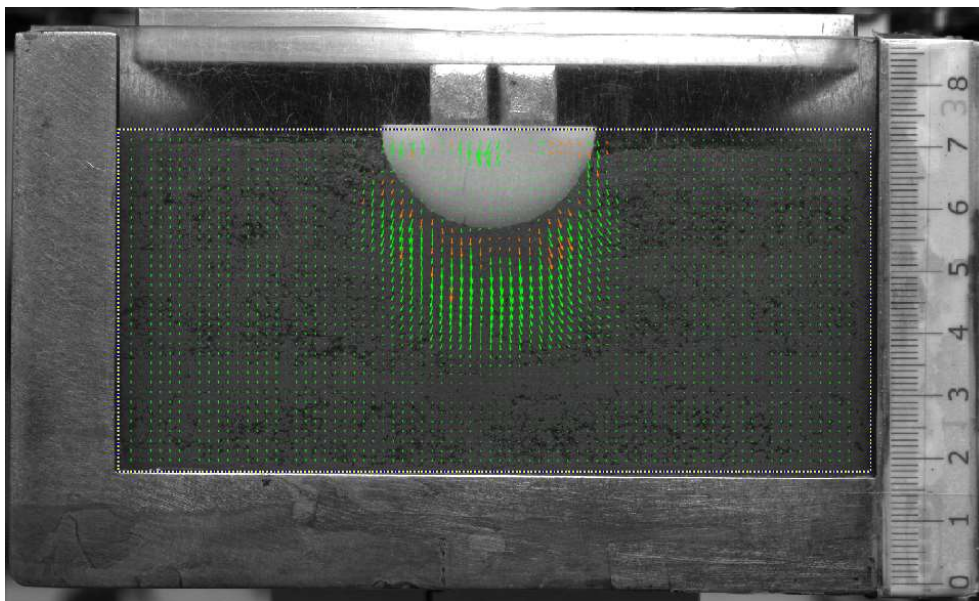


Abb. 67 Verschiebungsvektoren aus der PIV-Analyse – Beispiel HV1\_B2\_wP\_t2

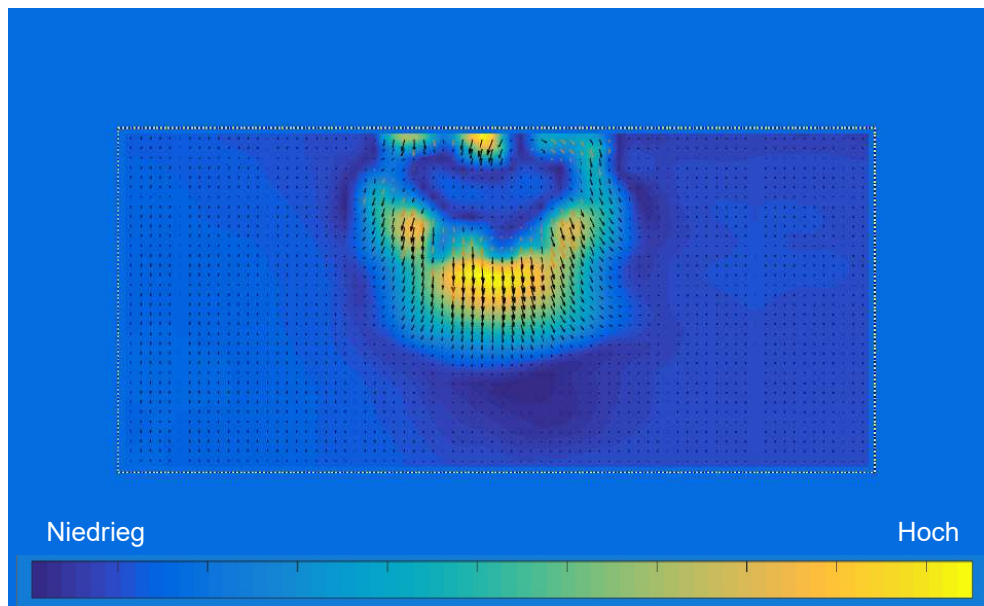


Abb. 68 Geschwindigkeitsfelder aus der PIV-Analyse – Beispiel HV1\_B2\_wP\_t2

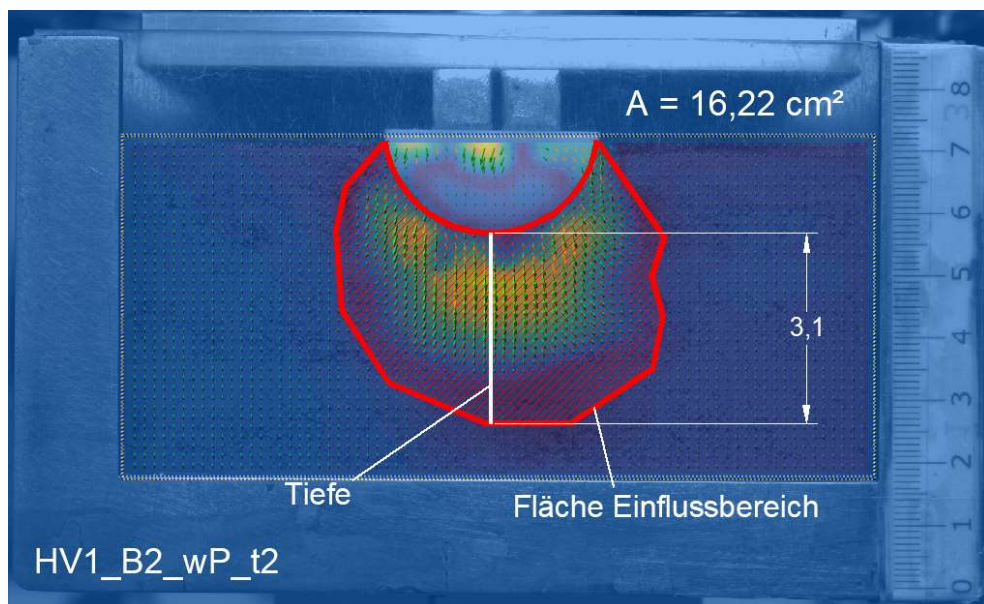


Abb. 69 Überlagerung und Ermittlung Einflussbereich-Fläche und -Tiefe – Beispiel HV1\_B2\_wP\_t2

- **Ergebnisse**

Abb. 70 stellt die Ergebnisse aus der Flächenermittlung der Einflussgröße dar und erleichtert den Vergleich der Versuche mit der Kennung Boden (B1, B2 und B3). Dabei ist ersichtlich, dass keine Werte für Versuch HV1\_B1\_wS\_t1 vorliegen. Aufgrund der „schlechten“ Ergebnisse der PIV-Analyse kann für diesen Versuch der Einflussbereich nicht eingegrenzt werden. In Abb. 71 werden ebenfalls die Werte aus der Flächenermittlung dargestellt, jedoch soll dieses Diagramm den Vergleich der Versuche mit der Kennung Wassergehalt (wS und wP) erleichtern.

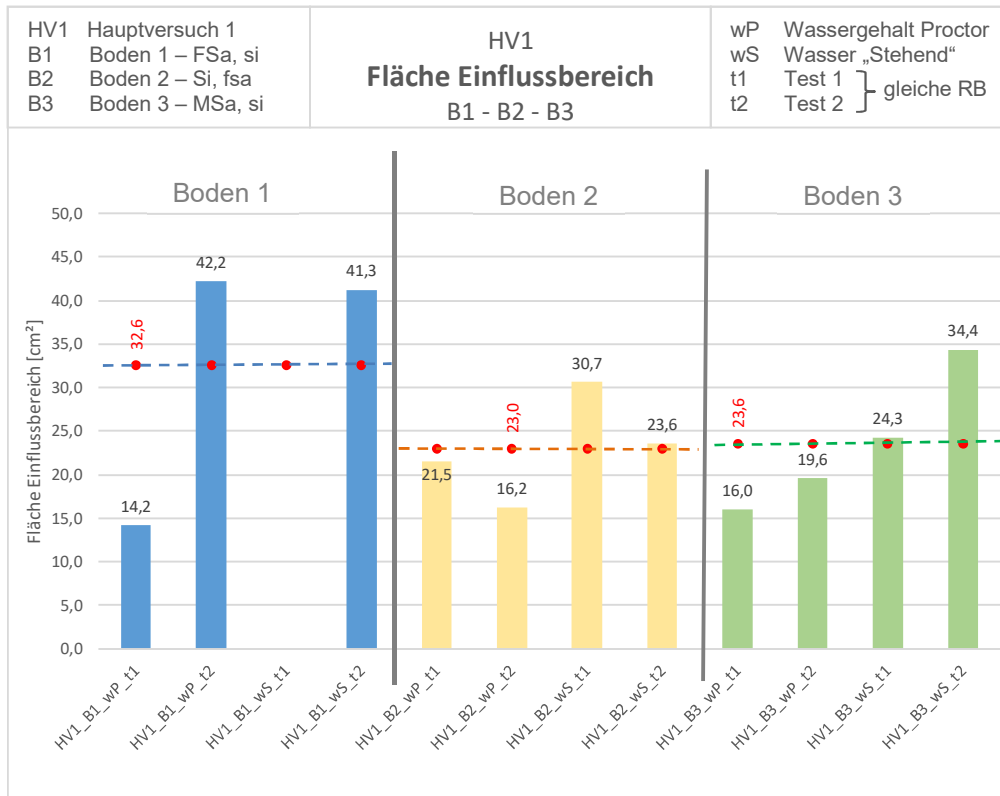


Abb. 70 Ergebnisse Einflussbereich Fläche HV 1 – Vergleich der Kennung Boden

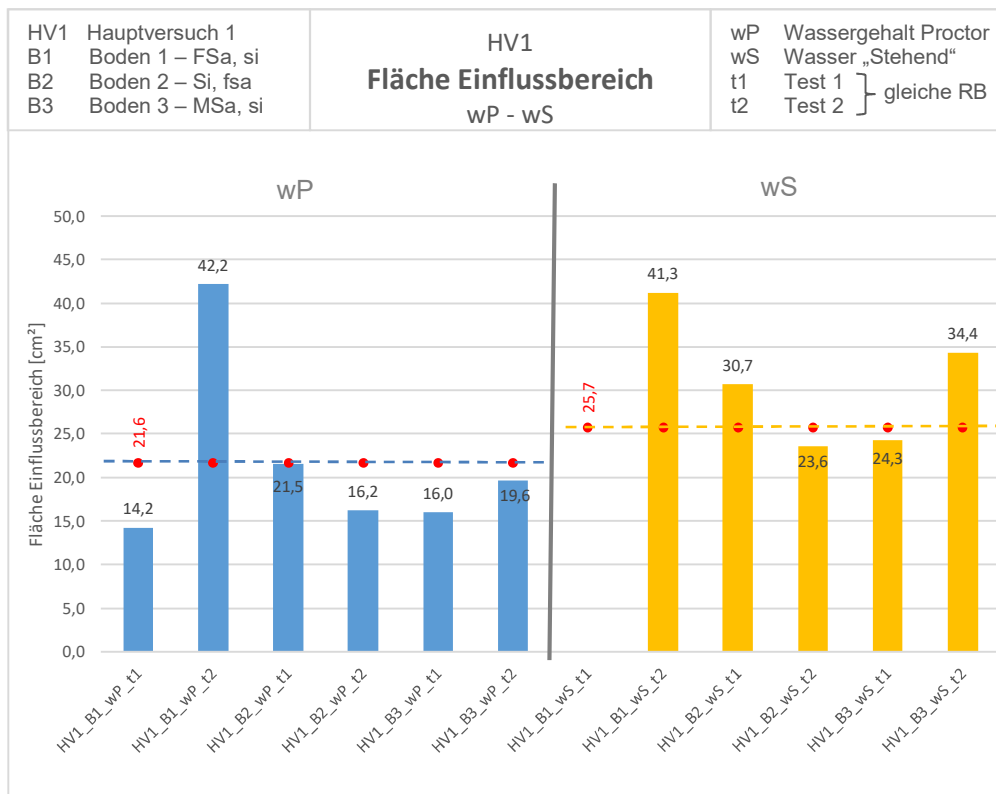


Abb. 71 Ergebnisse Einflussbereich Fläche HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt

Abb. 72 zeigt die Ergebnisse der Tiefe des Einflussbereichs der Versuche und erleichtert den Vergleich der Versuche mit der Kennung Boden (B1, B2 und B3).

Hier gilt dasselbe wie zuvor für den Versuch HV1\_B1\_wS\_t1. Im Gegenzug dazu werden in Abb. 73 dieselben Ergebnisse dargestellt, jedoch wird hier der Vergleich der Versuche mit der Kennung Wassergehalt (wS und wP) erleichtert.

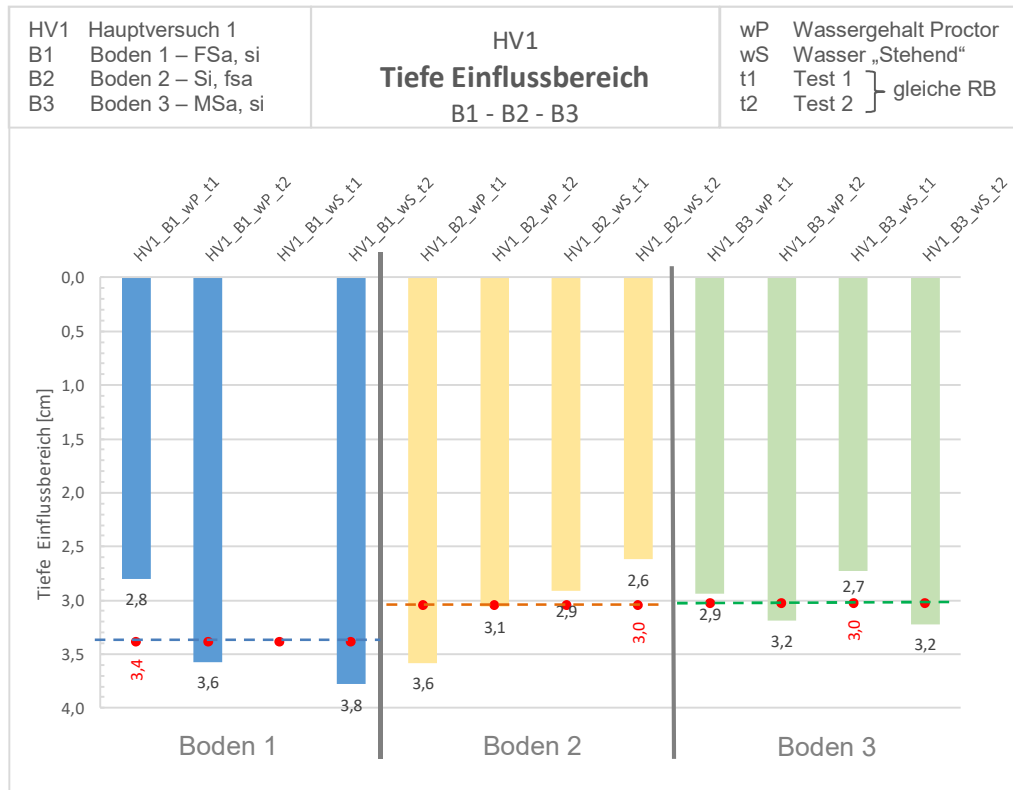


Abb. 72 Ergebnisse Einflussbereich Tiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Boden

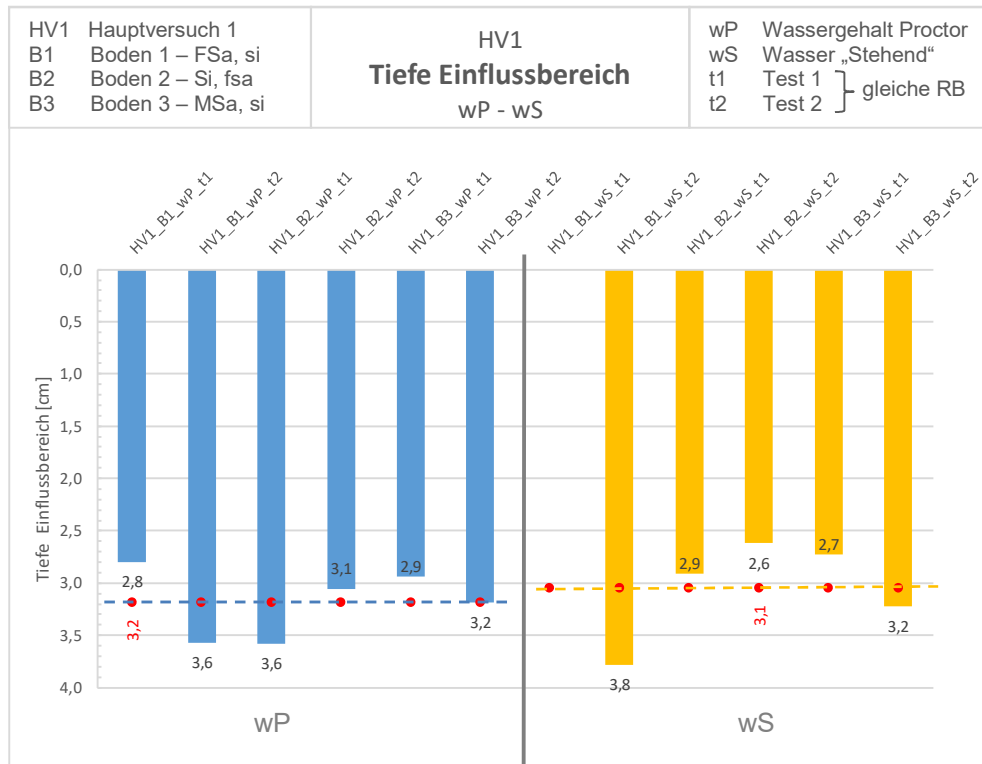


Abb. 73 Ergebnisse Einflussbereich Tiefe HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt

- **Interpretation**

Abb. 70 veranschaulicht, dass Boden 2 und Boden 3 im Durchschnitt circa die gleiche Fläche vom Einflussbereich unterhalb der Kugel aufweisen. Die Fläche beträgt etwa  $23 \text{ cm}^2$ . Der Durchschnittswert aus den Ergebnissen für Boden 1 ist höher, jedoch liegen hier keine Ergebnisse für den Versuch mit der Kennung HV1\_B1\_wS\_t1 vor. Daher ist es fraglich ob die Ergebnisse aus den Versuchen mit der Kennung \_B1\_ direkt mit den Ergebnissen aus den Versuchen mit der Kennung \_B2\_ und \_B3\_ verglichen werden können.

Aus Abb. 71 kann man ablesen, dass der Durchschnittswert für die Fläche aus den Versuchen mit der Kennung \_wP\_ um etwa  $4 \text{ cm}^2$  geringer ist, als bei jenem Wert von den Versuchen mit der Kennung \_wS\_. Es ist anzunehmen, dass ein höherer Wassergehalt eine größere Fläche unterhalb der Kugel bewirkt.

Entsprechend der Abb. 72 kann die Einflusstiefe unterhalb der Kugel für Boden 2 und Boden 3 mit etwa  $3 \text{ cm}$  beziffert werden. Wie zuvor erwähnt liegt für den Versuch mit der Kennung HV1\_B1\_wS\_t1 kein Ergebnis vor.

In Abb. 73 entspricht die Einflusstiefe für die Versuche etwa  $3 \text{ cm}$ . Betrachtet man zusätzlich die Ergebnisse aus Abb. 71, kann angenommen werden, dass bei höherem Wassergehalt die Einflusstiefe unverändert bleibt, jedoch eine größere Einflussfläche aktiviert wird. Das heißt der Einflussbereich im Boden nimmt bei höherem Wassergehalt in horizontaler Richtung zu und die Tiefe bleibt nahezu unverändert.

### 3.9.5 Verdichtung und Verdrängung

- **Auswertung**

Die Beurteilung des Bodens in der zweidimensionalen, vertikalen Schnittebene in Hinblick auf Verdichtung und Verdrängung erweist sich als äußerst schwierig. Um eine Auswertung durchführen zu können, müssen entsprechende Annahmen und Vereinfachungen getroffen werden.

Als Referenzfläche dient die gesamte Bodenfläche der Schnittebene, wie in Abb. 74 dargestellt. Mithilfe des vorhandenen Werkzeuges aus PIV-Kamera und PIV-Analyse ist es nicht möglich den genauen Bereich von Verdichtung und Verdrängung zu ermitteln. Somit wird die Annahme getroffen, dass die Fläche des verdrängten Bodens der Kugel ( $A_{\text{VDR,K}}$ ) als Berechnungsgrundlage dient und  $100 \%$  entspricht (siehe Abb. 75). Hier ist anzumerken, dass für diese Auswertemethode



dreidimensionale Effekte im Boden unberücksichtigt bleiben und die Schnittebene einer Symmetrieachse entspricht. Die Bodenoberkante bei 7 cm vor dem Start der dynamischen Belastung wird als Grenze zwischen Verdichtung und Verdrängung gewählt. Kommt es dazu, dass der Boden oberhalb dieser Marke verschoben wird, entspricht dies der Verdrängung vom Boden ( $A_{VDR,B}$ ). Die Differenz dieser beiden Flächen ( $\Delta A = A_{VDR,K} - A_{VDR,B}$ ) entspricht der Verdichtung des Bodens. Für den Fall, dass keine verdrängte Fläche ermittelt wird, ergibt dies eine hundertprozentige Verdichtung. Für die Beurteilung werden die Aufnahmen vom Versuchsende der Belastungsdauer, entweder 20.000 Lastwechsel oder Versuchsabbruch, untersucht.

Für das bessere Verständnis, wird nachfolgend ein Berechnungsbeispiel veranschaulicht, welches die Ergebnisse von Versuch HV1\_B1\_wP\_t1 darstellt:

$$A_{VDR,K} = 5,34 \text{ cm}^2 \quad \hat{=} \quad 100 \% \quad (9)$$

$$A_{VDR,B} = 2,28 \text{ cm}^2 \quad \hat{=} \quad 42,7 \% \quad (10)$$

$$\Delta A \hat{=} A_{VDI} = A_{VDR,K} - A_{VDR,B} = 3,06 \text{ cm}^2 \quad \hat{=} \quad 57,3 \% \quad (11)$$

$A_{VDR,K}$	[cm <sup>2</sup> ]	Verdrängte Fläche der Kugel
$A_{VDR,B}$	[cm <sup>2</sup> ]	Fläche des verdrängten Bodens
$A_{VDI}$	[cm <sup>2</sup> ]	Fläche Verdichtung

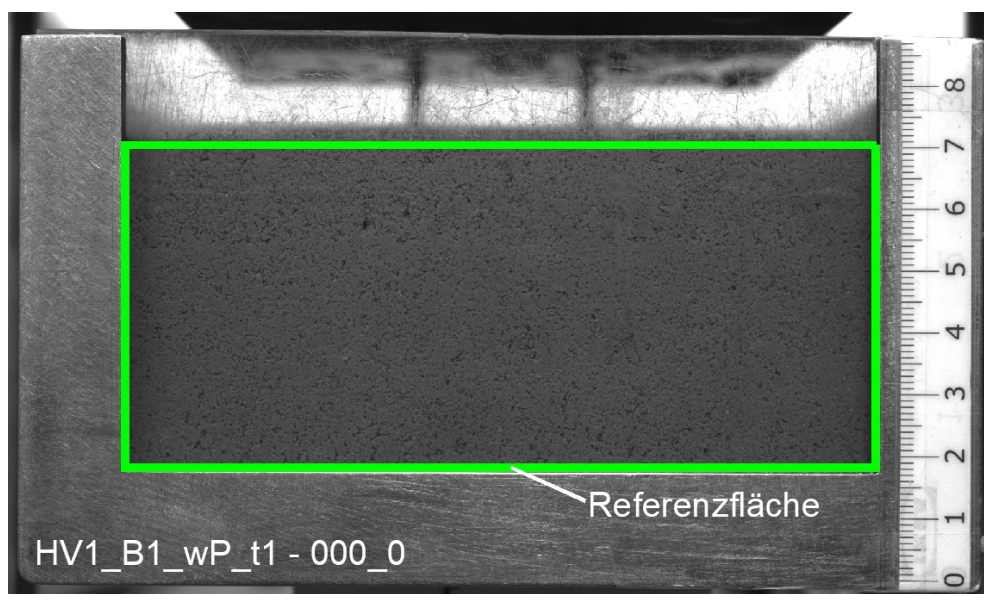


Abb. 74 Referenzfläche für Verdichtung und Verdrängung – Beispiel HV1\_B1\_wP\_t1

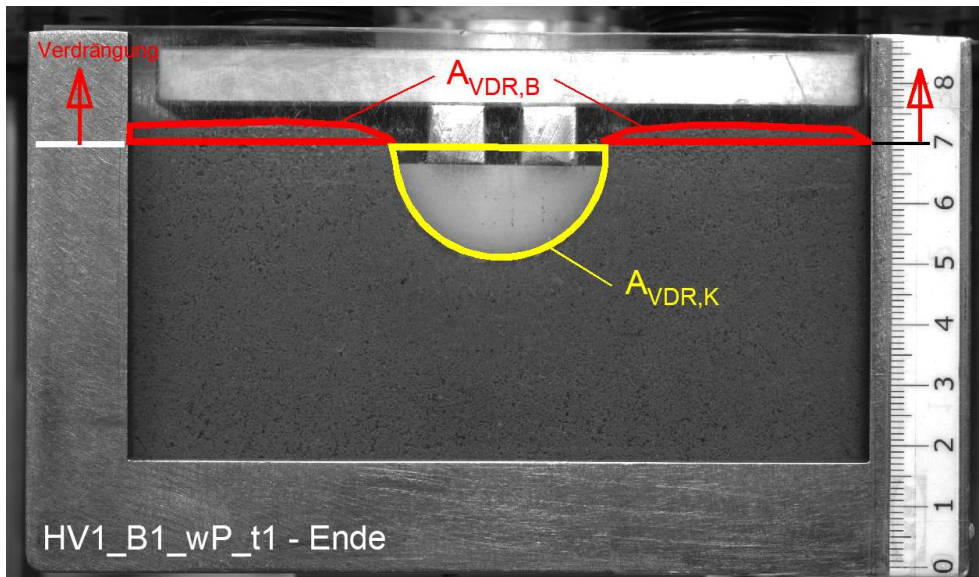


Abb. 75 Flächen Verdichtung und Verdrängung – Beispiel HV1\_B1\_wP\_t1

- **Ergebnisse**

Abb. 76 stellt die prozentuellen Anteile von Verdichtung und Verdrängung dar und erleichtert den Vergleich der Versuche mit der Kennung der unterschiedlichen Böden (B1, B2 und B3). Abb. 77 zeigt dieselben Ergebnisse, erleichtert jedoch den Vergleich der Kennung der unterschiedlichen Wassergehalte (wP und wS).

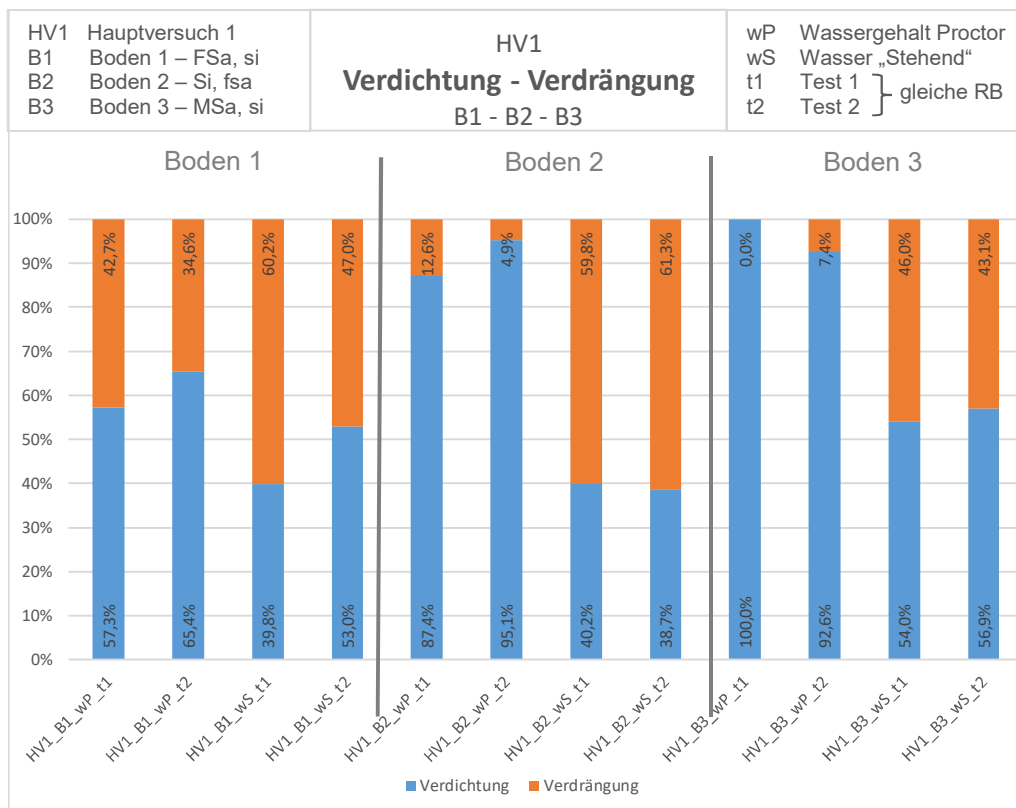


Abb. 76 Ergebnisse Verdichtung und Verdrängung HV 1 – Vergleich der Kennung Boden

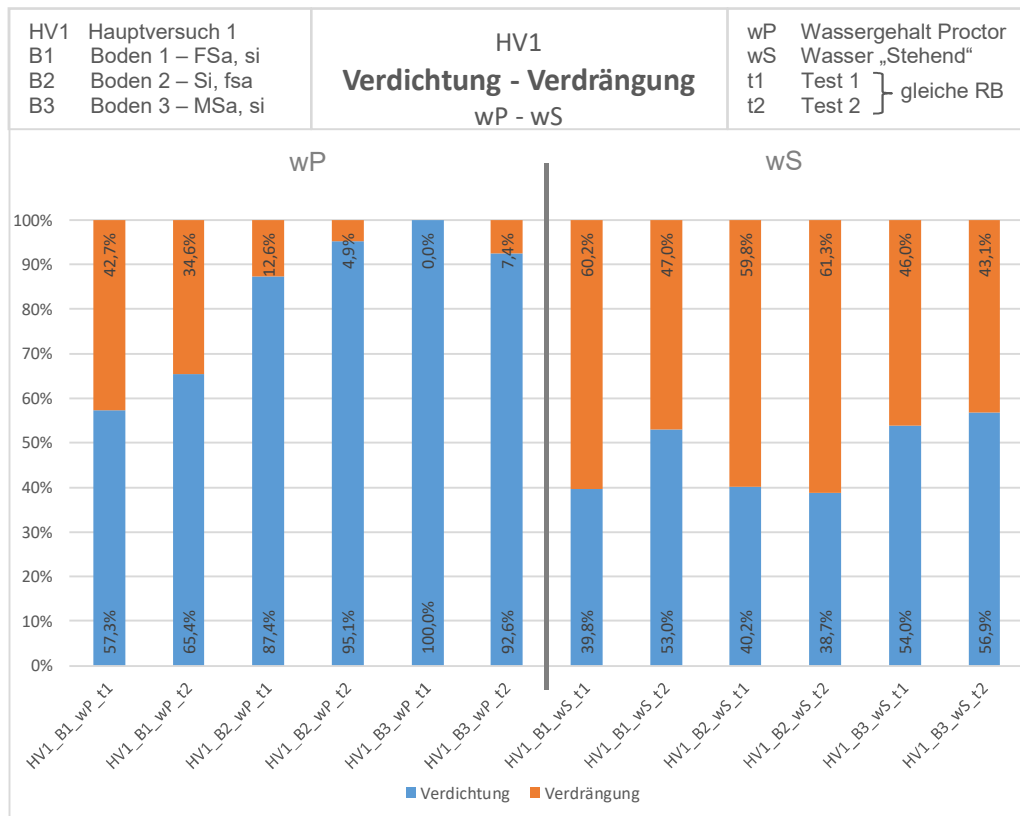


Abb. 77 Ergebnisse Verdichtung und Verdrängung HV 1 – Vergleich der Kennung Wassergehalt

### • Interpretation

Abb. 76 erleichtert den Vergleich der Böden. Die Ergebnisse der Versuche mit der Kennung `_wP_` zeigen, dass das Maß an Bodenverdrängung von Boden 1 nach Boden 3 abnimmt. Der Grund dafür ist die gewählte Einbaudichte und die vorhandene Proctordichte des jeweiligen Bodens. Bei Boden 1 entspricht die Einbaudichte schon beinahe der Proctordichte. Aufgrund dessen ist im Boden 1 der Verdrängungsanteil höher, da hier eine „geringere“ Verdichtung des Bodens möglich ist, als in Boden 2 und Boden 3.

Durch Abb. 77 wird deutlich, dass durch Wasserzugabe (Versuche mit der Kennung `_wS_`) der Anteil an Verdrängung zunimmt und das Ausmaß an Verdichtung abnimmt.

Der Grund hierfür ist, dass bei höherem Wassergehalt mehr Poren mit Wasser gefüllt sind. Da Wasser im Vergleich zu Luft inkompressibel ist, kann ein großer Teil des Porenvolumens nicht verkleinert werden. Das heißt es kann nur „wenig“ Verdichtung stattfinden. Da die Viertelkugel beim Eindringen in den Boden Platz benötigt und der Boden kaum verdichtet werden kann, muss im Boden eine Verdrängung stattfinden. Dabei darf der Porenwasserüberdruck nicht

unberücksichtigt bleiben. Um eine genaue Aussage darüber treffen zu können, müssten zusätzliche Untersuchungen mit vertiefter Betrachtungen dieser Thematik durchgeführt werden.

## 3.10 Hauptversuch 2

### 3.10.1 Versuchsablauf

Der Versuchsablauf der Hauptversuche 2 ist gleich wie jener der Hauptversuche 1 und in Kapitel 3.9.1 beschrieben. Hierbei besteht der Unterschied darin, dass vier Stück Viertelkugeln in den Boden eingebracht werden. Dies erfolgt jeweils mittig in einem Abstand von 2 cm an der Vorder- und Rückseite des Behälters (siehe Abb. 78).

Beinhaltet die Kennung des Versuchs „wP“ oder „wL“, wird direkt nach dem Einbau des Behälters der Versuch gestartet. Beinhaltet die Kennung des Versuchs das Kürzel „wS“, so erfolgt eine Minute vor dem Start die Wasserzugabe von 100 ml.

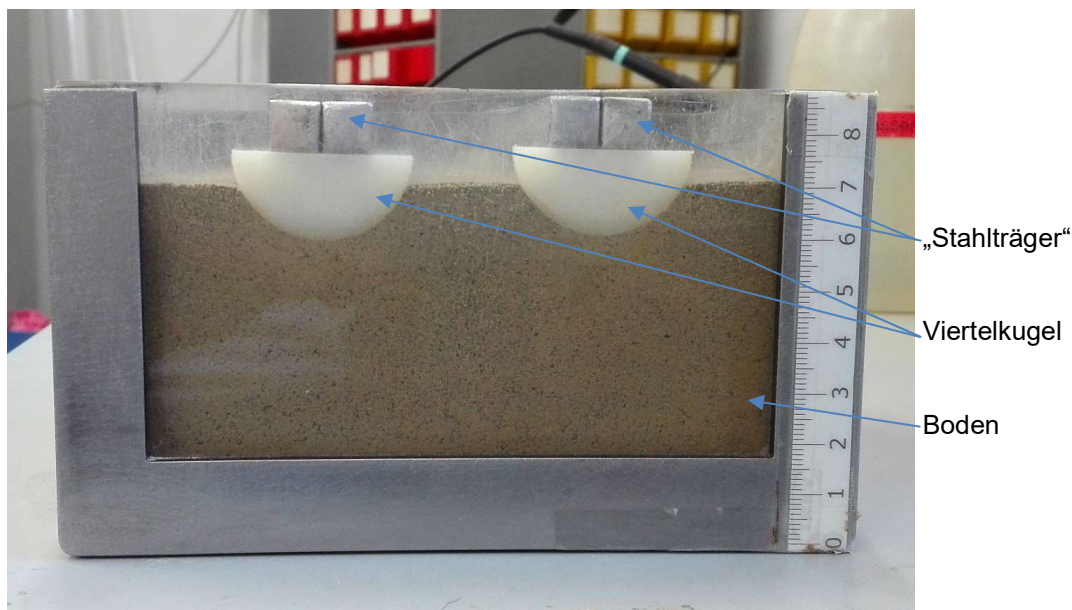


Abb. 78 Versuchskörper nach dem Einbringen der Viertelkugeln – HV 2

### 3.10.2 Versuchsdauer

- **Auswertung**

Die Auswertung der Versuchsdauer für die Hauptversuche 2 ist gleich wie für die Hauptversuche 1.

- **Ergebnisse**

Tab. 9 gibt über die Anzahl der Zyklen der einzelnen Versuche Auskunft. Die Ergebnisse werden in übersichtlichen Diagrammen veranschaulicht. Die Werte der Versuchsdauer können aus Abb. 79 abgelesen werden. Um einen Vergleich

zwischen den Versuchen mit unterschiedlichen Wassergehalten (wP, wS und wL) anzustellen, wird Abb. 80 herangezogen.

Tab. 9 Ergebnisse Versuchsdauer HV 2

Kennung Wassergehalt	Kennung Test	Hauptversuche 2		
		B1	B2	B3
		[Lastwechsel]		
wP	t1	4.360	20.000	20.000
	t2	20.000	20.000	20.000
wS	t1	349	6.977	44
	t2	2.791	6.628	41
wL	t1	44	17	44

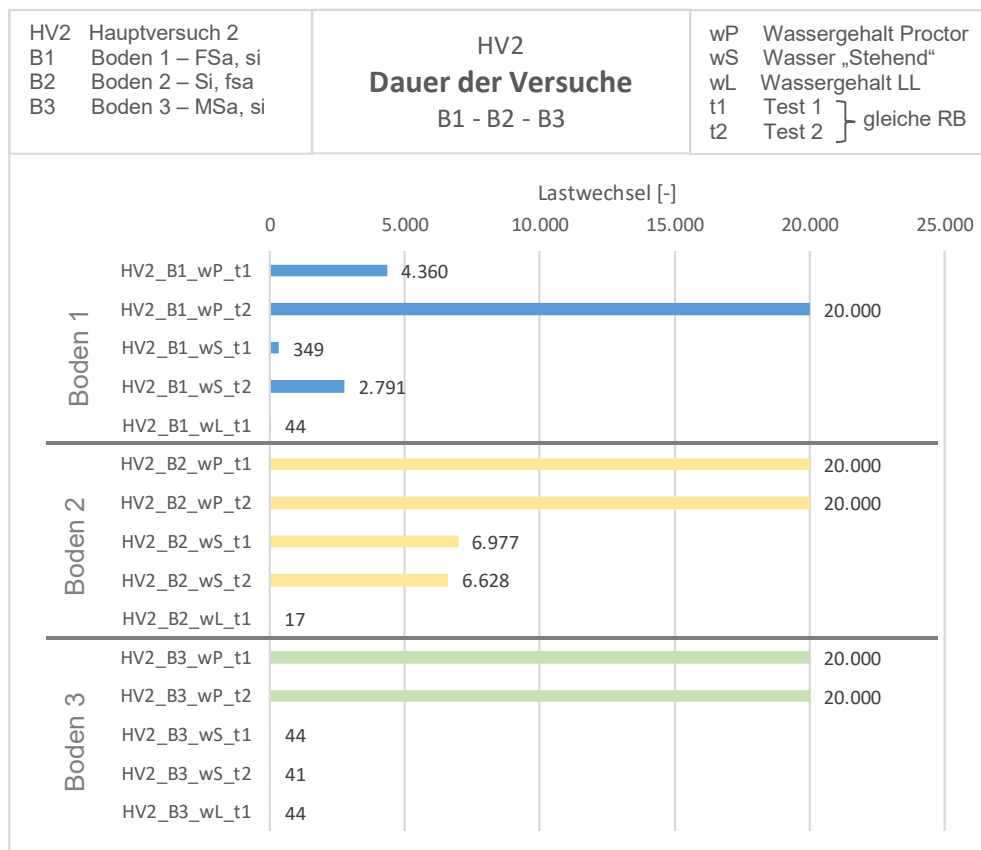


Abb. 79 Ergebnisse Versuchsdauer HV 2 – Vergleich der Kennung Boden

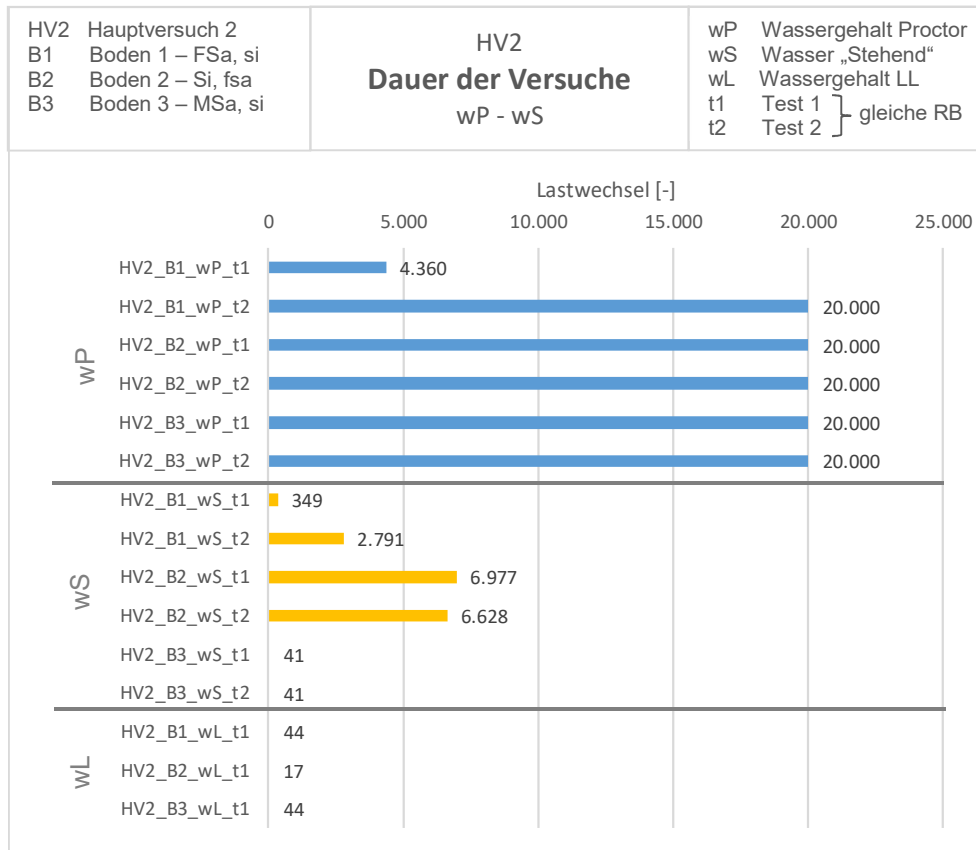


Abb. 80 Ergebnisse Versuchsdauer HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt

- **Interpretation**

Der Vergleich aus den Ergebnissen von Abb. 79 zeigt ein unterschiedliches Verhalten der Böden. Bei Boden 1 bildet der Versuch mit der Kennung HV2\_B1\_wP\_t1 eine Ausnahme und wird in Kapitel 3.11.1 genauer diskutiert. Vergleicht man die Versuche mit der Kennung \_wS\_, bemerkt man, dass die Versuche von Boden 2 einer viel längeren Belastungsdauer ausgesetzt waren, als die Versuche der Böden 1 und 3. Ein Grund für das sehr frühe Abbrechen der Versuche mit der Kennung \_B1\_wS\_ und \_B3\_wS\_ könnte die höhere Durchlässigkeit sein. Aufgrund dessen kann das Wasser tiefer in den Boden eindringen und hat einen negativen Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften. Weiters dürften die Böden 1 und 3 hinsichtlich Verflüssigung „empfindlicher“ sein.

Die Ergebnisse aus Abb. 80 geben darüber Auskunft, dass sowohl die Wasserzugabe, als auch ein erhöhter Wassergehalt, einen signifikanten Einfluss auf die maximal mögliche Dauer der Versuche hat. Die Versuche mit der Kennung \_wP\_ weisen eine Dauer von 20.000 Lastwechsel auf, ausgenommen der Versuch mit der Kennung HV2\_B1\_wP\_t1 (siehe Kapitel 3.11.1). Die Versuche mit der Kennung \_wS\_ mussten frühzeitig abgebrochen werden und die Testdauer kam

nicht über 6.977 Lastwechsel hinaus. Die Versuche mit der Kennung `_wL_` hielten einer maximalen Belastungsdauer von nur 44 Lastwechsel stand.

### 3.10.3 Eindringtiefe

- **Auswertung**

Die Auswertung der Eindringtiefe für HV 2 entspricht derselben wie der für HV 1.

- **Ergebnisse**

Die nachstehenden Diagramme zeigen die Eindringtiefen der Viertelkugeln in den Boden. Dabei beschreibt die Ordinate die Eindringtiefe in Millimeter und die Abszisse die Zyklusanzahl. Die negativen Werte auf der Abszisse entstanden beim Versuchseinbau und stellen keine Lastwechsel dar.

Abb. 81 zeigt die Eindringtiefe der Viertelkugeln über die gesamte Belastungsdauer von 20.000 Lastwechseln. Diese Darstellung soll den Vergleich der Versuche mit der Kennung Boden (B1, B2 und B3), welche entsprechend der Legende gefärbt sind, ermöglichen. Die Eindringtiefe der ersten 600 Lastwechsel kann von Abb. 82 abgelesen werden. Zusätzlich ist in Abb. 83 die Vorbelastung aus dem Versuchseinbau ersichtlich.

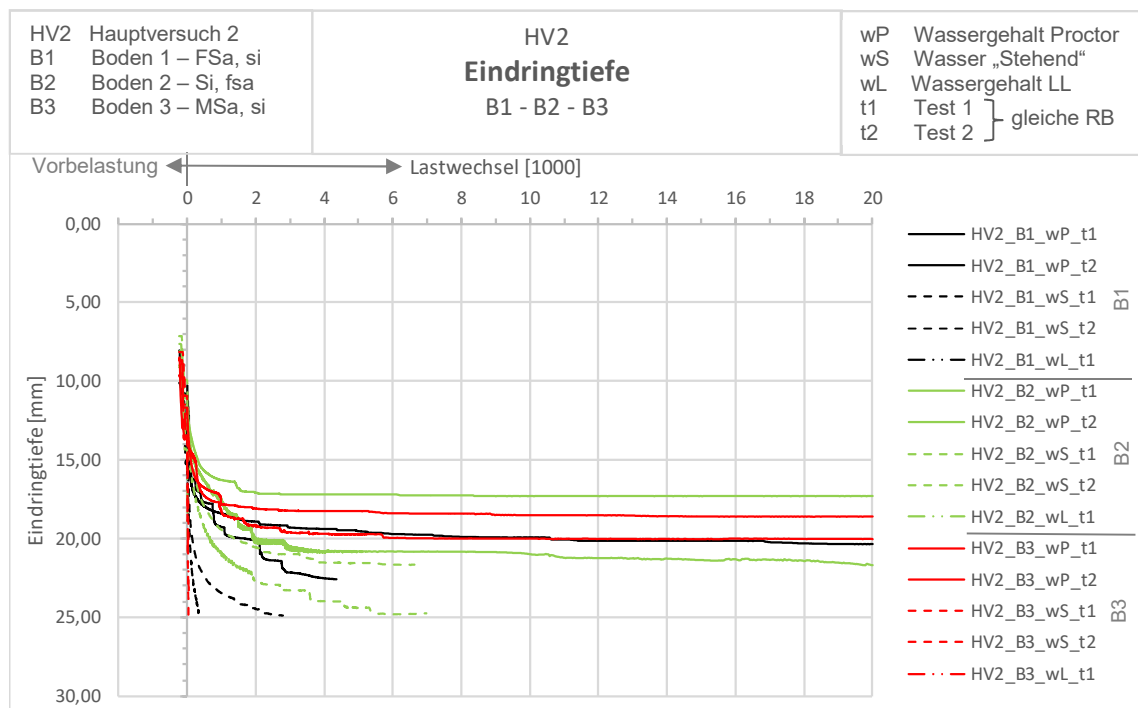


Abb. 81 Ergebnisse Eindringtiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Boden – 0 bis 20.000 Lastwechsel

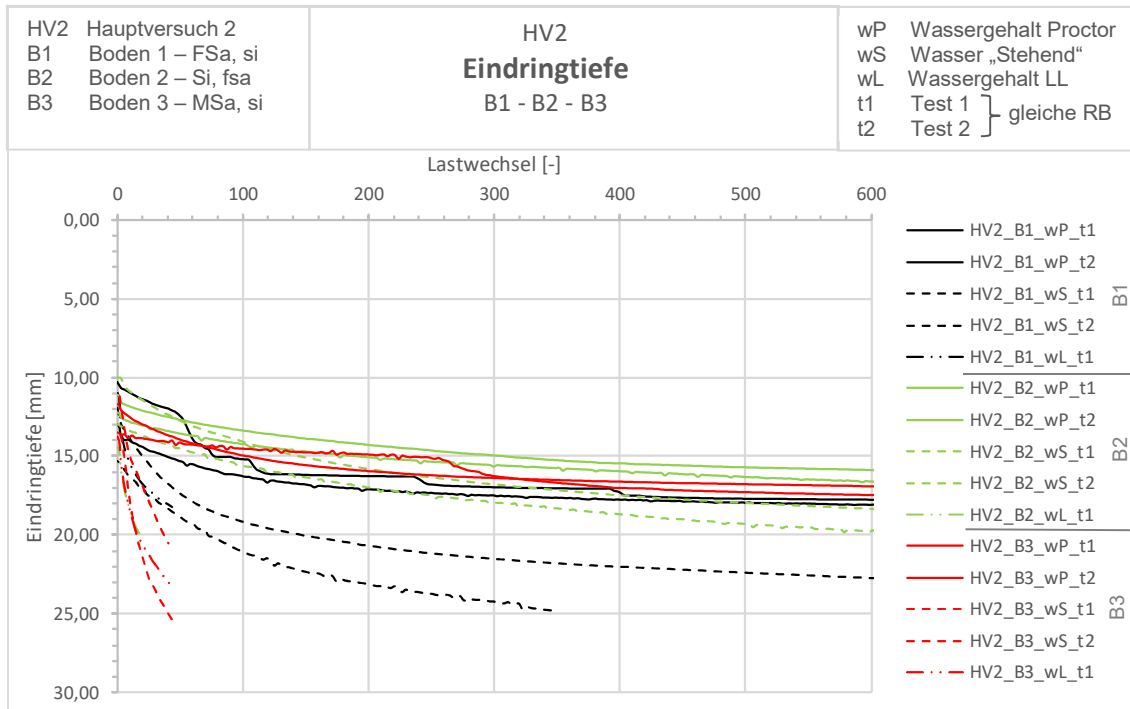


Abb. 82 Ergebnisse Eindringtiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Boden – 0 bis 600 Lastwechsel

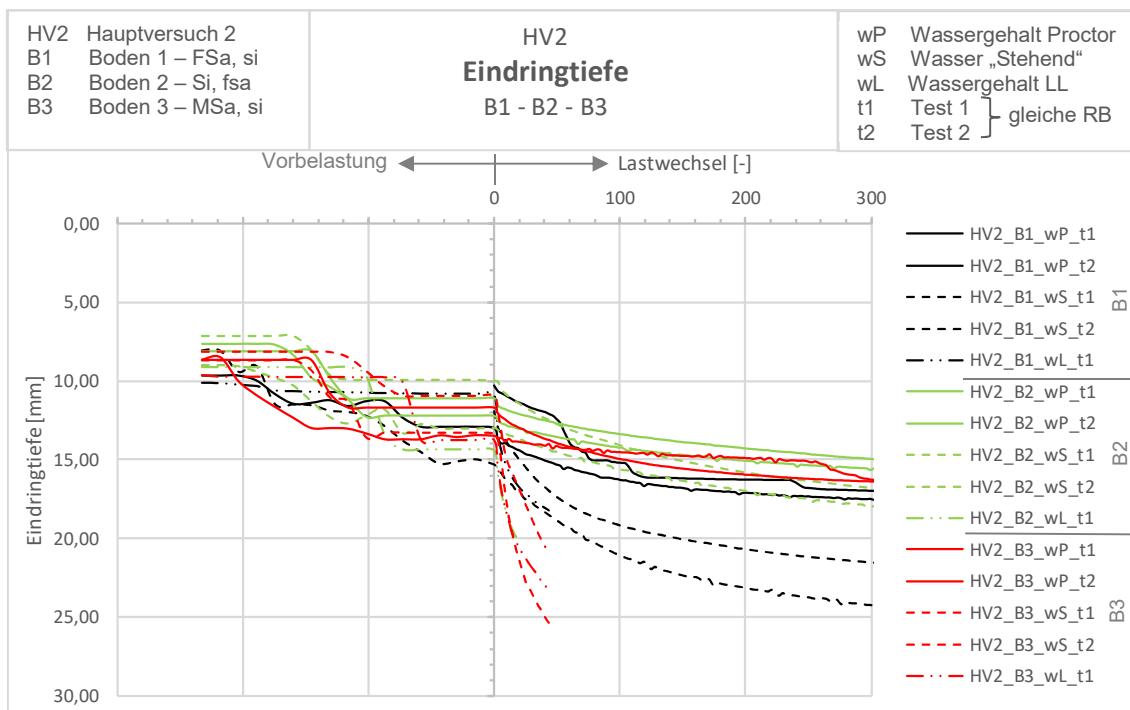


Abb. 83 Ergebnisse Eindringtiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Boden – 0 bis 300 Lastwechsel inklusive Vorbelastung

Durch das Betrachten der Abb. 84, Abb. 85 und Abb. 86 wird ein Vergleich der Versuche mit Kennung Wassergehalt (wS, wP und wL) möglich. Dabei gibt Abb. 84 Auskunft über die Eindringtiefe während der gesamten Belastungsdauer. Die detaillierte Betrachtung der ersten 600 Lastwechsel ist in Abb. 85 ersichtlich und Abb. 86 zeigt die Vorbelastungsphase.



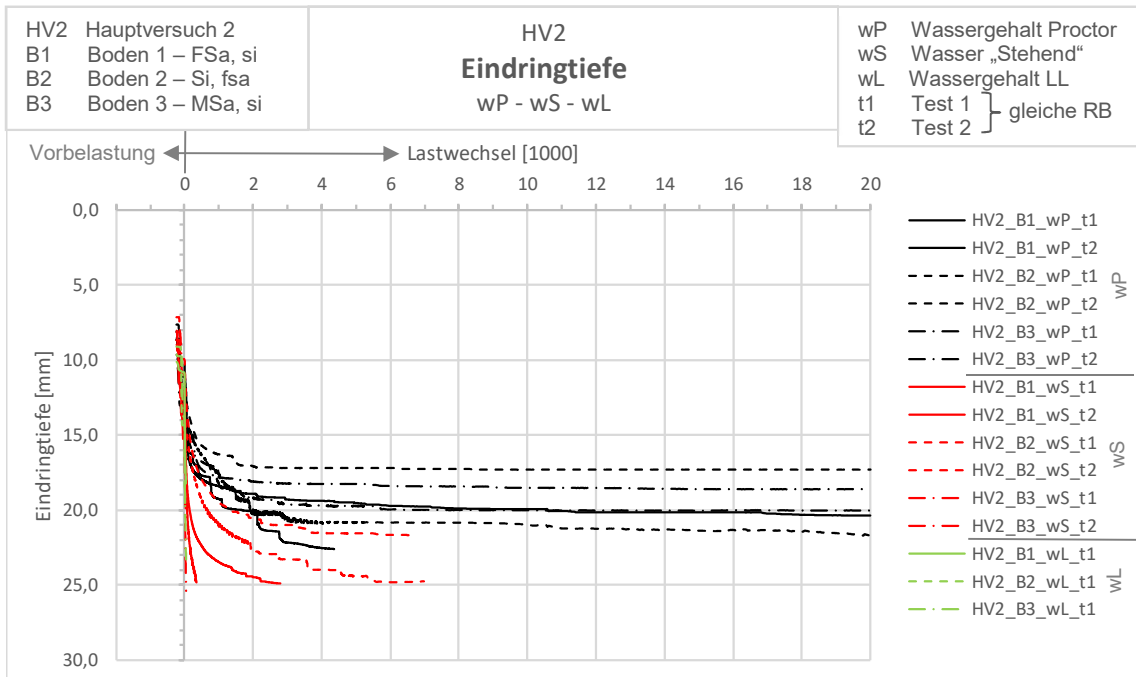


Abb. 84 Ergebnisse Eindringtiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt – 0 bis 20.000 Lastwechsel

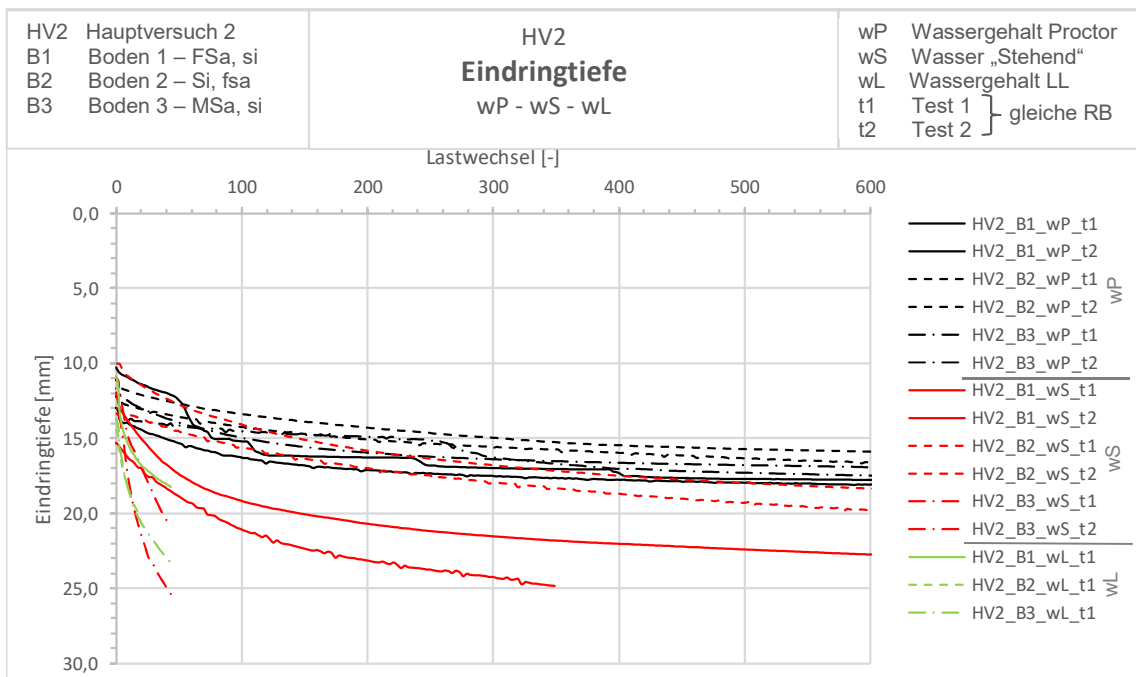


Abb. 85 Ergebnisse Eindringtiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt – 0 bis 600 Lastwechsel

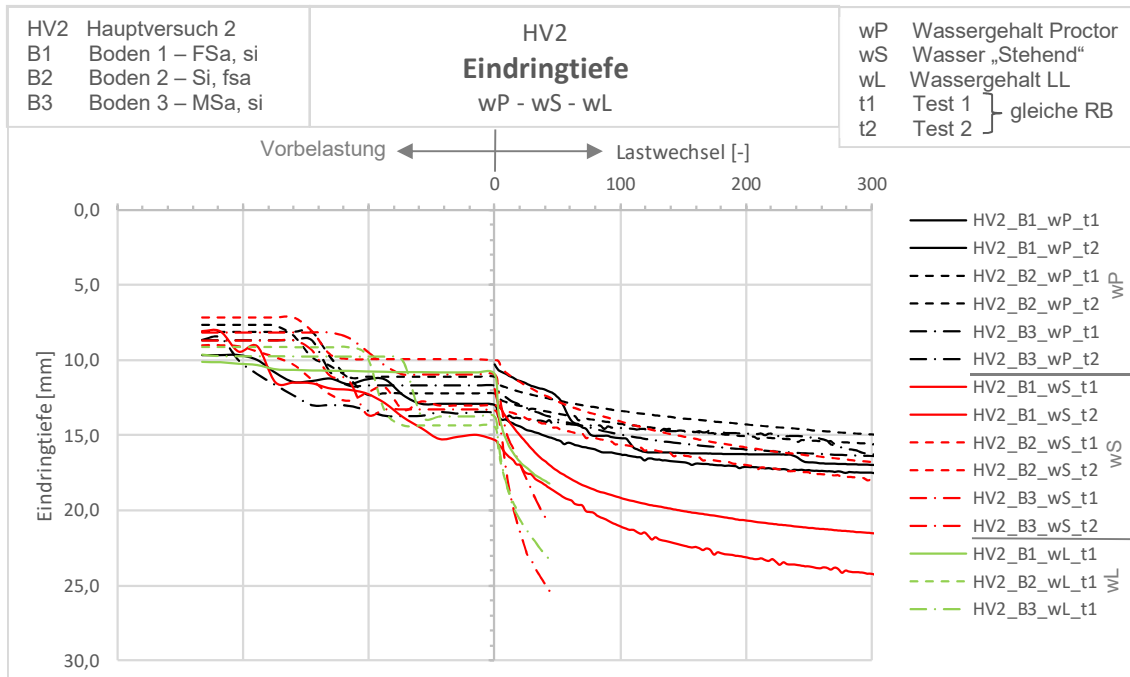


Abb. 86 Ergebnisse Eindringtiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt – 0 bis 300 Lastwechsel inklusive Vorbelastung

• **Interpretation**

Die Endsetzungen nach 20.000 Lastwechseln variieren bei den Versuchen mit Boden 2 sehr stark (Abb. 81). Die Setzungen von Boden 1 und Boden 3 befinden sich einem geringen Abstand zueinander. Die Ausnahme bildet der Versuch mit Kennung HV2\_B1\_wP\_t1, welcher größere Setzungen innerhalb von 4.360 Lastwechseln vorweist und in Kapitel 3.11.1 genauer diskutiert wird.

Es ist ersichtlich, dass bei den Versuchen mit der Kennung wP ab einem gewissen Zeitpunkt keine Setzungen mehr auftreten und die Setzungskurven horizontal verlaufen. Dieser Zeitpunkt kann nicht eindeutig eingegrenzt werden, da während den Versuchen die Kraftgröße händisch mittels der Einstellschrauben an der Versuchsmaschine nachgestellt werden musste. Aufgrund dessen sind die „Sprünge“ in den Setzungskurven entstanden.

Bei genauer Betrachtung der ersten 600 Lastwechsel wird deutlich, dass durch die Zugabe von Wasser auf die Oberfläche die Kugel viel schneller und tiefer eindringt (strichlierte Linien in Abb. 82). Weiters zeigen die Versuche mit der Kennung wL ein noch schnelleres Eindringen der Kugel in den sehr feuchten Boden (strichpunktierte Linien in Abb. 82), was zu einem vorzeitigen Abbruch der Versuche führte. Da bei diesen Versuchen die Setzungskurven noch keine horizontalen Tangenten vorweisen, kann davon ausgegangen werden, dass die Setzungen noch größer ausfallen würden, wenn es die Möglichkeit gäbe, die Versuche weiter zu führen. Hierbei bilden die Testläufe mit der Kennung B2\_wS eine Ausnahme. Bei

diesen Versuchen hat sich bereits eine nahezu horizontale Tangente ausgebildet. Somit kann angenommen werden, dass bei diesen Versuchen die Setzungen wahrscheinlich nicht mehr steigen würden.

Der Startpunkt der Setzungen variiert, sowohl beim Einbringen der Viertelkugeln in den Boden, als auch aufgrund der Vorbelastung durch den Versuchseinbau, wie aus Abb. 83 hervorgeht. Es war aufgrund der Konstruktion der Versuchsmaschine nicht möglich mit dem selben Startpunkt der Setzung von jeder Viertelkugel bei Versuchsbeginn zu starten.

Die Ergebnisse der Setzungen in Abb. 84 und Abb. 85 zeigen, dass durch Wasserzugabe (Versuche mit der Kennung `_wS_`, hier Linien mit roter Farbe und Versuche mit der Kennung `_wL_`, hier Linien mit grüner Farbe) die Viertelkugeln viel schneller und tiefer eindringen, als bei den Versuchen ohne Wasserzugabe (Versuche mit der Kennung `_wP_`, hier Linien mit schwarzer Farbe). Die Ergebnisse lassen die Vermutung zu, dass der erhöhte Wassergehalt sehr stark die Zustandsänderung der feinkörnigen Böden beeinflusst und zu einer Verschlechterung der Festigkeitseigenschaften führt. Weiters führt die dynamische Belastung zu einem raschen und tiefen Eindringen der Viertelkugel in den Boden.

#### 3.10.4 Einflussbereich

- **Auswertung**

Die Auswertung des Einflussbereichs in Hinblick auf Fläche und Tiefe für die Hauptversuche 2 ist gleich wie für die Hauptversuche 1. Zusätzlich werden anhand eines Beispiels die Ergebnisse der PIV-Analyse für die Hauptversuche 2 dargestellt. Abb. 87 zeigt die Verschiebungsvektoren, Abb. 88 die Bereiche mit den unterschiedlichen Geschwindigkeiten und Abb. 89 repräsentiert die Überlagerung und die Bestimmung des Einflussbereiches. Hierbei wird für die Einflusstiefe der Mittelwert von den beiden gemessenen Werten unterhalb der Viertelkugeln berechnet.

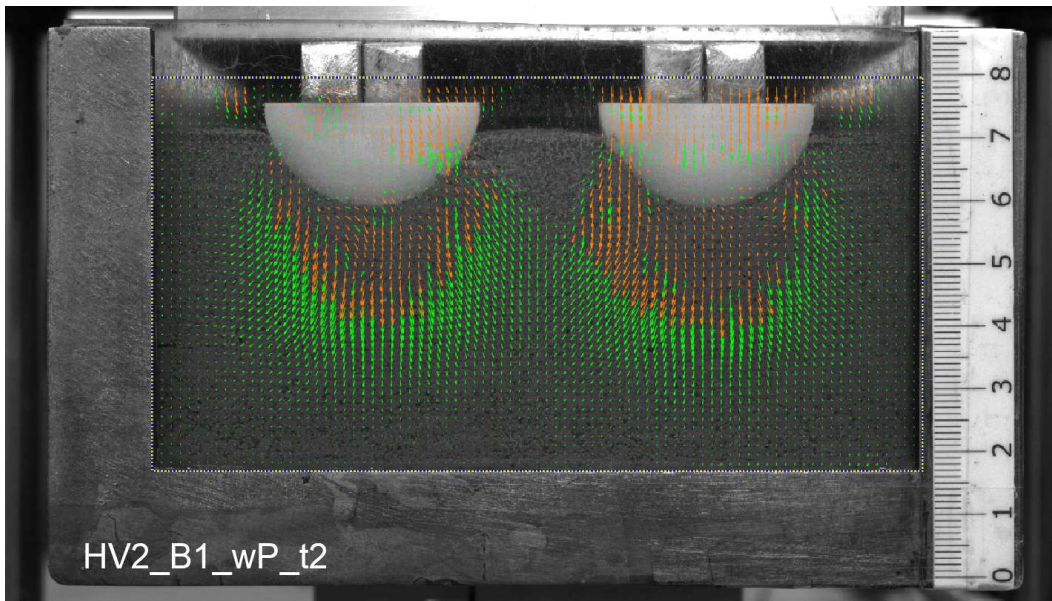


Abb. 87 Verschiebungsvektoren aus der PIV-Analyse – Beispiel HV2\_B1\_wP\_t2

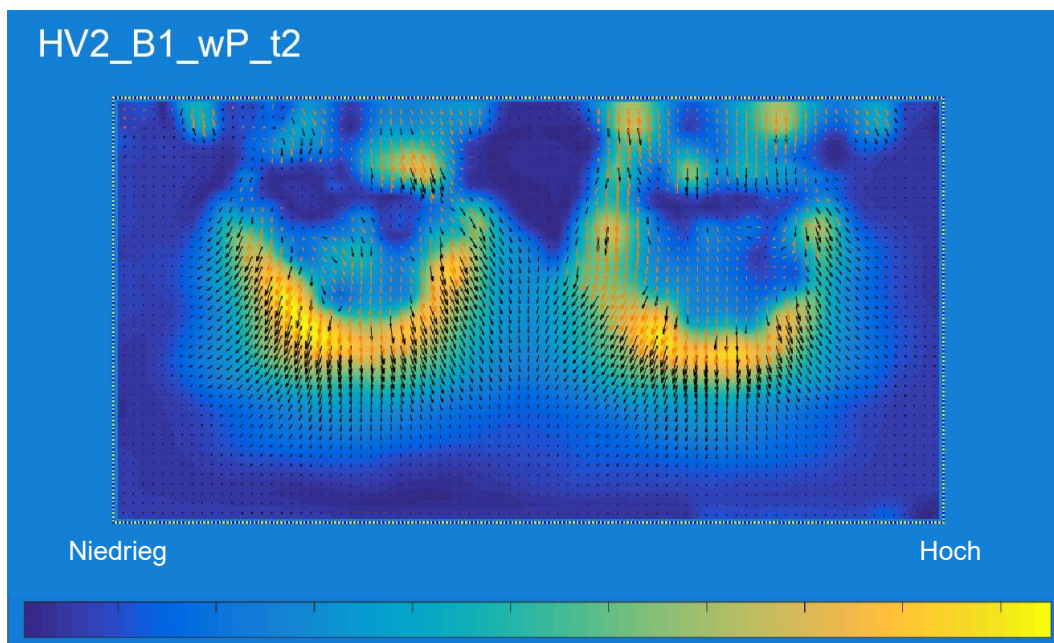


Abb. 88 Geschwindigkeitsfelder aus der PIV-Analyse – Beispiel HV2\_B1\_wP\_t2

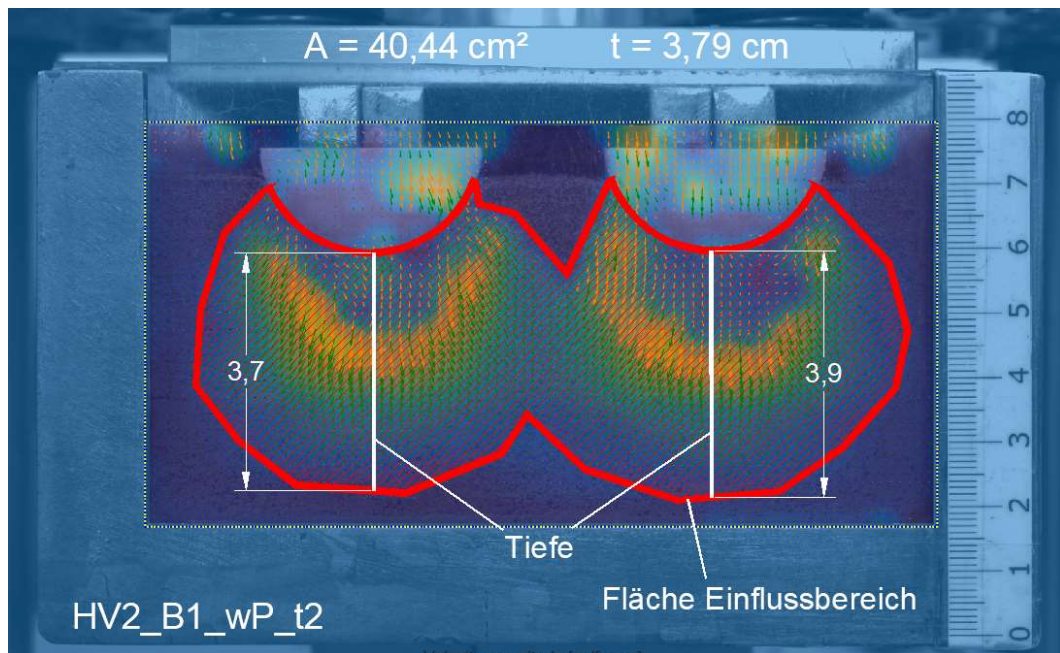


Abb. 89 Überlagerung und Ermittlung Einflussbereich-Fläche und -Tiefe – Beispiel HV2\_B1\_wP\_t2

- **Ergebnisse**

Die Ergebnisse aus der Flächenermittlung werden aus Abb. 90 deutlich und ermöglichen den Vergleich der Versuche in Hinblick auf die unterschiedlichen Böden (B1, B2 und B3). Für den einfacheren Vergleich der Versuche mit der Kennung Wassergehalt ( $w_S$ ,  $w_P$  und  $w_L$ ) wurden in Abb. 91 die Werte der Flächenermittlung erneut dargestellt.

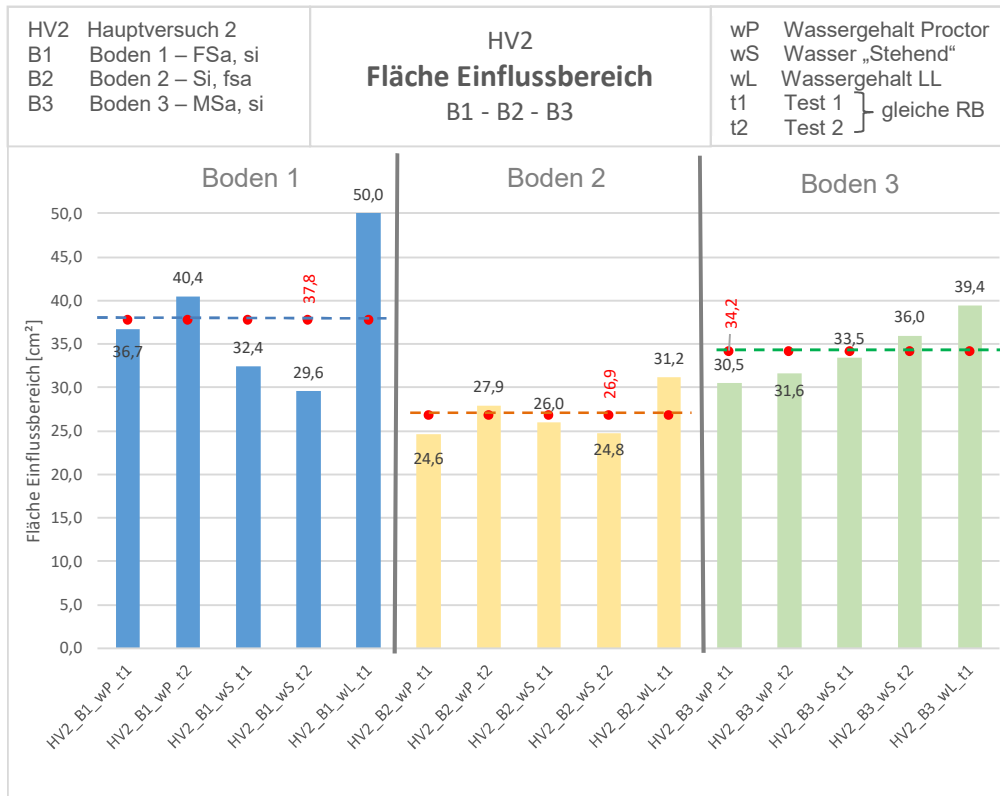


Abb. 90 Ergebnisse Einflussbereich Fläche HV 2 – Vergleich der Kennung Boden

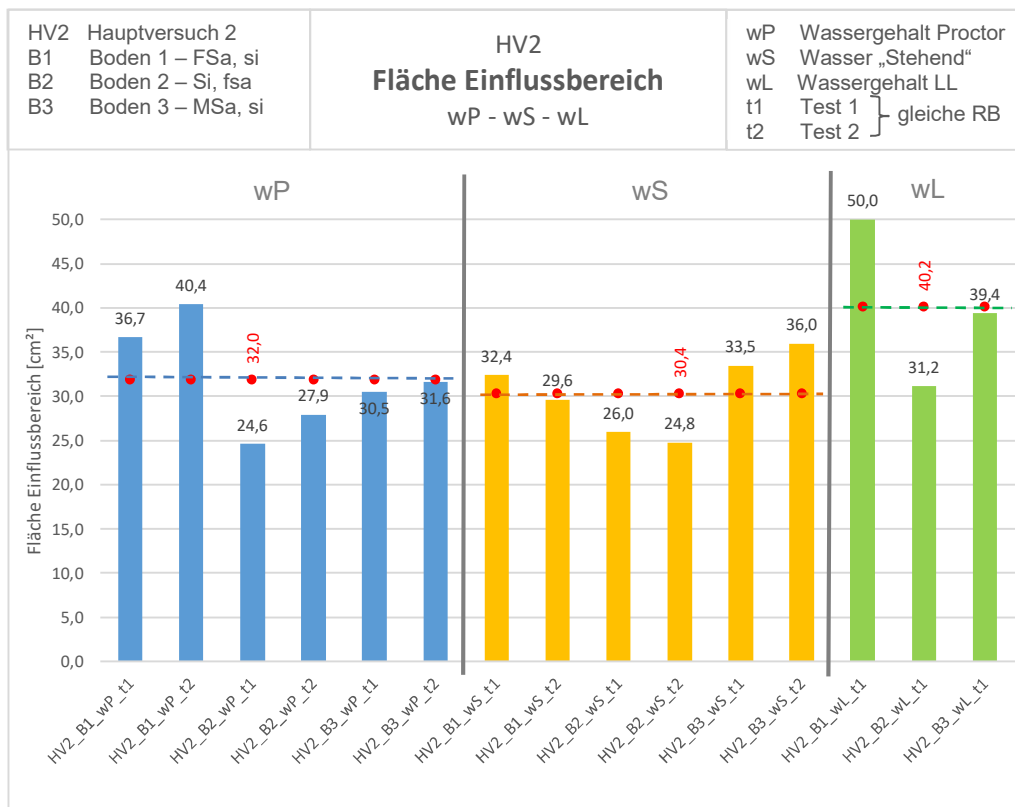


Abb. 91 Ergebnisse Einflussbereich Fläche HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt

Die Versuche der unterschiedlichen Böden (B1, B2 und B3) können anhand von Abb. 92 in Hinblick auf die Tiefe des Einflussbereiches verglichen werden. Um die

Versuche mit der Kennung Wassergehalt (wS, wP und wL) zu vergleichen, werden dieselben Ergebnisse nochmals in Abb. 93 gezeigt.

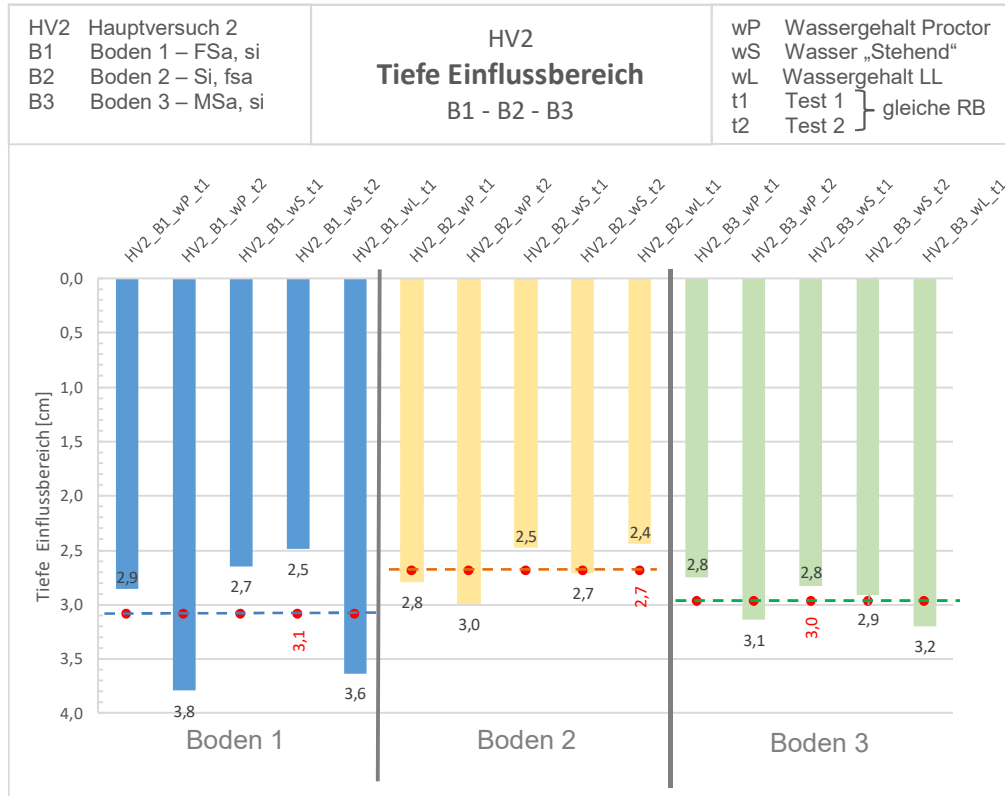


Abb. 92 Ergebnisse Einflussbereich Tiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Boden

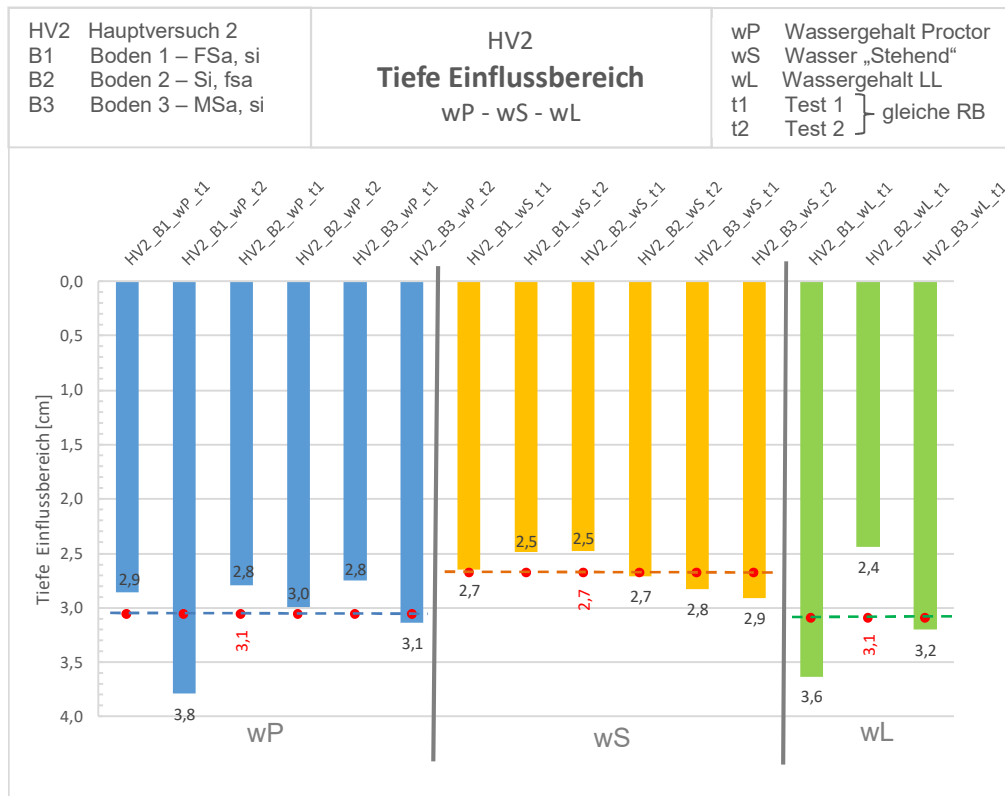


Abb. 93 Ergebnisse Einflussbereich Tiefe HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt

- **Interpretation**

Durch Abb. 90 wird deutlich, dass die Fläche des Einflussbereichs von Boden 1 bei etwa 38 cm<sup>2</sup>, von Boden 2 bei etwa 27 cm<sup>2</sup> und von Boden 3 bei etwa 34 cm<sup>2</sup> liegt.

Der Durchschnittswert der Flächen aus den Versuchen `_wP_` und `_wS_` ist in etwa gleich und entspricht circa 31 cm<sup>2</sup> (Abb. 91). Bei den Versuchen `_wL_` ist der Wert deutlich höher und beträgt etwa 40 cm<sup>2</sup>. Entsprechend Abb. 92 und Abb. 93 ist die Tiefe des Einflussbereichs für alle Versuche in etwa gleich und liegt bei ungefähr 3 cm.

Dementsprechend wird derselbe Effekt wie bei den Hauptversuchen 1 erkannt. Bei höherem Wassergehalt bleibt die Tiefe des Einflussbereichs nahezu unverändert, jedoch wird eine größere Einflussfläche aktiviert. Das bedeutet der Einflussbereich im Boden nimmt mit höherem Wassergehalt in horizontaler Richtung zu und bleibt in der Tiefe nahezu gleich.

### 3.10.5 Verdichtung und Verdrängung

- **Auswertung**

Für die Auswertung der Verdichtung und Verdrängung in der Schnittebene wurde bei Hauptversuch 2 dieselbe Methodik angewendet wie bei Hauptversuch 1. Für eine Veranschaulichung der Auswerteflächen der Hauptversuche 2 dient das Beispiel in Abb. 94.

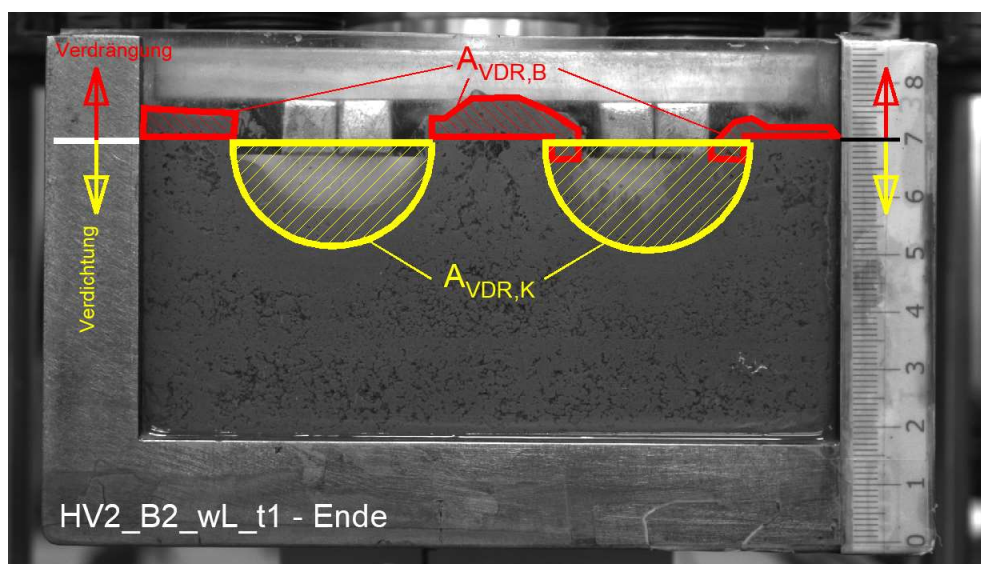


Abb. 94 Flächen Verdichtung und Verdrängung – Beispiel HV2\_B2\_wL\_t1



• **Ergebnisse**

Die prozentuellen Anteile von Verdichtung und Verdrängung sind in Abb. 96 veranschaulicht, was einen Vergleich der Versuche B1, B2 und B3 zulässt. Durch Abb. 96, welche die gleichen Ergebnisse beinhaltet, wird eine Gegenüberstellung der Versuche wP, wS und wL ermöglicht. Dabei ist ersichtlich, dass keine Werte für Versuch HV2\_B3\_wS\_t1 vorliegen. Hierbei ist das Foto vom Berührungszeitpunkt Kraftplatte zu Boden nicht rechtzeitig erstellt worden. Somit kann kein Bereich für diesen Versuch festgelegt werden.

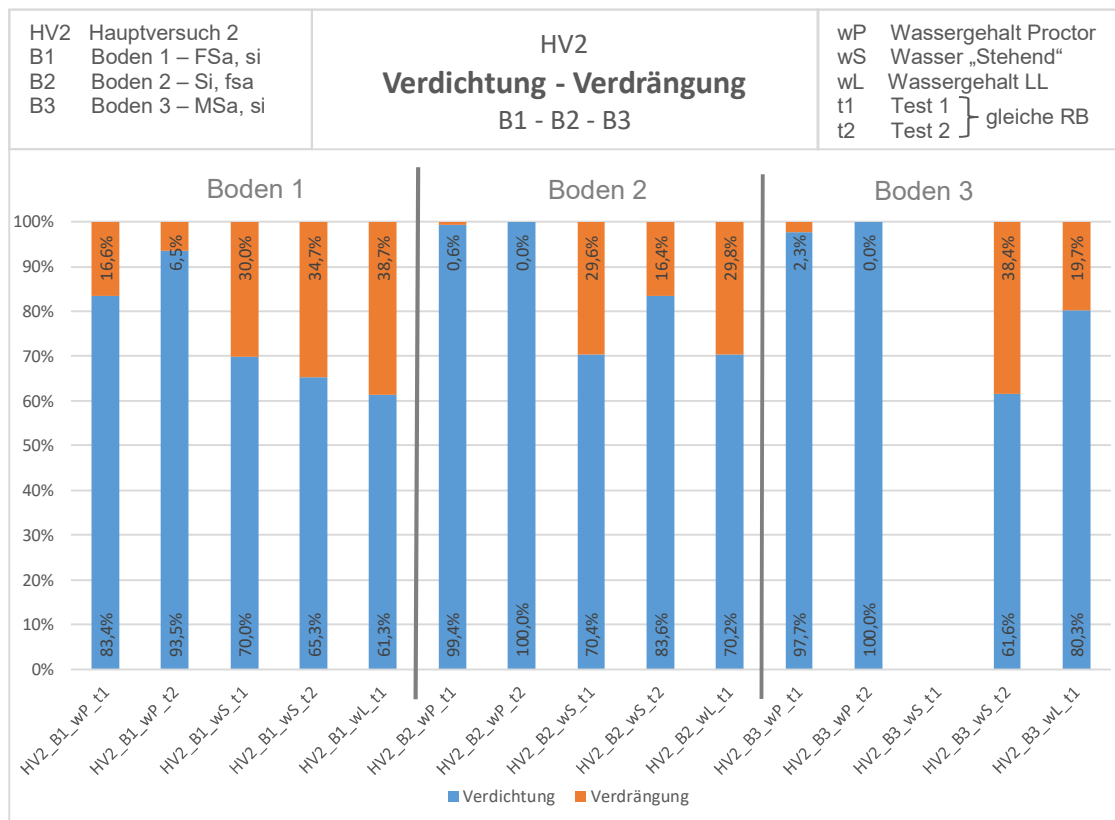


Abb. 95 Ergebnisse Verdichtung und Verdrängung HV 2 – Vergleich der Kennung Boden

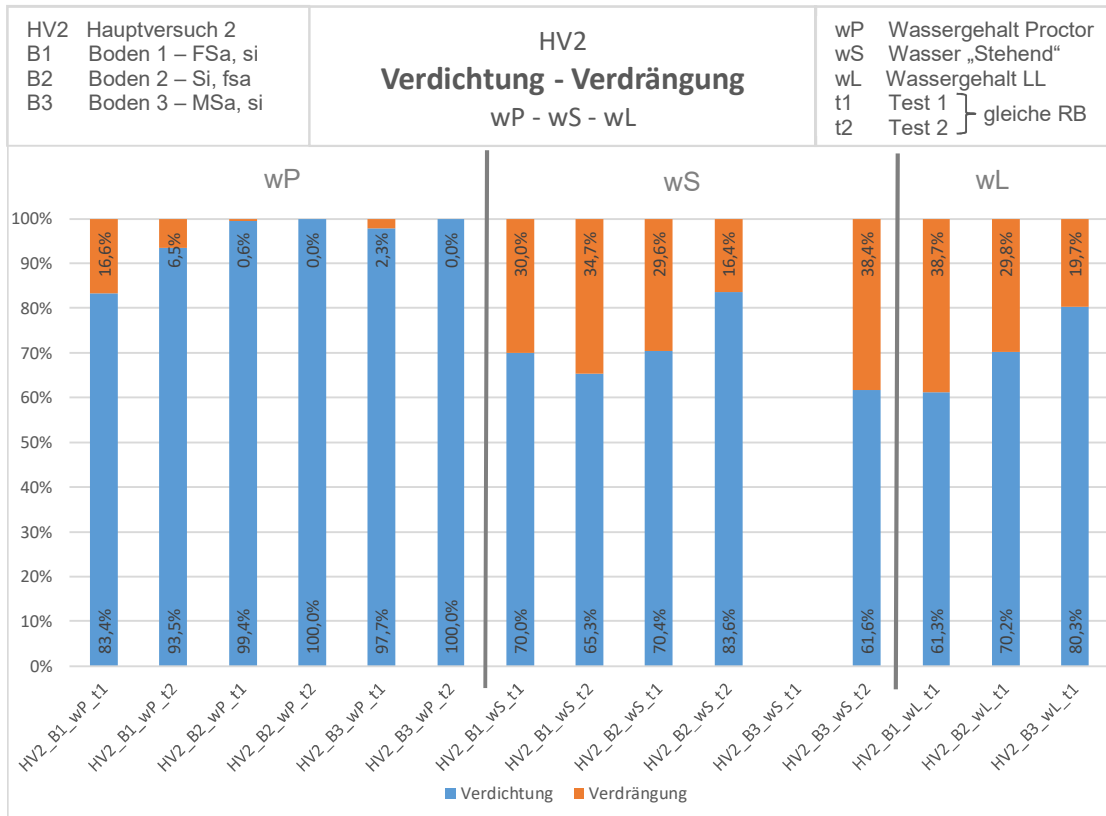


Abb. 96 Ergebnisse Verdichtung und Verdrängung HV 2 – Vergleich der Kennung Wassergehalt

- **Interpretation**

Versuche mit der Kennung `_wP_` zeigen, dass das Maß an Bodenverdrängung bei Boden 1 höher als bei Boden 2 und Boden 3 ist. Bei diesen beiden ist nahezu keine Verdrängung vorhanden. Der Grund dafür ist die gewählte Einbaudichte und die vorhandene Proctordichte des jeweiligen Bodens. Bei Boden 1 entspricht die Einbaudichte schon beinahe der Proctordichte. Aufgrund dessen ist im Boden 1 die Verdrängung höher, da hier eine „geringere“ Verdichtung des Bodens möglich ist, als in Boden 2 und Boden 3.

Aus Abb. 96 kann man ablesen, dass durch Wasserzugabe (Versuche mit der Kennung `_wS_` und `_wL_`) das Ausmaß an Verdrängung zunimmt und das Ausmaß an Verdichtung abnimmt.

### 3.11 Vergleich von Hauptversuch 1 und Hauptversuch 2

#### 3.11.1 Boden 1

Die Versuche mit der Kennung `HV1_B1_wP_t2` und `HV2_B1_wP_t1` mussten frühzeitig abgebrochen werden. Trotz der hohen Einbaudichte, welche beinahe der Proctordichte entspricht, kommt es bei diesen Versuchen zu großen Setzungen der Viertelkugeln.

Zusätzlich wurde während der Versuche Wasser aus dem Boden „gedrückt“, wie in Abb. 97 ersichtlich.

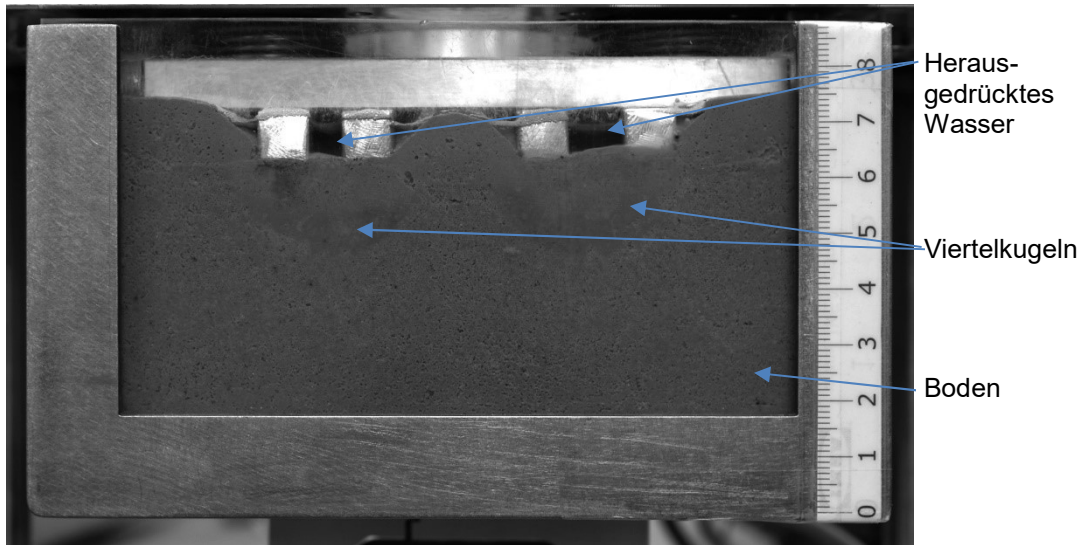


Abb. 97 Herausgedrücktes Wasser bei HV2\_B2\_wP\_t1

Es kann nicht eindeutig beurteilt werden, warum dieses Verhalten aufgetreten ist. Es sollte eine Versuchsreihe vom Boden 1 mit unterschiedlichen Einbaudichten und dem Proctor-Wassergehalt durchgeführt werden, um dieses Verhalten verstehen zu können.

### 3.11.2 Versuchsdauer

- **Ergebnisse**

In Abb. 98 werden die Mittelwerte der Versuchsdauern aus den zuvor präsentierten Ergebnissen dargestellt (siehe Kapitel 3.9.2 und 3.10.2) und miteinander verglichen.

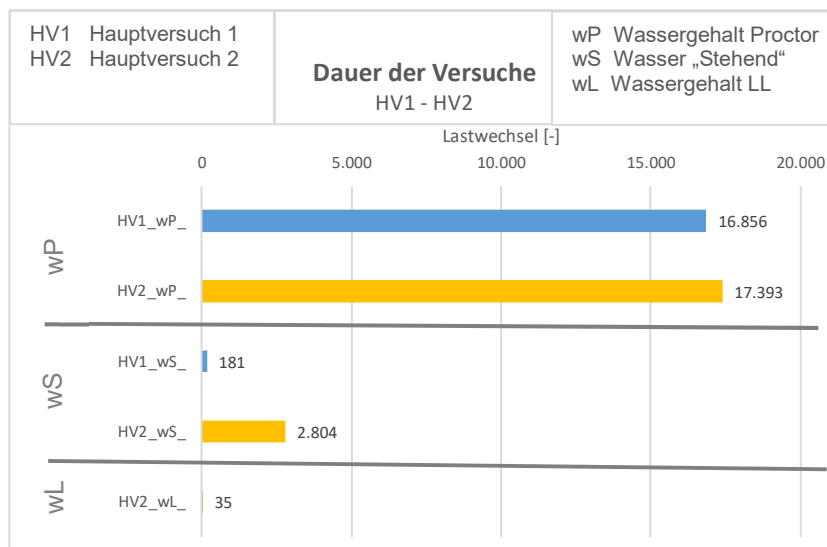


Abb. 98 Ergebnisse Versuchsdauer HV 1 und HV 2

- **Interpretation**

Im Gegenzug zu den Versuchen mit der Kennung `_wP_` kann in Hinblick auf die Versuchsdauer bei den Versuchen mit der Kennung `_wS_` ein deutlicher Unterschied vernommen werden. Die Versuche `HV2_wS_` dauerten eindeutig länger, als die Versuche `HV1_wS_`.

Für die Beurteilung einer Gruppenwirkung sind die Ergebnisse aus der Versuchsdauer alleine nicht ausreichend. Zusätzlich müssen noch die Ergebnisse aus Eindringtiefe, Einflussbereich, Verdichtung und Verdrängung untersucht werden.

### 3.11.3 Eindringtiefe

- **Ergebnisse**

Die nachfolgenden Diagramme geben über die Mittelwerte der Eindringtiefe Auskunft. Durch die Abszisse wird die Zyklusdauer und durch die Ordinate wird die Eindringtiefe in Millimeter angegeben. Alle negativen Werte auf der Abszisse entstanden durch das Einbringen der Kugel und die Vorbelastung beim Versuchseinbau und repräsentieren keine Lastwechsel.

Abb. 99 zeigt die Mittelwerte der Eindringtiefe der Viertelkugeln über die gesamte Belastungsdauer von 20.000 Lastwechseln. Diese Darstellung soll den Vergleich der Hauptversuche erleichtern. Abb. 100 stellt die Mittelwerte der Eindringtiefe innerhalb der ersten 600 Lastwechsel dar. Zusätzlich ist in Abb. 101 die Vorbelastung aus dem Versuchseinbau ersichtlich.

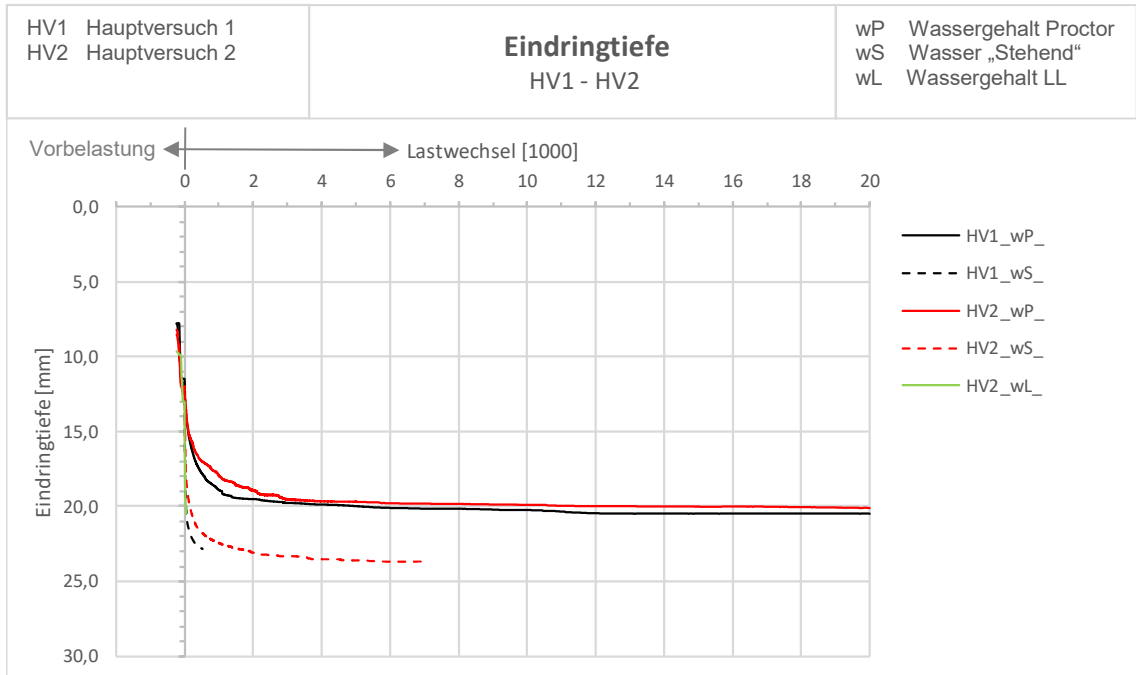


Abb. 99 Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 und HV 2 – 0 bis 20.000 Lastwechsel

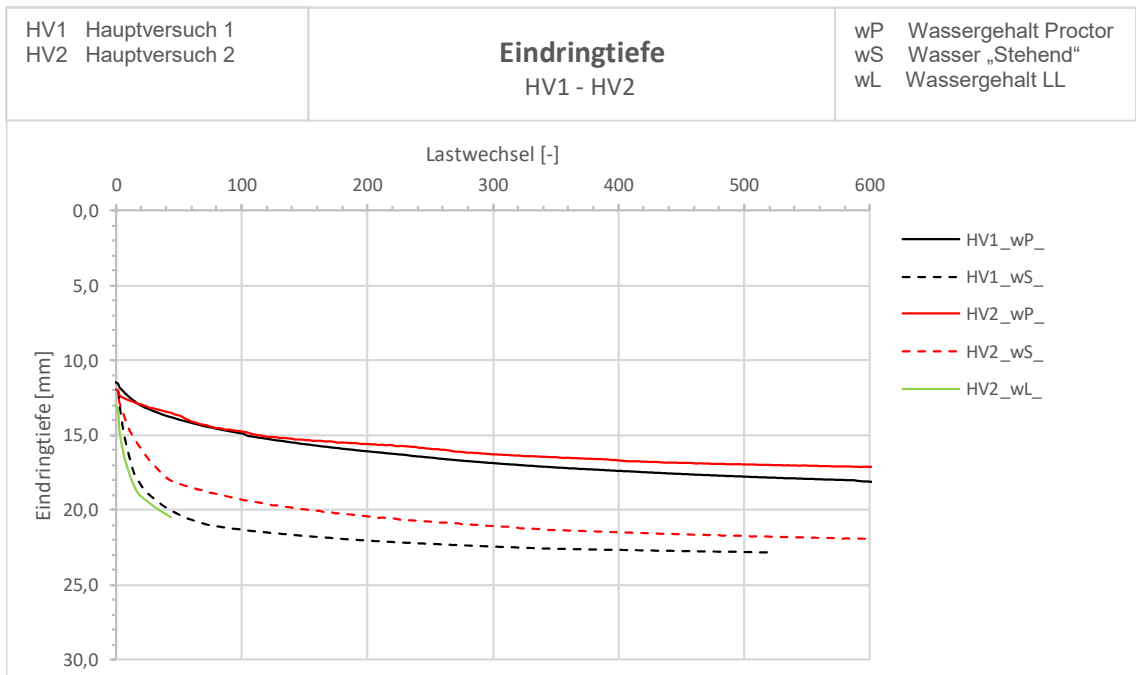


Abb. 100 Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 und HV 2 – 0 bis 600 Lastwechsel

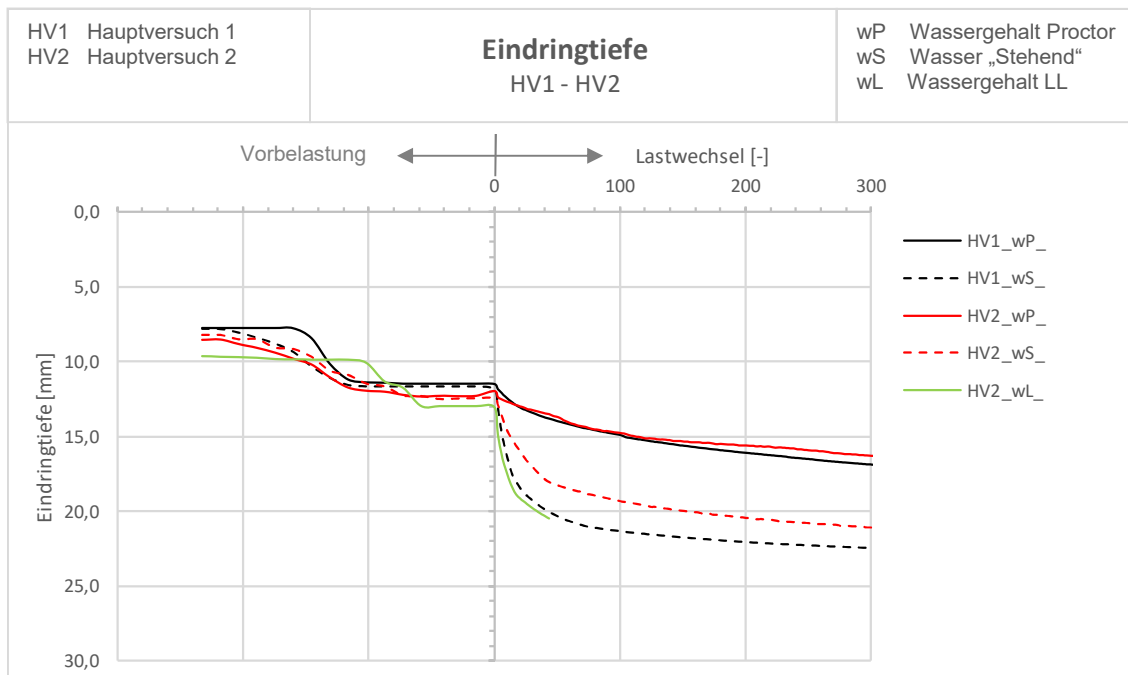


Abb. 101 Ergebnisse Eindringtiefe HV 1 und HV 2 – 0 bis 300 Lastwechsel inklusive Vorbelastung

- **Interpretation**

Betrachtet man Abb. 99, so kann festgestellt werden, dass die Endsetzungen der Versuche mit der Kennung HV1\_wP\_ minimal höher sind, als jene der Versuche mit der Kennung HV2\_wP\_. Vergleicht man die Setzungen bei 100 Lastwechsel in Abb. 100, stellt man fest, dass die Setzungen bei den Versuchen mit der Kennung HV1\_wS\_ etwa 21,5 mm und bei den Versuchen mit der Kennung HV2\_wS\_ etwa 19,0 mm betragen. Das bedeutet, dass bei der Versuchsreihe HV2\_ die Kugeln „langsamer“ in den Boden eindringen.

Hierbei ist ein geringer Unterschied in den Ergebnissen zwischen HV1 und HV2 sichtbar. Trotz der geringen Unterschiede kann eine Gruppenwirkung bei mehreren Kugeln nicht ausgeschlossen werden, da bei den Versuchen HV2 die Setzungen geringer ausgefallen sind.

Um den Effekt der Gruppenwirkung eindeutig festzustellen, bedarf es weiterer Untersuchungen. Eine Versuchsreihe mit einer steigenden Anzahl von Kugeln, zum Beispiel Testläufe mit einer Kugel, zwei Kugeln, drei Kugeln, vier Kugeln usw., könnte den Effekt der Gruppenwirkung eindeutig darstellen. Zusätzlich dazu könnte der Abstand zwischen den Kugeln einen Einfluss auf die Gruppenwirkung haben. Weiters hat auch die Größe vom Probekörper und dem Behälter einen signifikanten Einfluss und darf dabei nicht außer Acht gelassen werden.

### 3.11.4 Einflussbereich

- Ergebnisse**

Die Mittelwerte der Flächenermittlung für den Einflussbereich können aus Abb. 102 abgelesen werden. Durch Abb. 103 werden die Mittelwerte der Tiefe des Einflussbereichs deutlich.

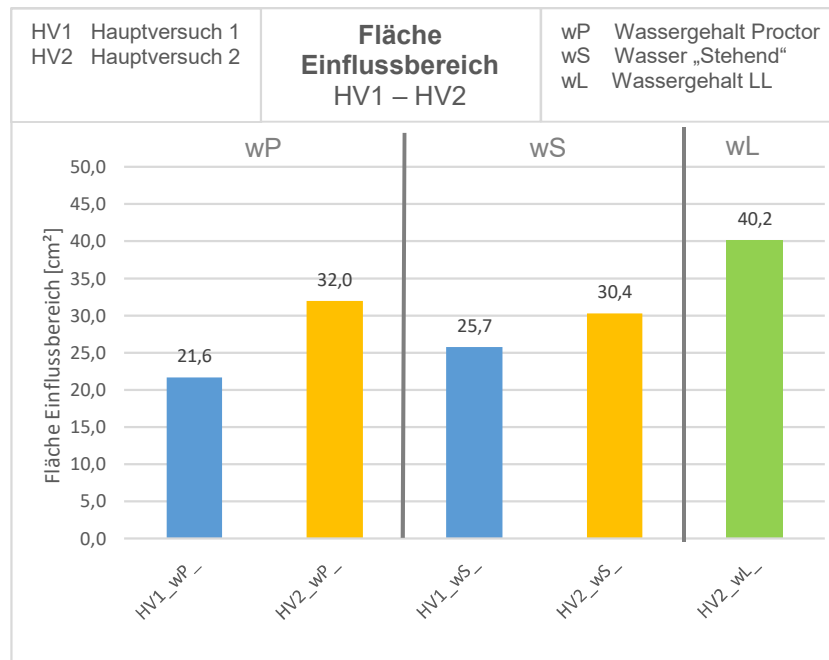


Abb. 102 Ergebnisse Einflussbereich Fläche HV 1 und HV 2

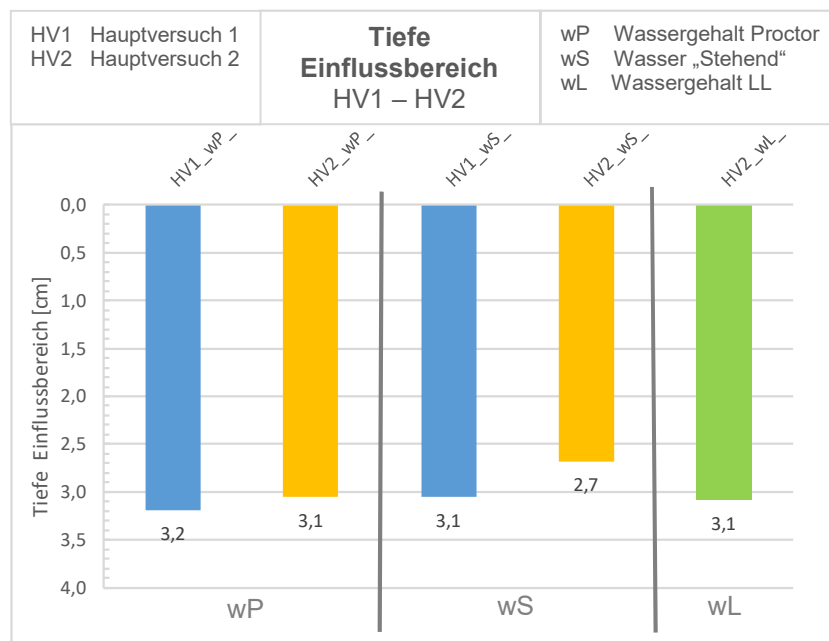


Abb. 103 Ergebnisse Einflussbereich Tiefe HV 1 und HV 2

- **Interpretation**

Bei Abb. 102 ist ersichtlich, dass bei den Versuchen mit der Kennung HV2\_ eine größere Fläche des Einflussbereichs vorhanden ist, als bei den Versuchen mit der Kennung HV1\_. Dieses Ergebnis ist plausibel, da bei einer steigenden Anzahl an Kugeln mit einer Vergrößerung der Einflussfläche zu rechnen ist.

Die Tiefe des Einflussbereiches kann von Abb. 103 abgelesen werden und liegt bei etwa 3 cm. Es hat den Anschein, dass bei der Versuchsreihe HV2\_ die Tiefe des Einflussbereichs abnimmt. Es liegt die Vermutung nahe, dass die Gruppenwirkung eine Verringerung der Tiefe des Einflussbereiches hervorruft. Um dies eindeutig beurteilen zu können reichen die vorhandenen Ergebnisse nicht aus und es müssen weitere detaillierte Untersuchungen durchgeführt werden.

### 3.11.5 Verdichtung und Verdrängung

- **Ergebnisse**

Abb. 104 stellt die Mittelwerte aus den Ergebnissen in Bezug auf Verdichtung und Verdrängung von Kapitel 3.9.5 und Kapitel 3.10.5 dar.

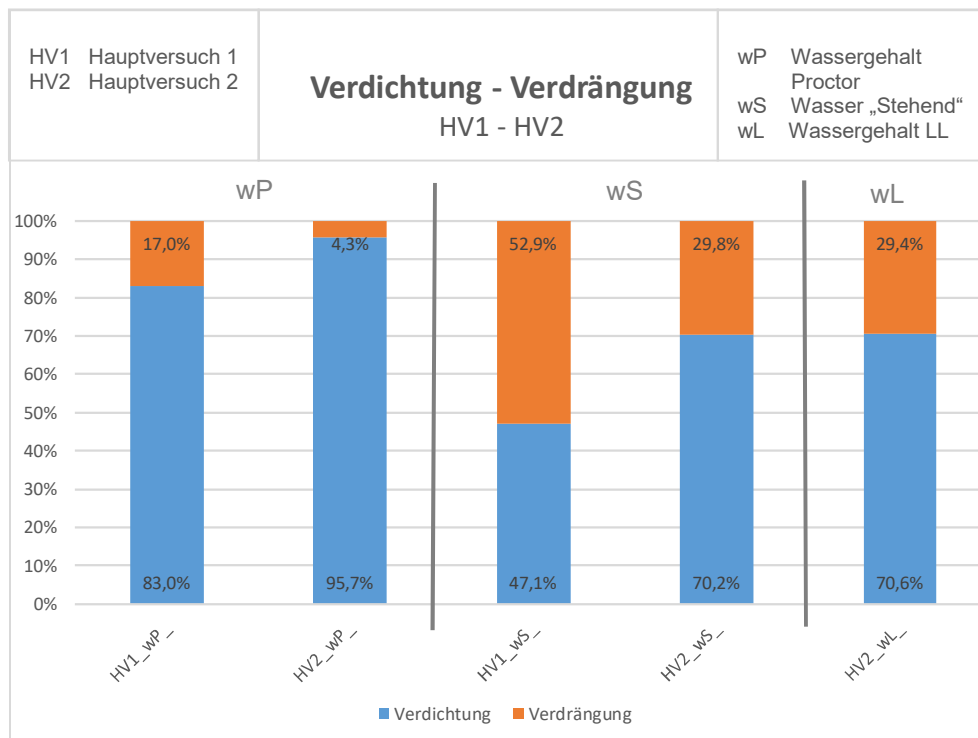


Abb. 104 Ergebnisse Verdichtung und Verdrängung HV 1 und HV 2



- **Interpretation**

Die Ergebnisse aus Abb. 104 zeigen, dass bei den Versuchen mit der Kennung \_wP\_ der Anteil der Verdrängung bei HV2 abnimmt. Das Gleiche ist bei den Versuchen mit der Kennung \_wS\_ sichtbar und ein eindeutiger Trend wird erkannt. Mit den zusätzlichen Informationen aus den vorherigen Ergebnissen kann das Vorhandensein eines Gruppeneffektes nicht ausgeschlossen werden, weil eine Verringerung der Verdrängung eindeutig sichtbar ist.

### 3.12 Feinteilbewegung

In der gegenständlichen Arbeit war es nicht möglich eine Lösung für die Quantifizierung der Feinteilbewegung bei den Versuchen zu finden. Somit bleibt die Frage über die Bewegung der Feinteile in dieser Arbeit weiterhin offen.

Beim Versuch mit der Kennung HV2\_B2\_wS\_t1 machte sich nach einer Belastungsdauer von etwa 5.000 Lastwechsel nachfolgender Effekt bemerkbar. Es wurde die Bildung von drei charakteristischen Bereichen wahrgenommen. Diese können entsprechend Abb. 105 unterteilt werden in braunes Wasser auf der Oberfläche (1), eine schlammartige Suspension mit einem scheinbar hohen Feinanteil (2) und den nassen Boden (3).



Abb. 105 Drei Phasen-Gemisch bei Versuch HV2\_B2\_wS\_t1

Es hat den Anschein, dass die Feinteile im Boden zur Bildung dieser Suspension führen. Weiters kann behauptet werden, dass die Feinteile aus dem aufgelockerten Boden von der Oberfläche in der Nähe der Viertelkugel stammen. Es wurde kein Transport von Feinteilen bemerkt, jedoch bildete sich eine Trennung der Feinteile vom Boden. Der Grund dafür könnte die dynamische Einwirkung sein, welche zu Vibrationen im Boden führt und lokale Verflüssigungseffekte entstehen lässt.

Dieser Effekt bei diesem Versuch bestätigt die Behauptung der Quetsch- und Aufstiegsphase nach Wang et al. (2014). Es ist anzumerken, dass dieser Effekt nur bei einem Versuch aufgetreten ist und durch keine weiteren Ergebnisse aus dieser Versuchsreihe bestätigt werden kann.

Um das Auftreten dieser drei charakteristischen Phasen eindeutig bestätigen zu können, sollte eine eigene Versuchsreihe mit dem Boden 2 (sandiger Schluff) durchgeführt werden. Es ist empfehlenswert einen Prüfstand ohne Begrenzung der Setzungstiefe, welche beim vorliegenden Prüfaufbau durch die Berührung der Kraftplatte mit Boden begrenzt war, zu verwenden.

## 4 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der aktuellen Arbeit zeigen, dass die Setzungen einer Viertelkugel unter zyklischer Belastung von circa 3 Hz bei einem Boden mit niedrigem Wassergehalt nach einer gewissen Zeit abklingen und die Setzungskurven sich einer horizontalen Tangente annähern. Im Gegensatz dazu zeigt die Wasserzugabe einen signifikanten Anstieg von Eindringtiefe und Eindringgeschwindigkeit bei dynamischen Belastungen.

Gemäß den Ergebnissen aus der Ermittlung des Einflussbereichs wird die Einflusstiefe unterhalb der Viertelkugel in der Anfangsphase der dynamischen Belastung mit einem Wert von circa 3 cm beziffert. Vergleicht man die Einflusstiefe mit dem Durchmesser der Viertelkugel (hier 35 mm), so ergibt dies ein Verhältnis von ungefähr 0,85 ( $t_E = \sim 0,85 \cdot d$ ). Ein steigender Wassergehalt bewirkt eine Vergrößerung der Einflussfläche, dessen horizontale Abmessungen bei gleichbleibender, vertikaler Einflusstiefe zunehmen.

Aus der stark vereinfachten Auswertemethode für das Verhalten des Bodens resultiert, dass bei höherem Sättigungsgrad der Anteil der Verdrängung im Boden zunimmt und der Anteil der Verdichtung abnimmt. Die Einbaudichte hat einen enormen Einfluss auf die Verteilung dieser Werte. Eine Erklärung hierfür ist, dass bei höherem Wassergehalt der Porenraum größtenteils mit Wasser anstatt mit Luft gefüllt ist. Da Wasser inkompressibel ist, kann beim Eindringen der Kugel nur „wenig“ Verdichtung stattfinden und es resultiert eine Steigerung der Verdrängung.

Geringere Setzungen, geringere Einflusstiefen und ein geringeres Maß an Verdrängung sind Indikatoren für die Existenz einer Gruppenwirkung. Es ist ein Trend sichtbar, jedoch kann der Effekt der Gruppenwirkung nicht hundertprozentig bestätigt werden und bedarf weiterer Versuche.

Die Feinteilbewegung konnte in der vorliegenden Arbeit nicht detektiert werden und erfordert eine eigene Forschungsarbeit mit einer adaptierten Prüfmaschine.

Zusammenfassend kommt man zu einem ähnlichen Schluss wie Alobaidi und Hoare (1999). Durch Befeuchtung der Bodenoberfläche kommt es zu einer Verschlechterung des Unterbodenmaterials. Dementsprechend hat Wasser einen sehr starken Einfluss auf das dynamische Eindringverhalten einer Viertelkugel in einen feinkörnigen Boden und das Vorhandensein einer Gruppenwirkung darf nicht ausgeschlossen werden.

## 5 Ausblick

Die Berechnung zur Ermittlung der Krafteinwirkung auf ein Gleisschotter-Einzelkorn hat einen sehr breiten Kraftbereich ergeben. Für die Durchführung dieser Arbeit waren diese Ergebnisse ausreichend. Detailliertere Berechnungen und Versuche mit dazugehöriger Messtechnik sind notwendig um den Kraftbereich der Einwirkung auf ein einzelnes Gleisschotterkorn im Übergangsbereich von Gleisschotter zu Unterboden genauer zu bestimmen.

Die Vorversuche zur Sättigung des Bodens haben ergeben, dass die gewählte Probenentnahme zu einer sehr starken Streuung der Messergebnisse des Wassergehaltes führt. In einer weiteren Arbeit sollten verschiedene Arten der Entnahme von Bodenproben, inklusive jener aus dieser Arbeit, zur Wassergehaltsbestimmung untersucht werden. Diese Ergebnisse sollten auch mit den unterschiedlichen Möglichkeiten zur Messung vom Wassergehalt verglichen werden.

Um den Effekt der Gruppenwirkung besser erfassen zu können, müssen noch weitere Versuche durchgeführt werden. Eine Versuchsreihe mit steigender Stückanzahl und sinkendem Abstand zwischen den Kugeln könnte einen eindeutigen Trend zur Gruppenwirkung feststellen. Es wird empfohlen einen anderen Prüfstand zur Durchführung der Versuche zu verwenden, da die Versuchsmaschine aus der vorliegenden Masterarbeit zu verschiedenen Starttiefen aufgrund des Versuchseinbaus geführt hat.

Die zusätzlichen Informationen aus Kraftbereich, Wassergehalt im Boden und Gruppenwirkung können mit den Ergebnissen aus dieser Arbeit zu einem besseren Verständnis in Bezug auf das dynamischen Eindringverhalten eines Gleisschotter-Einzelkorns führen.

Die gewonnenen Informationen sollen helfen die Entstehung des Phänomens Mud Pumping besser zu erforschen und dazu anregen die sogenannte Interlayer Creation genauer zu untersuchen. Die Ergebnisse dienen als Grundlage für weitere Forschungen im Bereich der Eisenbahninfrastruktur und können speziell für die Thematik „Mud Pumping“ als Vorlage dienen.

## 6 Literaturverzeichnis

- Alobaidi, I.; Hoare, D. J. (1994)  
Factors affecting the pumping of fines at the subgrade subbase interface. In: Geosynthetics International Vol. 1 (No. 2), S. 221–259.
- Alobaidi, I.; Hoare, D. J. (1996)  
The development of pore water pressure at the subgrade-subbase interface of a highway pavement and its effect on pumping of fines. In: Geotextiles and Geomembranes 14 (2), S. 111–135.
- Alobaidi, I.; Hoare, D. J. (1999)  
Mechanisms of pumping at the subgrade subbase interface of highway pavements. In: Geosynthetics International Vol. 6 (No. 4), S. 241–259.
- Burns, B.; Ghataora, G. S.; Sharley, P. (2006)  
Development and Testing of Geosand Composite Layers Using a Pumping Index Test. In: Railway Foundations: RailFound 06, S. 385–393.
- Cai, Xiaopei.; Cai, Xianghui.; Liu, K.; Wang, H.; Guo, L. (2015)  
Study on Mud Pumping Mechanism of Subgrade Surface Layer in Slab Ballastless Track Zone. In: Sensors & Transducers Vol. 186, S. 154–160.
- Duong, T. V.; Cui, Y. J.; Tang, A. M.; Dupla, J. C.; Canou, J.; Calon, N. et al. (2014a)  
Physical Model for Studying the Migration of Fine Particles in the Railway Substructure. In: Geotechnical Testing Journal Vol. 37 (5), S. 894–906.
- Duong, T. V.; Cui, Y. J.; Tang, A. M.; Dupla, J. C.; Canou, J.; Calon, N. et al. (2014b)  
Investigating the mud pumping and interlayer creation phenomena in railway substructure. In: Engineering Geology 171, S. 45–58.
- ÖNORM B4410, 01.09.2009  
Geotechnik - Untersuchungen von Bodenproben: Bestimmung des Wassergehaltes durch Ofentrocknung unter Einbeziehung der VORNORM ÖNORM CEN ISO/TS 17892-1.
- HBM (2018a)  
S2M; Kraftaufnehmer; Datenblatt; B3593. Online verfügbar unter <https://www.hbm.com/de/3364/s2m-kraufnehmer-zum-messen-von-zug-und-druckkraefften/>, zuletzt geprüft am 30.04.2018.
- HBM (2018b)  
WA, Induktive Standard-Wegaufnehmer, Datenblatt, B0545. Online verfügbar unter <https://www.hbm.com/de/3058/wa-l-induktiver-wegaufnehmer-tauchanker/>, zuletzt geprüft am 30.04.2018.
- Hudson, A.; Watson, G.; Le Pen, L.; Powrie, W. (2016)  
Remediation of Mud Pumping on a Ballasted Railway Track. In: Procedia Engineering Vol. 143, S. 1043–1050.
- Indraratna, B.; Salim, W. (2005)  
Mechanics of Ballasted Rail Tracks. A Geotechnical Perspective. London UK: Taylor & Francis Group plc.

- Kamalov, R.; Ghataora, G. S.; Burrow, M. P. N.; Whebi, M.; Musgrave, P. (2017)  
Migration of fine Particles from Subgrade Soil to the overlying Ballast. In: Railway Engineering-2017.
- Kuo, C.; Hsu, C.; Chen, Y.; Wu, C.; Wang, H.; Chen, D.; Lin, Y. X. (2016)  
Using Ground-penetrating Radar to Promote the Investigating Efficiency in Mud Pumping Disaster of Railways. In: Proceedings of Engineering and Technology Innovation Vol. 2, XX-XX.
- Marte, R. (2015)  
Baugrunderkundung. Vorlesungsunterlagen. TU Graz, Graz. Institut für Bodenmechanik und Grundbau.
- Rail.One GmbH (2011)  
Feste Fahrbahn Rheda 2000.
- Selig, E. T.; Waters, J. M. (1994)  
Track Geotechnology and Substructure Management. London: Thomas Telford Services Ltd.
- Thielicke, W.; Stamhuis, E. J. (2018)  
PIVlab. Version 1.41: MathWorks. Online verfügbar unter <https://de.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/27659-pivlab-particle-image-velocimetry--piv--tool>, zuletzt geprüft am 16.11.2017.
- Veit, P.; Walter, S. (2012/2013)  
Eisenbahnwesen. Vorlesungsskriptum. TU Graz, Graz. Institut für Eisenbahnwesen und Verkehrswirtschaft.
- Wang, Y.; Kong, L. W.; Wang, Y. L. (2014)  
Mechanism and Control of Subgrade Mud Pumping Under the Cyclic Load of Train. In: International Conference on Mechanics and Civil Engineering, S. 369–374.
- Wikimedia.org (2018)  
Online verfügbar unter [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Railway\\_track\\_Mud\\_eruption.JPG](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Railway_track_Mud_eruption.JPG), zuletzt geprüft am 26.05.2018.
- Woisetschläger, J. (2015)  
Lichtschnitt. Vorlesungsunterlagen. TU Graz, Graz. Institut für thermische Turbomaschinen und Maschinendynamik.
- Yu, S.; Wu-ming, L.; Ji-dong, T.; Ru-song, N.; Qi, Y. (2016)  
Analysis of Subgrade Soil Mud Pumping Model. In: EJGE - Eletronic Journal of Geotechnical Engineering Vol. 21 (Bundle 24), S. 7729–7740.