Doctoral Thesis

DEEP VIBRO COMPACTION

Dynamic Compaction Control Based on the Vibrator Movement

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of
Doctor of Science in Civil Engineering
of the Vienna University of Technology, Faculty of Civil Engineering

---

Dissertation

RÜTTELDRUCKVERDICHTUNG

Dynamische Verdichtungskontrolle auf Basis der Rüttlerbewegung

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der technischen Wissenschaften
eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen
von

Dipl.-Ing. **Péter Nagy**, BSc
Matrikelnummer 01027008
Franz-Haas-Platz 7/21 A-1110 Wien

1. Gutachter: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. **Dietmar Adam**
Institut für Geotechnik
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/220-2, A-1040 Wien

2. Gutachter: Prof. Dr. **K. Rainer Massarsch**
Institut für Boden- und Felsmechanik
Königliche Technische Hochschule (KTH)
SE-100 44 Stockholm, Schweden

3. Gutachter: Dr. **Róbert Szepesházi** PhD, Universitätsdozent
Lehrstuhl für Konstruktionsbau und Geotechnik
Széchenyi István Universität
H-9026 Győr, Egyetem tér 1., Ungarn

Wien, im November 2018 _____

Kurzfassung

Die Rütteldruckverdichtung ist ein Bodenverbesserungsverfahren, welches seit Jahrzehnten bei der tiefreichenden Verdichtung grobkörniger Böden erfolgreich zur Anwendung kommt. Das Verfahren wird zwar laufend weiterentwickelt, es stehen jedoch bis heutzutage keine geeigneten Instrumente zur laufenden, systematischen Überprüfung der Verdichtungsarbeiten zur Verfügung. Im Unterschied zu konventionellen Prüfmethoden soll es sich dabei um eine rüttler- und arbeitsintegrierte Methode der Verdichtungskontrolle handeln. Dies bedeutet, dass der Tiefenrüttler nicht nur als Verdichtungsgerät fungieren, sondern gleichzeitig auch als Messwerkzeug angewendet werden soll.

Die vorliegende wissenschaftliche Arbeit setzte sich die Entwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen eines Systems zur arbeitsintegrierten Qualitätskontrolle der Rütteldruckverdichtung auf Basis der dreidimensionalen Rüttlerbewegung zum übergeordneten Ziel. Die messtechnische Erfassung des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers und darüber hinaus diverser Verfahrensparameter sowie des Wellenfeldes an der Geländeoberfläche erfolgten in großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen auf einem Versuchsfeld.

Die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse ermöglichte bisher unzureichend geklärte bzw. nur zum Teil nachvollzogene Vorgänge, die während der Rütteldruckverdichtung auf dem Tiefbaugerät und im Rüttler-Boden Interaktionssystem auftreten, systematisch zu erforschen. Aufbauend auf den Erkenntnissen der Messdatenauswertung wurde ein analytisches Modell entwickelt. Dieses ließ eine grundlegende Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der aktuellen Steifigkeit des Bodens und dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers und in weiterer Folge eine Abgrenzung wesentlicher bodenphysikalischer Prozesse im zu verdichtenden Boden zu. Die Quantifizierung des Verdichtungserfolgs erfolgte in Form eines unmittelbar aus den messtechnisch erfassten Daten ableitbaren Indikators, der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit.

Bei der Rütteldruckverdichtung wird die Herstellung eines quasi-homogenen, zusammenhängenden verdichteten Bodenkörpers erzielt. Die Kontrolle der Verdichtungsarbeiten soll daher dreidimensional, über die Tiefe und flächendeckend, d. h. raumfüllend erfolgen. Die übliche gleichmäßige, rasterförmige Anordnung der Verdichtungsstrecken stellt eine hervorragende Grundlage für eine systematische, arbeitsintegrierte Überprüfung des behandelten Bodenbereiches dar. Auf Basis der Erkenntnisse dieser Arbeit sind hierfür die Rüttlerbewegung, diverse Verfahrensparameter und das Wellenfeld an der Geländeoberfläche anwendbar.

Abstract

Deep vibro compaction (vibroflotation) is a ground improvement technique, which has been worldwide strongly used for deep compaction of granular soils for decades. However, the methods for quality control of the compaction works are still largely empirical in nature and therefore often unreliable. There is currently no approved method for a reliable continuous compaction control for this ground improvement technique available. In contrast to conventional testing methods, a work- and vibrator-integrated testing tool is required. That means the deep vibrator should not just serve as a compaction device but at the same time as a measurement tool, too.

The presented doctoral thesis intends the development of the scientific basis for a system for work-integrated compaction control, based on the three-dimensional motion behaviour of the deep vibrator. For this purpose, fundamental experimental investigations were executed with an extensive test program. The compaction process was investigated in the scope of large-scale field tests. Additionally to the movement behaviour of the vibrator body, various process parameters and ground accelerations were recorded.

The outcomes of the experiments provided new insights into the highly complex soil-vibrator interaction system. They disclosed numerous previously less-known mechanisms during the compaction process. Based on the measurement data, a simplified analytical model of the soil-vibrator system was developed. The present analytical modelling allowed an indication of increasing soil stiffness due to vibro compaction. Moreover, it made an identification of fundamental physical processes in the compacted soil body possible. This way, compaction success could be quantified by a parameter called state-dependent stiffness indicator, which was derived directly from the monitored vibrator movement.

Deep vibro compaction obtains the production of a uniform, quasi-homogenous compacted soil body. For this reason, the control of the compaction works must be undertaken three-dimensional, covering the depth and the ground surface. The execution of the ground improvement in compaction patterns makes a systematic control of the soil body ideally possible. The outcomes of the current doctoral thesis provide fundamentals for the application of the deep vibrator as a measurement tool for this purpose. Additionally to the vibrator movement, specific machine parameters and the measured wave field on the ground surface can be applied for this aim.

Vorwort

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit am Institut für Geotechnik der Technischen Universität Wien, Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik, im Zuge des Forschungsprojektes „Dynamische Verdichtung mit Tiefenrüttlern“. Im Besonderen danke ich Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam, dem Vorstand des Institutes für Geotechnik vor allem für die Betreuung dieser wissenschaftlichen Arbeit, für die zahlreichen Diskussionen zu unterschiedlichen Fragestellungen des Forschungsprojektes sowie für all seine Unterstützung während meiner bisherigen Zeit am Institut.

Herrn Prof. Dr. K. Rainer Massarsch danke ich herzlich für die Begutachtung meiner Dissertation, für sein großes Interesse an dieser Arbeit und speziell für die inspirierenden Diskussionen und seine zahlreichen wertvollen fachlichen Hinweise.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Róbert Szepesházi PhD, dass er mit seinen wertvollen Ratschlägen während des Studiums mein Interesse für das wissenschaftliche Arbeiten weckte und vor allem, dass er sich zur Begutachtung dieser Dissertation bereit erklärte.

Ohne Unterstützung der Firma Keller Grundbau Ges.m.b.H. wäre diese Arbeit weder technisch noch finanziell durchführbar gewesen. Ich bedanke mich bei den Führungskräften der Firma, insbesondere bei Herrn Dipl.-Ing. Andreas Körbler und bei Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Clemens Kummerer für das entgegengebrachte Vertrauen im Zuge der Abwicklung des Forschungsprojektes. Herzlicher Dank gebührt Herrn Dipl.-Ing. Gerhard Strauch und Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Alexander Zöhrer, die einen wesentlichen Beitrag zum Gelingen dieses Forschungsprojektes geleistet haben. Vor allem danke ich Herrn Dipl.-Ing. Peter Freitag für seinen unermüdlichen Einsatz und die freundschaftliche Zusammenarbeit, sein großes Interesse an diesem Forschungsprojekt und seine tatkräftige Unterstützung, nicht zuletzt während den experimentellen Untersuchungen. Mein spezieller Dank gilt auch dem Baustellenpersonal und der gesamten Mannschaft der Werkstatt in Söding, deren Unterstützung essenziell für das Gelingen der Experimente beigetragen hat.

Den Mitarbeitern der Firma VCE Vienna Consulting Engineers ZT GmbH danke ich für die hervorragende Zusammenarbeit vor allem im Zuge der experimentellen Untersuchungen. Besonders danke ich Herrn Priv.Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Fritz Kopf für die zahlreichen Diskussionen zu unterschiedlichen Fragestellungen während des gesamten Forschungsprojektes sowie Herrn Dipl.-Ing. (FH) Martin Fritz für seinen unermüdlichen Einsatz im Zuge der Entwicklung des Messsystems und der Durchführung der Experimente.

Ich bedanke mich bei den Mitarbeitern der Firma Fugro Consult Kft., die die Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde ermöglicht hat. Spezieller Dank gilt in diesem

Zusammenhang meinem langjährigen Studienkollegen, Herrn Dipl.-Ing. Ferenc Scheuring, BSc für sein Engagement im Zuge der Durchführung und Auswertung dieser Versuche.

Ohne finanzielle Unterstützung der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) hätte dieses Forschungsprojekt nicht zustande kommen können. Ein besonderer Dank gilt den Mitarbeitern für die freundliche und offene Zusammenarbeit. Weiters bedanke ich mich bei der Österreichischen Gesellschaft für Genmechanik (ÖGG) für die Finanzierung der Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde.

Bei meinen Kollegen am Institut für Geotechnik sowie dem Laborpersonal möchte ich mich für die kollegiale Unterstützung während der bisherigen Zeit am Institut bedanken. Insbesondere bei Dipl.-Ing. Dr.techn. Adrian Kainrath für seine Unterstützung vor allem bei der Antragstellung für dieses Forschungsprojekt. Des Weiteren danke ich meinen Kolleginnen Dipl.-Ing. Viktoria Ostermann und Dipl.-Ing. Olja Barbir sowie meinen Kollegen Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Pistrol, BSc, Dipl.-Ing. Dr.techn. Cătălin Căpraru, Dipl.-Ing. Armin Steurer, Dipl.-Ing. Dr.techn. Marek Szabo und Dipl.-Ing. Mario Hager, BSc für die angenehme Zusammenarbeit am Institut. Für ihre Unterstützung bei den Laboruntersuchungen danke ich Herrn Ing. Andreas Hausenberger und den Herren Gerhard Steinbauer, Michael Dürmoser und Alfred Nitz, der leider im letzten Jahr unerwartet verstarb. Speziell bedanke ich mich bei Frau Frau Gerda Bruckner-Pfleger für ihre hilfsbereite Unterstützung, insbesondere in Fragen der Abrechnung und Universitätsbürokratie, sowie bei Frau Anna Zahradnik.

Ich bedanke mich bei Herrn Univ.Doz. Dipl.-Ing. Dr.techn. Piotr Borejko für seine Unterstützung in Fragestellungen der Wellenausbreitung im Untergrund sowie bei Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn Thomas Wolbank für die wertvolle Diskussion zu Stromaufnahme des Rüttlermotors.

Ich danke Frau Dipl.-Ing. Gabrijela Kvasina, BSc, Herrn Robin Bayerhofer, BSc und Herrn Marko Brkic, BSc, dass sie durch ihre studentischen Arbeiten einen Beitrag zur vorliegenden Dissertation geleistet haben.

Besonders möchte ich bei meinen Eltern Katalin Nagyné Kóczán und Pál Nagy bedanken, die mir durch ihre lebenslange Unterstützung einen Hochschulabschluss ermöglicht und dadurch die Grundlage für das Doktoraststudium geschaffen haben.

Ich danke meinem Freundeskreis für all die motivierenden Worte und Unterstützung aller Art im Zuge der Erstellung dieser Arbeit. Besonders danke ich Frau Dr.des. Katalin Cseh-Varga für das Korrekturlesen der Dissertation.

Der größte Dank gebührt meiner Freundin Dalma Sarnyai. Ohne ihre Geduld, Ermutigung in schweren Lebenssituationen und Unterstützung während all der Jahre wäre diese Arbeit nicht zustande gekommen.

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **1**

1.1 Einführung 1

1.2 Motivation und Ziel der Arbeit 2

2 Dynamische Tiefenverdichtungsverfahren **5**

2.1 Einführung 5

2.2 Vibrationsverdichtungsverfahren 6

2.2.1 Rütteldruckverdichtung (RDV) 7

2.2.1.1 Tiefenrüttler 7

2.2.1.2 Ablauf der Rütteldruckverdichtung 9

2.2.2 Tiefenverdichtung mit Aufsatzrüttlern 12

2.2.3 Rüttelstopfverfahren (RSV) 13

2.2.4 Sonderformen des Rüttelstopfverfahrens 14

2.3 Tiefenverdichtung mittels vertikalen, impulsartigen Stößen 15

2.3.1 Dynamische Intensivverdichtung (DYNIV) 16

2.3.2 Impulsverdichtung 16

2.3.3 Abgrenzung zu Vibrationsverdichtungsverfahren 16

2.4 Verdichtbarkeit von Böden mittels Tiefenrüttelverfahren 17

2.4.1 Erforderliche Baugrundinformationen 20

2.5 Wissenschaftliche Untersuchung des Tiefenrüttelverfahrens 21

2.5.1 Wissenschaftliche Untersuchungen zu den Prozessen im Rüttler-Boden Interaktionssystem 21

2.5.1.1 Erste experimentelle Untersuchungen der Rütteldruckverdichtung in großmaßstäblichen Versuchen 21

2.5.1.2 Theoretische Untersuchungen zu Rütteldruckverdichtung . . 22

2.5.1.3 Regelung der Rüttlerfrequenz zur Optimierung des Tiefenrüttelverfahrens 24

2.5.1.4 Experimentelle Untersuchungen im Modellmaßstab 24

2.5.1.5 Numerische Modellierung des Verdichtungsvorgangs 25

2.5.2 Verringerung des Scherwiderstandes zwischen den einzelnen Körnern im zu verdichtenden Boden 27

2.5.2.1 „Fließen“ des zyklisch belasteten Korngefüges 28

2.5.2.2 Verflüssigung des Bodens zufolge der dynamischen Belastung durch den Tiefenrüttler . . . 30

3 Verdichtungskontrolle bei der Rütteldruckverdichtung – Stand der Technik 33
3.1 Einleitung . . . 33
3.2 Verdichtungskontrolle mittels indirekten Untergrunderkundungsverfahren . . . 33
3.2.1 Sondierverfahren . . . 34
3.2.1.1 Rammsondierung . . . 35
3.2.1.2 Drucksondierung . . . 36
3.2.2 Seitendrucksonden . . . 37
3.2.3 Seismische Untersuchungen . . . 37
3.2.3.1 Bohrlochseismik . . . 38
3.2.3.2 Methoden auf Basis der Analyse von Oberflächenwellen . . . 38
3.3 Arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle bei Tiefenrüttelverfahren . . . 39
3.3.1 Verdichtungskontrolle durch arbeitsbegleitende Aufzeichnung von Verfahrensparametern . . . 40
3.3.1.1 Tiefenschreiberprotokolle . . . 41
3.3.1.2 Visualisierung des Verbesserungserfolgs mit dem VibroScan System . . . 42
3.3.2 Arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle bei der Resonanzverdichtung 42

4 Experimentelle Untersuchungen zur Rütteldruckverdichtung 45
4.1 Einleitung . . . 45
4.2 Zielsetzung . . . 45
4.3 Versuchskonzept . . . 46
4.4 Verdichtungsgerät . . . 48
4.4.1 Trägergerät . . . 48
4.4.2 Tiefenrüttler . . . 49
4.5 Messsystem . . . 50
4.5.1 Messsystem auf dem Rüttlerkörper . . . 50
4.5.1.1 Messung der Beschleunigungen zur messtechnischen Erfassung der Rüttlerbewegung . . . 51
4.5.1.2 Messtechnische Bestimmung der Unwuchtposition . . . 52
4.5.1.3 Messdatenerfassung und Führung der Signalkabel . . . 53
4.5.2 Arbeitsbegleitende Aufzeichnung von Verfahrensparametern . . . 55
4.5.3 Instrumentierung zur Erfassung des Wellenfeldes an der Geländeoberfläche . . . 55
4.5.4 Zeitsynchronisation der Messdaten . . . 56
4.6 Versuchsfeld . . . 57
4.6.1 Anforderungen an das Versuchsfeld . . . 57
4.6.2 Unterteilung des Versuchsfeldes . . . 58

4.6.3 Untergrunderkundung auf dem Versuchsfeld 58
4.6.3.1 Kernbohrungen 61
4.6.3.2 Rammsondierung (DPH) 64
4.6.3.3 Seismische Drucksondierung (SCPTu) 65
4.7 Ablauf der Verdichtungsversuche 66
4.7.1 Rüttlerschwingung frei hängend in der Luft 67
4.7.2 Standardmäßiger Rüttlerbetrieb 67
4.7.3 Parametervariationen im standardmäßigen Rüttlerbetrieb 68
4.7.4 Sonderversuche 69

5 Rüttlerbewegung, Vorgänge im dynamischen Rüttler-Boden Interaktionssystem 71
5.1 Einleitung 71
5.2 Kenngrößen zur Charakterisierung des Bewegungsverhaltens 73
5.2.1 Ermittlung der Schwingwegamplitude 73
5.2.2 Ermittlung des Vorlaufwinkels 73
5.3 Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers 74
5.3.1 Bewegungsverhalten des in der Luft unbehindert schwingenden Tiefenrüttlers 74
5.3.2 Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers im standardmäßigen Rüttlerbetrieb 76
5.3.2.1 Bewegungsverhalten in der Arbeitsphase Einvibrieren 77
5.3.2.2 Bewegungsverhalten in der Arbeitsphase Verdichtung 79
5.3.3 Einfluss der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden auf das Bewegungsverhalten des Rüttlers 86
5.3.4 Ergebnisse von Sonderversuchen 92
5.3.4.1 Sonderversuch zur Untersuchung des Einflusses der erhöhten Kontaktspannung auf das Bewegungsverhalten des Rüttlers 92
5.3.4.2 Einfluss der Wasserspülung auf das Bewegungsverhalten des Rüttlers 95
5.4 Einfluss der Spannung an der Kontaktfläche zwischen Rüttlerspitze und Boden auf das Wellenfeld an der Geländeoberfläche 97
5.4.1 Standardmäßiger Rüttlerbetrieb 98
5.4.2 Erhöhte Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden 100
5.5 Arbeitshypothese zur Erklärung wesentlicher physikalischer Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem 102
5.5.1 Vorgänge beim Einvibrieren des Tiefenrüttlers 103
5.5.1.1 Maßgebliche Einwirkungen auf das Korngerüst während des Einvibrierens 103
5.5.2 Vorgänge bei der Verdichtung im Pilgerschrittverfahren 106
5.5.2.1 Rütteldruckverdichtung als Restrukturierungsprozess des Korngefüges 106

5.5.2.2 Maßgebliche Einwirkungen auf das Korngerüst während der Verdichtung . . . 110
5.5.3 Unterteilung des Bodenbereichs um die fertiggestellte Verdichtungsstrecke . . . 111
5.5.4 Bodenverflüssigung als kritisch zu hinterfragende Modellvorstellung für die Rütteldruckverdichtung . . . 113

6 Analytische Modellierung des Rüttler-Boden Interaktionssystems 115
6.1 Einführung . . . 115
6.2 Das Rüttler-Boden Interaktionssystem als quadratisch angeregter Einmassenschwinger . . . 116
6.3 Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden Interaktionssystem . . . 118
6.3.1 Analogie zwischen dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers und dem quadratisch angeregten Einmassenschwinger . . . 118
6.3.2 Betriebsphasen des Rüttler-Boden Interaktionssystems . . . 121
6.3.3 Betriebsphasen während des standardmäßigen und nicht-standardmäßigen Rüttlerbetriebs . . . 125
6.4 Berücksichtigung einer mitschwingenden Bodenmasse . . . 127
6.4.1 Gegenüberstellung der Rüttlerbewegung in der Luft und im Boden zur Ermittlung der Größe der mitschwingenden Bodenmasse . . . 128
6.5 Rückrechnung der Parameter des Ersatzsystems aus der Rüttlerbewegung . . 133
6.6 Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit im standardmäßigen und nicht-standardmäßigen Rüttlerbetrieb . . . 137
6.6.1 Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit im standardmäßigen Rüttlerbetrieb . . . 137
6.6.2 Einfluss der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden auf die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit . . . 141
6.6.3 Gegenüberstellung der errechneten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit mit dem Rüttleranpressdruck . . . 145
6.7 Interpretation der errechneten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit aus bodenmechanischer Sicht . . . 146
6.7.1 Steifigkeit von granularen Medien . . . 146
6.7.2 Arbeitshypothese zur Abgrenzung maßgeblicher bodenphysikalischer Einflussfaktoren auf die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit . . . 150
6.7.2.1 Quasi-stationäre Rüttlerschwingung . . . 152
6.7.2.2 Kontraktanz - Steifigkeitserhöhung primär zufolge Reduktion des Porenraumes . . . 153
6.7.2.3 Dilatanz - Steifigkeitserhöhung durch die ansteigende Spannung im Korngerüst . . . 154
6.7.2.4 Praktische Bedeutung der Abgrenzung des kontraktanten und dilatanten Bodenverhaltens . . . 156

6.8 Gegenüberstellung des Bewegungsverhaltens des Rüttlers und der maßgeblichen bodenmechanischen Prozesse 158

7 Beurteilung des in-situ Zustands im ungestörten Boden und des Verdichtungsrasters 161
7.1 Einführung 161
7.2 Beurteilung des in-situ Zustandes im ungestörten Boden 162
7.3 Anwendung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit zur Beurteilung des Verdichtungsrasters 167
7.3.1 Rammsondierungen auf dem Versuchsfeld zur Beurteilung von unterschiedlichen Verdichtungsrastern 168
7.3.2 Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens zur Beurteilung des Verdichtungsrasters 171
7.3.3 Vergleich der betrachteten Verdichtungsstrecken im Sekundärraster und Gegenüberstellung mit Rammsondierungen 173

8 Stromaufnahme des Rüttlermotors als Verdichtungskontrolle 177
8.1 Einführung 177
8.2 Antrieb und Stromversorgung des Rüttlermotors 178
8.3 Zusammenhang zwischen Stromaufnahme und Rüttlerbewegung 179
8.3.1 Zusammenhang zwischen Stromaufnahme und Rüttlerbewegung im standardmäßigen Rüttlerbetrieb 179
8.3.2 Einfluss der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden auf die Stromaufnahme des Rüttlermotors 185
8.4 Zusammenhang zwischen Stromaufnahme und der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit 189
8.5 Kontrolle der Verdichtung unmittelbar über die Stromaufnahme des Rüttlermotors 196

9 Veränderung dynamischer Bodenkenngrößen zufolge der Rütteldruckverdichtung 197
9.1 Einführung 197
9.2 Anwendung von Bohrlochseismik zur Kontrolle von Bodenverbesserungsarbeiten 197
9.3 Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde 200
9.3.1 Grundprinzip der seismischen Drucksondierung (SCPTu) 200
9.3.1.1 Gegenüberstellung der klassischen Bohrlochseismik und der seismischen Drucksondierung 200
9.3.2 Ermittlung des Scherwellengeschwindigkeitsprofils im verdichteten und unverdichteten Boden 202
9.3.3 Auswertung der Messdaten 205
9.4 Bestimmung der Bodensteifigkeit beruhend auf der gemessenen Scherwellengeschwindigkeit 209

9.4.1 Bestimmung der Bodensteifigkeit im Bereich der sehr kleinen Dehnungen . . . 210
9.4.2 Einfluss der Rütteldruckverdichtung auf die Bodensteifigkeit . . . 211

10 Arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle im Zuge der Rütteldruckverdichtung 215
10.1 Einführung . . . 215
10.2 Tiefenabhängige Verdichtungskontrolle in der Verdichtungsstrecke . . . 216
10.2.1 Verdichtungskontrolle auf Basis der Rüttlerbewegung . . . 216
10.2.2 Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe . . . 219
10.2.3 Stromaufnahme des Rüttlermotors . . . 220
10.2.4 Wellenfeld an der Geländeoberfläche . . . 220
10.3 Beurteilung des in-situ Zustandes im Untergrund und Rasteroptimierung . . . 221
10.4 Praktische Anwendbarkeit der Erkenntnisse . . . 223
10.4.1 Verdichtungskontrolle in den einzelnen Verdichtungsstrecken . . . 223
10.4.1.1 Beispiel für einen optimierten Verdichtungsprozess . . . 226
10.4.2 Kontrolle und Optimierung des Abstands der Rüttleransatzpunkte . . . 226
10.5 Bestimmung der Steifigkeit des verdichteten Bodens . . . 227

11 Zusammenfassung und Ausblick 229

Literaturverzeichnis 235

Tabellenverzeichnis 247

Abbildungsverzeichnis 249

Liste der verwendeten Symbole 261

A Gedämpfter Einmassenschwinger mit quadratischer Anregung 265

B Datenblätter der angewendeten Sensoren 269

C Ergebnisse der Untergrunderkundung 273

D Ergebnisse der seismischen Drucksondierung 285

Kapitel 1

Einleitung

1.1 Einführung

Bauwerke müssen häufig auf gering tragfähigem bzw. setzungsempfindlichem Untergrund errichtet werden. Derartige Untergrundverhältnisse erfordern die Abtragung von Bauwerkslasten in tiefer liegende tragfähige Bodenschichten oder eine tiefreichende Verbesserung der Untergrundeigenschaften. Die Bodenverbesserung stellt dabei häufig die wirtschaftlichere Alternative gegenüber der Tiefgründung dar, insbesondere im Bereich von Infrastruktur-, Damm-, Straßen- und Eisenbahnbauten sowie gegebenenfalls auch im innerstädtischen Raum. Dementsprechend nimmt die Nachfrage nach geeigneten Bodenverbesserungsmethoden weltweit tendenziell zu.

Die Rütteldruckverdichtung – welche im englischen Sprachgebrauch als deep vibro compaction oder vibroflotation bezeichnet ist – wird seit Anfang der 1930er Jahren erfolgreich für die tiefreichende Verdichtung grobkörniger Böden angewendet. Der Tiefenrüttler ist ein horizontal schwingender zylindrischer Körper und wird meistens an einem Kran oder Bagger hängend bzw. an einem Mäkler geführt eingesetzt. Die Rotationsbewegung der im Inneren des Rüttelkörpers, auf einer vertikalen Welle angeordneten Unwucht(en) verursachen den horizontalen Schwingungsvorgang des Rüttlers. Als Folge des Rüttelvorganges wird der Untergrund um den Tiefenrüttler verdichtet. Die wesentlichen Vorteile der Rütteldruckverdichtung bestehen neben der Vorwegnahme von Setzungen durch Verdichtung des Bodens in der Homogenisierung des Untergrundes. Die Verdichtung bewirkt eine Erhöhung der Lagerungsdichte und damit zusammenhängend die Erhöhung der Bodensteifigkeit sowie die Verbesserung der Tragfähigkeit des Untergrundes.

Die erfolgreiche Ausführung einer Rütteldruckverdichtung ist von zahlreichen Faktoren abhängig, wie etwa die Eigenschaften des zu verdichtenden Untergrundes, das gewählte Verdichtungsgerät und verschiedene Verfahrensparameter. Die Erfahrung der ausführenden Firmen und insbesondere des Baustellenpersonals spielt hierbei ebenfalls eine wichtige Rolle.

1.2 Motivation und Ziel der Arbeit

Als Kritikpunkt gegenüber der Rütteldruckverdichtung und generell gegenüber Bodenverbesserungsverfahren werden oft die mangelhaften Instrumente zur Qualitätskontrolle aufgezeigt. Die Rütteldruckverdichtung ist zwar ein Bodenverbesserungsverfahren mit langjähriger Tradition, es stehen trotzdem bislang nur unzureichend Instrumente und Möglichkeiten zur arbeitsintegrierten Qualitätsprüfung der Rütteldruckverdichtung zur Verfügung. Der Wissensstand der ausführenden Firmen basiert primär auf Erfahrungen, jedoch nicht auf fundierten, grundlagenorientierten wissenschaftlichen Untersuchungen. Die praxisgerechte Qualitätssicherung bei der Rütteldruckverdichtung während des Herstellungsprozesses ist bis heute nicht zufriedenstellend gelöst. Die Beurteilung des Verdichtungserfolgs erfolgt vorwiegend durch laufende Aufzeichnung der Stromaufnahme des Rüttlermotors und der Menge des zugegebenen Nachfüllmaterials bzw. durch Sondierergebnisse im Anschluss an die Tiefenverdichtungsarbeiten.

Das Ziel, eine geeignete Methodik zur Qualitätssicherung bei der Rütteldruckverdichtung zur arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle zu entwickeln, wird von den ausführenden Firmen und von wissenschaftlichen Institutionen seit Jahrzehnten verfolgt. Im Unterschied zu konventionellen Prüfmethoden des Verdichtungserfolgs soll es sich dabei um eine rüttler- und arbeitsintegrierte Methode der Verdichtungskontrolle handeln. Dies bedeutet, dass der Tiefenrüttler nicht nur als Verdichtungsgerät fungieren, sondern gleichzeitig auch als Messinstrument anzuwenden ist. Darüber hinaus soll die Kontrolle nicht nach Abschluss der Verdichtungsarbeiten oder intermittierend und damit den Verdichtungsprozess unterbrechend, sondern bereits während der Verdichtung und kontinuierlich geschehen.

Ein derartiges System wurde im Bereich der dynamischen Walzenverdichtung bereits am Anfang der 1980er Jahre von *Thurner* und *Sandström* [138] vorgestellt. Die *Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle* (FDVK) beruht auf dem Prinzip, vom Bewegungsverhalten der dynamisch angeregten Bandage auf den aktuellen Verdichtungszustand des zu verdichtenden Bodens zu schließen. Die Technologie wird laufend weiterentwickelt, wissenschaftlich erforscht und stellt einen wichtigen Forschungsschwerpunkt des *Instituts für Geotechnik* an der *TU Wien* dar, beispielsweise in Form von wissenschaftlichen Arbeiten von *Adam* [2], *Kopf* [73] und *Pistrol* [113].

Die Idee, das Bewegungsverhalten des dynamisch angeregten Tiefenrüttlers im Rüttler-Boden Interaktionssystem als Grundlage für die Beurteilung des Verdichtungszustandes des Bodens heranzuziehen, wurde auch im Bereich der dynamischen Tiefenverdichtung verfolgt. Die ersten großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen zur messtechnischen Erfassung der Rüttlerbewegung sind auf *Morgan* und *Thompson* [97] zurückzuführen. Auf diese ersten Experimente folgten weitere Untersuchungen. Das komplexe Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers wurde anhand von vergleichsweise einfachen physikalischen und numerischen Modellen im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit von *Fellin* [45] untersucht.

Das Forschungsprojekt „Dynamische Verdichtung mit Tiefenrüttlern“ an der *TU Wien* setzte sich die Entwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen eines Systems zur Qualitäts-

kontrolle für die Rütteldruckverdichtung auf Basis der dreidimensionalen Rüttlerbewegung zum Ziel. Der Verdichtungserfolg soll in Form eines unmittelbar aus der messtechnisch erfassten Rüttlerbewegung ableitbaren Indikators quantifiziert werden. Dieser soll insbesondere darüber Auskunft erteilen, ob das Verdichtungspotenzial mit dem angewendeten Verdichtungsgerät ausgeschöpft worden ist. Da das Ziel der Rütteldruckverdichtung das Erzeugen eines zusammenhängenden quasi homogenen verdichteten Bodenbereiches ist, ist eine „raumfüllende"Verdichtungskontrolle erforderlich. Die Kontrolle des Verdichtungserfolgs soll dementsprechend über die Tiefe und gleichzeitig flächendeckend erfolgen.

Großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen stellen das grundlegende Instrument für gegenständliche die wissenschaftlichen Untersuchungen dar. Das Forschungsprojekt wickelte das *Institut für Geotechnik* an der *TU Wien*, gemeinsam mit den Projektpartnern *Universität Innsbruck, Institut für Grundlagen der Technischen Wissenschaften*, *Keller Grundbau Ges.m.b.H* und *VCE Vienna Consulting Engineers*, ab. Die Experimente wurden gemeinsam mit der Firma *Keller Grundbau*, mit einem von der Firma *VCE* messtechnisch ausgerüsteten Tiefenrüttler, durchgeführt. An der *Universität Innsbruck* untersuchte man theoretische und numerische Simulationsmodelle für das Rüttler-Boden Interaktionssystem. Die wissenschaftliche Auswertung und Interpretation der im Zuge der Experimente aufgezeichneten Messdaten sowie die Entwicklung eines analytischen Modells erfolgten an der *TU Wien*. Das Forschungsprojekt wurde von der *Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG)* und von der *Österreichischen Gesellschaft für Geomechanik (ÖGG)* gefördert.

In der vorliegenden Dissertation werden in Kapitel 2 die theoretischen und praktischen Grundlagen der Tiefenrüttelverfahren zusammenfasst und anschließend in Kapitel 3 ein Überblick der Methoden gegeben, die heutzutage zur Kontrolle und zum Nachweis des Verdichtungserfolgs bei der Rütteldruckverdichtung angewendet werden.

Die dreidimensionale Bewegung des Tiefenrüttlers während des Verdichtungsprozesses wurde in großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen messtechnisch beobachtet. Die Untersuchungen fanden auf einem Versuchsfeld bei Fisching in der Obersteiermark statt. Ein geeignetes Mess- und Datenübertragungssystem wurde entwickelt, welches auf einen Tiefenrüttler installiert wurde. Somit war es möglich, das dreidimensionale Bewegungsverhalten kontinuierlich und zuverlässig messtechnisch zu beobachten und zu dokumentieren. Kapitel 4 beschäftigt sich mit der ausführlichen Vorstellung der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen, die das Forschungsteam abwickelte.

Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen werden in Kapitel 5 der Diskussion unterzogen. Im Zuge der Auswertung und Interpretation der Messergebnisse konnten bisher unzureichend geklärte bzw. nur zum Teil nachvollzogene Vorgänge, die während der Rütteldruckverdichtung auf dem Tiefbaugerät und im Rüttler-Boden Interaktionssystem auftreten, systematisch erforscht werden. Die eingehende Diskussion der im Zuge der Versuchsdurchführung messtechnisch erfassten Rüttlerbewegung erfolgt auf Basis von Versuchsergebnissen. Dabei wird das Bewegungsverhalten des in der Luft unbehindert schwingenden Tiefenrüttlers sowie anschließend das Bewegungsverhalten im Boden, während des Verdichtungsvorgangs, im Detail betrachtet. Anschließend erfolgt die Gegenüberstellung des messtechnisch erfassten Wellenfeldes an der Geländeoberfläche und des Bewegungs-

verhaltens des Rüttlers. Das Kapitel beschränkt sich nicht nur auf eine Beschreibung der Rüttlerbewegung; eine Arbeitshypothese wird aufgestellt, um die wesentlichen physikalischen Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem zu beschreiben.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Messdatenauswertung erfolgte am *Institut für Geotechnik* an der *TU Wien* die Entwicklung eines analytischen Modells für das Rüttler-Boden Interaktionssystem. Das übergeordnete Ziel der analytischen Modellierung war eine grundlegende Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der aktuellen Steifigkeit des Bodens und dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers. Diese ermöglichte die Quantifizierung des Verdichtungserfolgs in Form eines unmittelbar aus den messtechnisch erfassten Daten ableitbaren Indikators. Kapitel 6 fokussiert auf die Vorstellung des mechanischen Modells und auf seine Anwendung zur Ableitung des Indikators für die Bodensteifigkeit, welches die Bezeichnung zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit erhielt. Eine Interpretation des errechneten Indikators aus bodenmechanischer Sicht lässt – weiterhin im Sinne einer Arbeitshypothese – die Abgrenzung von kontraktantem und dilatantem Verhalten des zu verdichtenden Bodens und dadurch eine Beurteilung seines Verdichtungszustandes zu.

Kapitel 7 beschäftigt sich mit zwei wesentlichen anwendungsorientierten Aspekten. Vorerst wird die Möglichkeit des Einsatzes der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit zur Beurteilung des in-situ Untergrundzustandes diskutiert und die Verifizierung der Ergebnisse mittels Rammsondierungen aufgezeigt. Dadurch ist es auch möglich, die Eignung von unterschiedlichen Verdichtungsrastern auf Basis des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers beurteilen zu können. Die zur Verdichtungskontrolle durchgeführten Rammsondierungen verifizierten dieses Erkenntnis.

Diverse Verfahrensparameter, vor allem die Stromaufnahme des Rüttlermotors, etablierten sich in den letzten Jahrzehnten in der Ausführungspraxis als Grundlage für einen Qualitätsnachweis der Verdichtungsarbeiten. In Kapitel 8 wird die im Zuge der experimentellen Untersuchungen messtechnisch erfasste Stromaufnahme betrachtet und der Rüttlerbewegung sowie dem auf Basis der Rüttlerbewegung errechneten Indikator für die aktuelle Bodensteifigkeit gegenübergestellt.

Die Untersuchungen auf dem Versuchsfeld beschränkten sich nicht nur auf die messtechnische Erfassung der Rüttlerbewegung. Darüber hinaus bestimmte man die Veränderung dynamischer Bodeneigenschaften zufolge Rütteldruckverdichtung mittels seismischer Drucksondierung. Diese Untersuchungen wurden von der Firma *Fugro Consult Kft.* durchgeführt und ausgewertet. Kapitel 9 beginnt mit einer Vorstellung des Verfahrens, worauf die Diskussion der Durchführung und Auswertung der Experimente sowie der Auswertungsergebnisse folgt.

Die gesamtheitliche Betrachtung der Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit ermöglichte es, ein Konzept für die arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle der Rütteldruckverdichtung zu erarbeiten. Dieses beruht auf drei grundlegenden Säulen: auf dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers, auf diversen Verfahrensparametern und auf einer Gegenüberstellung des Wellenfeldes an der Geländeoberfläche mit der Rüttlerbewegung. Im abschließenden Kapitel 10 werden die wichtigsten Erkenntnisse der vorliegenden Arbeit zusammengefasst, sowie ihre Anwendbarkeit zur Kontrolle von Tiefenverdichtungsarbeiten diskutiert.

Kapitel 2

Dynamische Tiefenverdichtungsverfahren

2.1 Einführung

Verdichtungsverfahren führen im Baugrund als Ordnungs- oder Restrukturierungsprozess zu einer Veränderung der Position und Orientierung von Partikeln sowie zur Vergrößerung der Kontaktfläche zwischen den einzelnen Bodenkörnern. Folglich kommt es zu einer Kornumlagerung. Die im Boden enthaltenen Luft- und Wassereinschlüsse werden teilweise verdrängt, das Porenvolumen wird reduziert und die Lagerungsdichte des Bodens und damit auch die Bodensteifigkeit erhöht. Dadurch homogenisiert sich der verdichtete Bodenbereich, seine Scherfestigkeit erhöht sich, die Zusammendrückbarkeit und die hydraulische Durchlässigkeit des Korngefüges werden abgemindert [59].

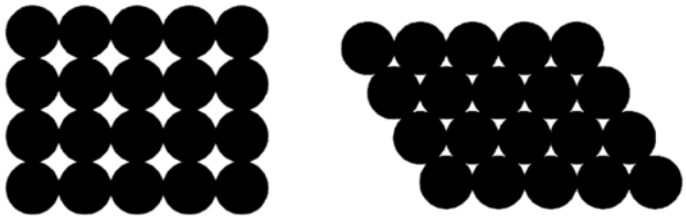


Abbildung 2.1: Lockere und dichte Lagerung von Körnern – schematische Darstellung [72].

Diesem Ordungs- oder Restrukturiereungsprozess geht bei dynamischen Bodenverdichtungsverfahren in der Regel ein „Zerstören“ des bestehenden Korngefüges durch die vom jeweiligen Verdichtungsgerät ausgelösten dynamischen Einwirkungen voraus. Dieses wird von *Sondermann* und *Kirsch* [131] als Destrukturierungsprozess bezeichnet. Der Destrukturierungsprozess und der Ordungs- oder Restrukturierungsprozess finden im Zuge der diversen Bodenverbesserungsmaßnahmen parallel statt und lassen sich daher in der Regel nicht voneinander eindeutig abgrenzen.

Bei gering tragfähigen bzw. setzungsempfindlichen Untergrund ist häufig eine tiefreichende Verbesserung und Homogenisierung der Untergrundeigenschaften erforderlich. Die-

se erfolgt oft mittels tiefreichenden Bodenverdichtungsverfahren. Eine tiefreichende Bodenverdichtung kann grundsätzlich mittels Vibrationsverdichtungsverfahren oder mittels vertikalen, impulsartigen Stößen an der Geländeoberfläche vor sich gehen. Bei den Vibrationsverdichtungsverfahren wird eine Rüttlereinheit in den Untergrund versenkt und in der Tiefe werden harmonische, horizontale oder gegebenenfalls vertikale Schwingungen erzeugt. Im Folgenden werden die Vibrationsverdichtungsverfahren, insbesondere mit Bezug auf das Rütteldruckverfahren, ausführlich vorgestellt. Anschließend erfolgt eine kurze Einführung zu Verfahren zur Tiefenverdichtung mittels vertikalen, impulsartigen Stößen an der Geländeoberfläche mit der Betrachtung der wesentlichen Unterscheide in der erzielbaren Verdichtungswirkung im Vergleich zum Rütteldruckverfahren.

Das Rütteldruckverfahren wird seit seiner Einführung auf dem Markt fortwährend weiterentwickelt. Über die geräte- und verfahrenstechnischen Entwicklungen hinaus fanden in den vergangenen Jahrzehnten wissenschaftliche, sowohl experimentelle als auch theoretische, Untersuchungen statt. Im vorliegenden Kapitel wird auf ausgewählte wissenschaftliche Arbeiten verwiesen. Dieses Kapitel widmet sich nicht nur den wissenschaftlichen Untersuchungen des Rütteldruckverfahrens. Darüber hinaus werden die wesentlichen bodenphysikalischen Prozesse im zu verdichtenden Boden betrachtet. Bodenkörner eines nichtbindigen, granularen Mediums lassen sich durch dynamische Einwirkungen so umlagern, dass sie in eine dichtere Lagerung gebracht werden können. Zufolge dynamischer Einwirkungen durch das Verdichtungsgerät reduziert sich die Scherfestigkeit des zu verdichtenden Bodens vorübergehend. Dieser Vorgang stellt einen essenziellen Prozess während der Rütteldruckverdichtung dar. Die vorübergehende Abminderung der Scherfestigkeit ist jedoch in der Literatur auf diverse bodenmechanische Ursachen zurückgeführt. Der abschließende Teil dieses Kapitels gewährt einen Überblick von möglichen Erklärungen für diesen Vorgang.

2.2 Vibrationsverdichtungsverfahren

Die Ausführung von Vibrationsverdichtungsarbeiten ist in Österreich in *EN 14731* [108] normativ geregelt. Die Norm unterscheidet grundsätzlich zwischen der Rütteldruck- und der Rüttelstopfverdichtung und gibt folgende Definitionen an:

Rütteldruckverdichtung
„Art der Baugrundverbesserung durch Tiefenrüttlung, wobei der Hauptzweck in der Verdichtung des Baugrunds besteht. Die Baugrundverbesserung ist auf viele nichtbindige Böden anwendbar und führt üblicherweise zu erhöhter Festigkeit und Steifigkeit, verminderter Durchlässigkeit und verminderter Sensibilität gegenüber Bodenverflüssigung.“

Rüttelstopfverfahren
„Art der Baugrundverbesserung durch Tiefenrüttlung, bei der ein Tiefenrüttler angewendet wird, um von der maximalen Eindringtiefe bis zur Baugrundoberfläche durchgehende Kiessäulen und damit eine Kiessäulen-Baugrund-Struktur zu bilden, die im Vergleich zum Baugrund im unbehandelten Zustand eine erhöhte Festigkeit und Steifigkeit aufweist. Die

Abbildung 2.2: Verdichtungsgerät aus den 1950er Jahren (links), Moderne Verdichtungsgeräte (rechts) [66].

Baugrundverbesserung ist bei vielen Böden anwendbar, in nicht bindigen Bodenzonen kann damit auch eine gewisse Eigenverdichtung erreicht werden.“

2.2.1 Rütteldruckverdichtung (RDV)

Die Rütteldruckverdichtung wurde vor dem Zweiten Weltkrieg in Deutschland, von der Firma *Johann Keller GmbH* entwickelt und patentiert [62]. In den nachfolgenden Jahrzehnten hat sich das Verfahren unter den Bodenverbesserungsverfahren schnell etabliert [35], [78] [133]. Die Rütteldruckverdichtung wird laufend weiterentwickelt und heutzutage weltweit zur tiefreichenden Verdichtung von grobkörnigen Böden eingesetzt. Das Verfahren kommt bei der Verdichtung sowohl von anstehenden Böden als auch von künstlichen Auffüllungen zur Anwendung. Die Entwicklung der Verfahrens- und Gerätetechnik ist beispielsweise bei *Kirsch* und *Kirsch* [70] ausführlich beschrieben.

2.2.1.1 Tiefenrüttler

Der Tiefenrüttler – mit der häufigen Bezeichnung Torpedo- oder Monorüttler – ist in Abbildung 2.3 schematisch dargestellt. Der Tiefenrüttler ist ein horizontal schwingender zylindrischer Stahlkörper mit einem Durchmesser von etwa 248 bis 490 mm und einer Länge von 2,73 bis 4,90 m. Die Schwingung des Rüttlers wird durch die Rotationsbewegung der im Inneren des Stahlrohres auf einer vertikalen Welle angeordneten Unwucht(en) verursacht. Die Parameter des einzusetzenden Tiefenrüttlers sind entscheidend für den Verdichtungserfolg. Dabei spielen vor allem die folgenden Parameter eine wichtige Rolle [70]:

- Rüttleramplitude
- Rüttlerfrequenz
- Fliehkraft

- Leistung des Rüttlermotors
- Anzahl und Anordnung der Wasseraustritte

Das Gewicht des Rüttlerkörpers liegt üblicherweise zwischen 820 und 4400 kg. Tabelle 2.1 zeigt einen Überblick von ausgewählten auf dem Markt erhältlichen Tiefenrüttlern mit den wichtigsten Geräteparametern.

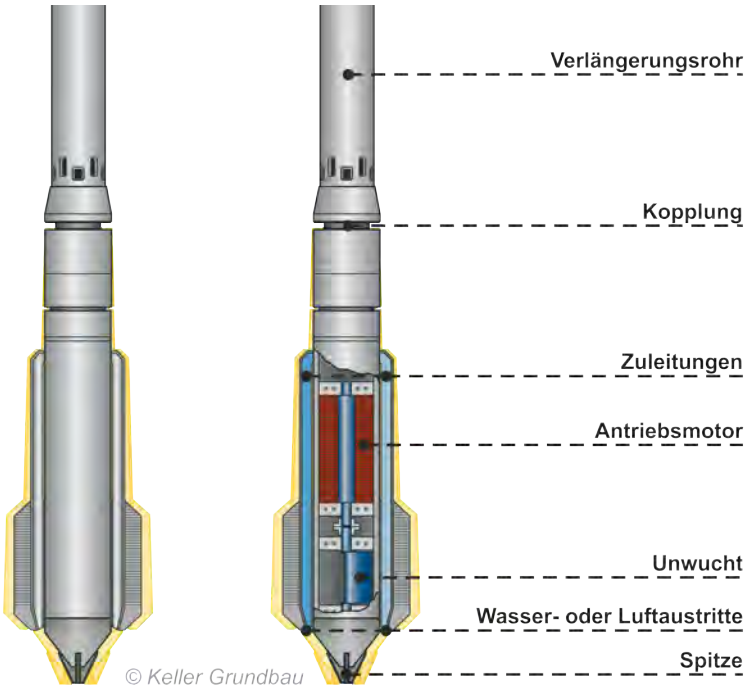


Abbildung 2.3: Schematische Darstellung eines Tiefenrüttlers [66].

Tabelle 2.1: Überblick von ausgewählten, auf dem Markt erhältlichen Tiefenrüttler [16], [70].

Hersteller	**Rüttlertyp**	**Länge (m)**	**Durchmesser (mm)**	**Gewicht (kg)**	**Leistung (kW)**	**Betriebsfrequenz (Hz)**
Keller	M1470	2.99	305	1515	70	50 - 60
	S340/34	3.10	421	2900	120	30
	S700	4.30	490	4400	180	25
Bauer	TR17	3.30	298	1400	112	≤ 53
	TR75	4.20	406	2580	235	≤ 32
Vibroflotation	V10	2.73	248	820	70	60
	V23	3.57	350	2200	130	30
	V48	4.08	378	2600	175	25
Balfour-Beatty	HD 130	k.A.	310	1850	98	50 - 60
	HD 150	k.A.	310	2250	130	50 - 60
	BD 300	k.A.	310	2575	120	30 - 36
	BD 400	k.A.	400	4400	215	30 - 35

Der Tiefenrüttler kann mittels Verlängerungsröhren in die erforderliche Tiefe gebracht werden. Die Übertragung der Rüttlerschwingung über die Verlängerungsrohre auf das Trä-

gergerät ist zu vermeiden und wird mit einer elastischen Kopplung zwischen dem Rüttlerkörper und den Verlängerungsrohren weitestgehend verhindert (siehe Abbildung 2.3). Über die Verlängerungsrohre erfolgt die Energieversorgung des Rüttlermotors und hier befinden sich die Zuleitungen für das Wasser zur Wasserspülung. Das Wasser tritt über Austritte an der Rüttlerspitze oder eventuell an bestimmten Stellen an den Verlängerungsrohren aus und unterstützt das Absenken des Rüttlers sowie den Verdichtungsvorgang. Die Anordnung und die Anzahl der Wasseraustritte können abhängig vom Gerätetyp unterschiedlich sein.

Der Rüttlermotor kann elektronisch oder hydraulisch angetrieben werden, wobei in den meisten Fällen ein elektronischer Antrieb zur Anwendung kommt. Die zum Antrieb des Rüttlermotors erforderliche elektrische Energie ist in der Regel von den Trägergeräten bereitgestellt. Das dafür erforderliche Stromaggregat ist meistens auf der Rückseite der Tragraupe montiert. Die Leistung des Rüttlermotors liegt im Regelfall zwischen 50 und 180 kW, eventuell sogar über 200 kW (siehe Tabelle 2.1). Der Motor wird oft zusammen mit einem Frequenzumrichter betrieben. Dadurch ist es möglich, die Betriebsfrequenz in gewissen Bandbreiten zu ändern. Die Verdichtung geschieht jedoch in der Regel bei konstanter Rüttlerfrequenz. Die Schwingweite der Rüttlerspitze eines in der Luft frei schwingenden Tiefenrüttlers liegt – je nach Gerätetyp – zwischen 5 und 50 mm [131].

Der Tiefenrüttler wird an Kränen bzw. Baggern hängend oder an speziell entwickelten Trägergeräten (Tragraupen) mäklergeführt eingesetzt. Bei Tragraupen mit Mäklerführung kann das Eindringen des Rüttlers in den zu verdichtenden Untergrund durch das Aktivieren des Eigengewichts der Tragraupe unterstützt werden. Dabei ist eine Hydraulikanlage im Einsatz. Im Zuge der Aktivierung des Eigengewichts der Tragraupe kann die Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden deutlich erhöht werden. Dieser Vorgang erhält häufig die Benennung „Aktivierung“, die zusätzliche Kraft „Aktivierkraft“. Beim Einsatz des Tiefenrüttlers auf einem Seilbagger hängend, steht lediglich das Eigengewicht des Rüttlerkörpers und der Verlängerungsrohre als Eindringhilfe zur Verfügung. Bei auf Seil hängenden Tiefenrüttlern sind generell deutlich größere Verdichtungstiefen möglich, als im Falle einer Mäklerführung.

2.2.1.2 Ablauf der Rütteldruckverdichtung

Der Verfahrensablauf bei einer Rütteldruckverdichtung ist in Abbildung 2.4 vereinfacht dargestellt und lässt sich in folgende vier Arbeitsphasen gliedern:

- Einvibrieren
- Verdichten
- Nachfüllen
- Abschließen

Einvibrieren
In der ersten Arbeitsphase der Rütteldruckverdichtung senkt man den Tiefenrüttler bis zur

geplanten Tiefe in den zu verdichtenden Untergrund ab. Dabei ist die Rüttlerfrequenz in der Regel konstant gehalten mit dem Erzielen einer möglichst hohen Eindringgeschwindigkeit. Das Einvibrieren ist meistens durch die kontinuierliche Wasserzugabe an der Rüttlerspitze erleichtert. Das Rücklaufwasser spült oft Feinteile aus der Kornstruktur aus.

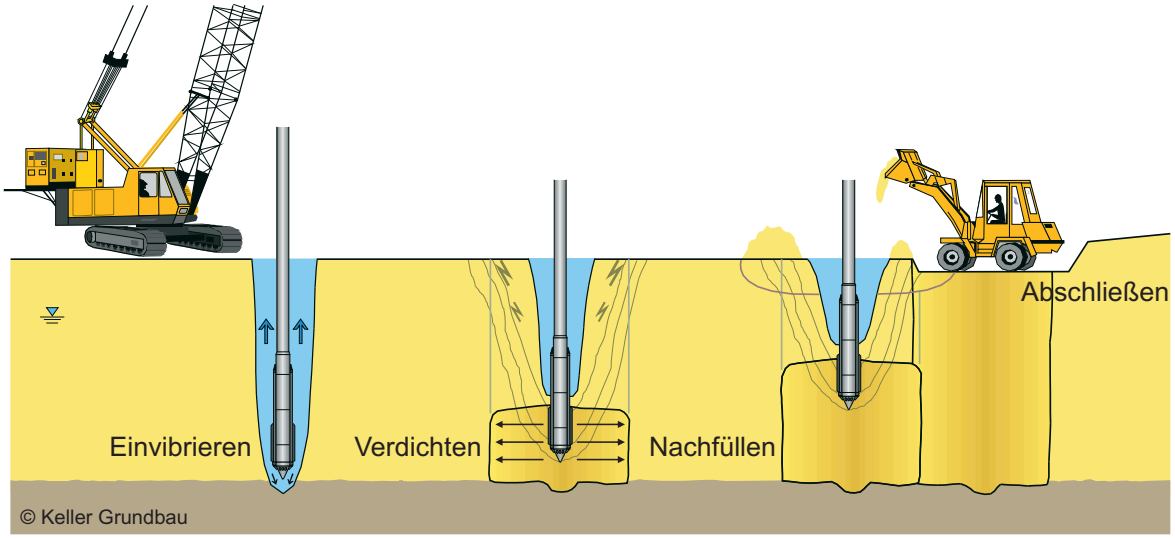


Abbildung 2.4: Vereinfachte Darstellung des Verfahrensablaufs bei der Rütteldruckverdichtung [66].

Verdichten

Anschließend an die Arbeitsphase des Einvibrierens beginnt die zweite Arbeitsphase der Rütteldruckverdichtung, die eigentliche Bodenverdichtung. Die Verdichtung erfolgt von unten nach oben, wobei die folgenden zwei unterschiedliche Arten von Verdichtungsabläufen zu unterscheiden sind:

- Der Tiefenrüttler wird stufenweise angehoben und bei der jeweiligen Tiefenstufe bei konstanter Rütteltiefe gehalten. Mit dieser Methode kann in kohäsionslosen Böden ein maßgeblicher Verdichtungserfolg erzielt werden.
- In leicht kohäsiven oder verkitteten Böden erfolgt der Verdichtungsvorgang ebenfalls von unten nach oben, aber in diesem Fall im Pilgerschrittverfahren. Der Rüttler wird periodisch angehoben und anschließend wieder in den zu verdichtenden Boden abgesenkt. Resultat des Absenkvorgangs ist die Verdichtung und Verdrängung vom Boden.

Im Zuge der Rütteldruckverdichtung soll ein zusammenhängender verdichteter Bodenbereich entstehen. Hierfür werden die Rüttleransatzpunkte nach einem bestimmten Verdichtungsmuster angeordnet. Die Austeilung der Rüttleransatzpunkte ist an die örtlichen Verhältnisse angepasst. Die Verdichtungsarbeiten können gegebenenfalls in mehreren Arbeitsgängen ausgeführt werden. Im ersten Arbeitsgang wird in einem Dreieck- oder Riereck-Raster verdichtet, unter der Bezeichnung „Primärraster“. Im zweiten Arbeitsgang wird in den Diagonalpunkten des ursprünglichen Rasters verdichtet, „Sekundärraster“ genannt (sie-

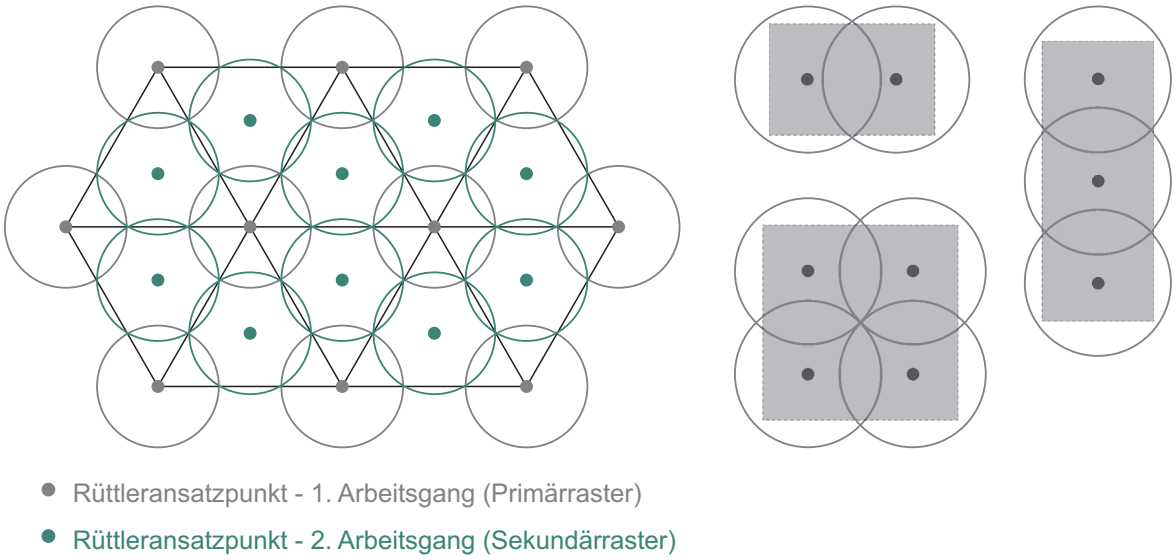


Abbildung 2.5: Dreieckförmige Rasteranordnung für großflächige Verdichtung, rechteckige (quadratische) Raster für Einzelfundamente (adaptiert nach [70]).

he Abbildung 2.5). Der optimale Abstand der Verdichtungsstrecken hängt von den Untergrundeigenschaften und von den Eigenschaften des angewendeten Tiefenrüttlers ab und liegt im Regelfall zwischen 2,5 und 5 m. Laut [39] soll der Mindestabstand der Rüttleransatzpunkte 1,4 m betragen. In Abbildung 2.5 ist dreieckförmige Rasteranordnung mit Primär- und Sekundärraster für großflächige Verdichtung und rechteckige Raster für Einzelfundamente exemplarisch dargestellt. Abbildung 2.6b zeigt eine rechteckige Anordnung der Verdichtungsstrecken während den Verdichtungsarbeiten.

(a) Trichter um den Rüttleransatzpunkt an der Oberfläche.

(b) Anordnung der Verdichtungsstrecken in einem Rechteckraster.

Abbildung 2.6: Ablauf der Rüttledruckverdichtung [66].

Der wesentliche Vorteil einer Rütteldruckverdichtung besteht darin, dass das Verfahren eine gezielte Steuerung der Verdichtungstiefe ermöglicht. Die Tiefenwirkung der Verdichtung ist praktisch ausschließlich durch die Parameter der angewendeten Geräteschaft begrenzt. Des Weiteren ist im Zuge der Rütteldruckverdichtung entlang der gesamten Ver-

dichtungsstrecke eine annähernd gleichmäßige Verdichtungswirkung erzielbar.

Nachfüllen
Die Verdichtung führt zu einer Abwärtsbewegung des Bodens um den Tiefenrüttler, wodurch sich ein Trichter um den Rüttleransatzpunkt an der Oberfläche ausbildet (siehe Abbildung 2.6a). Den Tichter verfüllt man laufend mit geeignetem Nachfüllmaterial. Die Volumenverminderung im Untergrund kann je nach Bodenbeschaffenheit und Ausgangslagerungsdichte bis zu 15% betragen [70]. Gemäß [39] ergeben sich dadurch erfahrungsgemäß erforderliche Mengen an Nachfüllmaterial von ungefähr $0,4$ bis $0,8\,\mathrm{t}$ pro Laufmeter Verdichtungsstrecke. Als Nachfüllmaterial können natürlich vorkommene Sande, Kiese oder Sand-Kies-Gemische, gebrochener Fels oder Recycling-Materialien wie gebrochene Ziegel oder gebrochener Beton verwendet werden, insofern diese ausreichend hart und chemisch inert sind [108]. Des Öfteren wird anstehendes gleichartiges Material, z. B. aus dem Aushub, verwendet.

Die Menge des Nachfüllmaterials wird im Zuge der Verdichtungsarbeiten kontinuierlich aufgezeichnet und bildet einen integrierenden Teil der indirekten Qualitätskontrolle.

Abschließen
Der oberflächennahe Bodenbereich – bis zu einer Tiefe von mindestens $0,5 - 1,0\,\mathrm{m}$ – lässt sich mit dem Rütteldruckverfahren nicht in ausreichendem Maße verdichten. Nach [39] muss daher das Arbeitsplanum für die Herstellung der Rütteldruckverdichtung ca. $0,50\,\mathrm{m}$ über planmäßiger Oberkante des verdichteten Bodenbereichs liegen[1]. Als Abschluss der Verdichtungsarbeiten ist folglich eine oberflächennahe Verdichtung an der Oberkante des verdichteten Bodenbereichs erforderlich. Diese erfolgt im Regelfall mittels einer Vibrationswalze.

2.2.2 Tiefenverdichtung mit Aufsatzrüttlern

Die Tiefenverdichtung mit Aufsatzrüttlern stellt eine Spezialform der Rüttelverdichtung dar und findet analog zur Rütteldruckverdichtung bei der tiefreichenden Verdichtung kohäsionsloser, rolliger Böden ihre Anwendung. Das Verfahren ist zusätzlich unter den Namen Resonanzverdichtung, Vibro-Wing-Methode oder MRC-Methode (Müller Resonance Compaction [139]) bekannt. Bei der Resonanzverdichtung wird eine Rüttlerbohle von einem an der Geländeoberfläche verbleibenden Aufsatzrüttler in vertikale Schwingung versetzt. Die Unterkante und die Mantelfläche der Rüttlerbohle übertragen die erzeugten harmonischen Schwingungen in den zu verdichtenden Boden. Eine ausführliche Beschreibung des Verfahrens ist beispielsweise bei *Massarsch* [88], [89] zu finden.

Die Resonanzverdichtung geschieht in der Regel unter der Verwendung einer leichten und flexiblen Verdichtungsbohle, die eine effektive Vibrationsübertragung in den umgebenden Boden ermöglicht. Es kommen hauptsächlich herkömmliche Stahlprofile oder Stahlroh-

[1] Die Strecke zwischen planmäßiger Oberkante des verdichteten Bodenbereichs und dem Arbeitsplanum ist häufig als „Leerstrecke“ bezeichnet.

re zur Anwendung. Diese werden gegebenenfalls mit Öffnungen versehen, um eine bessere Verzahnung mit dem Boden erzielen zu können. Es können zudem spezielle Bohlenausführungen zur Anwendung kommen, welche unter den Namen Terraprobe, Forster probe, Japanese Vibro-rod system, Franki Y-Probe und Swedish Vibro Wing system bekannt sind [89].

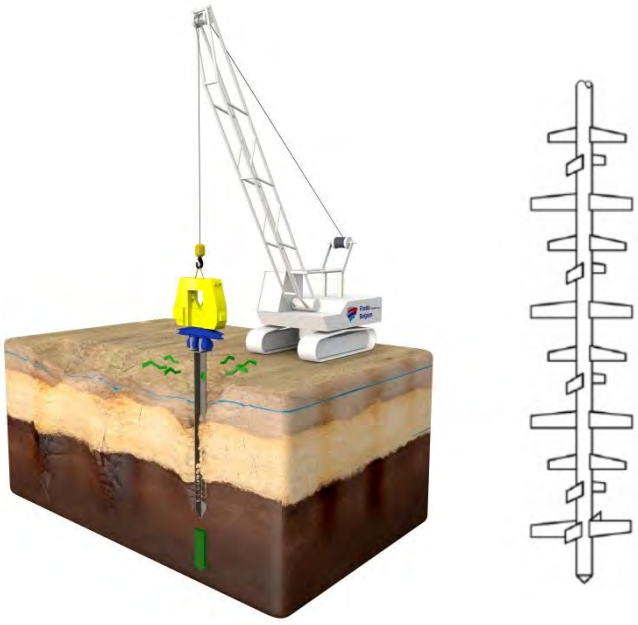


Abbildung 2.7: Schematische Darstellung der Tiefenverdichtung mittels Verdichtungsbohle und Aufsatzrüttler (links) und einer Vierflügelbohle (rechts) [41].

Die Verdichtung erfolgt durch wiederholtes Einvibrieren und Ziehen der Bohle, bei laufender Anpassung der Rüttlerfrequenz dem Verdichtungsvorgang. Das Schwingungsverhalten des Bodens wird mittels an der Geländeoberfläche installierten Messaufnehmern beobachtet, herangezogen als Grundlage für die Regelung der Rüttlerfrequenz. Im Zuge der Verdichtung wird durch die Frequenzregelung eine Systemresonanz erzielt. Das Grundprinzip der Frequenzreglung bei der Resonanzverdichtung wird in Abschnitt 3.3.2 diskutiert.

Die Resonanzverdichtung erfolgt in der Regel in mehreren Arbeitsgängen. Im ersten Arbeitsgang wird in der Regel in einem rechteckigen Raster, im zweiten Arbeitsgang in den Diagonalpunkten des ursprünglichen Rasters, verdichtet. Der Abstand der Verdichtungspunkte hängt von den Untergrundeigenschaften, von der angewendeten Rüttlerbohle und der Leistung des Aufsatzrüttlers ab und liegt im Regelfall bei 4 bis 5 m [88].

2.2.3 Rüttelstopfverfahren (RSV)

Das Rüttelstopfverfahren dient zur Verbesserung von bindigen feinkörnigen Böden mit geringem Verdichtungspotenzial. Dieses Verfahren geht nach einem ähnlichen Prinzip wie das Rütteldruckverfahren vor sich, jedoch mit dem Unterschied, dass dem Untergrund grobkörniges Material zugeführt und durch wiederholtes Einfahren mit dem Tiefenrüttler (im

Pilgerschrittverfahren) verdichtet wird. Dadurch können vertikale, säulenartige Schotterkörper im Untergrund erzeugt werden, die zur Erhöhung seiner Tragfähigkeit beitragen und gegebenenfalls aufgrund ihrer hohen hydraulischen Durchlässigkeit als Vertikaldrain wirken. Das grobkörnige Material kann direkt an die Spitze des Rüttlers durch ein mit dem Rüttlerkörper verbundenes Materialführungsrohr (Materialschleuse) gelangen oder von oben eingefüllt werden. Beim abschnittsweise Verfüllen des Hohlraums mit Verfüllmaterial und bei dessen anschließender Verdichtung wird dieser seitlich in den Boden gedrückt. Der umgebende Boden ist bei diesem Verfahren kaum mehr verdichtet, sondern vorrangig seitlich verdrängt. Üblicherweise besitzen Rüttelstopfsäulen einen Durchmesser von größer als 0,6 und kleiner als 1,2 m. Der Verfahrensablauf beim Rüttelstopfverfahren ist in Abbildung 2.8 veranschaulicht.

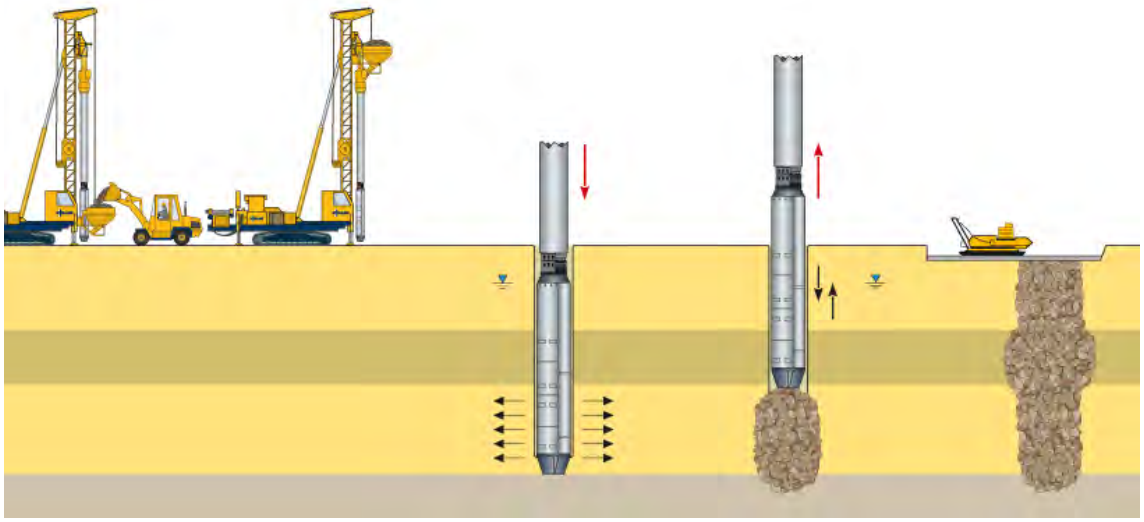


Abbildung 2.8: Verfahrensablauf beim Rüttelstopfverfahren [66].

2.2.4 Sonderformen des Rüttelstopfverfahrens

Für eine wirksame Bodenverbesserung mittels Rüttelstopfsäulen ist die seitliche Stützung des umgebenden Untergrundes eine maßgebende Voraussetzung. Falls aufgrund der geringen Scherfestigkeit des Untergrundes nur eine geringe seitliche Stützung vorhanden ist, sind größere Horizontalverformungen notwendig, um die Kontaktkräfte zwischen der Stopfsäule und dem umgebenden Boden zu aktivieren. Große Horizontalverformungen können zu großen Bauwerkssetzungen oder zum Versagen der Rüttelstopfsäulen führen. Es besteht die Möglichkeit, bei derartigen Untergrundverhältnissen die Tragfähigkeit von Rüttelstopfsäulen durch Geokunststoffummantelung bzw. mittels hydraulischen Bindemitteln oder Klebstoffen zu erhöhen.

Geokunststoffummantelte Stopfsäulen

Geokunststoffummantelte Stopfsäulen können auch in sehr weichen bindigen Böden zur

Verbesserung des anstehenden Bodens eingesetzt werden, da durch die Geokunststoffummantelung die fehlende radiale Stützwirkung des Bodens sichergestellt ist, wobei die Geokunststoffmantel durch Ringzugkräfte beansprucht ist [19], [116].

Vermörtelte Stopfsäulen (VSS) und Fertigmörtelsäulen (FSS)
Vermörtelte Stopfsäulen (VSS) werden auf gleiche Art und Weise wie herkömmliche Rüttelstopfsäulen hergestellt. Der einzige Unterschied besteht im zugegebenen Verfüllmaterial. Dem Kies wird während der Herstellung eine Zementsuspension als Bindemittel über eine eigene Zuleitung zugegeben. Nach dem Erhärten der Suspension entsteht eine verfestigte Säule im Untergrund [66]. Das Lastabtragungsverhalten der vermörtelten Stopfsäulen und Fertigmörtelsäulen entspricht der von unbewehrten Pfählen.

Betonrüttelsäulen (BRS) und Rüttleortbetonpfähle (ROB)
Die Herstellung der Betonrüttelsäulen (BRS) bzw. Rüttelortbetonpfählen (ROB) erfolgt ähnlich wie bei der herkömmlichen Rüttelstopfverdichtung. Dabei wird das Säulenelement anstatt vom grobkörnigen Verfüllmaterial in seiner gesamten Länge aus pumpfähigem Ortbeton hergestellt [66]. Das Lastabtragungsverhalten entspricht ebenfalls dem von unbewehrten Pfählen.

Betonrüttelsäulen und auch Vermörtelte Stopfsäulen können optimal in „Hybridgründungen“ ihre Anwendung finden. Unter dem Begriff Hybridgründungen sind Bodenverbesserungsverfahren zu verstehen, die gleichzeitig zwei Effekte erfüllen: beispielsweise die gleichzeitige Bodenverdichtung und das Einbringen eines tragfähigen Boden- Bindemittelgemisches, mit dem in weiterer Folge ein tragfähiges Tiefgründungselement geschaffen wird [4].

Verklebte Schotterstrukturen
Im Zuge eines aktuellen Forschungsprojektes wurde eine spezielle, umweltverträgliche Reaktionsharz-Rezeptur entwickelt, welche die Herstellung von harzverklebten Rüttelstopfsäulen ermöglicht. Darüber hinaus konnte man eine praxistaugliche Gesamtlösung zur Säulenherstellung unter Beibehaltung der hydraulischen Durchlässigkeit erarbeiten und im Rahmen von großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen erfolgreich testen [100], [153].

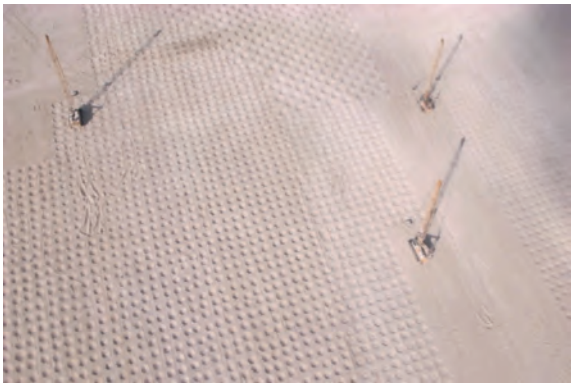
2.3 Tiefenverdichtung mittels vertikalen, impulsartigen Stößen

Eine tiefreichende Bodenverbesserung kann nicht nur mit Vibrationsverdichtungsverfahren sondern auch mittels impulsartigen Stößen an der Geländeoberfläche erfolgen. Im Folgenden werden zwei Verfahren, die Dynamische Intensivverdichtung (DYNIV) und die Impulsverdichtung vorgestellt. Anschließend erfolgt eine Diskussion wesentlicher Unterschiede zwischen diesen Verfahren und der tiefreichenden Bodenverbesserung mittels Rütteldruckverdichtung.

2.3.1 Dynamische Intensivverdichtung (DYNIV)

Das Prinzip der Dynamischen Intensivverdichtung gehört zu den ältesten Methoden der Bodenverdichtung [5], welche in den 1960er Jahren von *Menard* [91] wieder entdeckt und zu neuen Anwendungsgrenzen geführt wurde. Dabei lässt man ein Fallgewicht (von 10 bis 40 t) aus einer Höhe von 5 bis 40 m periodisch fallen (siehe Abbildung 2.10a) und dadurch entsteht eine tiefreichende Verdichtungswirkung im grobkörnigen Untergrund [131]. Bei Anwendungen an feinkörnigen Böden wird das Verfahren als „Dynamische Konsolidation“ bezeichnet [92].

(a) Grundprinzip der dynamischen Intensivverdichtung [129] (Serienaufnahme).



(b) Rasterförmige Anordnung der Verdichtungspunkte [93].

Abbildung 2.9: Dynamische Intensivverdichtung (DYNIV).

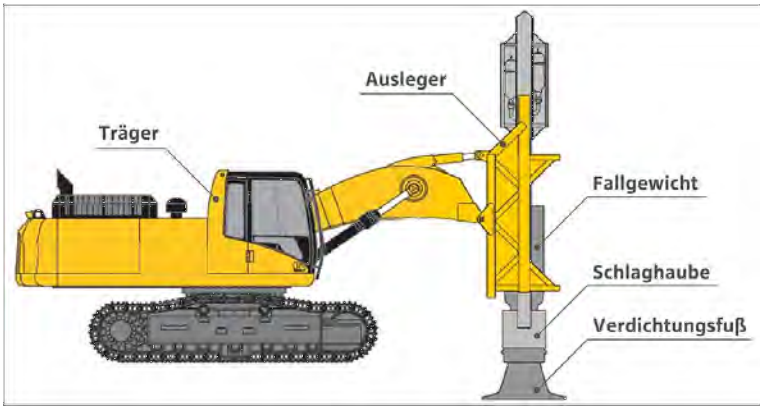
2.3.2 Impulsverdichtung

Der Impulsverdichter – ersichtlich in Abbildung 2.10 – ist ein Verdichtungsgerät, das die Technologie des hydraulischen Schlaghammers ausnutzt mit einem Einsatz von kontrollierten Stößen zur Verbesserung der Untergrundeigenschaften [1]. Das Verfahren entstand Anfang der 1990er Jahre in England um militärische Zwecke zu dienen, heute kommt seine weiterentwickelte Variante bei der mitteltiefen Verdichtung von Kiesen, Sanden, Schluffen und künstlichen Anschüttungen vor. Die Tiefenwirkung der Impulsverdichtung liegt in der Regel zwischen 4 bis 7, 5 m, bei ungünstigen Untergrundverhältnissen ist die Verdichtungstiefe geringer [105].

2.3.3 Abgrenzung zu Vibrationsverdichtungsverfahren

Der wichtigste Unterschied zwischen Vibrationsverdichtungsverfahren und der Dynamischen Intensivverdichtung bzw. der Impulsverdichtung besteht in der Anregungsart. Solange bei Vibrationsverdichtungsverfahren die Verdichtung des Bodens mittels harmonischer Schwingung einer Rüttlereinheit herbeigeführt wird, erfolgt die Anregung bei der Dynamische Intensivverdichtung bzw. der Impulsverdichtung transient.

Sowohl die dynamische Intensivverdichtung als auch die Impulsverdichtung stellen grundsätzlich effiziente Werkzeuge für eine tiefe bzw. mitteltiefe Verbesserung des Unter-



(a) Schematische Darstellung des Verdichtungsgerätes [154].

(b) Verdichtungsfuß des Impulsverdichters [1].

Abbildung 2.10: Aufbau des Impulsverdichters.

grundes dar. Eine gezielte Steuerung der Verdichtungstiefe ist jedoch hierbei verfahrensbedingt nicht möglich, wie dies bei der tiefreichenden Bodenverbesserung mittels Rütteldruckverdichtung der Fall ist. Ein weiterer wesentlicher Unterschied zu Tiefenrüttelverfahren besteht darin, dass bei diesen Verfahren die erzielbare Verdichtungswirkung mit zunehmendem Abstand von der Geländeoberfläche abnimmt und daher kein gleichmäßiger Verdichtungserfolg über die gesamte Verdichtungstiefe erzielbar ist.

2.4 Verdichtbarkeit von Böden mittels Tiefenrüttelverfahren

Die Art des zu verbessernden Bodens hat einen entscheidenden Einfluss auf die Auswahl des geeigneten Tiefenrüttelverfahrens. In der Fachliteratur wird die Verdichtbarkeit des Bodens am häufigsten auf Basis seiner Korngrößenverteilung definiert. Generell gilt, dass grobkörnige Böden mit einem hohen Eigenververdichtungspotenzial optimal mit dem Rütteldruckverfahren verdichtet werden können. Demgegenüber steht für die Verbesserung bindiger Böden mit geringem Verdichtungspotenzial und geringer hydraulischer Durchlässigkeit der Rüttelstopfverfahren zur Verfügung. Abbildung 2.11 stellt plakativ die Grenzen der Anwendbarkeit des Rütteldruck- und Rüttelstopfverfahrens in Abhängigkeit der Korngrößenverteilung dar.

Kirsch und *Kirsch* [70] geben Hinweise zur Verdichtbarkeit unterschiedlicher Bodenarten mit dem Rütteldruckverfahren an (siehe Tabelle 2.2). Es ist auch hierbei zu erkennen, dass das Rütteldruckverfahren in grobkörnigen Böden erfolgreich einsetzbar ist. Es sind jedoch unter den grobkörnigen Böden mit unterschiedlicher Korngrößenverteilung erhebliche Unterschiede hinsichtlich der erzielbaren Verdichtungswirkung festzustellen. Die Korngrößenverteilung des zu verdichten Untergrundes hat somit einen maßgeblichen Einfluss auf den erzielbaren Verdichtungserfolg. Bereits ein vergleichsweise geringer Schluff- oder Tonanteil kann die dynamische Verdichtungswirkung reduzieren oder sogar verhindern.

Abbildung 2.12 zeigt die Bandbreite der Korngrößenverteilung mittels Rütteldruckverdichtung effizient verdichtbarer Böden nach *Mitchell* [94]. Dabei ist auch die nach *Thorburn*

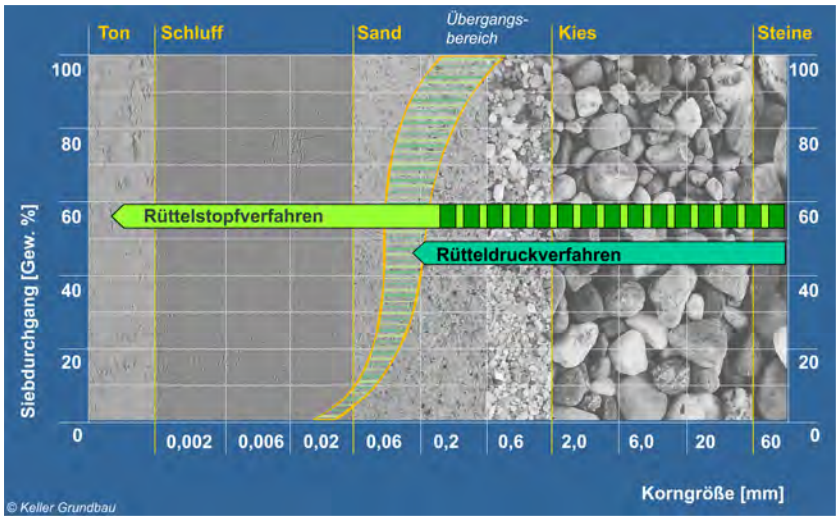


Abbildung 2.11: Anwendungsgrenzen des Rütteldruck- und Rüttelstopfverfahrens [66].

Tabelle 2.2: Verchtbarkeit grobkörniger Böden mit dem Rütteldruckverfahren (adaptiert nach [70]).

Bodenart	**Eignung zur Verdichtung mit dem Rütteldruckverfahren**
Kies, weit gestuft	Prinzipiell gut verdichtbar, eventuell großer Eindringwiderstand beim Einvibrieren.
Kies, eng gestuft	Geringe Verdichtungswirkung, wenn $D_{60}/D_{10} \leq 2$ (Probeverdichtung zu empfehlen).
Kies, schluffig und tonig	Die Verdichtung ist nicht möglich, wenn der Feinkornanteil über 12% liegt.
Sand, weit gestuft	Ideal geeignet
Sand, eng gestuft	Geringe Verdichtungswirkung, wenn $d_{60}/d_{10} \leq 2$ (Probeverdichtung zu empfehlen).
Sand, schluffig	Die Verdichtung ist nicht ausreichend wirksam, wenn der Schluffanteil über 8% liegt.
Sand, tonig	Die Verdichtung ist nicht ausreichend wirksam, wenn der Tonanteil über 2% liegt.

[137] definierte Bandbreite gestrichliert gekennzeichnet. Nach *Mitchell* [94] ist die Verdichtung bei einem Feinkornanteil höher als 20-25% ist eine ausreichende Eigenverdichtung bzw. Umlagerung der Bodenteilchen aufgrund der kohäsiven Eigenschaften des Bodens erschwert. Es ist zu beachten, dass die von *Mitchell* [94] Bandbreite im Bereich Grobsand und Kies nicht als realistisch anzusehen ist. Diese Böden lasen sich erfahrungsgemäß mit dem Rütteldruckverfahren optimal verdichten.

Brown [24] hat einen auf der Kornverteilung basierenden Eignungsfaktor zur Beurteilung der Verdichtbarkeit von Böden entwickelt. Der Eignungsfaktor SN (suitability number) ist folgendermaßen definiert:

$$SN = 1.7 \left(\frac{3}{{d_{50}}^2} + \frac{1}{{d_{20}}^2} + \frac{1}{{d_{10}}^2} \right)^{0.5} \tag{2.1}$$

wobei d_{50}, d_{20} und d_{10} der Korngröße entsprechen, welche die Kornverteilungslinie beim

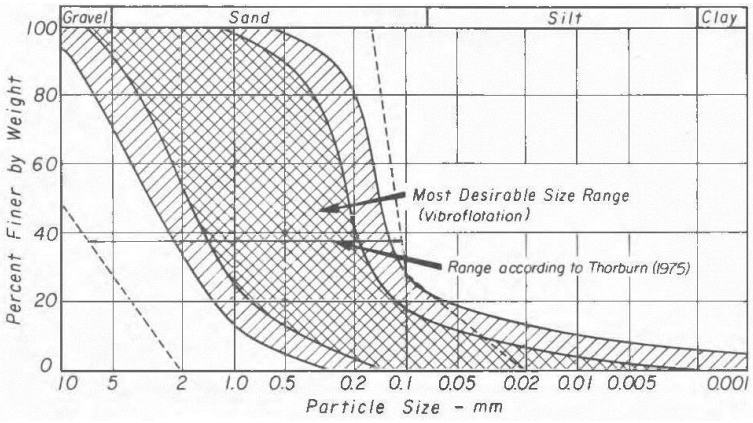


Abbildung 2.12: Bandbreite der Korngrößenverteilung mittels Rütteldruckverdichtung effektiv verdichtbarer Böden nach [94] und [137].

Siebdurchgang von 50%, 20% und 10% Massenprozent aufweist. Je kleiner der Eignungsfaktor ist, desto besser eignet sich der Boden zur Verdichtung mit dem Tiefenrüttelverfahren. Böden mit einem Eignungsfaktor über 50 sind mit dem Tiefenrüttelverfahren als nicht verdichtbar anzusehen. Diese Beurteilungsmethode konnte sich allerdings in der Praxis kaum durchsetzen.

Die hydraulische Durchlässigkeit des zu verdichtenden Bodens hat einen entscheidenden Einfluss auf die Verdichtbarkeit. Nach *Kirsch und Kirsch* [70] ist die Rütteldruckverdichtung in Böden mit einer hydraulischen Durchlässigkeit niedriger als $k_f = 10^{-5}\,\mathrm{m/s}$ nicht mehr möglich. Nach *Massarsch* [88] soll die Durchlässigkeit des zu verdichtenden Bodens ausreichend groß sein, um den raschen Abbau des durch die Verdichtung bewirkten Porenwasserüberdrucks zu ermöglichen, welcher zufolge des Verdichtungsvorgangs entsteht. Auch *Mitchell* [94] betont den negativen Einfluss der tendenziell niedrigeren hydraulischen Durchlässigkeit von Böden mit erhöhtem Feinkornanteil auf ihre Verdichtbarkeit.

Bodenproben zur Bestimmung der Korngrößenverteilung oder der hydraulischen Durchlässigkeit stehen häufig nicht, oder nur in geringer Anzahl, zur Verfügung. Des Weiteren ist es anhand von Bodenproben nicht möglich, die ursprüngliche Lagerungsdichte eines grobkörnigen Bodens festzustellen. Es ist daher üblich, für die Beurteilung des Verdichtungspotenzials Sondierungen zur indirekten Bestimmung der Lagerungsdichte des Bodens anzuwenden. In Österreich kommt dabei am häufigsten die Schwere Rammsonde (DPH; früher SRS 15) zur Anwendung. Nach *Massarsch* [87] kann die Verdichtungsfähigkeit von Böden anhand von Drucksondierungen, auf Basis des Diagramms in Abbildung 2.13 (links), beurteilt werden. Die Böden werden anhand des gemessenen Spitzenwiderstandes und des Reibungsverhältnisses sind in die Kategorien „verdichtbar“, „teilweise verdichtbar“ und „schwer verdichtbar“ unterteilt. In Abbildung 2.13 (rechts) ist zusätzlich die Abgrenzung der unterschiedlichen Bodenarten gemäß dem Klassifizierungssystem nach *Robertson* [121] dargestellt.

Die Anwendung unterschiedlicher Sondierverfahren zur Ermittlung des Verdichtungserfolgs bei der Rütteldruckverdichtung ist in Abschnitt 3.2.1 unter eingehender Diskussion unterzogen.

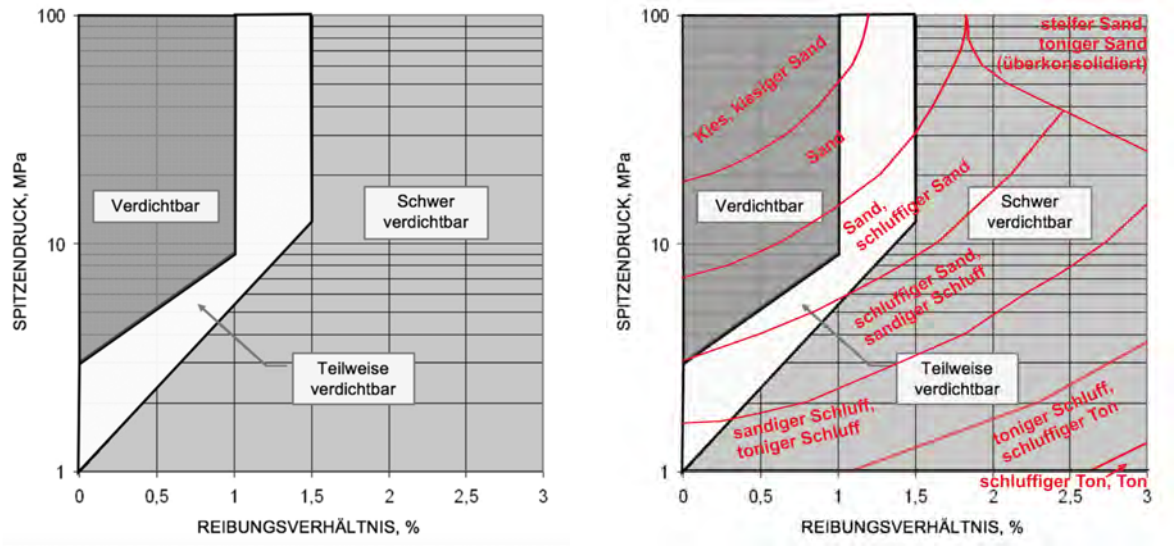


Abbildung 2.13: Beurteilung der Verdichtbarkeit von Böden anhand von Drucksondierungen nach *Massarsch* [88] (links), mit Abgrenzung der unterschiedlichen Bodenarten gemäß dem Klassifizierungssystem nach *Robertson* [121] (rechts).

2.4.1 Erforderliche Baugrundinformationen

Die Auswahl des anzuwendenden Tiefenverdichtungsverfahrens und der Verbesserungserfolg hängen sehr stark von den Eigenschaften des zu verdichtenden Untergrundes ab. Daher ist eine geotechnische Voruntersuchung vor der Durchführung der Tiefenverdichtungsarbeiten unerlässlich. Bei der Untergrunderkundung kommen in der Regel die herkömmlichen Verfahren, hauptsächlich Bohrungen, Schürfe und Sondierungen zur Anwendung. Nach Auswahl des geeigneten Verfahrens sind in weiterer Folge gemäß *EN 14731* [108] die folgenden Informationen über den Untergrund bei der Rütteldruckverdichtung zwingend notwendig, um dessen Eignung zum jeweiligen Bodenverbesserungsverfahren beurteilen zu können:

- Korngrößenverteilung und Feinkornanteil
- Lagerungsdichte
- hydraulische Durchlässigkeit
- Gefahr der Kornzertrümmerung
- Kohäsion, Zementierung
- Fundamentreste im Untergrund

Die maßgeblichen Eigenschaften des Nachfüllmaterials müssen ebenfalls ermittelt werden. Nachfüllmaterialien müssen ausreichend hart und chemisch inert sein bzw. die Verdichtbarkeit des Einbaumaterials muss gewährleistet sein.

Durch Verdichtungsversuche auf einem Testfeld kann die erzielbare Verdichtungstiefe und Verdichtungserfolg mit dem anzuwendenden Verdichtungsgerät vor Ort idealerweise überprüft werden [70].

2.5 Wissenschaftliche Untersuchung des Tiefenrüttelverfahrens

Innovationen beschränkten sich bei den Tiefenrüttelverfahren nicht nur auf die Verbesserung der Verdichtungsgeräte und der Verfahrenstechnik. Zahlreiche wissenschaftliche Untersuchungen befassten sich mit den Prozessen im Rüttler-Boden Interaktionssystem sowie im zu verdichtenden Boden. Der erste Teil des vorliegenden Abschnitts beschäftigt sich mit ausgewählten wissenschaftlichen Arbeiten, die sich die Untersuchung des Rütteldruckverfahrens zum Ziel gesetzt haben.

Die vorübergehende Verringerung der Scherfestigkeit im zu verdichtenden Boden ist eine wesentliche Voraussetzung für die Rütteldruckverdichtung. Dieser Vorgang wird jedoch in der Fachliteratur auf unterschiedliche bodenmechanische Prozesse zurückgeführt. Der zweite Teil dieses Abschnitts gibt ein Überblick möglicher Erklärungen für diesen Vorgang, auf Basis von diversen Veröffentlichungen an.

2.5.1 Wissenschaftliche Untersuchungen zu den Prozessen im Rüttler-Boden Interaktionssystem

2.5.1.1 Erste experimentelle Untersuchungen der Rütteldruckverdichtung in großmaßstäblichen Versuchen

Die die ersten großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen zur messtechnischen Erfassung der Rüttlerbewegung können auf *Morgan* und *Thompson* [97] im Jahr 1983 zurückgeführt werden. Die Untersuchungen erfolgten im locker gelagerten Sand in Schottland. Im Zuge der Experimente kamen drei unterschiedliche Rüttlertypen mit hydraulischem Antrieb zur Anwendung. Die Verdichtung führte man im Pilgerschrittverfahren durch. Messsensoren wurden an der Rüttlerspitze sowie im Untergrund in unterschiedlichen Abständen vom Verdichtungsgerät installiert. Bei der indirekten Kontrolle des Verdichtungserfolgs kam die Leichte Rammsonde (DPL) zum Einsatz.

Im Zuge dieser Experimente konnte die Rüttlerbewegung durch die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze erfolgreich erfasst werden. Abbildung 2.14 zeigt eine exemplarische Gegenüberstellung der messtechnisch erfassten Rüttleramplitude und Ergebnisse von Rammsondierungen über die Tiefe dargestellt, bei unterschiedlichen Verdichtungsstrecken. Die Schwingwegamplitude betrug bei diesem Rüttlertyp während der freien Schwingung in der Luft 7,5 mm. Im Zuge des Verdichtungsvorgangs wurden bei sämtlichen betrachteten Verdichtungsversuchen deutlich niedrigere Schwingwegamplituden aufgezeichnet als während der Rüttlerschwingung in der Luft.

Auf Basis dieser experimentellen Untersuchungen stellten die Autoren Zusammenhänge zwischen der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und der Dichte des verdichteten Bodens fest. Sie schlugen die Entwicklung von analytischen Modellen zur Berechnung von bodenmechanischen Kenngrößen aus der Rüttlerbewegung vor.

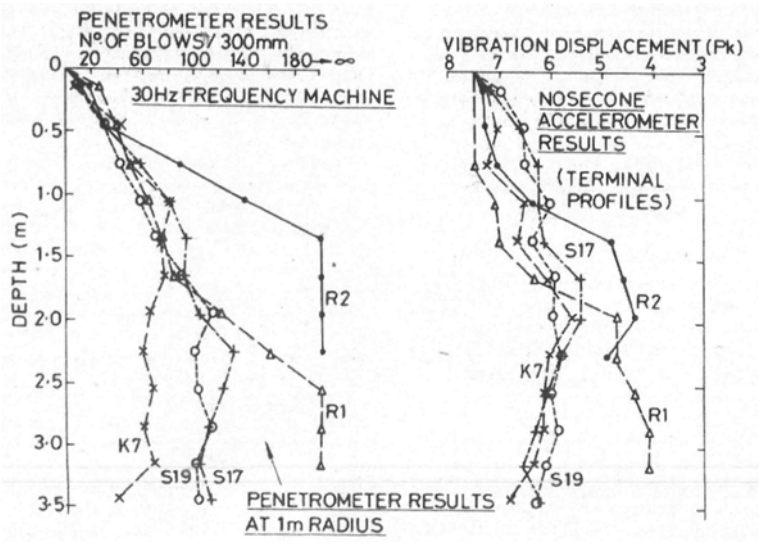


Abbildung 2.14: Gegenüberstellung der messtechnisch erfassten Schwingwegamplitude (rechts) und die Ergebnisse von Rammsondierungen (DPL) (links) bei unterschiedlichen Verdichtungsstrecken [97].

2.5.1.2 Theoretische Untersuchungen zu Rütteldruckverdichtung

Das Rütteldruckverfahren wurde im Rahmen einer wissenschaftlichen Arbeit von *Fellin* [43], [45] anhand von analytischen und numerischen Modellen untersucht. Dabei wurden die beiden Komponente des Rüttler-Boden Interaktionssystems vorerst getrennt analysiert, der in der Luft frei schwingender Rüttler behandelt sowie das Verhalten des Bodens bei zyklischer Belastung untersucht.

Es wurden analytische Näherungslösungen für die Rüttlerbewegung in der Luft und im Boden angegeben. Ausgehend von der analytischen Darstellung des dynamischen Rüttler-Boden Interaktionssystems erfolgte die Untersuchung des Zusammenhangs zwischen der Rüttlerbewegung und Bodenparametern theoretisch mit Methoden der klassischen Bodendynamik. Die Zusammenhänge für die vertikale und kippende Fundamentbewegung nach *Wolf* [150], für die horizontale Pfahlschwingung nach *Makris* und *Gazetas* [81] fungierten als Basis für die Ermittlung von Bodenparameter aus den Ersatzgrößen der entwickelten analytischen Modelle. Dabei wurde auch die Dehnungsabhängigkeit der Steifigkeit des Bodens berücksichtigt. Abbildung 2.15 und Abbildung 2.16 zeigen die zugrunde gelegten Ersatzsysteme. Schlussfolgerung war, dass die Rückrechnung von Bodenparametern aus der Rüttlerbewegung anhand von Analogien zur Fundament- und Pfahlschwingung prinzipiell möglich ist. Die berechneten Bodenparameter schwanken jedoch relativ stark, bereits bei einer geringen Änderung in der Rüttlerbewegung, wodurch die praktische Anwendbarkeit der Methode schwer erscheint. Diese Arbeit hat jedoch theoretisch aufgezeigt, dass das Bewegungsverhalten des Rüttlers prinzipiell als Grundlage zu einer Qualitätskontrolle dienen kann.

Fellin [45] behandelte in seiner wissenschaftlichen Arbeit die Wellenausbreitung vom Rüttler als plastodynamisches Problem ausführlich. Die Erhöhung der Bodendichte zufolge Rütteldruckverdichtung und die Reichweite der Verdichtung sind hier mit dem hypoplasti-

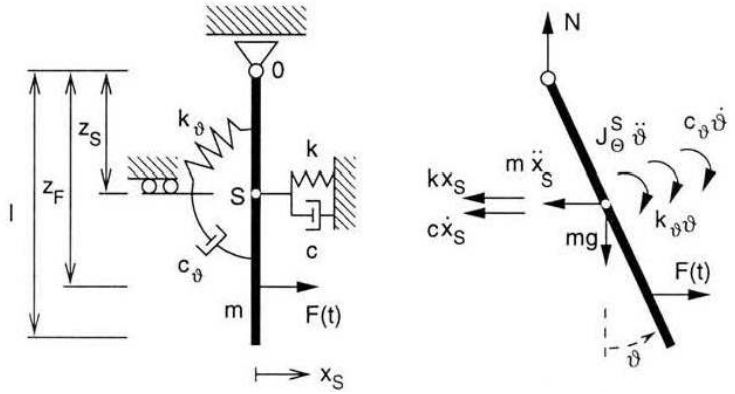


Abbildung 2.15: Ersatzsystem für das Rüttler-Boden Interaktionssystem aus Analogie zur Fundamentschwingung [44].

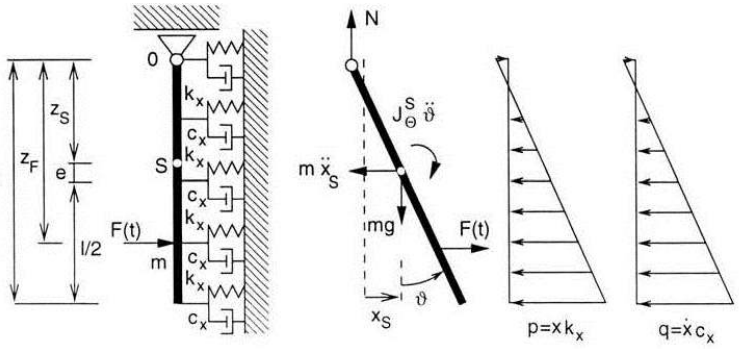


Abbildung 2.16: Ersatzsystem für das Rüttler-Boden Interaktionssystem aus Analogie zur Pfahlschwingung [44].

schen Stoffmodell in der Version *von Wolffersdorf* [151] betrachtet.

Die Ergebnisse der theoretischen Untersuchungen von *Fellin* [45] zeigten, dass für die Untersuchung der Rüttlerbewegung und für die optimierte Festlegung von Verfahrensparametern experimentelle Untersuchungen im Großmaßstab notwendig sind. Der Autor schlug die messtechnische Erfassung der der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und unterhalb der elastischen Kopplung bzw. des Phasenunterschiedes zwischen Erregerkraft und Auslenkrichtung des Rüttlerkörpers vor. Letzterer erhielt die Bezeichnung „Vorlaufwinkel“.

Fellin [46] hat aufbauend auf seinen theoretischen Untersuchungen Großversuche in Südbayern durchgeführt. Diese dienten zur Entwicklung eines neuen online Überwachungs- und Qualitätssicherungssystems, welches auf Basis von Messungen der Rüttlerbewegung arbeitet. Dabei kam ebenfalls ein hydraulisch angetriebener Tiefenrüttler zur Anwendung. Im Zuge der Experimente wurde die Rüttlerbewegung messtechnisch erfasst und daraus Modellkonstanten eines vereinfachten Masse-Feder-Dämpfer Schwingsystems berechnet. Die Ergebnisse zeigten, dass eine online Verdichtungskontrolle durch messtechnische Erfassung der Rüttlerbewegung und eine anschließende Auswertung der Messdaten prinzipiell möglich ist. *Fellin* stellte jedoch seitdem keine weiteren Experimente zur Untersuchung der Rüttlerbewegung an.

2.5.1.3 Regelung der Rüttlerfrequenz zur Optimierung des Tiefenrüttelverfahrens

Wehr [143] befasste sich mit der Problematik der Ausnutzung von Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden Interaktionssystem und führte theoretische Analysen zur Regelung der Rüttelfrequenz zur Optimierung der Rütteldruckverdichtung durch. Auf Grundlage der analytischen Modelle von *Fellin* [45] bestimmte *Wehr* rechnerisch Resonanzfrequenzen für unterschiedliche Rüttlertypen. Nach *Wehr* [143] soll die Verdichtung bei Resonanz des Rüttler-Boden Interaktionssystems erfolgen, da die Rüttleramplitude und damit auch die auf den zu verdichtenden Boden übertragenen Schwingungen bei Systemresonanz am größten seien und daher die effektivste Verdichtungswirkung in diesem Zustand erzielt werden könne. Das zentrale Anliegen dieser theoretischen Untersuchungen war, die Grundlagen eines Systems zur kontinuierlichen Nachregelung der Rüttlerfrequenz zu entwickeln und damit die Ausnutzung von Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden System zu ermöglichen.

2.5.1.4 Experimentelle Untersuchungen im Modellmaßstab

Aufbauend auf den Erkenntnissen von *Fellin* [45] und *Wehr* [143] untersuchte *Nendza* [106], [107] mit einem Modellrüttler im Maßstab $M = 1 : 3$ (siehe Abbildung 2.17) die Rüttlerbewegung während des Verdichtungsvorgangs sowie die Möglichkeiten zur Optimierung der Verfahrensparameter im Rahmen einer Forschungsarbeit an der Technischen Universität Braunschweig.

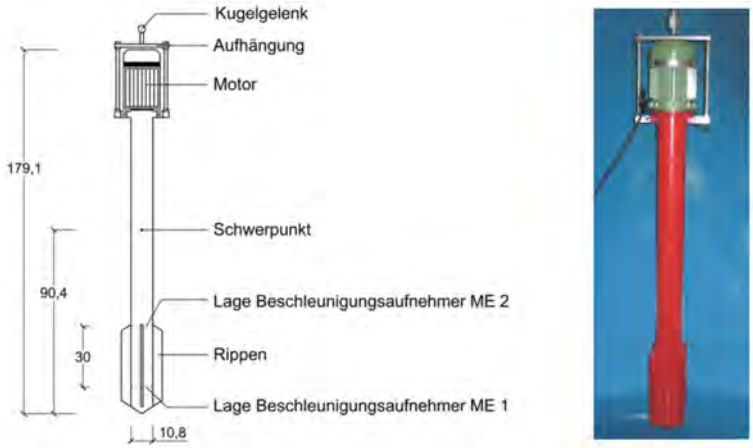


Abbildung 2.17: Aufbau und Geometrie des angewendeten Modellrüttlers [106].

Die Durchführung der Untersuchungen in einem Versuchsschacht ermöglichte es, im Modellboden Beschleunigungsaufnehmer und Porenwasserdruckaufnehmer zu installieren (siehe Abbildung 2.18). Als Modellboden diente wassergesättigter Mittelsand. In den Versuchsserien wurden verfahrens- und gerätetechnischen Parameter, wie Rüttlerfrequenz, Unwuchtmasse und Rütteltiefe variiert und deren Einfluss auf die Rüttlerbewegung sowie auf das Maß und die räumliche Ausbreitung der Verdichtungswirkung beurteilt.

Diese Experimente machten das Erfassen des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers sowie des Porenwasserdrucks im Modellboden und die Beschleunigungen am Versuchs-

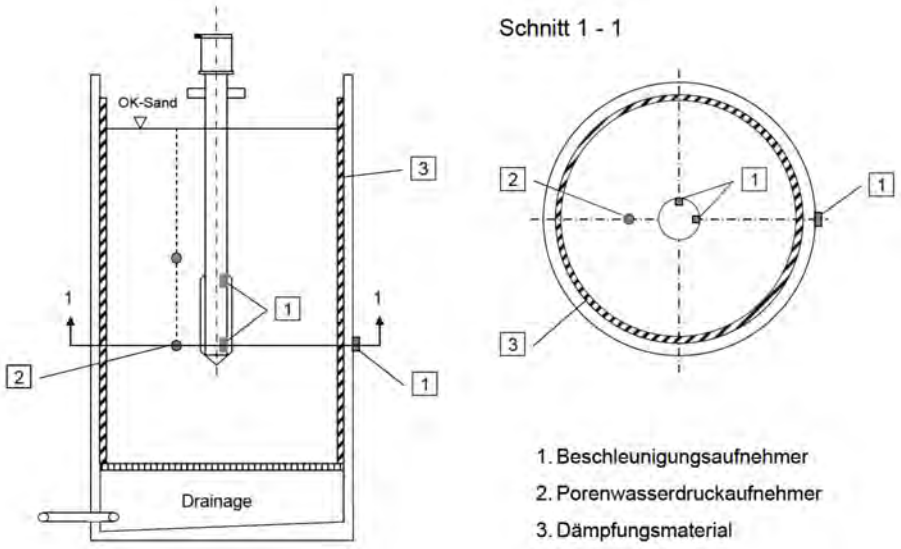


Abbildung 2.18: Aufbau des Versuchssachtes mit dem eingesetzten Messsystem [106].

schacht während der Verdichtungsversuche möglich. Dabei konnte eine signifikante Änderung der Werte dieser Parameter beobachtet werden. Die Beurteilung des Verdichtungserfolgs erfolgte durch Gegenüberstellung von Rammsondierergebnissen vor und nach den Verdichtungsarbeiten. Die Feststellung war, dass verfahrens- und gerätetechnischen Parameter einen signifikanten Einfluss auf den Verdichtungserfolg haben.

2.5.1.5 Numerische Modellierung des Verdichtungsvorgangs

In der Literatur sind zahlreiche Berichte über numerischen Simulationen der Rütteldruckverdichtung zu finden, wie beispielsweise von *Arnold und Herle* [10], *Cudmani et al.* [33], *Heibrock et al.* [54], *Heins et al.* [55], *Henke et al.* [57], *Nagula und Grabe* [99], *Schmitter* [126]. Im Folgenden werden einige numerische Simulationsergebnisse von *Henke et al.* [57] betrachtet.

Henke et al. [57] untersuchte den Verdichtungsvorgang während der Rütteldruckverdichtung in Sand mittels eines gekoppelten Euler-Lagrange Ansatzes. Der Untergrund wurde dabei mit dem hypoplastischen Stoffmodell abgebildet. Abbildung 2.19 zeigt das zugrunde gelegte numerische Modell.

Die Verdichtung des Bodens ist anhand der Porenzahlverteilung nach einer Verdichtungsdauer von 3 s als Kontourplot in Abbildung 2.20 (links) bzw. für fünf Schnitte in unterschiedlichen Tiefen in Abbildung 2.20 (rechts) dargestellt. Im Konturplot der Porenzahlverteilung ist ein etwa kugelförmiger Bereich um den Tiefenrüttler erkennbar. Innerhalb des Verdichtungsbereichs erreicht man eine minimale Porenzahl von $e \approx 0,47$. Mit zunehmendem Abstand vom Rüttler verringert sich die Verdichtungswirkung, die sich in allen fünf definierten Schnitten in der mit zunehmendem Abstand steigenden Porenzahl zeigt, die asymptotisch die Ausgangsporenzahl $e_0 = 0,925$ annähert.

Abbildung 2.21 veranschaulicht das Geschwindigkeitsfeld der Bodenpartikel zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Simulation. Infolge der Bodenverdichtung kommt es zu einem „Nachfließen“vom Bodenmaterial in den verdichteten Bereich. Hierbei zeigen die

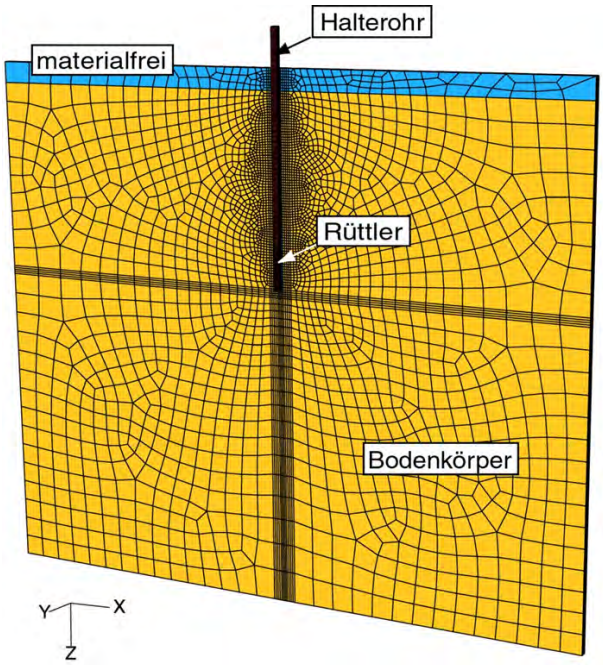


Abbildung 2.19: Numerisches Modell zur dreidimensionale Simulation des Verdichtungsvorgangs [57].

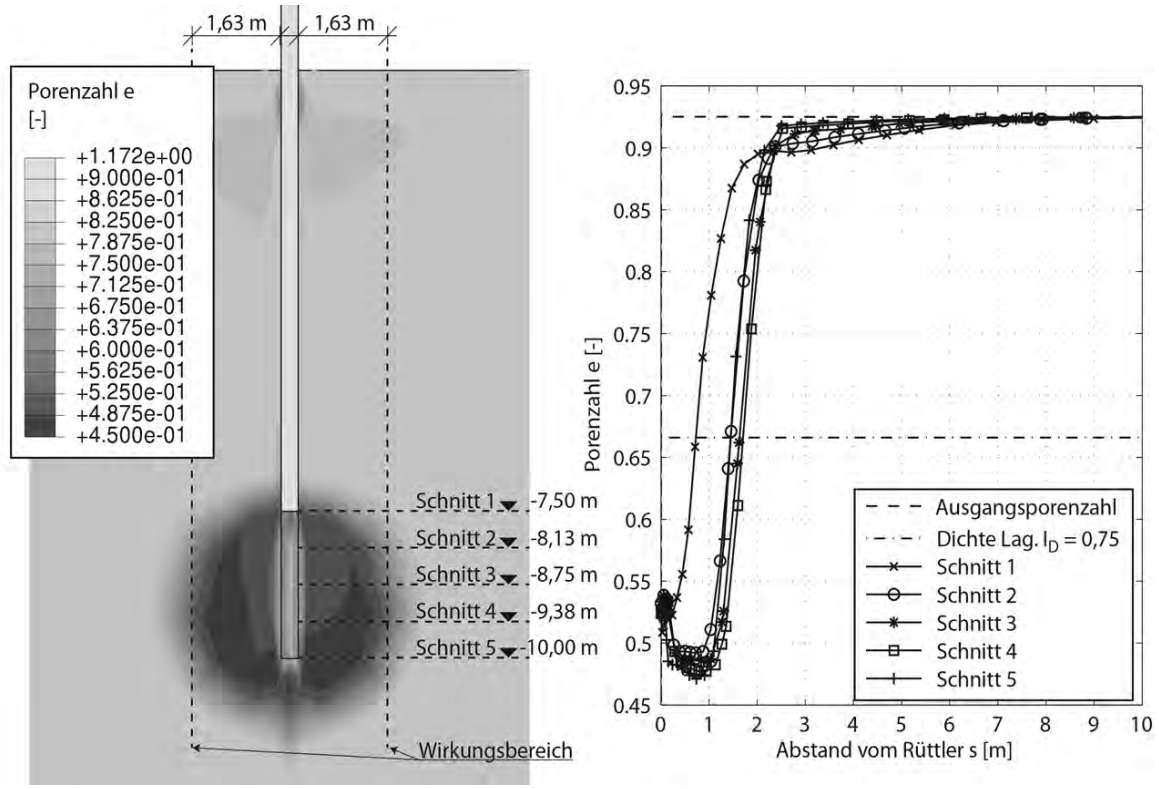


Abbildung 2.20: Porenzahlverteilung nach einer Verdichtungsdauer von 3 s als Kontourplot (links) bzw. für fünf Schnitte in unterschiedlichen Tiefen (rechts) [57].

Simulationen, dass sich der Boden entlang des Rüttlers vertikal nach unten bewegt. Um den Rüttler herum ist das Geschwindigkeitsfeld aufgrund der rotierenden Bewegung des

Rüttlers starken Schwankungen unterworfen. In der in Abbildung 2.21 dargestellten Momentaufnahme führt der Rüttler eine nach rechts gerichtete Bewegung aus.

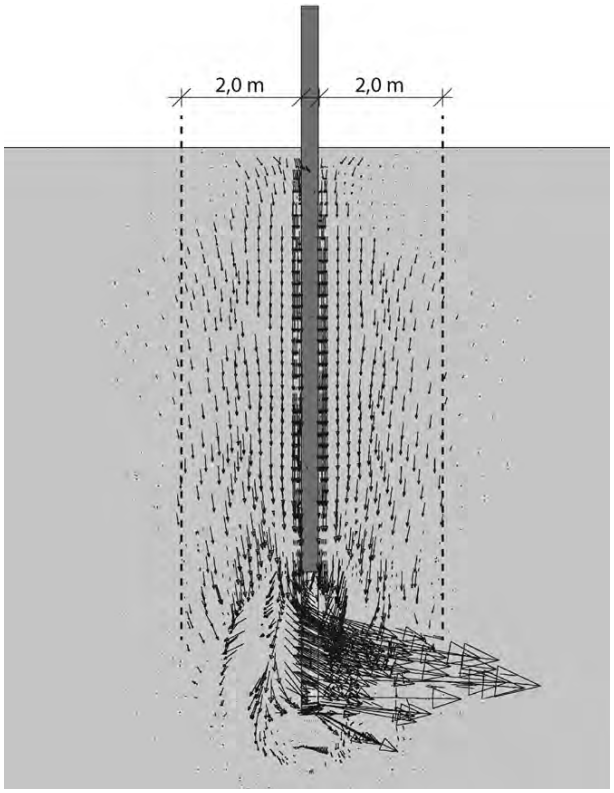


Abbildung 2.21: Geschwindigkeitsfeld der Bodenpartikel zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Simulation [57].

2.5.2 Verringerung des Scherwiderstandes zwischen den einzelnen Körnern im zu verdichtenden Boden

Während der Rütteldruckverdichtung werden in Folge der Veränderung der Position und Orientierung der Einzelkörner im Korngerüst bleibende Verformungen im Untergrund herbeigeführt. Eine Grundvoraussetzung für die Kornumlagerung und damit für die Verdichtungswirkung ist eine vorübergehende Verringerung des Schwerwiderstandes zwischen den Einzelkörnern. In der Literatur sind unterschiedliche Erklärungen für diesen Vorgang zu finden, welche grundsätzlich zu den folgenden zwei Gruppen zugeordnet werden können:

- Überschreiten einer kritischen Beschleunigung im Zuge der Schwingung der Einzelkörner in Folge von Rüttlerschwingung, bezeichnet als „Fließen“ oder „Schotterfließen“, in englischem Sprachgebrauch als „fliudisation“ oder „vibrofluidisation“.
- Bodenverflüssigung aufgrund des sukzessive ansteigenden Porenwasserdrucks zufolge der zyklischen Belastung durch den schwingenden Rüttlerkörper, bezeichnet in englischem Sprachgebrauch als „liquefaction“.

2.5.2.1 „Fließen“ des zyklisch belasteten Korngefüges

Während der Rütteldruckverdichtung werden zufolge der Rüttlerschwingung die einzelnen Bodenkörner in Schwingung versetzt. Nach *Rodger und Littlejohn* [122] und *Rodger* [123] führt die horizontale Schwingung des Rüttlers zur Reduktion bzw. Überwindung des Reibungswiderstands und gegebenenfalls der Haftfestigkeit zwischen den Einzelkörnern. *Rodger* [123] definiert einen Schwellenwert von $0,5\,\mathrm{g}$ für die Beschleunigung, welche als kritische Beschleunigungsamplitude anzusehen ist. Solange die Beschleunigung der Einzelkörner die kritische Beschleunigung unterschreitet, gibt es keine maßgebliche Verringerung in der Scherfestigkeit des Bodens (siehe Abbildung 2.22a). Bei diesem Niveau der Beschleunigungsamplitude ist keine nennenswerte Kornumlagerung und damit auch keine maßgebliche Bodenverdichtung möglich. Effektive Verdichtung findet bei Beschleunigungsamplituden zwischen $0,5\,\mathrm{g}$ und $1,5\,\mathrm{g}$ statt. Mit zunehmender Beschleunigung der Einzelkörner sinkt die Scherfestigkeit und erreicht ihr Minimum zwischen $1,5\,\mathrm{g}$ und $2,0\,\mathrm{g}$. Der Zustand mit abgeminderter Scherfestigkeit ist als „Fließen“ („fluidisation“) bezeichnet. Nach [123] befindet sich der Boden in unmittelbarer Nähe des Rüttlerkörpers in diesem Zustand. Dabei wird seine Scherfestigkeit zwar drastisch reduziert, sie verschwindet jedoch nicht komplett und folglich überträgt dieser Bereich auch Schwingungen [70].

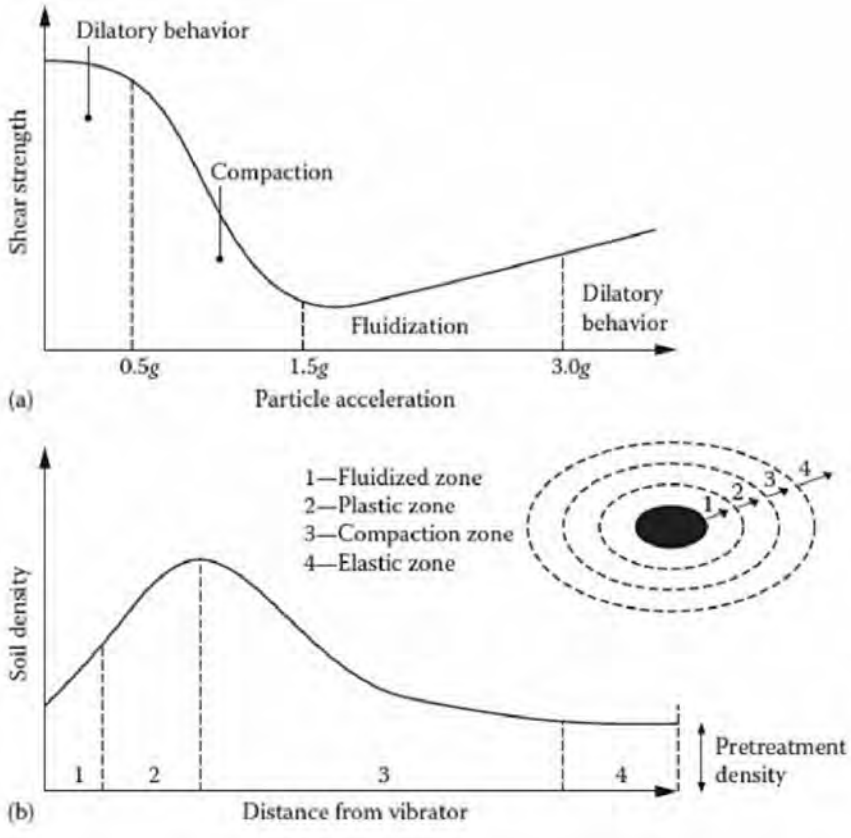


Abbildung 2.22: Vorgänge in der Kornstruktur abhängig von der Größe der Beschleunigungsamplitude der Einzelkörner (oben) und schematische Darstellung der Abstandsabhängigkeit der Verdichtungswirkung (unten) [70] (adaptiert nach [123]).

Nach *Rodger* [123] ist die erzielbare Verdichtungswirkung vom radialen Abstand zum

Tiefenrüttler abhängig (siehe Abbildung 2.22b), wobei diese nicht zweckmäßig unmittelbar am Rüttlerkörper, sondern in einem bestimmten Abstand davon am größten ist. Dieser Umstand lässt sich auch in den numerischen Simulationsergebnissen von *Henke et al.* [57] beobachten (siehe Abbildung 2.20). Die Verdichtungswirkung verringert sich mit zunehmendem radialen Abstand vom Tiefenrüttler und ab einem bestimmten Abstand entspricht die Bodendichte der Dichte des unverdichteten Bodens („pretreatment density"). Die vom Rüttlerkörper induzierten Schwingungen werden mit zunehmendem Abstand vom Tiefenrüttler zufolge der materiellen und der geometrischen Dämpfung abgemindert. Ab einem gewissen Abstand vom Rüttleransatzpunkt ist daher nicht mehr möglich, den Scherwiderstand zwischen den einzelnen Bodenkörnern zu überwinden. Es ist keine Kornumlagerung und daher auch keine Verdichtungswirkung möglich, wodurch auch der Wirkungsradius der Verdichtung begrenzt ist.

Denies et al. [38] berichteten über „Fließen" in trockenem *Fontainebleau* Sand – im Zuge von experimentellen Untersuchungen im Labormaßstab – zufolge vertikaler Anregung des Versuchsbodens. In dieser Veröffentlichung ist auch ein umfassender Überblick der wesentlichen thematisch relevanten Untersuchungen vorzufinden. Im Zuge der Experimente wurden abhängig von der Größe der dimensionslosen Beschleunigungsamplitude[2] drei unterschiedliche Zustände im Versuchsboden beobachtet und beschrieben. Bei vergleichsweise niedrigen dimensionslosen Beschleunigungsamplituden ($\Gamma_v < 1$) ist Volumenverminderung im untersuchten Bodenkörper zu beobachten („densification range"). Bei dimensionslosen Beschleunigungsamplituden $1 < \Gamma_v$ zeigte sich eine geneigte Fläche an der Oberkante des Versuchsbodens („instability surface range"), welche sich ab einer dimensionslosen Beschleunigungsamplitude von $\Gamma_v \approx 1,5$ sukzessive auflöste. Ab einer dimensionslosen Beschleunigungsamplitude von $\Gamma_v \approx 2,4$ wurde eine signifikante Verringerung der Scherfestigkeit des Bodens entdeckt. Dieses Werteniveau zeigt eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen von *Rodger* [123] (siehe Abbildung 2.22). Dieser Zustand des Versuchsbodens ist bei *Denies et al.* [38] als „vibrofluidisation" oder „vibro-fluid range" bezeichnet.

Abbildung 2.23 zeigt die Lagerungsdichte des Versuchsbodens nach Beendigung des Versuchs, bei unterschiedlichen dimensionslosen Beschleunigungsamplituden Γ_v im *Fontainebleau* und *Solani*[3] Sand. Es ist dabei die größte Lagerungsdichte bei einer dimensionslosen Beschleunigungsamplitude zwischen etwa $\Gamma_v \approx 0,5$ und $1,5$ ersichtlich. Auch diese Ergebnisse zeigen eine qualitative Übereinstimmung mit der von *Rodger* [123] ermittelten Bandbreite der Beschleunigungsamplituden, wo Bodenverdichtung stattfindet (vgl. Abbildung 2.22).

In den beiden oben diskutierten Veröffentlichungen ist das Verhalten des Bodens in Abhängigkeit von der Größe der Beschleunigungsamplitude definiert. Nach *Massarsch* [88] ist jedoch aus Sicht der Verdichtungswirkung nicht die Beschleunigungsamplitude der Bodenpartikel, sondern die Scherdehnung im Boden die maßgebliche Größe. Untersuchungen von *Wersäll* [145] zeigen, dass Bodenverdichtung erst durch eine Überschreitung einer kritischen

[2] Die dimensionslose Beschleunigungsamplitude Γ_v stellt das Verhältnis der vertikalen Beschleunigungsamplitude a_v zur Erdbeschleunigung g dar.

[3] Die Untersuchugsergebnisse mit trockenem *Solani* Sand wurden von *Prakash und Gupta* [114] veröffentlicht.

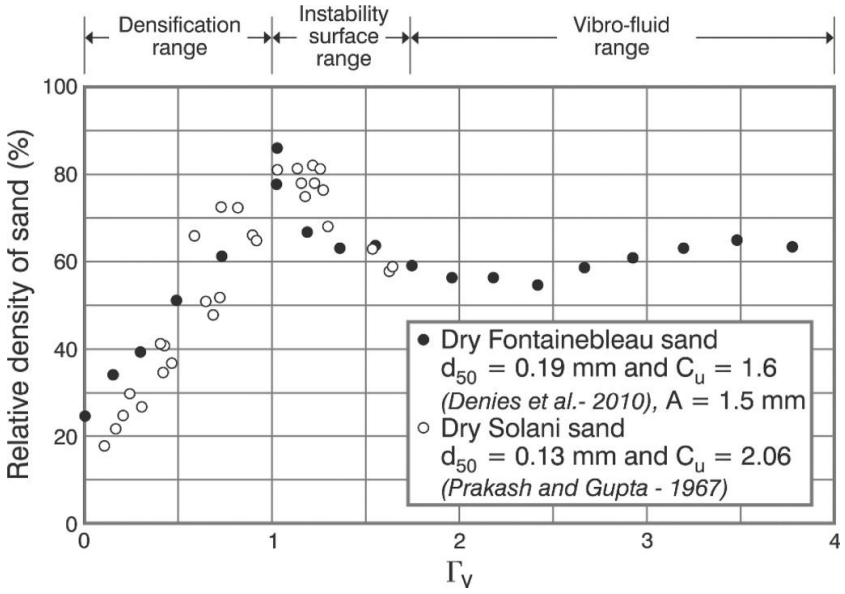


Abbildung 2.23: Lagerungsdichte des Versuchsbodens nach Beendigung des Versuchs, abhängig vom Werteniveau der dimensionslosen Beschleunigungsamplitude Γ_v [38].

Scherdehnung im Boden zustande kommen kann.

„Fließen“ in folge von der Verringerung der Scherfestigkeit kann beispielsweise im Gleisschotter, während der Gleisstopfverdichtung – sogar mit freiem Auge – beobachtet werden. Diesen Vorgang bezeichnet man häufig als „Schotterfließen“. Bei der Gleisstopfverdichtung handelt es sich ebenfalls um eine hochfrequente zyklische Belastung eines trockenen grobkörnigen Mediums. *Barbir* [15] konnte diesen Vorgang im Zuge von großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen beobachten und messtechnisch nachweisen.

2.5.2.2 Verflüssigung des Bodens zufolge der dynamischen Belastung durch den Tiefenrüttler

Mogami und *Kubo* [96] verwendeten im Jahr 1953 den Begriff „Verflüssigung“ („liquefaction“) zum ersten Mal im Zusammenhang mit Böden. Bodenverflüssigung ist definitionsgemäß eine Verringerung der Scherfestigkeit und Schubsteifigkeit des Bodens aufgrund des ansteigenden Porenwasserdrucks in wassergesättigten kohäsionslosen Böden zufolge zyklischer, möglicherweise auch transienter Belastung [75]. Verflüssigung führt zu einem Zustand mit deutlich reduzierter oder nahezu verschwindender effektiver Spannung im Korngerüst, und damit zu einer Überführung des Bodens in einen quasi-flüssigen Zustand.

Nach *Kramer* [75] müssen die folgenden Randbedingungen erfüllt sein, damit es zur Verflüssigung des Bodens kommen kann:

- wassergesättigter kohäsionsloser Boden
- dynamische (zyklische oder transiente) Belastung
- undrainierte Verhältnisse

Erdbebeneinwirkungen führen unter entsprechenden Randbedingungen häufig zur Bodenverflüssigung und in weiterer Folge zu erheblichen bleibenden Verformungen im verflüssigten Untergrund und folglich zu Bauwerksschäden. In der Fachliteratur, beispielsweise bei [58], [75], [127], [155], sind zahlreiche Schadensfälle dokumentiert, die eindeutig auf Bodenverflüssigung zufolge Erdbeben zurückzuführen sind. Allerdings sind Erschütterungseinwirkungen zufolge Erdbeben nicht der einzig mögliche Grund für Bodenverflüssigung. Es gab Schadensfälle, bei denen die Schadensursache auf Bodenverflüssigung zufolge Erschütterungen aus Eisenbahnverkehr, Rammvorgängen, Sprengungen oder geophysikalischen Untersuchungen zurückgeführt wurde [75].

Fellin [45] diskutierte die Verflüssigung des Bodens im Einflussbereich des Tiefenrüttlers als mögliche Ursache für die Verdichtung des Bodens. Nach *Nendza* [106] „wird eine besonders effiziente Verdichtung durch die Weckung von Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden-System sowie durch Bodenverflüssigung herbeigeführt." Die Untersuchung dieser Mechanismen wurde im Rahmen der experimentellen Untersuchungen im Modellmaßstab (siehe Abschnitt 2.5.1.4) in den Vordergrund gestellt.

Baez und Martin [12] verwendeten im Zuge von experimentellen Untersuchungen im Großmaßstab CPTu Drucksonden zur messtechnischen Erfassung von Porenwasserdruck und beobachteten signifikante Porenwasserüberdrücke während der Rütteldruckverdichtung. Auf Basis dieser Messergebnisse wird von den Autoren die Bodenverflüssigung als maßgebliche Ursache für die Verdichtungswirkung genannt. Sie berichten jedoch über einen Verdichtungserfolg im Zuge der gleichen Untersuchungskampagne auch in solchen Fällen, in denen im Untergrund keine Porenwasserüberdrücke zufolge Rütteldruckverdichtung generiert worden sind. Für die fehlende Verflüssigung wird die Wirkung von bereits fertiggestellten Verdichtungsstrecken als Drainagekörper als potenzielle Ursache genannt, welche einen raschen Abbau von Porenwasserüberdrücken ermöglichen. *Massarsch* [88] diskutiert auch den positiven Einfluss von bereits fertiggestellten Verdichtungsstrecken auf die Beschleunigung des Abbaus von Porenwasserüberdrücken.

Slocombe et al. [130] führen die Verdichtungswirkung in teilgesättigten Böden auf die Verringerung des Reibungswiderstands zwischen den Einzelkörnern zufolge Rüttlerschwingung zurück. Demgegenüber begründen *Slocombe et al.* die Verdichtungswirkung in wassergesättigten Böden mit einer Verringerung der Scherfestigkeit zufolge des zunehmenden Porenwasserüberdrucks in Kombination mit Hohlraumaufweitung und Rüttlerschwingungen. Nach *Kirsch und Kirsch* [70] ist die Abminderung der Scherfestigkeit eines trockenen Bodens im Zuge der Rütteldruckverdichtung ebenfalls auf ein „Fließen" des zyklisch belasteten Korngefüges, demgegenüber ist diese in wassergesättigten Böden auf Bodenverflüssigung zufolge der dynamischen Belastung durch die Rüttlerschwingung zurückzuführen.

Kapitel 3

Verdichtungskontrolle bei der Rütteldruckverdichtung – Stand der Technik

3.1 Einleitung

Wie bei sämtlichen Bodenverbesserungsverfahren spielen auch bei der Rütteldruckverdichtung die Kontrolle und der Nachweis des Verbesserungserfolgs eine zentrale Rolle. Dabei kommen in der Regel indirekte Untergrunderkundungsverfahren sowie bestimmte während des Verdichtungsvorgangs aufgezeichnete Verfahrensparameter zur Anwendung. Es folgt ein Überblick der Methoden, die heutzutage zur Kontrolle und zum Nachweis des Verdichtungserfolgs bei der Rütteldruckverdichtung angewendet sind.

3.2 Verdichtungskontrolle mittels indirekten Untergrunderkundungsverfahren

Indirekte Untergrunderkundungsverfahren zur Bestimmung bodenphysikalischer Eigenschaften haben generell den großen Vorteil, dass sie Messungen im ungestörten Untergrund erlauben. Der Boden wird nicht – wie bei Laboruntersuchungen – aus seinem Verband gelöst, sondern die Untersuchung seiner mechanischen Eigenschaften geschieht ohne eine wesentliche Veränderung des Spannungszustandes. Die Entnahme von ungestörten Bodenproben oder eine direkte Dichtebestimmung vor Ort sind – besonders in größerer Tiefe und unter dem Grundwasserspiegel – kaum möglich. Des Weiteren wird bei Feldversuchen ein größerer Bereich des Untergrundes erfasst und nicht nur eine vergleichsweise kleine Bodenprobe. Anhand von entnommenen Bodenproben ist es kaum möglich, die Lagerungsdichte eines grobkörnigen Bodens zu beurteilen.

Aus diesen Gründen kommen primär indirekte Untergrunderkundungsverfahren im Zuge der Verdichtungskontrolle bei der Rütteldruckverdichtung zur Anwendung. Dabei kommen in erster Linie Sonderverfahren, hauptsächlich Ramm- und Drucksondierungen,

Standard Penetration Tests sowie seltener diverse Seitendrucksonden und vereinzelt geophysikalische Verfahren zur Anwendung. Die Erkundungsmaßnahmen werden im Regelfall vor und nach den Verdichtungsarbeiten durchgeführt, um die Vergleichbarkeit der Eigenschaften des unbehandelten und des verdichteten Bodens zu gewährleisten. Die vor den Verdichtungsarbeiten durchgeführten Untersuchungen bilden in der Regel einen integrierten Teil der Untergrunderkundung. Die Beurteilung des Verdichtungserfolgs erfolgt idealerweise durch die Gegenüberstellung der Ergebnisse gleicher Erkundungsverfahren vor und nach den Verdichtungsarbeiten an identischen Orten.

Untergrunderkundungsverfahren stellen prinzipiell eine einfache und vergleichsweise schnelle Methode zur Kontrolle des Verdichtungserfolgs bei Tiefenrüttelverfahren dar. Ein wesentlicher Nachteil von derartigen Verfahren ist es jedoch, dass die Überprüfung des Verdichtungserfolgs nur punktuell und während einer Unterbrechung der Verdichtungsarbeiten oder erst nach dem Abschluss erfolgen kann. Bei nicht zufriedenstellendem Verdichtungsergebnis sind nachträgliche Maßnahmen zu einer Verbesserung der Verdichtungswirkung oft nicht möglich oder sind sehr zeitaufwändig und kostenintensiv.

Es hat sich in der Ausführungspraxis – vor allem bei größeren Bauvorhaben – als sinnvoll erwiesen, vor der Durchführung der Verdichtungsarbeiten auf der Baustelle, auf einem Testfeld Probeverdichtungen durchzuführen und anschließend den Verdichtungserfolg mittels indirekten Erkundungsverfahren zu überprüfen. Das Testfeld lässt sich anschließend oftmals ideal in die verdichtete Fläche integrieren.

3.2.1 Sondierverfahren

Im Folgenden wird auf die Anwendung von Ramm- und Drucksondierungen sowie von Flachdilatometern zur Kontrolle der Rütteldruckverdichtung durch Anwendungsbeispiel aus der Fachliteratur reflektiert.

Die Ansatzpunkte der Sondierungen vor den Verdichtungsarbeiten werden etwa gleichmäßig in der zu verdichtenden Fläche verteilt. Nach der Verdichtung sollen die Sonden an den theoretisch ungünstigsten Stellen abgeteuft werden, wo die geringsten Sondierwiderstände zu erwarten sind. Diese Stellen ergeben sich dort, wo der Abstand zu den benachbarten Rüttleransatzpunkten am größten ist (siehe Abbildung 3.1). Die Punkte mit der theoretisch niedrigsten Verdichtungswirkung bezeichnet man häufig als „Schwachstelle“.

Generell gilt, dass die Interpretation von Sonderergebnissen sorgfältig erfolgen muss, da zahlreiche Faktoren das Ergebnis beeinflussen können. Beispielsweise kann der Zeitabstand zwischen der Fertigstellung der Verdichtungsarbeiten und der Sondierung einen maßgeblichen Einfluss haben. Unter anderen *Covil et al.* [32] und *Mitchell und Solymar* [95] beobachteten und dokumentierten nach Anwendung der Tiefenverdichtung bei wiederholten Sondierungen eine Erhöhung des Sondierwiderstandes von 50 bis 100%. Die Erhöhung der Sondierwiderstände hat ihren Ursprung in der zeitabhängigen Erhöhung der Steifigkeit und Festigkeit des verdichteten Bodens. Dieser Vorgang wird im deutschen Sprachgebrauch als „Reifungseffekt“ oder „Alterungseffekt“ bezeichnet. *Afifi und Woods* [9] sowie *Wichtmann und Triantafyllidis* [147] berichten über eine mit der Zeit ansteigende Bodensteifigkeit bei

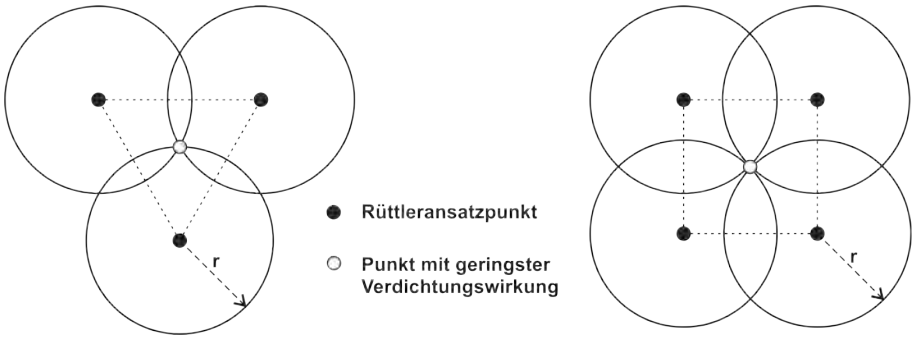


Abbildung 3.1: Schwachstelle mit theoretisch geringster Verdichtungswirkung beim Dreieck- und Rechteckraster (adaptiert nach [70]).

konstantem Spannungszustand. Hierbei handelt es sich um Untersuchungen unter Laborbedingungen. Die Steifigkeitsentwicklung im Boden kann sogar bis zu mehrere Jahre andauern. Die Ursachen für zeitabhängige zunehmende Bodenfestigkeiten sind bis heute nicht vollständig geklärt. Sie werden auf mechanische (Verbesserung der Makroverzahnung der Körner bzw. der Mikroverzahnung der Kontaktflächen), chemische (Zementierung an den Kornkontakten) oder auf biologische Ursachen (Verklebung der Kornkontakte durch Ausscheidungsprodukte von Kleinstlebewesen) zurückgeführt [147].

3.2.1.1 Rammsondierung

Bei der Rammsondierung wird der dynamische Widerstand des Untergrundes beim Einbringen eines Gestänges mit einer genormten kegelförmigen Sondenspitze durch die Anzahl der Schläge gemessen, welche erforderlich sind, um die Sonde um einen definierten Maß in den Boden einzubringen.

Als maßgebende Messgröße gilt in Österreich üblicherweise der Wert N_{10}, die Anzahl der notwendigen Schläge für eine festgelegte Sondeneindringtiefe von 10 cm. In Österreich kommt aufgrund der Untergrundverhältnisse hauptsächlich die Schwere Rammsondierung (DPH) als indirekte Erkundungsmethode zur Anwendung. Zur Beurteilung des Verdichtungserfolges der Rütteldruckverdichtung wird dementsprechend in erster Linie dieser Sondentyp herangezogen. Die Erfahrungen aus der Ausführungspraxis zeigen, dass die Rammsondierung zum Nachweis des Verdichtungserfolgs geeignet ist [3], [30], [148].

Dieverse Korrelationen bestimmen die Lagerungsdichte oder der Steifigkeit des Bodens auf Basis von Rammsondierergebnissen. Ein Überblick empirischer Zusammenhänge zur Ableitung diverser Bodenkenngrößen aus Ergebnissen von Ramm- und Drucksondierungen ist beispielsweise in *Yanulova* [154] zu finden. Bei einer Rammsondierung können zahlreiche Faktoren das Sondierergebnis beeinflussen, die in der Regel nicht voneinander zu trennen sind. Eine Beschreibung maßgeblicher Einflussfaktoren auf den Sondierwiderstand bei der Rammsondierung kann ebenfalls [154] entnommen werden.

3.2.1.2 Drucksondierung

Bei der herkömmlichen CPTu Drucksondierung (Cone Penetration Test with pore pressure u) presst man eine zylindrische Messsonde weggesteuert mit einer möglichst konstanten Geschwindigkeit von $20 \pm 0,5\,\mathrm{mm/s}$ in den Untergrund. Man misst kontinuierlich Spitzendruck q_c, lokale Mantelreibung f_s, lokalen Porenwasserdruck u und die Abweichung der Sondierspitze von der Vertikalen. Ein weiterer wesentlicher Parameter bei der Versuchsauswertung ist der Quotient der Mantelreibung und des Spitzendrucks, Reibungsverhältnis R_f genannt [118]. Die aufgezeichneten Messdaten dienen häufig zur Ermittlung diverser bodenphysikalischer Größen. Hierfür kommen empirische Zusammenhänge zur Verwendung [119], [120].

Die Beurteilung des Verdichtungserfolgs unterstützt in der Regel der Spitzendruck q_c oder die lokale Mantelreibung f_s. Abbildung 3.2 zeigt exemplarisch eine Geberüberstellung des Spitzenwiderstandes und der lokalen Mantelreibung der Drucksonde vor und nach den Verdichtungsarbeiten.

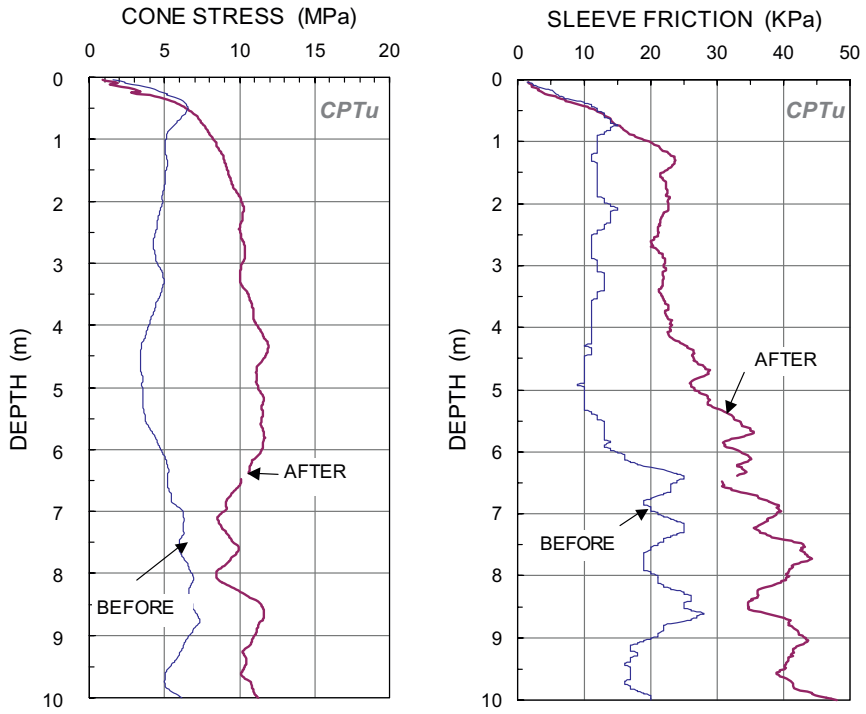


Abbildung 3.2: CPTu Drucksondierung, Spitzenwiderstand und Mantelreibung vor nach den Verdichtungsarbeiten [90].

Die Drucksondierung kommt bei der Überprüfung der Rütteldruckverdichtung vorwiegend in Sanden und kiesigen Sanden zur Anwendung. Es sind in der Fachliteratur zahlreiche Berichte über die erfolgreiche Anwendung der Drucksonde zur Verdichtungskontrolle bei Tiefenrüttelverfahren zu finden [22], [65], [95], [117], [118]. Für Drucksondierungen gilt auch, dass die Interpretation der Ergebnisse sorgfältig erfolgen soll, denn unterschiedliche Einflussfaktoren den gemessenen Sondierwiderstand beeinflussen können [70].

3.2.2 Seitendrucksonden

Seitendrucksonden spielen bei der Verdichtungskontrolle der dynamischen Tiefenverdichtungsverfahren im Vergleich zu Ramm- und Drucksondierungen eine untergeordnete Rolle. Beiträge aus der Fachliteratur beinhalten jedoch Berichte über der erfolgreichen Anwendung von Flachdilatometer (DMT) [83] zur Qualitätskontrolle von Tiefenrüttelverfahren [13], [84], [140], wobei das Flachdilatometer in Kombination mit Drucksonden erfolgreich zur Anwendung kam. Abbildung 3.3 zeigt den Verlauf des Horizontalen Spannungsindex K_D und des Constrained Modulus M_{DMT}[1] über die Tiefe vor und nach der Rütteldruckverdichtung. Die Verdichtung erfolgte in diesem Fall bis zu einer Tiefe von 8 m, im Sand. Eine Änderung des Verdichtungszustandes ist bis zur Verdichtungstiefe anhand der Untersuchungsergebnisse mit dem Flachdilatometer eindeutig erkennbar.

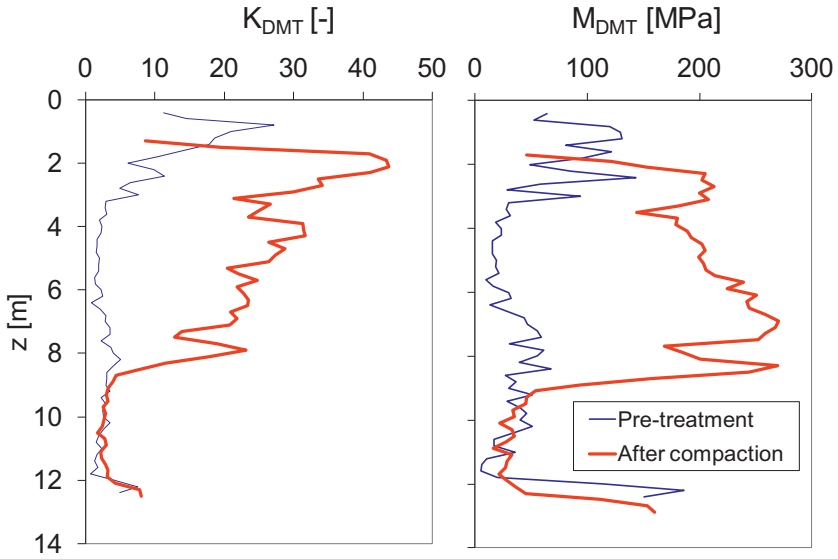


Abbildung 3.3: Kontrolle des Verdichtungserfolges mit dem Flchdilatometer (DMT). Verlauf des Horizontalen Spannungsindex K_D und des Constrained Modulus M_{DMT} über die Tiefe vor und nach der Rütteldruckverdichtung einer 8 m mächtigen Sandschicht [13].

3.2.3 Seismische Untersuchungen

Das Potenzial für die Anwendung seismischer Untersuchungen in der Geotechnik wurde früh erkannt. Bereits *Terzaghi* [136] weist auf die Anwendbarkeit und Bedeutung von „Bodenuntersuchungen durch Sprengungen und mittels Schwingern“ zur Erkundung des Untergrundes hin. Derartige Untergrunderkundungsverfahren gewannen besonders in den letzten Jahrzehnten durch die rasche Entwicklung der Mess- und Datenaufzeichnungssysteme an Bedeutung. Geophysikalische Untersuchungen zur Bestimmung bodendynamischer Kenngrößen basieren auf dem Prinzip der elastischen Wellenausbreitung bzw. der geometrischen Optik und liefern deshalb Kennziffern, die auf sehr kleine Verformungen begrenzt

[1] Der Horizontale Spannungsindex K_D ist eine unmittelbar aus den Messergebnissen des Flachdilatometerversuchs ableitbare Größe, das Constrained Modulus M_{DMT} ist mittels Korrelationen aus den Versuchsergebnissen ableitbar.

sind [61], [134]. Seismische Untersuchungen sind in der Regel relativ aufwändig und sind dementsprechend mit hohen Kosten verbunden. Aus diesem Grund verwendet man derartige Untersuchungen vergleichsweise selten zur Kontrolle des Verdichtungserfolges, obwohl bestimmte Arten von seismischen Verfahren dazu sehr gut geeignet sind [47]. Seismische Verfahren haben jedoch generell den großen Vorteil, dass sie die Untersuchung größerer Bodenbereiche im Untergrund ermöglichen und dadurch eine bessere Übersicht des untersuchten Bodens bieten.

Bei der Auswertung von geophysikalischen Untersuchungen werden in der Regel Profile der Scherwellengeschwindigkeit v_s über die Tiefe ermittelt, da dieser Parameter von der Schubsteifigkeit des Bodens abhängig ist. Die Bestimmung der Schubsteifigkeit auf Basis der Schwerwellengeschwindigkeit wird in Abschnitt 9.4 diskutiert.

3.2.3.1 Bohrlochseismik

Für die Kontrolle von Tiefenverdichtungsarbeiten ist die Bohrlochseismik prinzipiell gut geeignet, aufgrund der vergleichsweise aufwendigen Versuchsdurchführung kommen diese Methoden allerdings selten zur Anwendung. Anwendungsbeispiele von Bohrlochseismik zur Qualitätskontrolle von Bodenverbesserungsmaßnahmen sind Gegenstand von Kapitel 9.

3.2.3.2 Methoden auf Basis der Analyse von Oberflächenwellen

Methoden auf Basis der Analyse von Oberflächenwellen, wie *SASW*[2] oder *MASW*[3] werden für die Erkundung des Untergrundes weltweit eingesetzt. *SASW* wurde am Anfang der 1980er Jahre entwickelt [56]. *MASW* stellten *Park et al.* [112] erstmals vor. Mit den beiden Methoden ist die Ermittlung von Scherwellengeschwindigkeitsprofilen v_s im oberflächennahen Bodenbereich, auf Basis der Analyse des Oberflächenwellenfelds, möglich. In der Literatur sind sowohl für *SASW* [68], [82] als auch für *MASW* [21], [63] Anwendungsbeispiele zur Kontrolle des Verdichtungserfolgs von Verdichtungsarbeiten zu finden.

Bei der Errichtung des Péribonka-Staudamms [63] wurde der Untergrund unterhalb der Dammaufstandsfläche mittels Rütteldruckverdichtung (RDV) und dynamischen Intensivverdichtung (DYNIV) tiefreichend verdichtet. Zur Kontrolle des Verdichtungserfolgs wurden herkömmliche Sondierverfahren und die MASW-Methode eingesetzt. Im Zuge dieser geophysikalischen Untersuchungen wurden mehr als 900 Schwerellengeschwindigkeitsprofile vor und nach den Verdichtungsarbeiten bis zu einer maximalen Tiefe von 50 m ermittelt. Die große Anzahl von Schwerellengeschwindigkeitsprofilen ermöglicht eine anschauliche Darstellung des Verdichtungserfolgs. Abbildung 3.4 zeigt die Verteilung der Scherwellengeschwindigkeit v_s in vertikalen Ebenen der ermittelten Schwerellengeschwindigkeitsprofile unterhalb der Dammaufstandsfläche des Péribonka-Staudamms vor und nach den Verdichtungsarbeiten.

[2] Akronym für Spectral Analysis of Surface Waves.
[3] Akronym für Multichannel Analysis of Surface Waves.

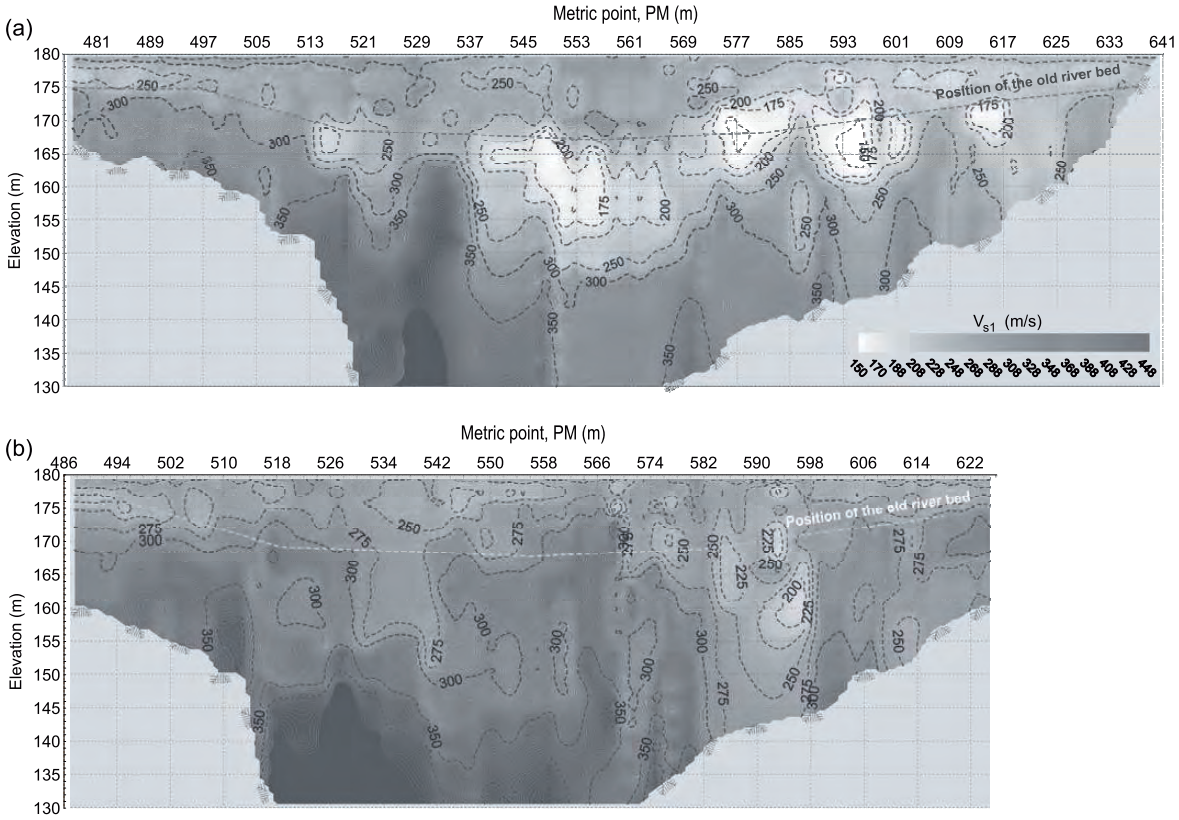


Abbildung 3.4: Verteilung der Scherwellengeschwindigkeit v_s in vertikalen Ebenen anhand von Schwerellengeschwindigkeitsprofilen unterhalb der Dammaufstandsfläche des Péribonka-Staudamms vor (oben) und nach (unten) den Verdichtungsarbeiten [63].

Anhand dieser Untersuchungsergebnisse ist eine signifikante Erhöhung der Scherwellengeschwindigkeit zufolge der Verdichtungsarbeiten bis zu einer großen Tiefe erkennbar. Darüber hinaus zeigt Abbildung 3.4b eine deutlich gleichmäßigere Verteilung der Scherwellengeschwindigkeit in der betrachteten Ebene. Dieser Umstand ist eindeutig auf eine Homogenisierung des Untergrundes durch die Verdichtungsarbeiten zurückzuführen.

3.3 Arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle bei Tiefenrüttelverfahren

Wie die in Abschnitt 3.2 diskutierten Untersuchungsergebnisse zeigen, sind indirekte Untergrunderkundungsverfahren zur Kontrolle von Tiefenverdichtungsarbeiten anwendbar. Diese Verfahren haben generell den großen Nachteil, dass sie erst nach der Fertigstellung der Verdichtungsarbeiten erfolgen können. Eine Kontrolle des Verdichtungserfolgs während der Verdichtung erfordert deren Unterbrechung und ist dadurch mit einem zusätzlichen Zeitaufwand verbunden. Ein weiterer Nachteil dieser Methoden besteht darin, dass ungünstige Abweichungen vom erwarteten Verdichtungserfolg erst nachher auffallen. In solchen Fällen ist die Anordnung von zusätzlichen Verdichtungsstrecken oft nicht möglich oder ist mit zusätzlichem Zeit- und Kostenaufwand verbunden.

Aus diesen Gründen sind Methoden zu einer arbeitsintegrierten Kontrolle von Verdichtungsarbeiten für die Baupraxis seit Jahrzehnten von besonderem Interesse. Generell gilt, dass bei einer arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle die Überprüfung des Verdichtungserfolgs nicht intermittierend und damit den Verdichtungsprozess unterbrechend, sondern bereits während der Verdichtung kontinuierlich erfolgt. Ein System zur arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle ermöglicht es, den Verdichtungserfolg fortwährend zu überwachen und gegebenenfalls den Verdichtungsprozess durch Änderung der Prozess- und Herstellparameter laufend zu adaptieren.

Systeme zur arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle sind im Bereich der dynamischen Walzenverdichtung, sowohl bei Vibrations- als auch bei Oszillationswalzen, Stand der Technik. Es handelt sich bei der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) um eine walzen- und arbeitsintegrierte Methode der Verdichtungsprüfung auf Basis des Bewegungsverhaltens der dynamisch angeregten Walzenbandage. Dies bedeutet, dass die Walze nicht nur als Verdichtungsgerät fungiert, sondern gleichzeitig Messwerkzeug ist. Eine ausführliche Beschreibung der unterschiedlichen Verfahren zur Verdichtungskontrolle ist beispielsweise in *Adam* und *Pistrol* [6] zu finden.

Trotz der wissenschaftlichen Untersuchung des Zusammenhanges zwischen dem Bewegungsverhalten und dem Verdichtungserfolg (siehe Abschnitt 2.5.1) hat sich – gegenüber der Walzenverdichtung – bislang keine Methode für eine arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle des Tiefenrüttelverfahrens auf Basis des Bewegungsverhaltens des Rüttlers in der Praxis etabliert. Eine standardmäßige arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle beim Rütteldruckverfahren erfolgt heutzutage lediglich durch eine arbeitsbegleitende Aufzeichnung von Verfahrensparametern. Im Folgenden wird ein Überblick der gängigen Methoden zur Verdichtungskontrolle der Rütteldruckverdichtung auf Basis von Verfahrensparametern und deren Grundprinzip skizziert. Bei der Resonanzverdichtung ist eine arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle und Frequenzregelung auf Basis der messtechnischen Beobachtung des Oberflächenwellenfeldes möglich. Das Grundprinzip dieses Verfahrens wird ebenfalls aufgezeigt.

3.3.1 Verdichtungskontrolle durch arbeitsbegleitende Aufzeichnung von Verfahrensparametern

Generell gilt, dass Tiefenverdichtungsverfahren von den ausführenden Firmen hinsichtlich der Verfahrensparameter umfangreich dokumentiert sind. Bestimmte Verfahrensparameter – in erster Linie die Stromaufnahme des Rüttlermotors – werden zur Kontrolle und zum Nachweis des Verdichtungserfolgs herangezogen.

Die übliche gleichmäßige rasterförmige Anordnung der Verdichtungsstrecken stellt bei den dynamischen Tiefenverdichtungsverfahren eine geeignete Grundlage für eine systematische Überprüfung des verdichteten Bodenbereiches durch die Aufzeichnung von Verfahrensparametern dar. Durch die Interpretation der aufgezeichneten Messdaten können wertvolle Informationen über die Untergrundverhältnisse im verbesserten Bodenbereich ermittelt werden. Die einzelnen Verdichtungspunkte sind somit praktisch als indirekte Boden-

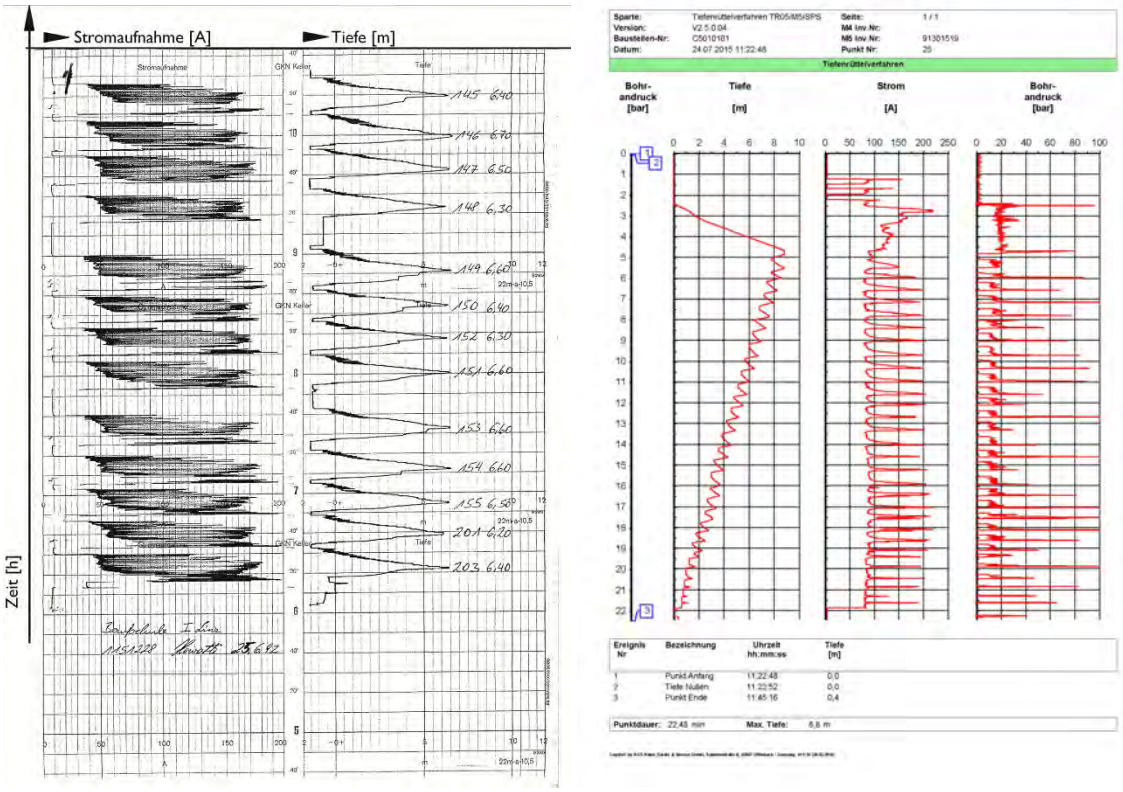


Abbildung 3.5: Das Metra–Watt–Schreiber System für die Datenaufzeichnung in der Rütteltechnik [40] (links), Tiefenschreiberprotokoll heutzutage (rechts).

aufschlüsse anzusehen. Mit zunehmender Komplexität der Bauvorhaben kam in den letzten Jahrzehnten der Interpretation der aufgezeichneten Verfahrensparameter immer größere Bedeutung zu [40], [156].

3.3.1.1 Tiefenschreiberprotokolle

Zur Dokumentation des Verdichtungsvorgangs im Zuge einer Rütteldruckverdichtung kommen Registriergeräte zum Einsatz, welche die Rütteltiefe, die Stromaufnahme des Rüttlermotors und gegebenenfalls weitere Verfahrensparameter aufgezeichnen. Bereits Anfang der 1980er Jahren führte die Firma *Keller Grundbau* für diesen Zweck das sogenannte Metra–Watt–Schreiber System für die Datenaufzeichnung in der Rütteltechnik ein [40].

Spätere Generationen der Registriergeräte ermöglichten die Anzeige der Verfahrensparameter in der Fahrerkabine und damit die Möglichkeit der begleitenden Kontrolle des Verdichtungsvorgangs durch den Gerätefahrer. Die arbeitsintegrierte Kontrolle und Aufzeichnung der Verfahrensparameter etablierte sich durch die laufende Weiterentwicklung der Mess- und Datenübertragungstechnik zum wesentlichen Verfahrensbestandteil. Die Verfahrensparameter werden für jede Verdichtungsstrecke aufgezeichnet und auf einem Protokoll über die Tiefe grafisch dargestellt, Tiefenschreiberprotokoll bezeichnet. In Abbildung 3.5 ist ein Protokoll aus den 1980er Jahren und ein modernes Tiefenschreiberprotokoll exemplarisch dargestellt.

3.3.1.2 Visualisierung des Verbesserungserfolgs mit dem VibroScan System

Die eingehende Auswertung und Interpretation von derartigen Messprotokollen und eine Einordnung ins Untergrundmodell sind mit beträchtlichem Zeitaufwand verbunden oder bei größeren Bauprojekten gar nicht möglich. Die Firma *Keller Grundbau* hat daher das VibroScan System entwickelt, das eine dreidimensionale Darstellung diverser Verfahrensparameter ermöglicht (siehe Abbildung 3.6). Darüber hinaus lässt das VibroScan System einen on-line Zugriff auf die dokumentierten Verfahrensparameter zu und garantiert damit eine laufende Qualitäts- und Leistungskontrolle der Verdichtungsarbeiten. Mit diesem System ist somit eine Evaluierung der Verfahrensparameter über den gesamten behandelten Bodenbereich möglich.

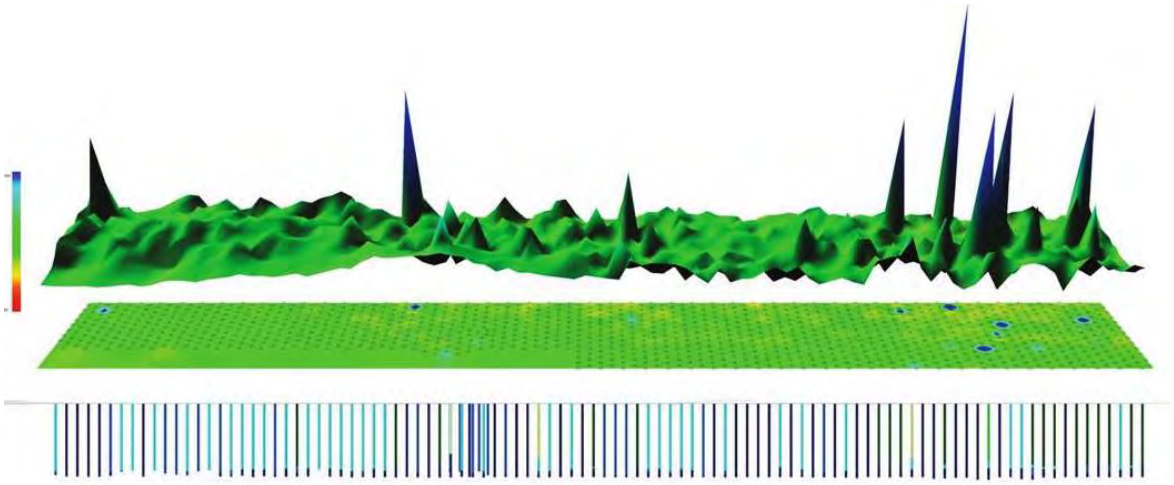


Abbildung 3.6: Visualisierung von Verfahrensparametern mit dem VibroScan System [156].

Es sei angemerkt, dass die Verwendung diverser Verfahrensparameter zur Verdichtungskontrolle, wie die Stromaufnahme des Rüttlermotors und des daraus abgeleiteten Amperfaktors[4], primär auf Praxiserfahrungen und nicht auf fundierten grundlagenorientierten Forschungsarbeiten basiert. Der Zusammenhang zwischen den dokumentierten Verfahrensparametern – wie beispielsweise die Stromaufnahme des Rüttlermotors – und dem Verdichtungserfolg wurde bislang wissenschaftlich nicht systematisch untersucht. Die laufende Beobachtung und Kontrolle der Verfahrensparameter während der Verdichtungsarbeiten sowie die visuelle Darstellung der aufgezeichneten Daten sind jedoch als arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle anzusehen.

3.3.2 Arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle bei der Resonanzverdichtung

Bei der Resonanzverdichtung[5] wird die Erregerfrequenz des Aufsatzrüttlers auf die Resonanzfrequenz des dynamischen Rüttler-Bohle-Boden Interaktionssystems abgestimmt. Der frequenzvariable Aufsatzrüttler ist über eine elektronische Kontrolleinheit gesteuert. Das

[4] Eine ausführliche Beschreibung der Qualitätskontrolle bei der Rütteldruckverdichtung auf Basis des Amperfaktors ist in *Falk et al.* [40] zu finden.

[5] Die Beschreibung dieses Verfahrens kann Abschnitt 2.2.2 entnommen werden.

Ziel ist dabei, durch die Regelung der Frequenz die Erschütterungsausbreitung im zu verdichtenden Boden zu erhöhen und dadurch eine effektivere Verdichtungswirkung zu erzielen. Geophonen erfassen das Oberflächenwellenfeld in der Umgebung des aktuell bearbeiteten Verdichtungspunktes kontinuierlich. Dadurch ist es möglich die Vibrationsfrequenz des Aufsatzrüttlers an dem Verdichtungsvorgang anzupassen. Es erfolgt hierbei nicht nur eine arbeitsintegrierte Kontrolle des Verdichtungsvorgangs, sondern gleichzeitig auch eine Regelung des Verdichtungsgerätes.

Abbildung 3.7 zeigt die messtechnisch erfasste vertikale Schwinggeschwindigkeit an der Oberfläche im Zuge einer Resonanzverdichtung. Während des Verdichtungsvorgangs wird Resonanz im Rüttler-Bohle-Boden Interaktionssystem erzielt, das System bei seiner Resonanzfrequenz angeregt. Die Annahme ist, dass bei Systemresonanz die effektivste Bodenverdichtung stattfindet, da in diesem Zustand eine effektive Ausstrahlung der Vibrationsenergie von der Oberfläche der Verdichtungsbohle erfolgt [88]. Im vorliegenden Fall ergeben sich die größten vertikalen Schwinggeschwindigkeitsamplituden bei einer Rüttlerfrequenz von etwa 15 Hz.

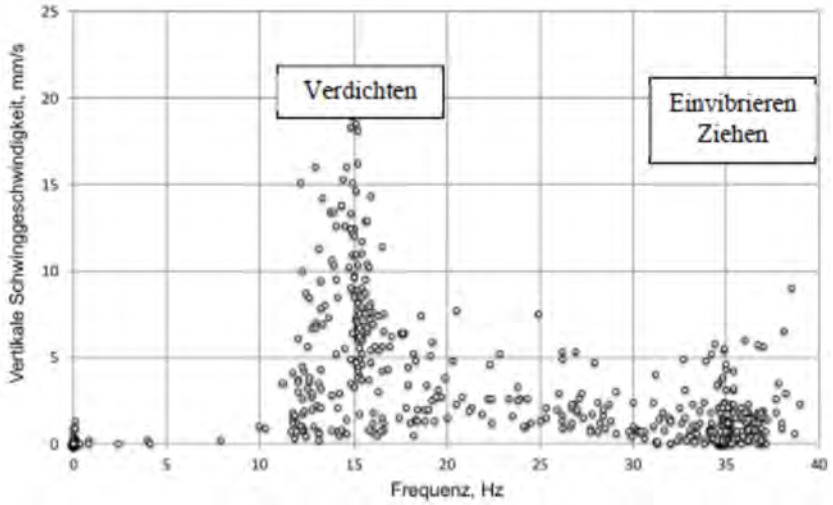


Abbildung 3.7: Messtechnische Beobachtung des Oberflächenwellenfeldes während der Resonanzverdichtung zur arbeitsintegrierten Qualitätskontrolle und Regelung [88].

Um den Bodenwiderstand entlang der Verdichtungsbohle zu reduzieren, geschieht das Einvibrieren und Ziehen der Bohle bei vergleichsweise hoher Rüttlerfrequenz. Das Rüttler-Bohle-Boden System wird dabei deutlich über seiner Eigenfrequenz angeregt. Es entstehen daher während des Einvibrierens und des Ziehens verhältnismäßig geringe Erschütterungen an der Geländeoberfläche (siehe Abbildung 3.7).

Massarsch [88] betont die Bedeutung weiterer wesentlicher Verfahrensparameter während der Resonanzverdichtung, die zur indirekten Kontrolle der Verdichtungsarbeiten angewendet werden können. Die Absenkgeschwindigkeit der Bohle trägt auch zur indirekten Verdichtungskontrolle bei. Im bereits verdichtetem Untergrund ist das Versenken der Bohle erschwert, es ist im Vergleich zum unverdichteten Boden eine deutlich niedrigere Absenkgeschwindigkeit möglich.

Kapitel 4

Experimentelle Untersuchungen zur Rütteldruckverdichtung

4.1 Einleitung

Auf dem Gebiet der Rütteldruckverdichtung wurden bereits einige theoretische und experimentelle Forschungsarbeiten zur Untersuchung der Vorgänge im dynamischen Rüttler-Boden Interaktionssystem durchgeführt (siehe Abschnitt 2.5.1). Es stehen jedoch bislang keine ausreichend genauen Informationen zum dreidimensionalen Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers und zu den Vorgängen im Untergrund während des Verdichtungsvorgangs zur Verfügung. Aus diesem Grund wurden im Rahmen des gegenständlichen Forschungsprojektes die experimentellen Untersuchungen der Rütteldruckverdichtung in den Vordergrund gestellt und eine umfangreiche Versuchsserie von großmaßstäblichen Experimenten abgewickelt.

4.2 Zielsetzung

Diese Forschungsarbeit hat sich zum übergeordneten Ziel gesetzt, wissenschaftlichen Grundlagen eines Systems der arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle für die Rütteldruckverdichtung auf Basis des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers zu schaffen. Dazu ist es notwendig, das dreidimensionale Bewegungsverhalten während des Verdichtungsvorgangs, die Wirkung der Rütteldruckverdichtung auf den Boden und den Zusammenhang zwischen der Rüttlerbewegung und bestimmten Verfahrensparametern eingehend zu untersuchen. Aufbauend auf der messtechnisch erfassten Rüttlerbewegung können bisher unzureichend geklärte bzw. nur zum Teil nachvollzogene Vorgänge, die während der Rütteldruckverdichtung auf dem Verdichtungsgerät und im dynamischen Rüttler-Boden Interaktionssystem auftreten, beleuchtet werden.

Die wesentlichen Ziele der experimentellen Untersuchungen sowie der nachfolgenden Auswertung und Interpretation der Messergebnisse können wie folgt zusammenfasst werden:

- Entwicklung eines Mess- und Datenübertragungssystems zur dauerhaften und verlässlichen Gewinnung von Messdaten
- Untersuchung des dreidimensionalen Bewegungsverhaltens des in der Luft frei schwingenden Tiefenrüttlers
- Untersuchung des dreidimensionalen Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers im Zuge des Verdichtungsvorgangs
- Identifikation von maßgeblichen Einflussfaktoren auf das Bewegungsverhalten
- Erlangung eines grundlegenden Verständnisses der Vorgänge, die während des Verdichtungsprozesses im Rüttler-Boden Interaktionssystem auftreten
- Erkundung des Zusammenhanges zwischen dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers und dem Wellenfeld an der Geländeoberfläche
- Ermittlung der Zusammenhänge zwischen der aktuellen Steifigkeit bzw. dem Verdichtungszustand des Bodens und dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers
- Formulierung von Empfehlungen für einen sinnvollen und theoretisch fundierten Indikator für den aktuellen Verdichtungszustand während des Verdichtungsprozesses
- Untersuchung des Wirkungsradius der Verdichtung und darauf aufbauend die Analyse der Möglichkeiten zur Optimierung des Verdichtungsrasters
- Verifizierung der Erkenntnisse mittels der in der Ausführungspraxis etablierten Erkundungsverfahren
- Untersuchung der Anwendbarkeit der aktuellen Stromaufnahme des Rüttlermotors zur Verdichtungskontrolle
- Untersuchung der Veränderung dynamischer Bodenkenngrößen im Versuchsboden zufolge Rütteldruckverdichtung

4.3 Versuchskonzept

Um die oben definierten Ziele erreichen zu können, wurde ein entsprechendes Versuchskonzept entwickelt. Dieses diente als Grundlage für die Auswahl eines geeigneten Verdichtungsgerätes und Versuchsfeldes, für die messtechnische Instrumentierung sowie für die Einrichtung des Testfeldes und die Planung des Ablaufes der Experimente.

Wie Abbildung 4.1 schematisch zeigt, baut das Versuchskonzept der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen auf drei grundlegenden Säulen auf:

- Messtechnische Erfassung der dreidimensionalen Rüttlerbewegung.
- Arbeitsbegleitende Aufzeichnung von Verfahrensparametern.
- Messtechnische Erfassung des Wellenfeldes an der Geländeoberfläche.

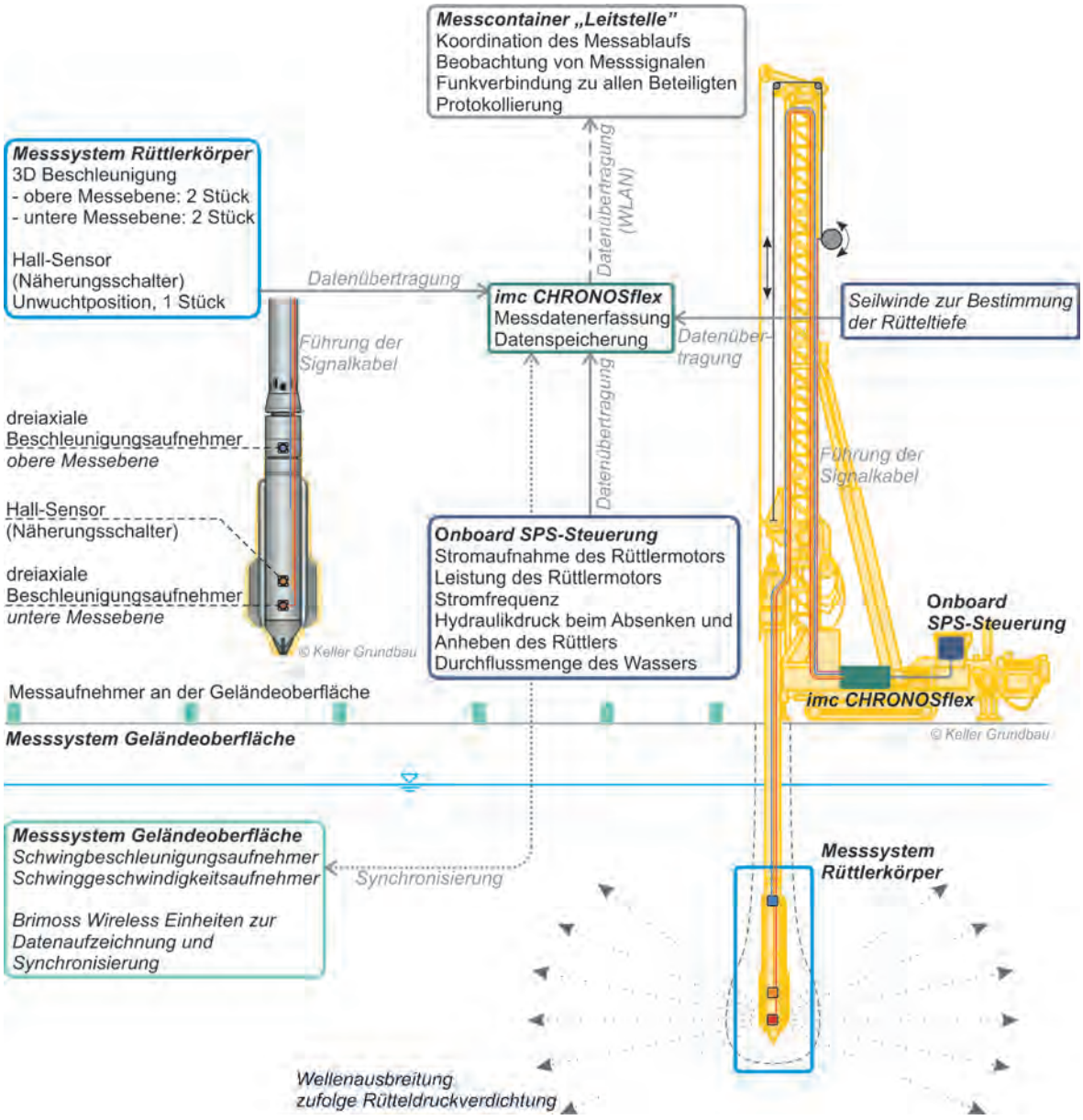


Abbildung 4.1: Schematische Darstellung des Versuchskonzeptes während der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen (adaptiert nach [103]).

Da die messtechnische Erfassung der dreidimensionalen Bewegung des Tiefenrüttlers das zentrale Ziel der Forschungsarbeit war, wurde diese bei der Erarbeitung des Versuchskonzeptes in den Vordergrund gestellt. Abschnitt 4.5.1 zeigt das Messsystem zur Erfassung der Rüttlerbewegung.

Diverse Verfahrensparameter, wie beispielsweise die Rüttlerfrequenz, die Durchflussmenge des Wassers zur Wasserspülung oder der Rüttleranpressdruck beeinflussen den Verdichtungsprozess und die Rüttlerbewegung. Aus diesem Grund ist die dreidimensionale Rüttlerbewegung nur gemeinsam mit diesen interpretierbar. Ausführenden Firmen wenden bestimmte Verfahrensparameter, vor allem die Stromaufnahme des Rüttlermotors für die Kontrolle der Verdichtungsarbeiten an. Aus den oben genannten Gründen ist die arbeitsbegleitende Aufzeichnung dieser Parametern eine essenzielle Erweiterung der mess-

technischen Beobachtung des Bewegungsverhaltens mit näherer Betrachtung in Abschnitt 4.5.2.

Zufolge der dynamischen Rüttler-Boden Interaktion wird die Rüttlerschwingung auf das Korngerüst des Bodens übertragen. Diese Erschütterungen breiten sich in Form von seismischen Wellen im Untergrund aus. Ein gewisser Anteil dieser seismischen Wellen erreicht die Geländeoberfläche und pflanzt sich als Oberflächenwelle fort. Da die sich zufolge der Verdichtung lokal im Einflussbereich des Tiefenrüttlers verändernden Bodeneigenschaften einen Einfluss auf das Wellenfeld an der Geländeoberfläche ausüben ist seine messtechnische Beobachtung und Erfassung von besonderer Bedeutung. Aus diesem Grund wurde das Wellenfeld an der Oberfläche mittels triaxiale Beschleunigungsaufnehmer und Seismometer in definierten Abständen vom jeweiligen Verdichtungspunkt erfasst. Das Messsystem an der Geländeoberfläche ist in Abschnitt 4.5.3 beschrieben.

Die gesamtheitliche Betrachtung des dreidimensionalen Bewegungsverhaltens, der aufgezeichneten Verfahrensparameter und der Wellenausbreitung zufolge Rütteldruckverdichtung soll das grundlegende Verständnis der wesentlichen Vorgänge im hochkomplexen Rüttler-Boden Interaktionssystem. Darauf aufbauend soll die Identifikation potenzieller Indikatoren für den Verdichtungszustand des Bodens möglich sein.

4.4 Verdichtungsgerät

4.4.1 Trägergerät

Als Trägergerät kam ein Raupen-Hydraulikbagger zur Anwendung. Der Tiefenrüttler wurde an einem Anbaumäkler geführt eingesetzt. Abbildung 4.2 zeigt das angewendete Trägergerät mit dem bereits instrumentierten Tiefenrüttler.

Auf dem Außenteil des Mäklers bewegt sich entlang der Führungsleisten der mit Gleitlagern ausgestattete Führungsschlitten. Am Führungsschlitten können verschiedene Arbeitsgeräte befestigt werden [25]. Im vorliegend Fall dient er zur Befestigung des Tiefenrüttlers. Aufgrund der Mäklerführung ist es möglich, zusätzlich zum Eigengewicht des Tiefenrüttlers (inkl. Aufsatzrohre) das Eigengewicht der Tragraupe als Eindringhilfe während des Einvibrierens und des Absenkvorgangs im Zuge der Verdichtung im Pilgerschrittverfahren zu aktivieren. Die zusätzliche Anpresskraft ist oft auch als „Aktivierkraft“ genannt. Durch die Aktivierung des Eigengewichts der Tragraupe kann trotz des vergleichsweise niedrigen Rüttlereigengewichts eine hohe Anpresskraft auf den Boden über der Rüttlerspitze übertragen werden. Eine Hydraulikanlage steuert die Anpresskraft. Der Druck in der Hydraulikanlage wird häufig als Rüttleranpressdruck bezeichnet.

Das für die Stromversorgung des Rüttlermotors erforderliche Stromaggregat ist meistens – wie auch im gegenständlichen Fall – auf der Rückseite der Tragraupe montiert. Ein Starkstromkabel versorgt ihn mit Strom, welches in den Verlängerungsrohren geführt wird.

Abbildung 4.2: Das im Großversuch in Fisching angewendete Trägergerät mit dem instrumentierten Tiefenrüttler.

4.4.2 Tiefenrüttler

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen kam der Tiefenrüttler des Typs *M-1470* der Firma *Keller Grundbau* zum Einsatz. Der bereits instrumentierte Tiefenrüttler ist in Abbildung 4.2 ersichtlich. Der Rüttlerkörper ist zylinderförmig, sein Außendurchmesser beträgt 305 mm, seine Länge 2990 mm, das Betriebsgewicht 1515 kg. Der Rüttlerkörper enthält eine, zur vertikalen Rüttlerachse exzentrisch angeordnete, rotierende Unwuchtmasse, die von einem Drehstrom-Asynchronmotor angetrieben ist. Die Maximale Leistung des Motors beträgt 70 kW, die Versorgungsspannung 400 V Die Motorfrequenz ist bis maximal 60 Hz mittels einem Frequenzumrichter praktisch beliebig einstellbar. Im standardmäßigen Rüttlerbetrieb wird der Rüttlermotor im Regelfall bei einer Frequenz von 50 Hz betrieben.

Der Tiefenrüttler ist schematisch in Abbildung 4.3 dargestellt. Auf dem Rüttlerkörper sind zwei Flügel angeordnet, die das Verdrehen um seine vertikale Achse während der Verdichtung verhindern. Die Wasserspülung erfolgt über Leitungen, die ebenfalls in den Flügeln angeordnet sind, die Wasseraustrittsöffnungen befinden sich oberhalb der Rüttlerspitze. Bei diesem Rüttlertyp ist entlang des Rüttlerkörpers keine Wasserspülung möglich.

Eine elastische Kopplung trennt den Rüttlerkörper von den Verlängerungsrohren. Durch die Scherverformung der elastischen Kopplung kann die Übertragung der horizontalen Schwingungen auf das Verlängerungsrohr praktisch verhindert werden.

4.5 Messsystem

Ausgehend aus dem Versuchskonzept wurde für die großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen ein Mess- und Datenübertragungssystem entwickelt, das sich grundsätzlich auf drei Teilsysteme unterteilen lässt:

- Messsystem auf dem Rüttlerkörper zur Erfassung des dreidimensionalen Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers
- Arbeitsbegleitende Aufzeichnung von Verfahrensparametern aus der Onboard-SPS-Steuerung des Verdichtungsgerätes
- Messsystem zur Erfassung des Wellenfeldes an der Geländeoberfläche

4.5.1 Messsystem auf dem Rüttlerkörper

Im Zuge der Entwicklung des Versuchskonzeptes wurde festgelegt, die Beschleunigungen des Rüttlerkörpers an unterschiedlichen Stellen sowie die aktuelle Position der Unwuchtmasse messtechnisch zu erfassen, wodurch die Identifizierbarkeit der dreidimensionalen Rüttlerbewegung gewährleistet ist.

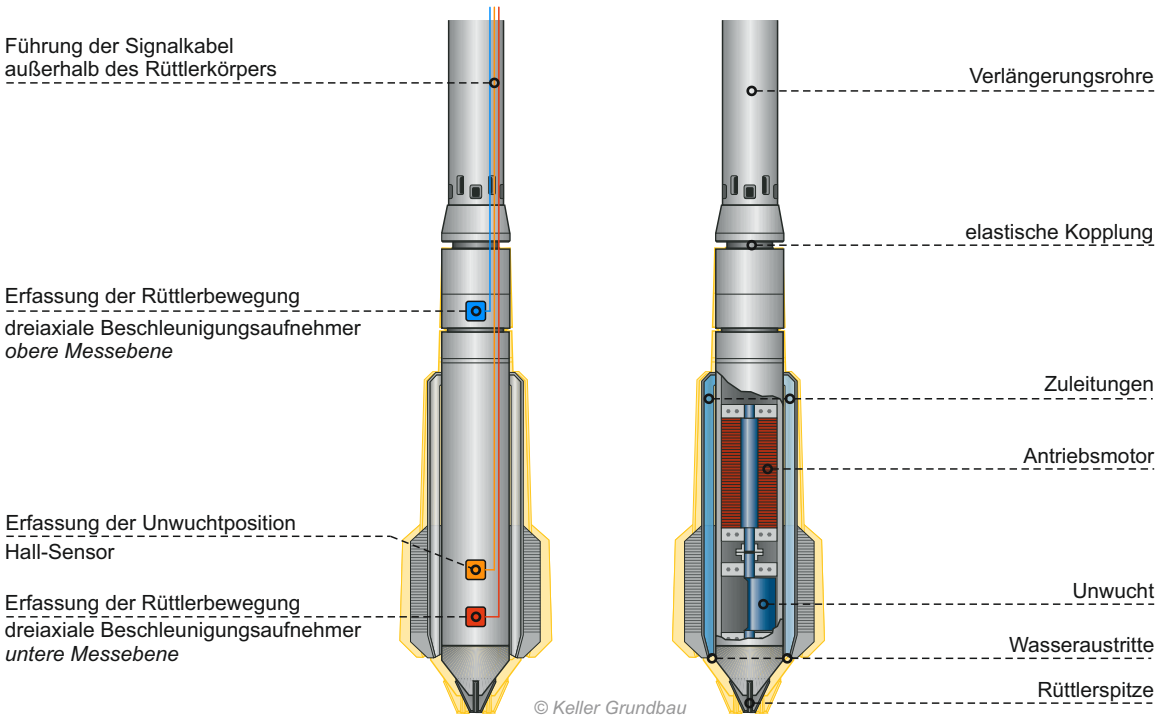


Abbildung 4.3: Prinzipielle Darstellung des Tiefenrüttlers und des Messsystems zur Erfassung der dreidimensionalen Rüttlerbewegung.

Die Installation des Mess- und Datenübertragungssystems auf den Rüttlerkörper stellte ein äußerst komplexes Problem dar, da während der Verdichtungsarbeiten mit bedeutenden mechanischen und thermischen Einwirkungen auf die Messsensorik zu rechnen war.

Des Weiteren mussten die Sensoren vor Feuchtigkeit geschützt werden. Um eventuelle Sensorenschäden und Datenverluste möglichst vorbeugen zu können, wurde das Mess- und Datenübertragungssystem an Ort und Stelle in der Rüttlerwerkstatt der Firma *Keller Grundbau* in Söding aufgebaut und anschließend sorgfältig getestet.

4.5.1.1 Messung der Beschleunigungen zur messtechnischen Erfassung der Rüttlerbewegung

Die messtechnische Erfassung der dreidimensionalen Rüttlerbewegung erfolgte mittels Messung der Beschleunigungen an unterschiedlichen Stellen auf dem Rüttlerkörper. Triaxiale Beschleunigungssensoren wurden in zwei Messebenen, in der Nähe der Rüttlerspitze („untere Messebene“) bzw. unterhalb der elastischen Kopplung („obere Messebene“) installiert. Es wurden je Messebene zwei Sensoren eingebaut, welche auf der Außenseite des Rüttlerkörpers befestigt wurden. Die Anordnung der Beschleunigungsaufnehmer auf dem Rüttlerkörper und die Vorzeichenregelung sind in Abbildung 4.4 schematisch dargestellt.

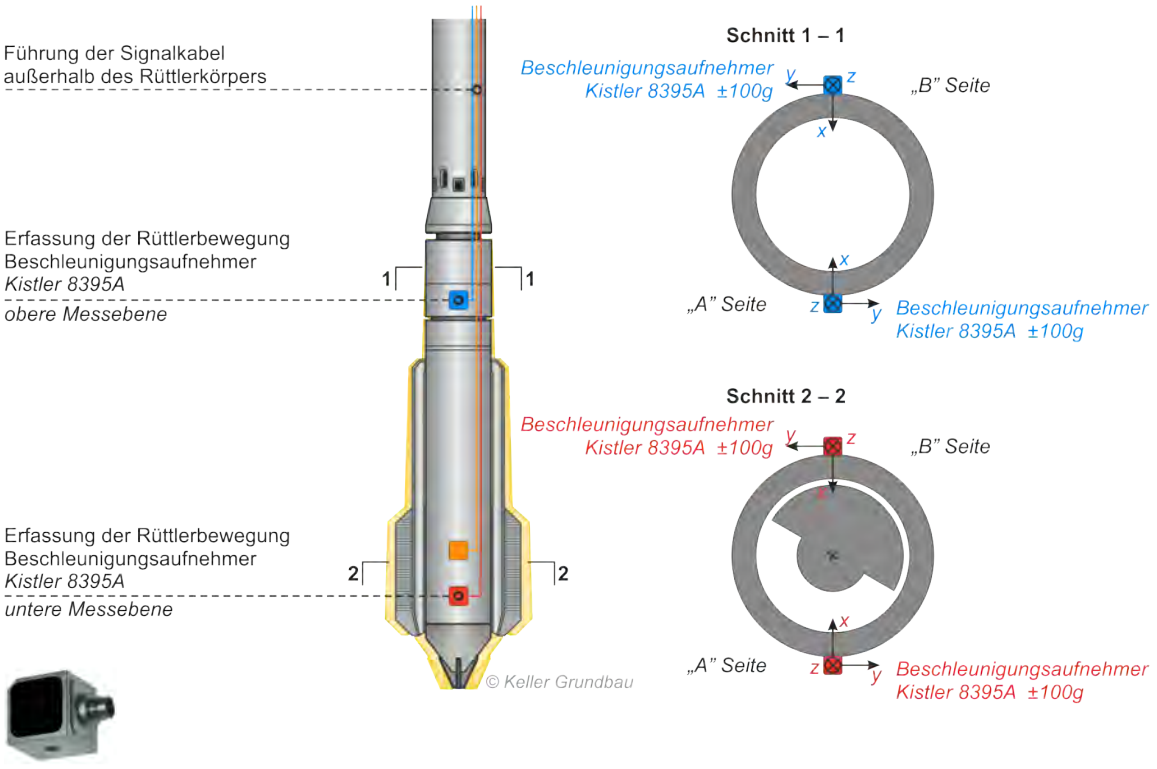


Abbildung 4.4: Messtechnische Erfassung der dreidimensionalen Rüttlerbewegung mit triaxialen Beschleunigungsaufnehmern des Typs 8395A auf dem Rüttlerkörper. Anordnung, Sensitivitäten und positive Messrichtungen.

Für die Messung der Beschleunigungen des Rüttlerkörpers wurden triaxiale Beschleunigungssensoren des Typs 8395A der Firma *Kistler* [71] mit der Sensitivität von $\pm 100\,\mathrm{g}$ verwendet. Das Datenblatt dieses Sensors kann Anhang B entnommen werden. Aufgrund der zu erwartenden hohen Temperaturen des Rüttlerkörpers (bis 140°C) wurden temperaturbe-

(a) Beschleunigungssensor des Typs 8395A der Firma *Kistler* [71] auf dem Rüttlerkörper.

(b) Robuste Stahlgehäuse zum Schutz des Beschleunigungssensors.

Abbildung 4.5: Montage der triaxialen Beschleunigungsaufnehmer auf den Rüttlerkörper [102].

ständige Messsensoren gewählt. Mit dem angewendeten Sensortyp war die Erfassung der Sensortemperatur ebenfalls möglich, die im vorliegenden Fall der Temperatur der Außenseite des Rüttlerkörpers entsprach. Dadurch war die Kontrolle der Rüttlertemperatur während der Versuchsdurchführung möglich. Über die hohen Rüttlertemperaturen hinaus war es mit weiteren Einwirkungen auf die Beschleunigungsaufnehmer zu rechnen. Nachdem man die Sensoren an der Außenseite des Rüttlerkörpers montiert hat, waren diese während der Verdichtungsversuche hohen mechanischen Einwirkungen ausgesetzt. Des Weiteren mussten die Sensoren vor Feuchtigkeit geschützt werden, da die Verdichtung großteils unter dem Grundwasserspiegel erfolgte sowie im Zuge der Verdichtung über die beiden Wasseraustritte an der Rüttlerspitze durchgehend Wasser zugeführt wurde.

Um die Messaufnehmer vor diesen Einwirkungen zu schützen, wurden diese in robusten Stahlgehäusen installiert, welche auf den Rüttlerkörper angeschweißt waren (siehe Abbildung 4.5b). Die Messaufnehmer schraubte man unmittelbar an den Rüttlerkörper. Um die Gehäuse komplett abzudichten, wurden die Stahlzylinder mit Zweikomponentenklebstoff verfüllt bzw. zusätzlich mit einer angeschweißten Stahlklappe verschlossen.

4.5.1.2 Messtechnische Bestimmung der Unwuchtposition

Die jeweils aktuelle Position der Unwuchtmasse wurde durch einen Hall-Sensor[1] ermittelt. Der Hall-Sensor erzeugt eine Signalspitze, sobald sich ein Magnet am Sensor vorbei bewegt. Der angewendete Hall-Sensor ist eine Eigenentwicklung der Firma *VCE ZT GmbH*. Der Magnet wurde auf die Welle der rotierenden Unwucht montiert, der Hall-Sensor im Rüttlerkörper installiert (siehe Abbildung 4.6). Dieser Sensor war ebenfalls durch ein robustes Stahlgehäuse vor mechanischen Einwirkungen und Feuchtigkeit geschützt.

Die Erfassung der aktuellen Position der rotierenden Unwuchtmasse lässt in weiterer Folge die Bestimmung des Phasenwinkels zu, welcher einen wesentlichen Parameter zur

[1] Ein Hall-Sensor (auch Hall-Sonde oder Hall-Geber) nutzt den Hall-Effekt zur Identifizierung von Magnetfeldern. Der Hall-Effekt, benannt nach Edwin Hall, beschreibt das Auftreten einer elektrischen Spannung in einem stromdurchflossenen Leiter, der sich in einem stationären Magnetfeld befindet.

Charakterisierung des Bewegungsverhaltens eines derartigen dynamischen Systems darstellt. Da im Rüttlerkörper noch deutlich höhere Temperaturen (bis 170°C) als auf dessen Außenseite auftreten können, wurde die Temperaturbeständigkeit des Näherungsschalters und des Magneten unter Laborbedingungen sorgfältig getestet. Abbildung 4.7 zeigt den angewendeten Hall-Sensor und wesentliche Schritte des Installationsprozesses.

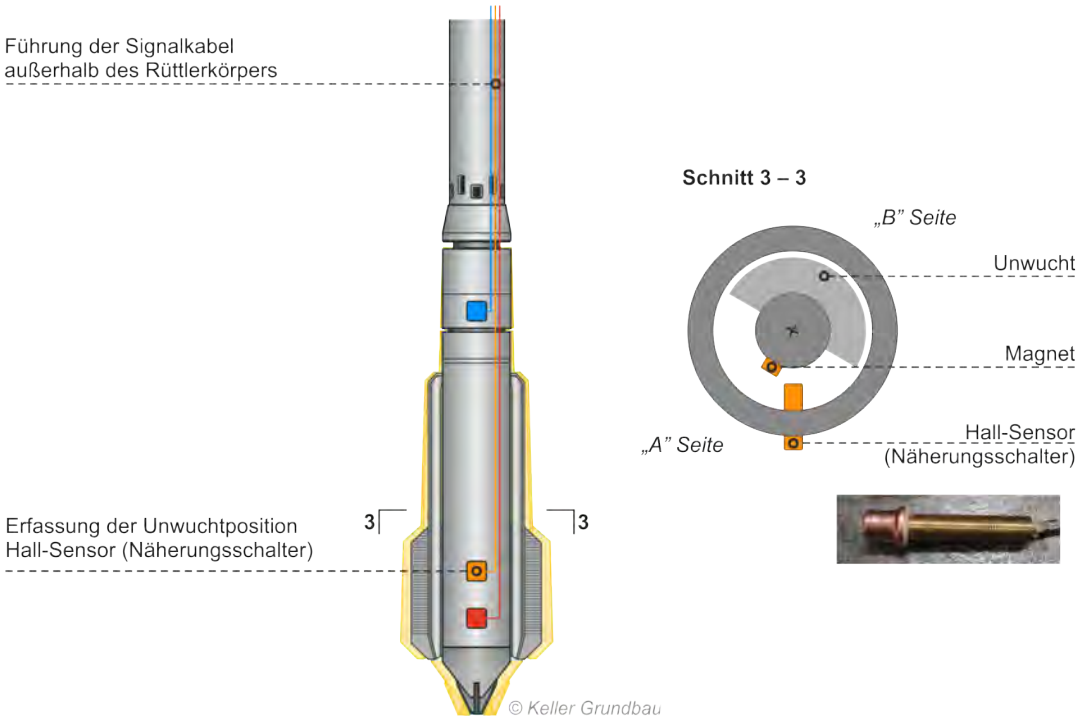
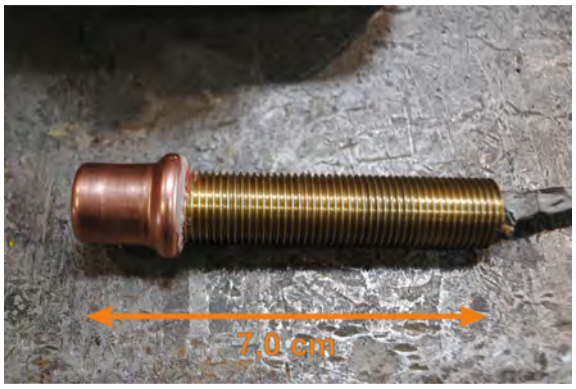


Abbildung 4.6: Anordnung des Hall-Sensors und des Magneten im Rüttlerkörper und auf der Welle der rotierenden Unwucht.

4.5.1.3 Messdatenerfassung und Führung der Signalkabel

Die Signale sämtlicher Sensoren wurden auf einem hinter der Fahrerkabine des Trägergerätes installierten Messdatenlogger des Typs *imc CRONOSflex*, gespeichert, mit einer Aufzeichnungsrate von 10 kHz erfasst.

Für die Übertragung der Signale der Messsensoren auf dem Rüttlerkörper waren die Signalkabel über den Rüttlerkörper und über die Verlängerungsrohre bis zum Messdatenlogger zu führen. Diese stellte ebenfalls eine Herausforderung bei der Entwicklung des Mess- und Datenübertragungssystems dar, in erster Linie im Bereich des Rüttlerkörpers und der Verlängerungsrohre, wo die Signalkabel großen mechanischen Belastungen ausgesetzt sind. Aufgrund der beschränkten Platzverhältnisse war es nicht möglich, die Signalkabel innerhalb des Rüttlerkörpers zu installieren. In den Verlängerungsrohren wäre zwar ausreichend Platz für die Signalkabel vorhanden gewesen, die Bedingungen waren jedoch hier äußerst ungünstig. Der Rüttlermotor ist über ein Starkstromkabel mit elektrischer Energie versorgt, welches innerhalb der Verlängerungsrohre geführt und im oberen Drittel des Tiefenrüttlers am Rüttlermotor angeschlossen ist. Bei einer Installation der Signalkabel in



(a) Hall-Sensor im Messinggehäuse.

(b) Magnet auf der Welle der Unwucht.

(c) Der Hall-Sensor, vorbereitet für die Montage in den Rüttlerkörper.

(d) Montage des Hall-Sensors in den Rüttlerkörper.

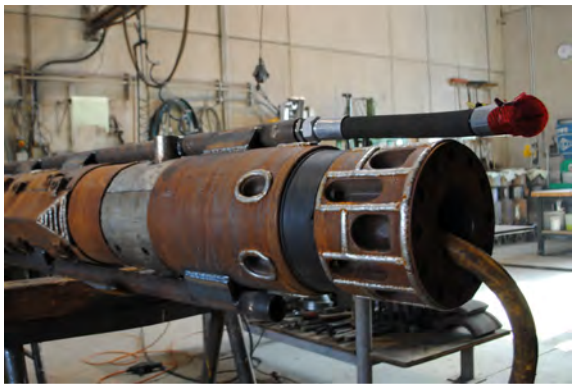
Abbildung 4.7: Montage des Hall-Sensors in den Rüttlerkörper und des Magneten auf die Welle der Unwucht.

unmittelbarer Nähe des Starkstromkabels hätte aufgrund des starken elektromagnetischen Feldes des Starkstromkabels kaum eine störungsfreie Signalübertragung gewährleistet werden können. Des Weiteren erfolgt die Wasserversorgung des Tiefenrüttlers ebenfalls über die Verlängerungsrohre. Dieser Umstand hätte weitere Schwierigkeiten für die Befestigung und Abdichtung der Signalkabel bedeutet.

Aus den oben genannten Gründen wurden die Signalkabel der Messsensoren außerhalb des Rüttlerkörpers, beidseitig, in dickwandigen Stahlrohren (siehe Abbildung 4.8a) installiert. Die Stahlrohre wurden an den Rüttlerkörper bzw. an die Verlängerungsrohre angeschweißt. Um die Beweglichkeit der Kabelführung bei der elastischen Kopplung zu sichern, kam es an dieser Stelle zur Anwendung von flexiblen Hydraulik-Panzerschläuche (siehe Abbildung 4.8b). Die dickwandigen Stahlrohre dienten als Schutz gegen mechanische Einwirkungen und Feuchtigkeit, aber gleichzeitig auch als Abschirmung[2] für die Signalkabel. Damit konnten diese vom elektromagnetischen Feld des Starkstromkabels zur Stromversorgung des Rüttlermotors geschützt werden und gewährleistet war in weiterer Folge eine verlässliche, störungsfreie Signalgewinnung und Signalübertragung.

[2]Die Abschirmung elektrotechnischer Geräte und Einrichtungen dient dazu, elektrische oder magnetische Felder von diesen fernzuhalten oder umgekehrt, die Umgebung vor den von der Einrichtung ausgehenden elektrischen oder magnetischen Feldern zu schützen.

(a) Das angewendete Stahlrohr.



(b) Montage der Hydraulik-Panzerschläuche bei der elastischen Kopplung.

Abbildung 4.8: Führung der Signalkabel in dickwandigen Stahlrohren.

4.5.2 Arbeitsbegleitende Aufzeichnung von Verfahrensparametern

Wie in Abschnitt 3.3 eingehend diskutiert, haben Tiefenverdichtungsverfahren hinsichtlich der Verfahrensparameter eine ausführliche Dokumentation. Bestimmte Parameter werden von den ausführenden Firmen arbeitsbegleitend aufgezeichnet und in weiterer Folge zum Nachweis des Verdichtungserfolgs herangezogen. Im Zuge der gegenständlichen Verdichtungsversuche leitete man diese Daten direkt aus der Onboard-SPS-Steuerung des Verdichtungsgerätes weiter und zeichnete mit dem hinter der Fahrerkabine des Trägergerätes installierten Messdatenlogger laufend auf. Dabei handelt es sich um die folgenden Parameter:

- Stromaufnahme und Leistung des Rüttlermotors
- Stromfrequenz
- Druck in der Hydraulikanlage gesondert beim Absenken und Anheben des Rüttlers
- Durchflussmenge des Wassers zur Wasserspülung

Zusätzlich wurden die folgenden Verfahrensparameter messtechnisch erfasst:

- Rütteltiefe als vertikaler Abstand der Rüttlerspitze von der Geländeoberkante
- Gewicht des zugeführten Nachfüllmaterials

Zur Bestimmung der Rütteltiefe verwendete man eine Seilwinde, welche am Oberteil des Anbaumäklers montiert und der Seil am Führungsschlitten befestigt wurde. Somit erfolgte die Bestimmung der Rütteltiefe als Relativverschiebung zwischen Rüttler und Mäkler (siehe Abbildung 4.1). Das Gewicht des zugeführten Nachfüllmaterials wurde für die einzelnen Verdichtungsstrecken händisch protokolliert.

4.5.3 Instrumentierung zur Erfassung des Wellenfeldes an der Geländeoberfläche

Zur messtechnischen Erfassung des Wellenfeldes an der Geländeoberfläche wurde diese mit Messsensorik instrumentiert. Dabei kamen triaxiale Beschleunigungsaufnehmer des Typs

EpiSensor FBA ES-T der Firma *Kinemetrics* und Seismometer (Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer) des Typs *LE-3D/5s* der Firma *Lennartz Electronic GmbH* zur Anwendung. Die verwendeten *EpiSensoren FBA ES-T* und *LE-3D/5s* sind Messsensoren, die insbesondere für Erschütterungsmessungen geeignet sind. Die Datenblätter dieser Sensoren sind Anhang B zu entnehmen. Die Speicherung dieser Messdaten erfolgte mit einer Abtastfrequenz von 1000 Hz.

Das Messsystem auf der Geländeoberfläche wurde auf zwei Teilsysteme unterteilt, auf Fern- und Nahfeldsensoren. Die Sensoren im Nahfeld wurden regelmäßig bewegt. Diese wurden in der Umgebung des jeweiligen Verdichtungspunktes, in unterschiedlichen Abständen vom jeweiligen Rüttleransatzpunkt aufgestellt, um das Wellenfeld in der unmittelbaren Nähe des Rüttleransatzpunktes erfassen zu können (siehe Abbildung 4.9). Die Sensoren im Fernfeld blieben über die gesamte Versuchsserie in ihrer Position unverändert. Diese Anordnung der Messsensoren hatte den Vorteil, dass nicht alle Sensoren beim Positionswechsel des Tiefenrüttlers zu bewegen waren.

Abbildung 4.9: Triaxiale Beschleunigungsaufnehmer in unmittelbarer Nähe des Rüttleransatzpunktes (Nahfeld) mit den *Brimos Wireless* Einheiten für eine zeitlich synchrone Messdatenerfassung.

Sämtliche Sensoren waren mit ihrer positiven x-Achsenrichtung nördlich ausgerichtet. Die aktuelle Position der Sensoren wurde während der Versuchsdurchführung dokumentiert und bei der Messdatenauswertung berücksichtigt.

4.5.4 Zeitsynchronisation der Messdaten

Um sämtliche Messkanäle am Ende der Versuche in einem zeitlich synchronen Datensatz zusammenfassen zu können, war eine nachträgliche Zeitsynchronisation aller Messdaten notwendig. Für jeden Verdichtungsversuch wurde ein eigener Datensatz generiert, in dem

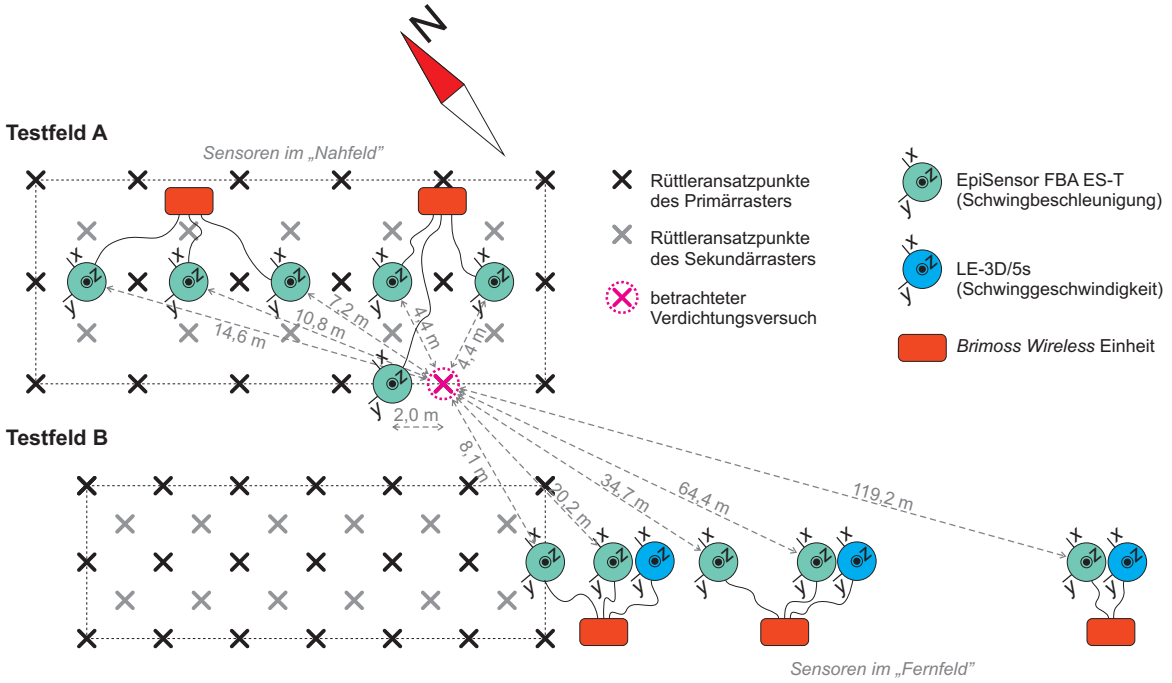


Abbildung 4.10: Instrumentierung zur Erfassung des Wellenfeldes an der Geländeoberfläche bei einem ausgewählten Verdichtungsversuch (Zeichnung nicht maßstäblich).

die Signale aller Sensoren zeitlich synchron abgespeichert sind.

Für die zeitlich synchrone Messdatenerfassung wurden *Brimos Wireless* Einheiten der Firma *VCE ZT GmbH* eingesetzt. Das *Brimos Wireless* System ist eine Eigenentwicklung der Firma, welches vorwiegend im Bereich der Bauwerksdiagnose seine Anwendung findet. Dabei handelt es sich um ein drahtloses Messsystem für zahlreiche Sensoren mit Systemzeitsynchronisation, Funk-Datenübertragung und autarker Energieversorgung. Die *Brimos Wireless* Einheiten sind in Abbildung 4.9 ersichtlich.

Für die Synchronisierung der Messkanäle wurden Schaltsignale von *IRIS I/O* Funkmodulen verwendet. Der Schnitt der Messdaten und die Zusammenfassung in einen Datensatz pro Verdichtungsversuch erfolgten nachträglich, im Zuge der Datenaufbereitung, anhand dieser Schaltsignale. Bei der Synchronisierung der Messsignale erreichte man eine μs-Genauigkeit.

4.6 Versuchsfeld

4.6.1 Anforderungen an das Versuchsfeld

Die wichtigsten Anforderungen an das Versuchsfeld entstanden im Zuge der Planung der experimentellen Untersuchungen. Diese sind folgende:

- Für die Rütteldruckverdichtung ideal geeignete Untergrundverhältnisse:
  - Grobkörniger Boden mit einem möglichst geringen Feinkornanteil

  - Möglichst hohes Verdichtungspotenzial (locker bis mitteldichte Lagerung)
  - Möglichst homogene Untergrundverhältnisse bis zu einer vergleichsweise großen Tiefe

- Möglichst erschütterungsarme Umgebung für eine störungsfreie Erfassung des Wellenfeldes an der Geländeoberfläche
- Ausreichend große Fläche für die einzelnen Testfelder, für die Messsensorik an der Geländeoberfläche und für die Baustelleneinrichtung

Nach einer Vorerkundung an mehreren potenziellen Standorten wurde das Versuchsfeld in einer Kiesgrube der Firma *Cemex* in der Obersteiermark, in der Nähe der Gemeinde Fisching, eingerichtet. Die großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen fanden im Sommer 2015 statt.

4.6.2 Unterteilung des Versuchsfeldes

Das Versuchsfeld wurde in vier Testfelder mit unterschiedlichen Verdichtungsrastern unterteilt. Abbildung 4.11 zeigt eine Aufnahme des Versuchsgeländes mit schematischer Darstellung der einzelnen Testfelder. Die Verdichtungspunkte fügten sich in einen Quadratraster ein. Eine tabellarische Übersicht der unterschiedlichen Verdichtungsraster auf den vier Testfeldern ist in Tabelle 4.1 vorzufinden.

Tabelle 4.1: Abstand der Rüttleransatzpunkte auf den vier Testfeldern.

	Primärraster	**Sekundärraster**	**Abstand der Verdichtungspunkte**
Testfeld A	$4,0 \times 4,0\,\mathrm{m}$	ja	$2,8\,\mathrm{m}$
Testfeld B	$3,0 \times 3,0\,\mathrm{m}$	ja	$2,1\,\mathrm{m}$
Testfeld C	$2,5 \times 2,5\,\mathrm{m}$	ja	$1,4\,\mathrm{m}$
Testfeld SCPT	$5,0 \times 5,0\,\mathrm{m}$	nein	$5,0\,\mathrm{m}$

In den Testfeldern *A*, *B* und *C* erfolgte die Verdichtung in zwei Arbeitsgängen. Im ersten Arbeitsgang wurde in einem quadratischen Raster verdichtet, unter der Bezeichnung „Primärraster“. Im zweiten Arbeitsgang folgte die Verdichtung in den Diagonalpunkten des ursprünglichen Rasters, im „Sekundärraster“. Die Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde erhielten ein eigenes Testfeld (Testfeld *SCPT*) ohne Sekundärraster. Die Austeilung der Rüttleransatzpunkte ist in Abbildung 4.12 dargestellt. In dieser Abbildung sind zusätzlich zum Verdichtungsraster die unterschiedlichen Untergrunderkundungsmaßnahmen auf dem Versuchsfeld eingetragen.

4.6.3 Untergrunderkundung auf dem Versuchsfeld

Vor Durchführung der Verdichtungsversuche wurde auf dem Versuchsfeld ein umfangreiches Untergrunderkundungsprogramm abgewickelt. Dieses erfolgte mit Kernbohrungen

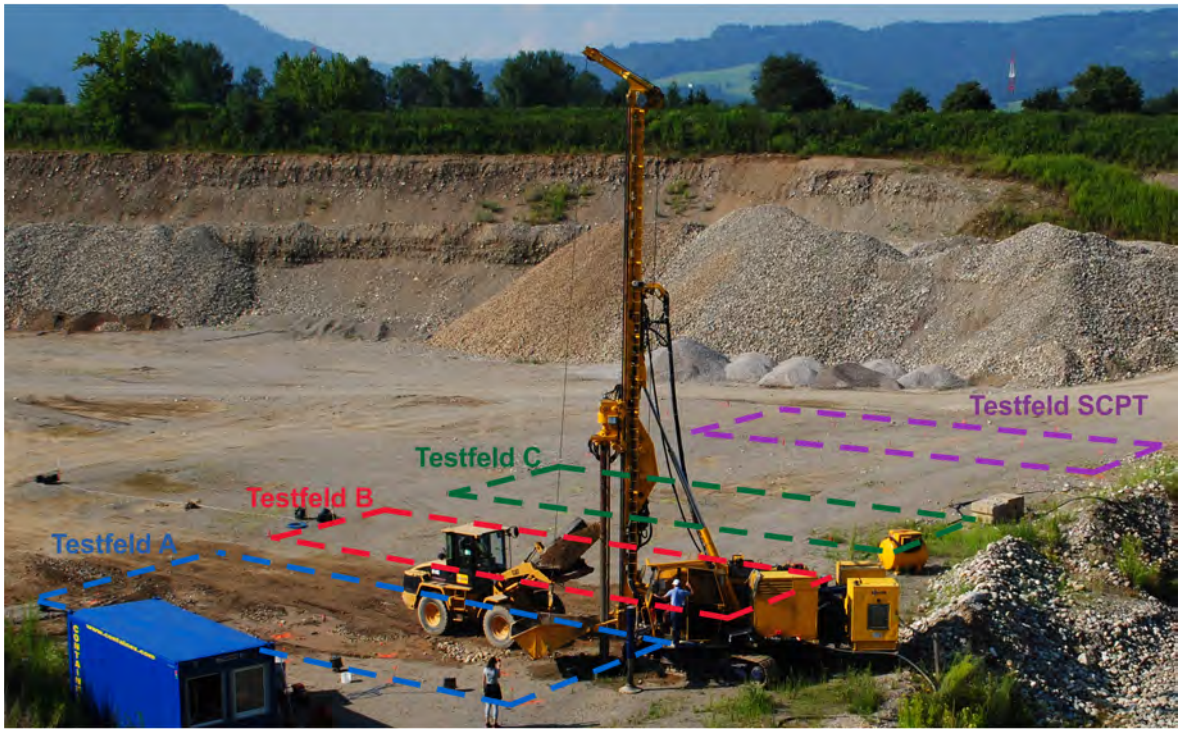


Abbildung 4.11: Versuchsfeld in der Kiesgrube der Firma *Cemex* in Fisching, unterteilt in vier Testfelder [101].

und Schweren Rammsondierungen (DPH). Es wurden zahlreiche Rammsondierungen abgeteuft, in Anwendung zur indirekten Beurteilung des Verdichtungserfolgs. Diese Maßnahmen bildeten gleichzeitig einen integrierten Teil der Untergrunderkundung. Rammsondierungen zur Beurteilung des Verdichtungserfolgs fanden zusätzlich auch nach Abschluss der Verdichtungsarbeiten statt.

Über Kernbohrungen und Rammsondierungen hinaus kam auf dem Versuchsfeld die seismische Drucksonde (SCPTu) zum Einsatz. Diese Untersuchungen wurden in erster Linie zur Ermittlung der Veränderung dynamischer Bodenkenngrößen zufolge Rütteldruckverdichtung herangezogen und folgten im Rahmen einer Untersuchungskampagne nach Abschluss der Verdichtungsarbeiten.

Die Ansatzpunkte der Kernbohrungen sowie Ramm- und Drucksondierungen sind in Abbildung 4.12 dargestellt.

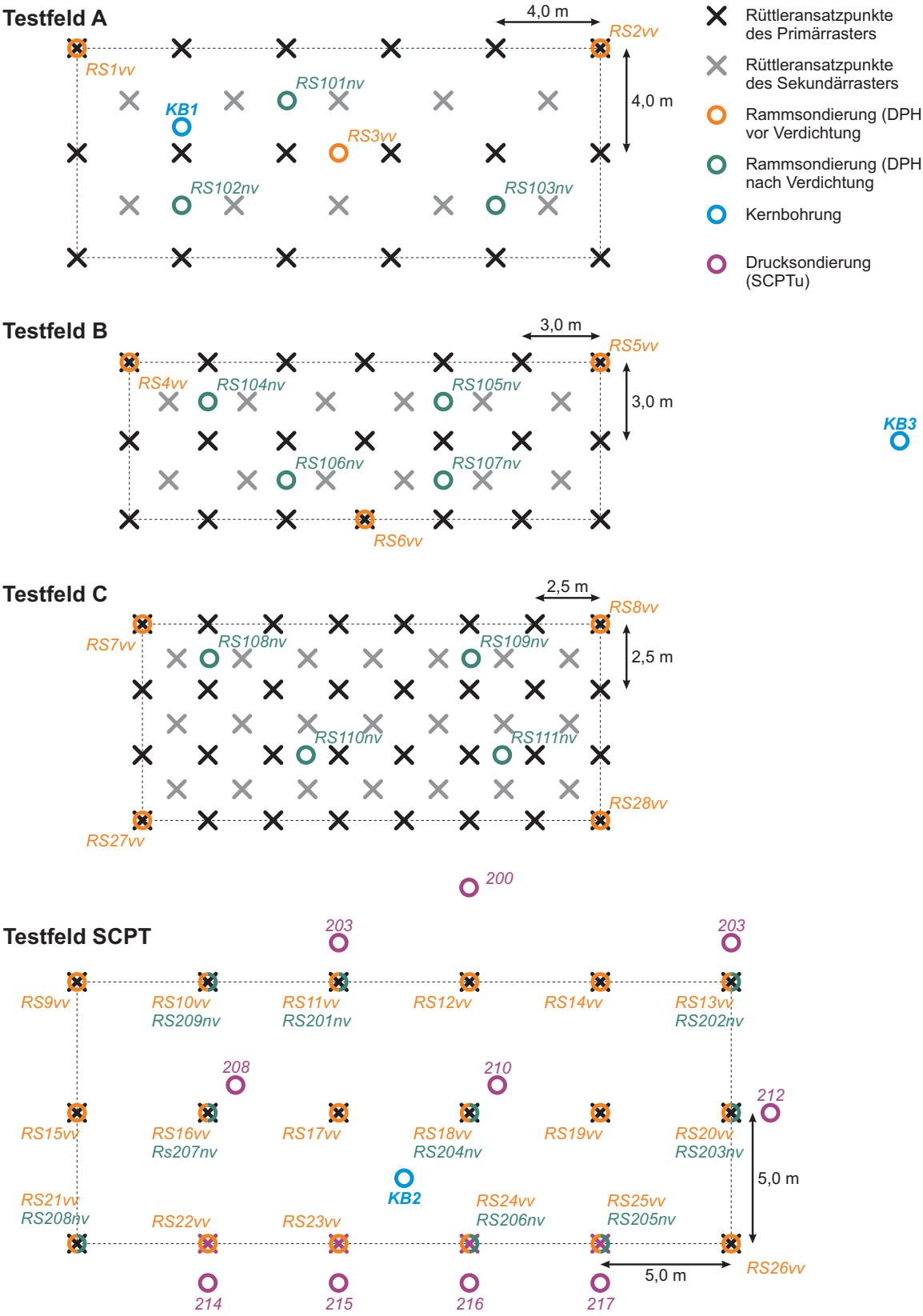


Abbildung 4.12: Schematische Darstellung der Austeilung der Rüttleransatzpunkte und Ansatzpunkte der Kernbohrungen sowie Ramm- und Drucksondierungen auf dem Versuchsfeld in Fisching.

Das Untersuchungsprogramm auf dem Versuchsfeld setzte sich aus folgenden Erkundungsmaßnahmen zusammen:

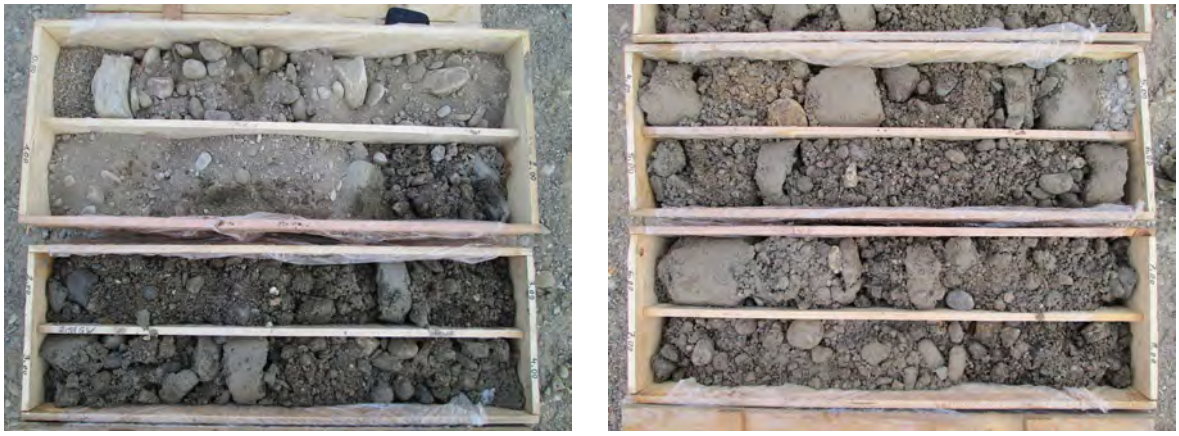
- Kernbohrungen: 2 Stk. bis 15,0 m, 1 Stk. bis 20,0 m Tiefe.
- Schwere Rammsondierung (DPH): 28 Stk. vor, 20 Stk. nach den Verdichtungsarbeiten.
- seismische Drucksondierung (SCPTu): 1 Stk. zur Erkundung des Untergrundes, 9 Stk. auf dem Testfeld SCPT, nach den Verdichtungsarbeiten.

Abbildung 4.13: Bohrprofile der Kernbohrungen auf dem Versuchsfeld in Fisching.

4.6.3.1 Kernbohrungen

Im Zuge der Untergrunderkundung wurden insgesamt drei Kernbohrungen abgeteuft, bis zu einer Tiefe von 15 m (KB1 und KB2) bzw. 20 m (KB3). Bis zur Erkundungstiefe fand

man vorwiegend leicht verkittete Kiese, stellenweise aber auch Steine und Blöcke vor. In den Kernbohrungen waren vereinzelt Einzelschichten mit deutlich höherem Feinkorn- und niedrigerem Kiesanteil erkennbar. Der Grundwasserspiegel wurde bei allen drei Kernbohrungen in einer Tiefe von 2,10 m unter Geländeoberkante angetroffen. Die Bohrprofile sind in Abbildung 4.13 ersichtlich. Abbildung 4.14 zeigt exemplarisch Kernkisten der Kernbohrung Nr. *KB2* für den Tiefenbereich $0,0 - 8,0$ m unter Geländeoberkante. Die Kernkisten sämtlicher Kernbohrungen sind in Anhang C angeführt.



(a) Tiefenbereich:
$0,0 - 4,0$ m unter Geländeoberkante.

(b) Tiefenbereich:
$4,0 - 8,0$ m unter Geländeoberkante.

Abbildung 4.14: Kernkisten der Kernbohrung Nr. *KB2*.

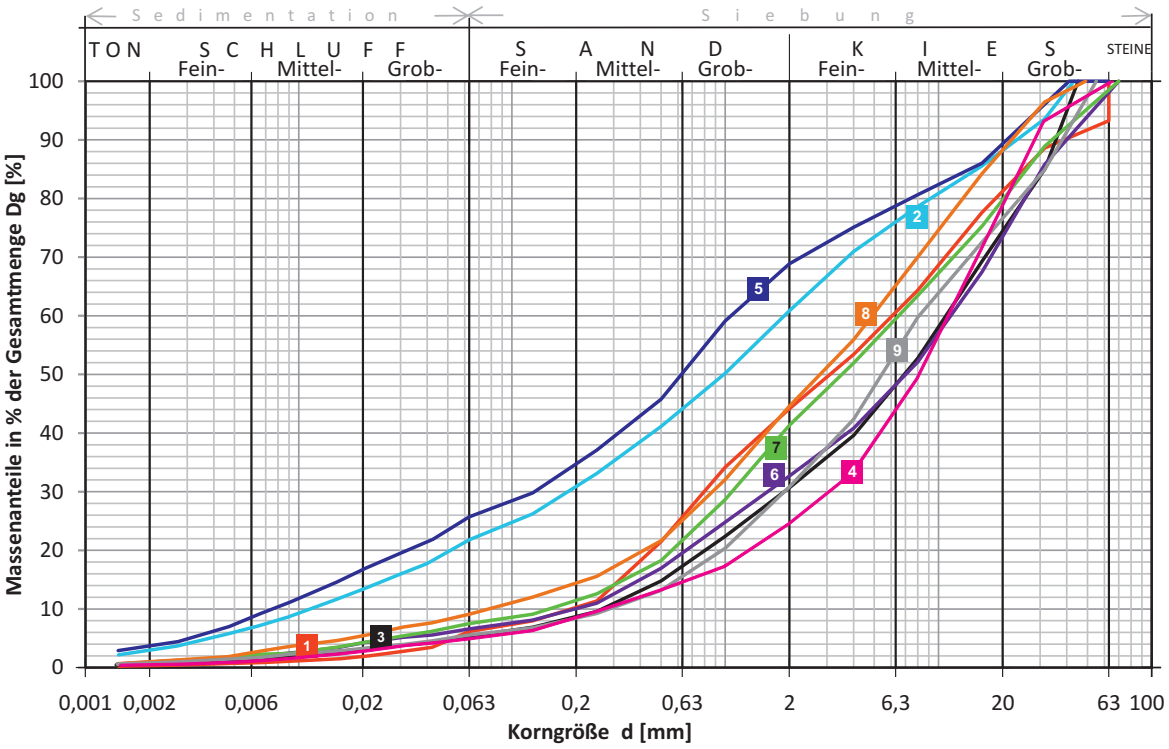


Abbildung 4.15: Korngrößenverteilung der entnommenen Bodenproben.

Aus den Bohrkernen sowie vom Nachfüllmaterial wurden Bodenproben entnommen

(siehe Abbildung 4.13) und die Korngrößenverteilung im Erdbaulaboratorium des *Institutes für Geotechnik* bestimmt. Diese sind in Abbildung 4.15 dargestellt. Die Korngrößenverteilung der Bodenproben Nr. *1*, *3*, *6*, *7*, *8* und *9* variiert in einer vergleichsweise schmalen Bandbreite. In Abbildung 4.15 ist auch die Korngrößenverteilung der beiden Bodenproben (Nr. *2* und *5*) dargestellt, jeweils aus einer Einzelschicht mit höherem Feinkornanteil entnommen. Als Nachfüllmaterial wurde anstehendes Boden verwendet (Nr. *4*). Der Anteil der einzelnen Kornfraktionen aller Proben ist in Tabelle 4.2 angeführt. Tabelle zeigt die Ungleichförmigkeitszahl C_u und die Krümmungszahl C_c der Kornverteilungslinien. Des Weiteren ist der Eignungsfaktor SN (suitability number) nach *Brown* [24] angegeben (vgl. Abschnitt 2.4). Die detaillierte Ergebnisse der Laboruntersuchungen sind im Anhang C sichtbar.

Tabelle 4.2: Kornverteilung der entnommenen Bodenproben.

Probennummer	**Kernbohrung**	**Entnahmetiefe**	**Kornverteilung [%]**				
			Steine	Kies	Sand	Schluff	Ton
1	KB1	$4,5 - 4,7$ m	6,7	49,1	38,0	5,8	0,4
2	KB1	$13,5 - 13,7$ m	0,0	39,1	39,1	18,8	3,0
3	KB2	$5,5 - 5,7$ m	0,0	69,4	25,3	4,7	0,6
4	Nachfüllmaterial		0,4	75,3	19,6	4,4	0,3
5	KB1	$5,0 - 5,2$ m	0,0	31,2	43,1	22,0	3,7
6	KB1	$5,5 - 5,7$ m	1,9	65,4	26,1	5,7	0,9
7	KB1	$2,0 - 2,3$ m	1,5	57,2	33,8	6,7	0,8
8	KB1	$6,0 - 6,3$ m	0,0	55,4	35,5	8,1	1,0
9	KB1	$7,7 - 8,0$ m	0,0	69,1	25,3	4,8	0,8

Tabelle 4.3: Ungelichförmigkeitszahl, Krümmungszahl und Eignungsfaktor nach *Brown* [24] der entnommenen Bodenproben.

Probennummer	**Ungleichförmigkeitszahl**	**Krümmungszahl**	**Eignungsfaktor**
	C_u [-]	C_c [-]	SN [-]
1	32,197	0,553	7,46
2	167,597	1,565	94,64
3	41,043	1,251	5,79
4	39,9	3,093	6,17
5	141,776	2,037	130,78
6	57,853	1,108	7,01
7	43,603	1,194	8,66
8	62,968	2,000	14,76
9	28,428	1,547	5,36

4.6.3.2 Rammsondierung (DPH)

Die Rammsondierungen vor den Verdichtungsarbeiten zur Erkundung des Untergrundes wurden bis zu einer Tiefe von 12,0 m bzw. 15,0 m unter Geländeoberkante abgeteuft. Diese dienten auch als Grundlage zur Beurteilung des Verdichtungserfolgs. An den Testfeldern *A*, *B* und *C* waren jeweils 3 bis 4 Sondieransatzpunkte angeordnet. Auf dem *SCPT*-Testfeld positionierte man die Ansatzpunkte der Rammsondierungen vor den Verdichtungsarbeiten an den künftigen Rüttleransatzpunkten.

Anhand der durchgeführten Rammsondierungen konnte nach EN 22476-2 [109] bis zu einer Tiefe von etwa 10 m auf eine lockere bis mitteldichte Lagerung des anstehenden Bodens geschlossen werden. Bis zu einer Tiefe von $1,5 - 2,0$ m unter Geländeoberkante war eine dicht bis sehr dicht gelagerte Deckschicht vorzufinden. Diese ist auf die oberflächennahe Verdichtung zufolge des Maschinenverkehrs in der Kiesgrube zurückzuführen. Abbildung 4.16 (links) zeigt exemplarisch das Diagramm einer Rammsondierung vor den Verdichtungsarbeiten. Die Verdichtungstiefe hat man auf Basis der durchgeführten Rammsondierungen einheitlich, für sämtliche Verdichtungsversuche bei einer Tiefe von 9,0 m unter Geländeoberkante festgelegt.

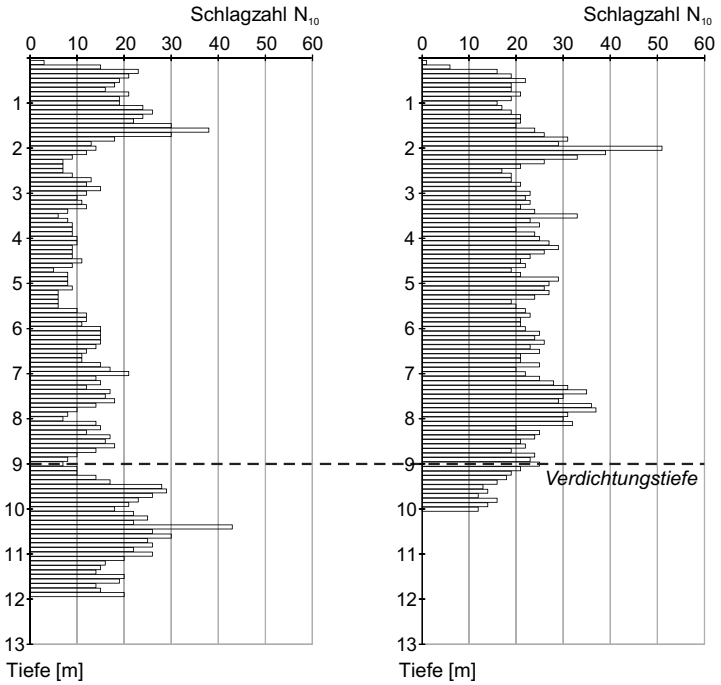


Abbildung 4.16: Diagramm einer Schweren Rammsondierung (DPH) jeweils vor (links) und nach (rechts) den Verdichtungsarbeiten.

Für die Überprüfung des Verdichtungserfolgs, führte man Rammsondierungen auch nach den Verdichtungsarbeiten durch. Diese wurden bis zu einer maximalen Tiefe von 10,0 m unter Geländeoberkante abgeteuft. In Abbildung 4.15 (rechts) ist exemplarisch das Diagramm einer Rammsondierung nach den Verdichtungsarbeiten angeführt. Abbildung 4.17 zeigt die Einhüllenden und die Mittelwerte der Schlagzahlen aller Rammsondierungen, jeweils vor und nach den Verdichtungsarbeiten angeführt. Dabei sind die Testfeldern *A*, *B*

und *C* differenziert betrachtet.

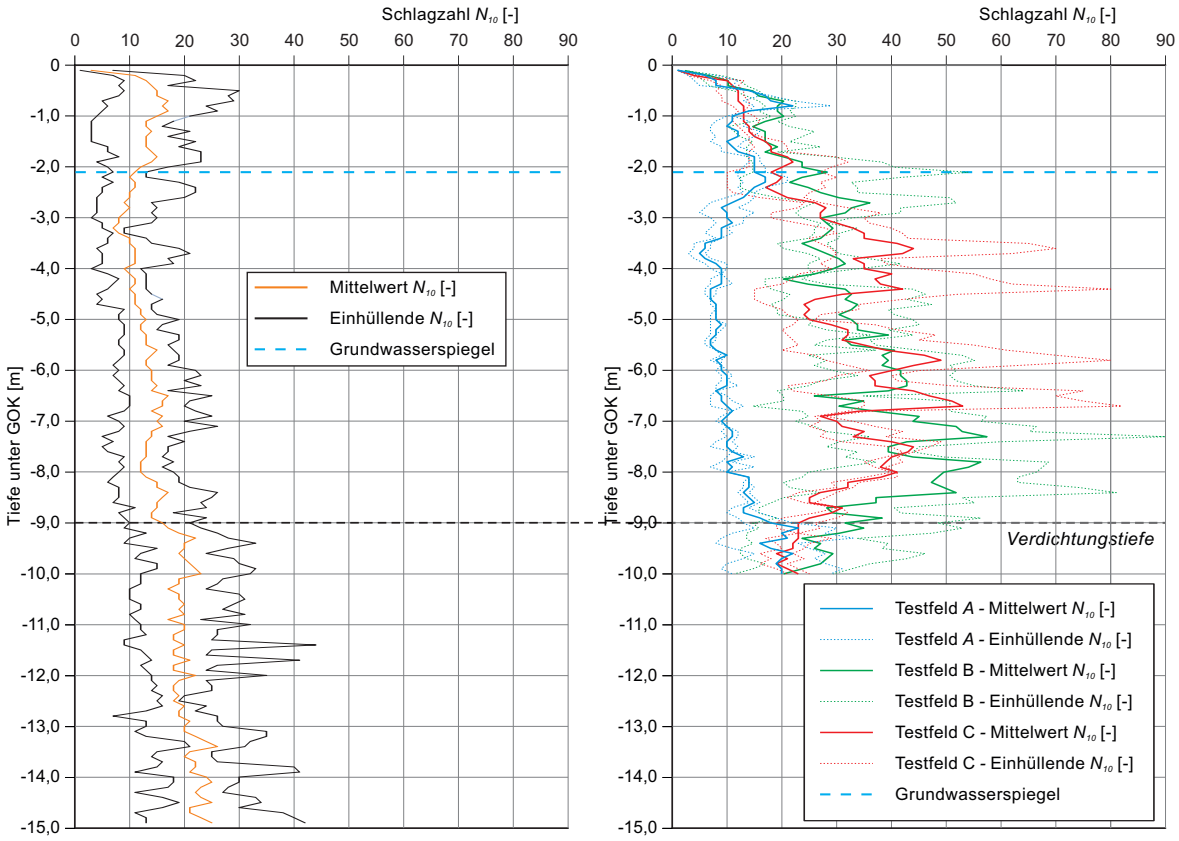


Abbildung 4.17: Schwere Rammsondierungen (DPH) – Einhüllende und Mittelwert der Schlagzahlen vor (links) und nach (rechts) den Verdichtungsarbeiten.

Die detaillierte Auswertung zur Rammsondierungen zur Überprüfung des Verdichtungserfolgs in zusammenhängenden verdichteten Bereichen (auf den Testfeldern *A*, *B* und *C*) ist in Kapitel 7 vorzufinden. Die Untersuchung von einzelnen Verdichtungsstrecken mittels Rammsondierung (auf dem Testfeld *SCPT*) ist in Kapitel 9 ausführlich behandelt.

4.6.3.3 Seismische Drucksondierung (SCPTu)

Die seismische Drucksonde wurde in erster Linie zur Bestimmung der Veränderung dynamischer Bodenkenngrößen zufolge Rütteldruckverdichtung angewendet. Die Versuchsdurchführung sowie die Auswertung und Interpretation der Messergebnisse sind Gegenstand von Kapitel 9. Die Sondierung Nr. *200* wurde zur Erkundung des Untergrundes, im Bereich zwischen den Testfeldern *C* und *SCPT*, im unverdichteten Boden abgeteuft (siehe Abbildung 4.12). In Abbildung 4.18 sind der Spitzendruck q_c, die lokale Mantelreibung f_s, der lokale Porenwasserdruck u und das Reibungsverhältnis R_f und die Scherwellengeschwindigkeit v_s bei dieser Sondierung über die Tiefe dargestellt. Der Untergrund wurde nach dem Diagramm von *Robertson* [121] vorwiegend als sandiger Kies und Sand klassifiziert. Die Punktwolke der identifizierten Wertepaare ist im Klassifizierungsdiagramm violett markiert. Die Bodenklassen sind am Diagramm des Reibungsverhältnisses farblich gekennzeichnet.

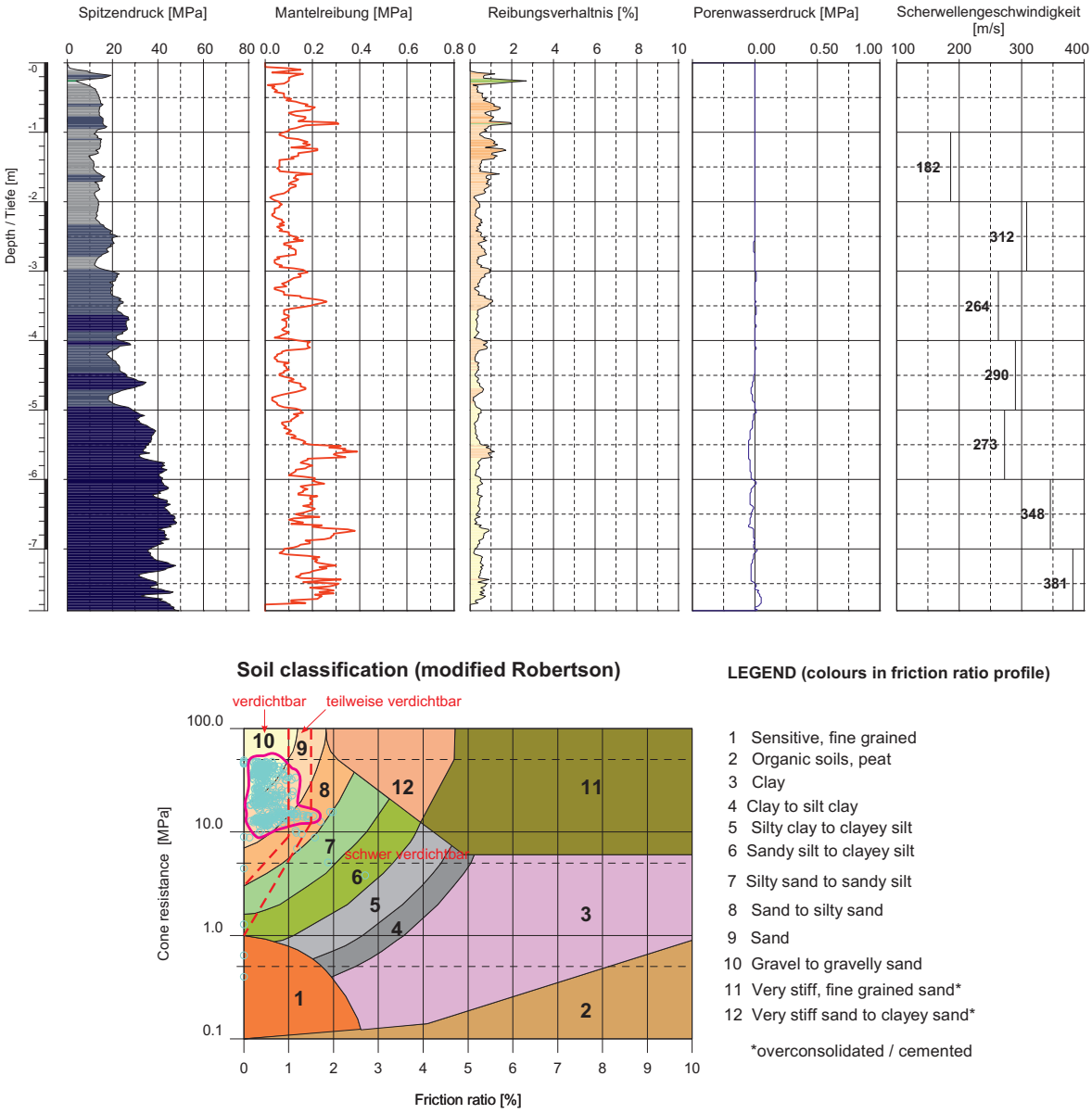


Abbildung 4.18: Spitzendruck q_c, die lokale Mantelreibung f_s, der lokale Porenwasserdruck u, das Reibungsverhältnis R_f und die Scherwellengeschwindigkeit v_s bei einer seismischen Drucksondierung zur Erkundung des Untergrundes. Bodenklassifizierung nach *Robertson* [121], mit Beurteilung der Verdichtbarkeit nach *Massarsch* [88].

4.7 Ablauf der Verdichtungsversuche

Es war geplant, im Zuge der experimentellen Untersuchungen möglichst viele Verdichtungsversuche und eine möglichst große Anzahl an gleichartigen Versuchen durchzuführen. Diese ermöglichte sich wiederholende Ereignisse im Rüttler-Boden Interaktionssystem mehrfach zu dokumentieren und damit eventuelle Fehlmessungen und Anomalien identifizieren bzw. ausschließen und insbesondere die Reproduzierbarkeit der Versuche untersuchen und analysieren zu können. Der Ablaufplan der Verdichtungsversuche wurde flexibel gestaltet, um dessen Adaptierbarkeit auf Basis von neuen Erkenntnissen im Zuge der Versuchsdurchführung zu sichern.

Die Koordination der Verdichtungsversuche erfolgte vor Ort, von einer Leitstelle im Messcontainer aus. Von der Leitstelle aus wurde auch die *IRIS I/O* Master-Einheit zur späteren Synchronisierung der Messdaten bedient. Dank des auf dem Versuchsfeld eingerichteten WLAN-Netzwerks konnten die Messsignale vor Ort in quasi-Echtzeit beobachtet werden. Dadurch war es möglich, kritische Parameter – wie beispielsweise die aktuelle Temperatur der Sensoren – laufend zu überprüfen oder einen eventuellen Ausfall von Sensoren frühzeitig zu erkennen und darauf bei Bedarf umgehend zu reagieren. Um die Messsensorik von übermäßig hohen Temperaturen zu schützen, beobachtete man die Temperatur der am Rüttlerkörper installierten Beschleunigungsaufnehmer laufend und bei übermäßig hohen Sensortemperaturen brach den jeweiligen Verdichtungsversuch ab.

Hier folgt ein Überblick der durchgeführten Verdichtungsversuche, die in den nachfolgenden Kapiteln, im Zuge der Auswertung und Interpretation der aufgezeichneten Messdaten, eingehend diskutiert werden. Die durchgeführten Verdichtungsversuche lassen sich folgenden vier Gruppen zuordnen:

- Rüttlerschwingung frei hängend in der Luft
- Standardmäßiger Rüttlerbetrieb
- Parametervariationen im standardmäßigen Rüttlerbetrieb
- Sonderversuche

4.7.1 Rüttlerschwingung frei hängend in der Luft

Als Grundlage für die Auswertung der Verdichtungsversuche wurde der Tiefenrüttler im Zuge der experimentellen Untersuchungen zunächst in der Luft frei hängend angeregt und das Bewegungsverhalten des unbehindert schwingenden Rüttlerkörpers messtechnisch beobachtet und dokumentiert. Durch die Ergebnisse dieses Experimentes kann das Bewegungsverhalten in der Luft und im Boden gegenübergestellt werden. Das Bewegungsverhalten des in der Luft frei hängenden Tiefenrüttlers ist Abschnitt 5.3.1 zu entnehmen, die Gegenüberstellung des Bewegungsverhaltens in der Luft und im Boden erfolgt in Abschnitt 5.3.2. Dieses Experiment bildete in weiterer Folge eine äußerst wertvolle Grundlage für die analytische Modellierung des Rüttler-Boden Interaktionssystems.

4.7.2 Standardmäßiger Rüttlerbetrieb

Generell gilt für die Rütteldruckverdichtung, dass heutzutage der Wissensstand der ausführenden Firmen primär auf Erfahrungen aus der Ausführungspraxis resultiert. Bei diesem Verfahren spielt daher die Erfahrung des Baustellenpersonals – vor allem der Gerätefahrer – eine zentrale Rolle. Aus diesem Grund wurde von der Firma *Keller Grundbau* für die experimentellen Untersuchungen Baustellenpersonal mit langjähriger Erfahrung im Bereich der dynamischen Tiefenverdichtung ausgewählt.

Die messtechnische Beobachtung der Arbeit vom erfahrenen Gerätefahrer wurde während der Versuchsdurchführung in den Vordergrund gestellt. Ein großer Teil der bearbeiteten Verdichtungsstrecken wurde im standardmäßigen Rüttlerbetrieb, ohne jegliche Vorgabe für die Verfahrensparameter, nach Ermessen eines erfahrenen Gerätefahrers der Firma *Keller* hergestellt.

Im standardmäßigen Rüttlerbetrieb wurde der Tiefenrüttler in der ersten Arbeitsphase bis zur geplanten Verdichtungstiefe einvibriert. Anschließend erfolgte die Verdichtung von unten nach oben im Pilgerschrittverfahren. Dabei wurde der Tiefenrüttler periodisch, etwa um 90 bis 100 cm angehoben und anschließend etwa um 50 bis 70 cm wieder in den zu verdichtenden Boden abgesenkt. Der Gerätefahrer hat Absenk- und Hebevorgang im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte wurde manuell gesteuert, und den Maß des Anhebens und des Absenkens bei den einzelnen Verdichtungsschritten gewählt. Das Absenken des Rüttlers erfolgte bei den einzelnen Verdichtungsschritten bei annähernd konstanter Eindringgeschwindigkeit. Den Verdichtungsvorgang hat man bei einer konstanten Rüttlerfrequenz von 50 Hz durchgeführt.

Das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers während der Verdichtung im Standardbetrieb ist in Abschnitt 5.3.2 eingehend diskutiert.

4.7.3 Parametervariationen im standardmäßigen Rüttlerbetrieb

Ausgewählte Verdichtungsstrecken wurden mit vorgegebenen, vom standardmäßigen Betrieb geringfügig abweichenden Verfahrensparametern bearbeitet. Im Zuge dieser Parametervariationen entsprach der Verdichtungsvorgang prinzipiell jenem im standardmäßigen Rüttlerbetrieb, man hat lediglich geringfügige Modifikationen vorgenommen, um den Einfluss diverser Parameter auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers systematisch erkunden zu können.

Bereits im Zuge der Durchführung der Experimente konnte erkannt werden, dass die Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden mit zunehmender Rütteltiefe ansteigt und gleichzeitig das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers maßgeblich beeinflusst. Aus diesem Grund wurde im Zuge der durchgeführten Parametervariationen besonders die Untersuchung des Einflusses der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers in den Vordergrund gestellt. Im Zuge der Versuchsdurchführung hat man – analog zum standardmäßigen Rüttlerbetrieb – im Pilgerschrittverfahren verdichtet. Bei diesen Versuchen wurde der Absenkvorgang im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte – gegenüber dem standardmäßigen Rüttlerbetrieb – nicht bei einer aus Sicht des Gerätefahrers optimalen Absenktiefe abgebrochen, sondern weitergeführt. Dadurch aktivierte man das Eigengewicht der Tragraupe zu einem deutlich höheren Maß als im Standardbetrieb, wodurch eine deutlich höhere Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden ergab.

Der Einfluss der erhöhten Kontaktspannung auf das Bewegungsverhalten ist Gegenstand von Abschnitt 5.3.3 in Gegenüberstellung zum standardmäßigen Rüttlerbetrieb.

4.7.4 Sonderversuche

Um diverse Prozesse im Untergrund während der Rütteldruckverdichtung näher betrachten zu können, kam es im Zuge der experimentellen Untersuchungen zu Verdichtungsversuche, bei denen der Arbeitsprozess von jenem im standardmäßigen Rüttlerbetrieb maßgeblich abwich.

Der Einfluss der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden auf das Bewegungsverhalten wurde über den oben beschriebenen Parametervariationen hinaus auch im Zuge von Sonderversuchen näher untersucht. Einer dieser Versuche ist in Abschnitt 5.3.4.1 beschrieben.

Unabhängig davon, ob die Rütteldruckverdichtung unter- oder oberhalb des Grundwasserspiegels erfolgt, stellt das Zuführen von Wasser über Wasseraustritte an diversen Positionen auf dem Rüttlerkörper generell einen wesentlichen Bestandteil des Rütteldruckverfahrens dar. Die Ergebnisse der Experimente haben nachgewiesen, dass die Wasserspülung das Bewegungsverhalten des Rüttlers ebenfalls beeinflusst. Der Einfluss der Durchflussmenge des Wassers auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers wurde im Rahmen eines Sonderversuches näher untersucht. Abschnitt 5.3.4.2 befasst sich mit diesem.

Kapitel 5

Rüttlerbewegung, Vorgänge im dynamischen Rüttler-Boden Interaktionssystem

5.1 Einleitung

Durch die horizontale Schwingung des Tiefenrüttlers wird der Boden in Schwingung versetzt, gleichzeitig beeinflusst den Tiefenrüttler die Reaktion des Bodens in seinem Bewegungsverhalten. Das dynamische Rüttler-Boden Interaktionssystem stellt ein hochkomplexes System dar. Die Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem sind nicht unmittelbar zu beobachten, zudem ist eine messtechnische Erfassung dieser Vorgänge nur beschränkt möglich. Aus diesem Grund konnten diese bis dato auf Basis von Erfahrungen aus der Ausführungspraxis bzw. experimentellen und theoretischen Untersuchungen (siehe Kapitel 2) erst zum Teil nachvollzogen und beschrieben werden.

Das grundlegende Verständnis der wesentlichen physikalischen Vorgänge während des Verdichtungsprozesses stellt jedoch eine wesentliche Voraussetzung bei der Entwicklung der Grundlagen eines Systems zur arbeitsintegrierten Qualitätskontrolle der Rütteldruckverdichtung dar. Die messtechnische Erfassung der dreidimensionalen Rüttlerbewegung im Rahmen der durchgeführten experimentellen Untersuchungen leistet einen fundamentalen Beitrag zum grundlegenden Verständnis wesentlicher physikalischer Vorgänge im hochkomplexen Rüttler-Boden Interaktionssystem, die bei der Bodenverdichtung mittels Rütteldruckverfahren eine zentrale Rolle spielen. Auf Basis der Ergebnisse der gegenständlichen experimentellen Untersuchungen lassen sich ausgehend vom Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers zahlreiche Prozesse im Rüttler-Boden Interaktionssystem identifizieren, die für den Verdichtungsvorgang während der Rütteldruckverdichtung verantwortlich sind.

Das vorliegende Kapitel gliedert sich in zwei Teile. Der erste Teil befasst sich eingehend mit der während der Versuchsdurchführung messtechnisch beobachteten und erfassten Rüttlerbewegung. Dabei wird das Bewegungsverhalten des in der Luft unbehindert schwingenden Tiefenrüttlers sowie anschließend dessen Bewegungsverhalten im Boden,

während des Verdichtungsvorgangs im Detail betrachtet und zugleich die wesentlichen Unterschiede zwischen dem Bewegungsverhalten in der Luft und im Boden aufgezeigt. Dies ist Gegenstand von Abschnitt 5.3. In Abbildung 5.1 (rechts) ist das prinzipielle Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers im Boden schematisch dargestellt.

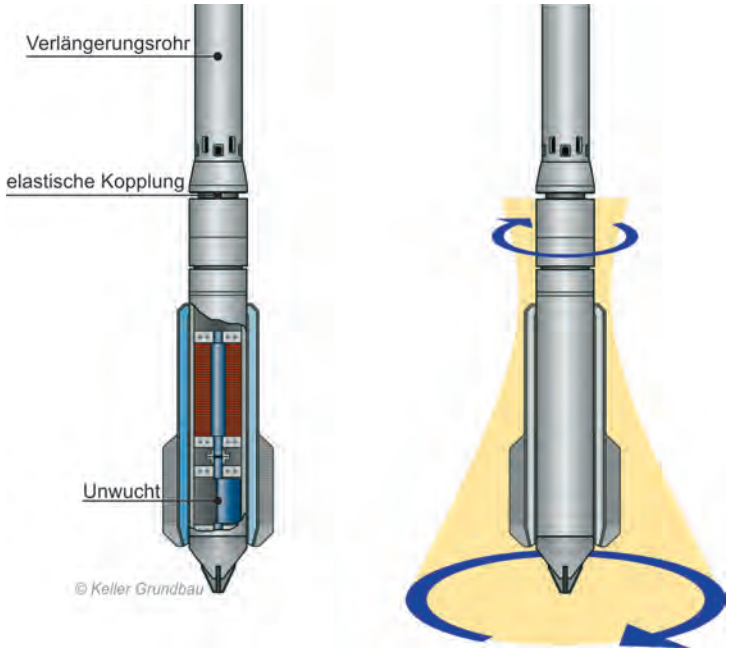


Abbildung 5.1: Prinzipielle Darstellung eines Tiefenrüttlers und dessen Bewegungsverhaltens im Boden (adaptiert nach [66]).

Der Verdichtungsvorgang wurde nicht nur im Zuge des standardmäßigen Rüttlerbetriebs untersucht, sondern auch in Parametervariationen und Sonderversuchen. Abschnitt 4.7 zeigt einen Überblick der durchgeführten Verdichtungsversuche. Auf den Ergebnissen dieser Experimente beruhend ist nun der Einfluss diverser Prozessparameter auf das Bewegungsverhalten beleuchtet. Aufbauend auf der messtechnisch beobachteten und erfassten Rüttlerbewegung können zahlreiche, aus der Sicht der Verdichtungswirkung maßgebliche bodenphysikalische Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem zur tiefreichenden Verdichtung des Bodens identifiziert und erläutert werden. Dieses Kapitel geht daher über eine allgemeine Beschreibung der Rüttlerbewegung hinaus.

Das zweite Teil des Kapitels ist einer Arbeitshypothese zur Erklärung der wesentlichen physikalischen Phänomene im Rüttler-Boden Interaktionssystem gewidmet. Bei der vorgestellten Arbeitshypothese wird der Verdichtungsvorgang vereinfacht betrachtet und auf eine Beschreibung essenzieller Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem reduziert.

Es sei jedoch angemerkt, dass das im Folgenden aufzuzeigende Bewegungsverhalten und die daraus abgeleitete Arbeitshypothese zur Erklärung wesentlicher physikalischer Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem ist aus heutiger Sicht ausschließlich für jene Randbedingungen als gültig anzusehen, die während der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen auf dem Versuchsfeld in Fisching vorherrschten. Im Zuge dieser Experimente wurden sämtliche Verdichtungsversuche in einem vergleichsweise homogenen Un-

tergrund durchgeführt (siehe Abschnitt 4.6.3). Bei sämtlichen Verdichtungsversuchen kam ein bestimmter Tiefenrüttler, der Rüttlertyp *M-1470* der Firma *Keller*, zur Anwendung (siehe Abschnitt 4.4). Die Erfahrungen aus der Ausführungspraxis zeigen dennoch, dass das beobachtete Verhalten des Rüttler-Boden Interaktionssystems für die gegenständlichen Randbedingungen als typisch anzusehen sind. Es sind allerdings unter abweichenden Randbedingungen unterschiedliche Arten von Systemverhalten möglich. Sowohl das angewendete Verdichtungsgerät als auch die Eigenschaften des zu verdichtenden Untergrundes haben dabei voraussichtlich einen entscheidenden Einfluss auf das Verhalten des Rüttler-Boden Systems.

5.2 Kenngrößen zur Charakterisierung des Bewegungsverhaltens

Zur Charakterisierung des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers werden die Schwingwegamplitude des Rüttlerkörpers und der Phasenunterschied zwischen der Unwuchtposition und der Auslenkrichtung des Rüttlerkörpers herangezogen.

5.2.1 Ermittlung der Schwingwegamplitude

Im Zuge der Auswertung der Messsignale der Beschleunigungsaufnehmer auf dem Rüttlerkörper (siehe Abschnitt 4.5.1) wurden die aufgezeichneten Beschleunigungssignale vom Drift[1] bereinigt. Sowohl bei der oberen als auch bei der unteren Messebene wurden die Signale der gegenüberliegenden Sensoren gemittelt. Durch zweifache numerische Integration dieser gemittelten Signale wurden schließlich die Zeitverläufe der Schwingwegamplituden des Rüttlerkörpers in der jeweiligen Messebene in die beiden horizontalen Achsenrichtungen x und y berechnet.

Im Zuge der Diskussion des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers werden im Folgenden die Schwingwegamplituden der oberen und unteren Messebenen, jedoch primär jene der Rüttlerspitze, betrachtet, die unter Voraussetzung einer Starrkörperbewegung des Rüttlerkörpers ermittelt wurde.

5.2.2 Ermittlung des Vorlaufwinkels

Bei Maschinen mit einer rotierenden Unwuchtmasse[2] ist immer ein bestimmter Phasenunterschied zwischen der Richtung der aus der Unwuchtrotation resultierenden Erregerkraft und der Richtung der Verschiebung der dynamisch aktiven Masse vorhanden. Dieser Phasenunterschied stellt eine essenzielle Kenngröße bei der Charakterisierung eines derartigen dynamischen Systems dar.

Ein Tiefenrüttler ist ein Gerät mit rotierender Unwuchtmasse. Bei einem Tiefenrüttler zeigt die Richtung der Erregerkraft von der Rotationsachse in Richtung Schwerpunkt der

[1] Der Begriff „Drift“wird für eine langsam veränderliche Störung verendet, die dem Nutzsignal überlagert [50].

[2] Maschinen mit rotierenden Unwuchtmassen können in der Regel als quadratisch angeregter Einmassenschwinger abgebildet werden. Eine Herleitung der allgemeinen Zusammenhänge für den quadratisch angeregten Einmassenschwinger kann Anhang A entnommen werden.

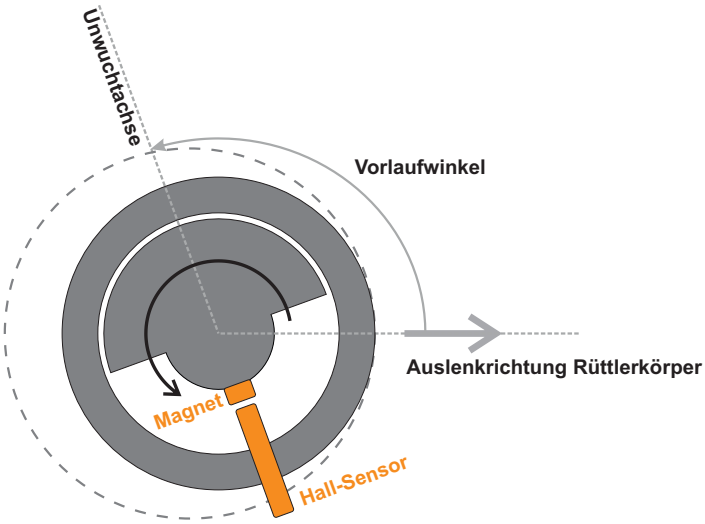


Abbildung 5.2: Definition des Vorlaufwinkels als Phasenunterschied zwischen der Unwuchtposition und der Auslenkrichtung des Rüttlerkörpers.

Unwuchtmasse, die Auslenkrichtung des Rüttlerkörpers entspricht der Richtung der Bewegung der dynamisch aktiven Masse. Während der Unwuchtrotation eilt der Schwerpunkt der Unwuchtmasse der Auslenkrichtung des Rüttlerkörpers voraus. Aufgrund des Vorauseilens der Unwuchtrotation gegenüber der Bewegung des Rüttlerkörpers hat *Fellin* [45] den Begriff „Vorlaufwinkel“ als Bezeichnung des Phasenunterschiedes zwischen der Unwuchtposition und der Auslenkrichtung des Rüttlerkörpers eingeführt. Da sich der Begriff Vorlaufwinkel in der Literatur bereits etabliert hat, wird er auch in der vorliegenden Arbeit zur Bezeichnung des Phasenunterschiedes zwischen der Unwuchtposition und der Auslenkrichtung des Rüttlerkörpers angewendet. Der Vorlaufwinkel kann sich theoretisch in der Bandbreite zwischen 0° und 180° bewegen (siehe Anhang A).

Die aktuelle Auslenkrichtung des Rüttlerkörpers ist aus den aufgezeichneten Beschleunigungssignalen bekannt, durch eine Analyse des Phasenunterschieds zwischen der durch den Hall-Sensor (siehe Abschnitt 4.5.1) erzeugten Signalspitze und des Beschleunigungssignals ist die Bestimmung des Vorlaufwinkels zu einem beliebigen Zeitpunkt während der Rüttlerschwingung möglich.

5.3 Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers

5.3.1 Bewegungsverhalten des in der Luft unbehindert schwingenden Tiefenrüttlers

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen wurde der Tiefenrüttler in der Luft frei hängend angeregt und das Bewegungsverhalten des unbehindert schwingenden Rüttlers messtechnisch beobachtet und dokumentiert. Das Zusammenführen der Zeitverläufe der Schwingwegamplituden des Rüttlerkörpers in den beiden horizontalen Achsenrichtungen x und y ermöglichte die Bewegung der jeweiligen Messebene in der horizontalen Ebene zu ermitteln. Das Diagramm auf der linken Seite der Abbildung 5.3 zeigt die horizontale Be-

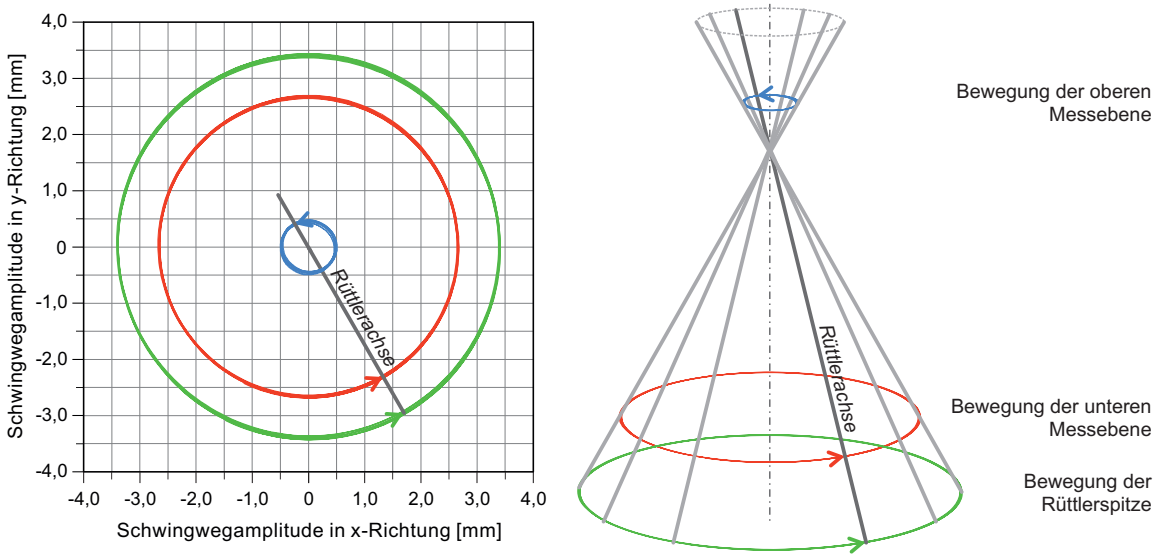


Abbildung 5.3: Bewegung der oberen und der unteren Messebene bzw. der Rüttlerspitze in der horizontalen Ebene (links), schematische Darstellung des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers mit deutlich überhöhter Darstellung der Schwingwegamplituden (rechts) während der unbehinderten Rüttlerschwingung in der Luft.

wegung der oberen (blau) und der unteren (rot) Messebene über zehn Erregerperioden bei konstanter Erregerfrequenz von etwa 50 Hz. Während der Rüttlerschwingung ist eine Starrkörperbewegung des Rüttlerkörpers vorauszusetzen. Falls die Position von zwei beliebigen Punkten des Rüttlerkörpers im dreidimensionalen Raum bekannt ist, ist die Position eines beliebigen Punktes des Rüttlerkörpers berechenbar. Die aktuelle Position der Rüttlerspitze wurde im Zuge der Messdatenauswertung rechnerisch ermittelt. Die Bewegung der Rüttlerspitze in der horizontalen Ebene ist in Abbildung 5.3 mit grüner Farbe gekennzeichnet.

In Abbildung 5.3 ist klar ersichtlich, dass im Zuge der unbehinderten Rüttlerschwingung in der Luft in beiden horizontalen Achsenrichtungen erwartungsgemäß die gleichen maximalen Schwingwegamplituden auftreten. Die einzelnen Punkte des Rüttlerkörpers bewegen sich somit in der horizontalen Ebene auf nahezu perfekten kreisförmigen Bahnen. Die maximale Schwingwegamplitude beträgt sowohl in x- als auch in y-Richtung in der oberen Messebene $0,48$ mm, in der unteren Messebene $2,65$ mm. Die obere und die untere Messebene bewegen sich dabei phasenversetzt. Ein Rotationszentrum bildet sich somit nicht in der elastischen Kopplung, sondern in diesem Fall im oberen Drittel des Rüttlerkörpers aus. Unter Voraussetzung einer Starrkörperbewegung lässt sich eine Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze von $3,48$ mm berechnen. In Abbildung 5.3 ist die Position des Rüttlerkörpers im dreidimensionalen Raum zu unterschiedlichen Zeitpunkten sichtbar. Die Rüttlerachse ist dabei mit grauen Geraden symbolisiert. In der Abbildung ist die Bewegung der oberen und der unteren Messebene bzw. der Rüttlerspitze deutlich überhöht angezeigt. Die Form der Einhüllende der Rüttlerbewegung in der Luft entspricht einem Doppelkegel. Wie anhand Abbildung 5.3 erkennbar ist, treten am oberen Ende des Rüttlerkörpers, bei der elastischen Kopplung, Horizontalverschiebungen auf. Durch die Scherverformung der elastischen Kopplung kann die Übertragung der horizontalen Schwingungen auf das

Verlängerungsrohr praktisch verhindert werden.

Abbildung 5.4 zeigt schematisch die Position der Unwuchtmasse im Vergleich zur Auslenkrichtung des Rüttlerkörpers. Während der unbehinderten Schwingung in der Luft wurde bei konstanter Erregerfrequenz von 50 Hz ein Vorlaufwinkel von etwa 178° ermittelt, welche eine überkritische Anregung des Tiefenrüttlers[3] indiziert.

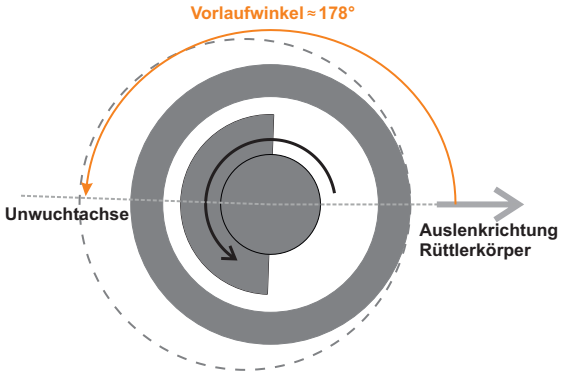


Abbildung 5.4: Schematische Darstellung des Vorlaufwinkels während der unbehinderten Schwingung in der Luft.

5.3.2 Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers im standardmäßigen Rüttlerbetrieb

Es folgt nun das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers im Boden, während des Verdichtungsprozesses im standardmäßigen Rüttlerbetrieb, auf Basis von aufgezeichneten Messergebnissen betrachtet. Im Zuge der Verdichtungsversuche im standardmäßigen Rüttlerbetrieb hat der erfahrene Gerätefahrer der Firma *Keller* sämtliche Verfahrensparameter, wie

- Rüttlerfrequenz,
- Eindringgeschwindigkeit beim Einvibrieren des Tiefenrüttlers sowie während der einzelnen Verdichtungsschritte des Verdichtungsvorgangs,
- Maß des Anhebens und Absenkens des Rüttlers während der einzelnen Verdichtungsschritte und
- Durchflussmenge des Wassers für die Wasserspülung

gewählt. Bei sämtlichen Verdichtungspunkten, im standardmäßigen Rüttlerbetrieb bearbeitet, erfolgte die Verdichtung im Pilgerschrittverfahren. Die Arbeit des erfahrenen Gerätefahrers wurde dabei messtechnisch beobachtet und erfasst. Abbildung 5.5 zeigt Messergebnisse, die während der Bearbeitung eines ausgewählten Verdichtungspunktes im standardmäßigen Rüttlerbetrieb aufgezeichnet worden sind sowie eine Gegenüberstellung des

[3]Eine Phasenverschiebung (Vorlaufwinkel) zwischen der aus der Unwuchtrotation resultierenden Erregerkraft und der Richtung der Verschiebung der dynamisch aktiven Masse (Rüttlermasse) von exakt 180° würde sich theoretisch bei einem ungedämpften System einstellen. Falls das System zu einem gewissen Maß gedämpft ist, ist eine Phasenverschiebung von exakt 180° nicht möglich (siehe Anhang A).

Bewegungsverhaltens während der unbehinderten Schwingung in der Luft und während des Verdichtungsvorgangs.

Für die Auswertung der Versuchsergebnisse werden die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und der Vorlaufwinkel zur Charakterisierung der Rüttlerbewegung herangezogen. In Abbildung 5.5 ist zusätzlich zum zeitlichen Verlauf der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und des Vorlaufwinkels die Rüttletiefe und der Druck in der Hydraulikanlage während des Absenkens des Rüttlers (Rüttleranpressdruck) über den gesamten Verdichtungsvorgang dargestellt. Die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze wurde analog zur unbehinderten Schwingung in der Luft, unter Voraussetzung einer Starrkörperbewegung des Rüttlerkörpers, auf Basis der Bewegung der oberen und der unteren Messebene berechnet. In Abbildung 5.5 zeigt lediglich die Schwingwegamplitude in x-Richtung.

Vor dem Beginn des Verdichtungsvorgangs wurde der Tiefenrüttler in der Luft hängend in Schwingung gebracht, wobei die Rüttlerfrequenz von null an beginnend auf 50 Hz gesteigert, konstant gehalten und wieder auf 0 Hz herabgeregelt wurde (Zeitintervall $t = 0 - 260$ s). Dabei ist das im Abschnitt 5.3.1 beschriebene Bewegungsverhalten erkennbar, mit einer Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze von 3,48 mm und mit einem Vorlaufwinkel von etwa 178°. Die Gegenüberstellung der Rüttlerbewegung in der Luft und der Rüttlerbewegung während des Verdichtungsvorgangs thematisiert Kapitel 6.

5.3.2.1 Bewegungsverhalten in der Arbeitsphase Einvibrieren

Im Zuge der Bearbeitung des betrachteten Verdichtungspunktes wurde der Tiefenrüttler – entsprechend dem üblichen Verfahrensablauf während der Rütteldruckverdichtung (siehe Abschnitt 2.2.1.2) – bis zur geplanten Verdichtungstiefe einvibriert, im vorliegenden Fall bis etwa 9,0 m Tiefe unter Geländeoberkante. Der standardmäßige Verfahrensablauf ist anhand des zeitlichen Verlaufs der Rütteltiefe[4] in Abbildung 5.5 erkennbar. Das Einvibrieren erfolgte bei einer annähernd konstanten Eindringgeschwindigkeit, bei einer konstanten Rüttlerfrequenz von etwa 50 Hz und bei einer konstanten Durchflussmenge des Wassers für die Wasserspülung.

[4] Die Rütteltiefe ist in der vorliegenden Arbeit als der vertikale Abstand der Rüttlerspitze von der Geländeoberkante definiert.

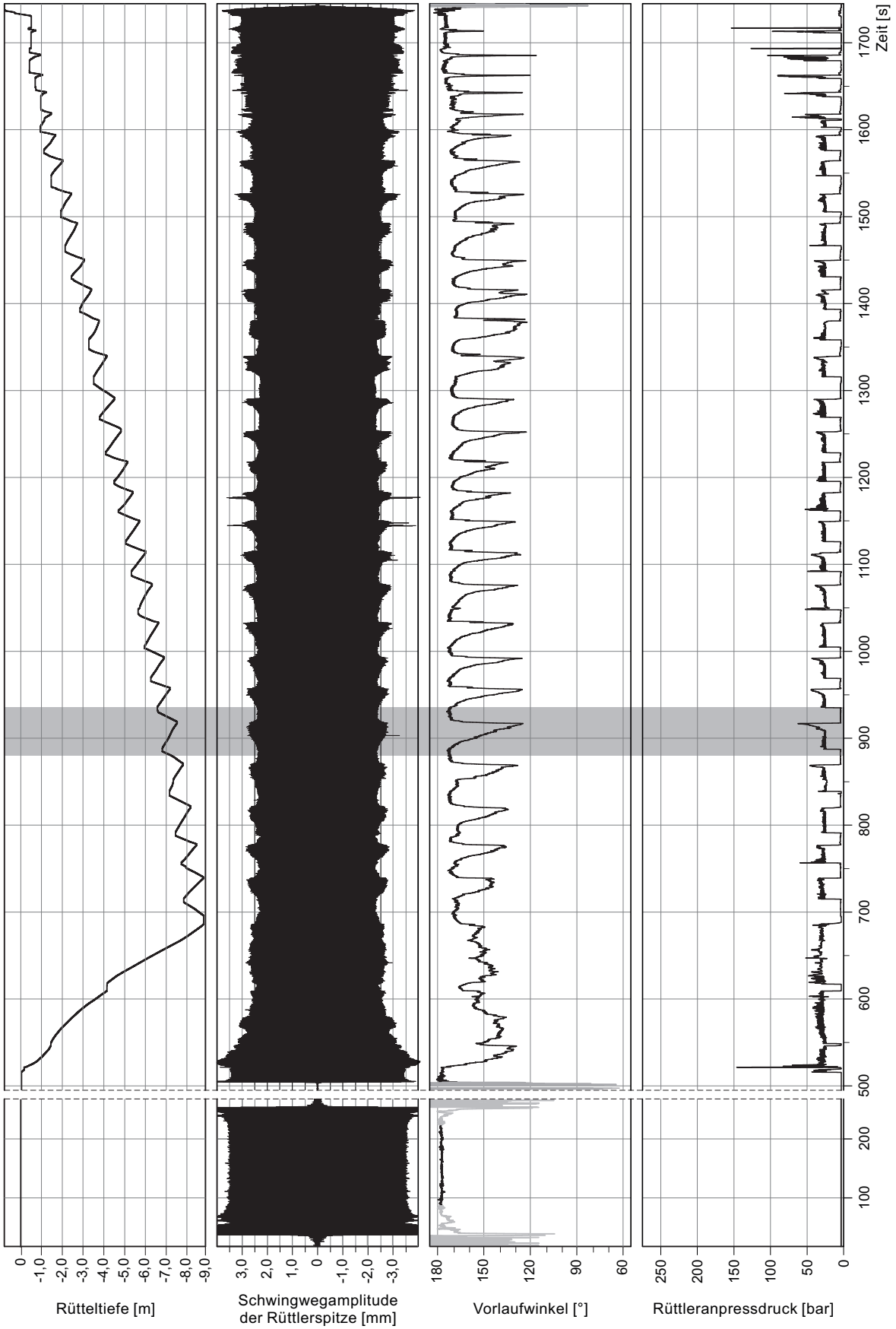


Abbildung 5.5: Rütteltiefe, Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel und Rüttleranpressdruck während der Rüttlerschwingung in der Luft und während des Verdichtugnsvorgangs im Zuge eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb [103].

Während des Einvibrierens ändert sich das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers laufend. Sowohl die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze als auch der Vorlaufwinkel schwanken in einer bestimmten Bandbreite. Die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze bewegt sich ab einer Rütteltiefe von 2,0 m in der Bandbreite von etwa 2,3 mm bis 3,0 mm (bei geringeren Rütteltiefen sind auch höhere Werte ersichtlich). Der Vorlaufwinkel sinkt am Beginn des Absenkvorgangs vergleichsweise rasch ab und nimmt anschließend bis zum Erreichen der geplanten Verdichtungstiefe Werte in einer Bandbreite von etwa 130° bis 170° an.

5.3.2.2 Bewegungsverhalten in der Arbeitsphase Verdichtung

Im standardmäßigen Rüttlerbetrieb erfolgt die Verdichtung nach dem Erreichen der geplanten Verdichtungstiefe, anschließend an der Arbeitsphase Einvibrieren, von unten nach oben. Wie auf dem zeitlichen Verlauf der Rütteltiefe erkennbar ist, wurde die Verdichtung im vorliegenden Fall im Pilgerschrittverfahren durchgeführt. Der Gerätefahrer hat dabei den Tiefenrüttler periodisch, etwa um 90 cm angehoben und anschließend etwa um 50 bis 70 cm wieder in den zu verdichtenden Boden abgesenkt. Somit lässt sich der Verdichtungsvorgang auf einzelne Verdichtungsschritte unterteilen. Gerätefahrer steuerte den Absenk- und Hebevorgang im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte manuell, er hat den jeweiligen Maß des Anhebens und des Absenkens bei den einzelnen Verdichtungsschritten nach eigenem Ermessen gewählt. Das Absenken des Rüttlers erfolgte bei den einzelnen Verdichtungsschritten bei einer annähernd konstanten Eindringgeschwindigkeit. Der Verdichtungsvorgang wurde analog zur Arbeitsphase Einvibrieren, bei einer konstanten Rüttlerfrequenz von etwa 50 Hz und bei einer konstanten Durchflussmenge des Wassers für die Wasserspülung, durchgeführt.

Im standardmäßigen Rüttlerbetrieb sind während der Arbeitsphase Verdichtung maßgebliche Änderungen im Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers erkennbar, die sich im zeitlichen Verlauf der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und des Vorlaufwinkels deutlich zeigen. Es ist eine klare Periodizität der beiden Parameter sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht ersichtlich.

Ein in Abbildung 5.5 exemplarisch hervorgehobener Verdichtungsschritt ist in Abbildung 5.6 vergrößert dargestellt. Die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze ist dabei zu den beiden Zeitpunkten $t_1 = 887$ s und $t_2 = 916$ s jeweils für ein Zeitfenster von 0,2 s gesondert dargestellt. Unmittelbar vor Beginn des Absenkvorgangs (im Zeitintervall $t = 885 - 888$ s), schwingt der Tiefenrüttler bei konstanter Rütteltiefe im Untergrund. Im betrachteten Zeitintervall ist die Schwingwegamplitude annähernd konstant und deutlich niedriger als während der unbehinderten Schwingung in der Luft. Sie beträgt beim betrachteten Verdichtungsschritt etwa 2,33 mm. Der Vorlaufwinkel ist in diesem Zeitintervall ebenfalls nahezu konstant, er ist betragsmäßig geringfügig kleiner im Vergleich zur unbehinderten Schwingung in der Luft und beträgt im vorliegenden Fall etwa 173°. Der Einfluss des umgebenden Bodens auf das Bewegungsverhalten ist anhand der Unterschiede in den beiden betrachteten Parametern im Zuge der Rüttlerschwingung in der Luft und im Boden eindeutig sicht-

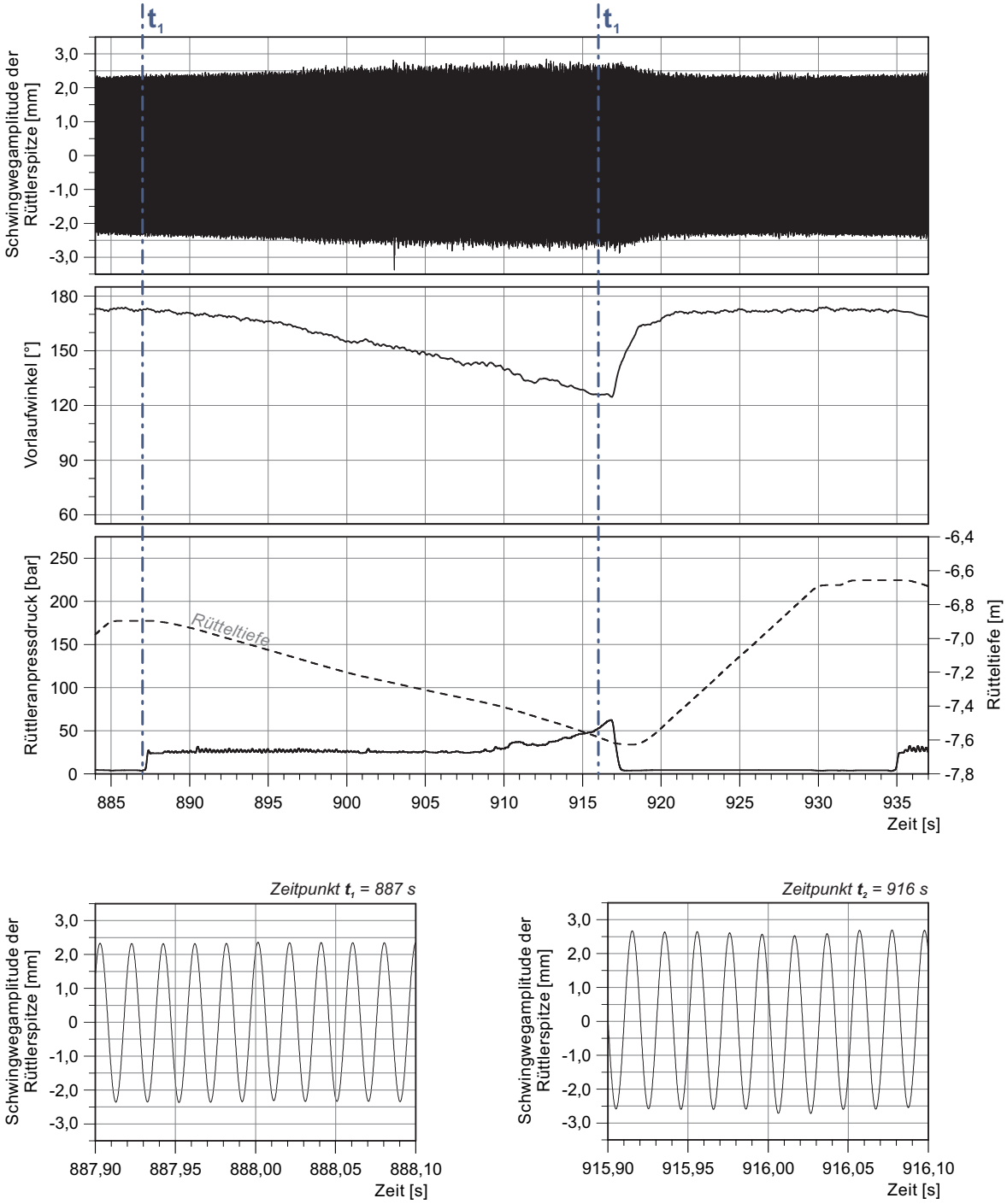


Abbildung 5.6: Rütteltiefe, Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel und Rüttleranpressdruck während eines Verdichtungsschrittes des in Abbildung 5.5 dargestellten Verdichtungsprozesses, mit Darstellung der Schwingwegamplitude zu den Zeitpunkten $t_1 = 887\,\mathrm{s}$ und $t_2 = 916\,\mathrm{s}$ für Zeitfenster von jeweils $0,2\,\mathrm{s}$.

bar. Da sich während der Schwingung bei konstanter Rütteltiefe das Bewegungsverhalten des Rüttlers nicht maßgeblich ändert, gilt die Rüttlerschwingung in diesem Zustand als quasi-stationär.

Abbildung 5.7 zeigt die Bewegung des Rüttlers in der oberen und unteren Messebenen

bzw. der Rüttlerspitze in der horizontalen Projektion (links) sowie schematisch das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers mit deutlich überhöhter Darstellung der Schwingwegamplituden (rechts) während der quasi-stationären Rüttlerschwingung im Boden, unmittelbar vor Beginn des Absenkvorgangs beim betrachteten Verdichtungsschritt zum Zeitpunkt $t_1 = 887\,\text{s}$. Es ist dabei zu erkennen, dass sich hierbei – gegenüber zur unbehinderten Rüttlerschwingung in der Luft – kein Bewegungspol ausbildet. Die Form der Einhüllende der Rüttlerbewegung entspricht während der Schwingung im Untergrund im Gegensatz zur doppelkegelartigen Einhüllenden der Rüttlerschwingung in der Luft, einem einschaligen Rotationshyperboloid[5].

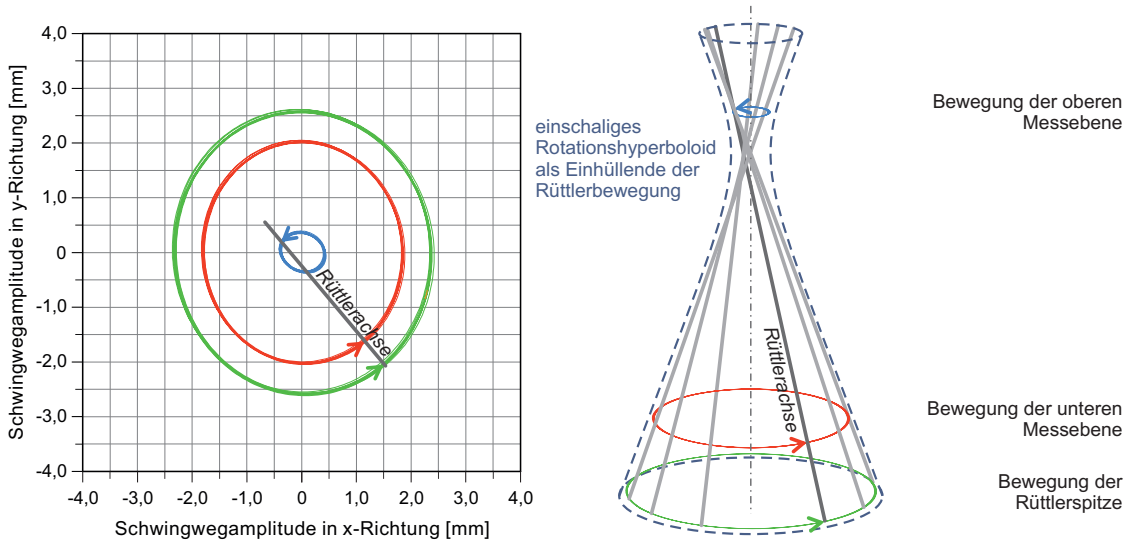


Abbildung 5.7: Bewegung des Rüttlers in der oberen und unteren Messebene bzw. der Rüttlerspitze in der horizontalen Projektion (links), schematische Darstellung des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers (rechts) während der Rüttlerschwingung im Boden, zum Zeitpunkt $t_1 = 887\,\text{s}$.

Beim betrachteten Verdichtungsschritt wird mit dem Absenkvorgang zum Zeitpunkt $t = 888\,\text{s}$ begonnen, der Tiefenrüttler wird mit annähernd konstanter Geschwindigkeit in den zu verdichtenden Bodenbereich abgesenkt. Dabei wird durch die Verdichtung sowie Verdrängung des Bodens sein Verdichtungszustand sukzessive verändert. Ab dem Beginn des Absenkvorgangs zeigt sich eine allmähliche Änderung im Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers.

Die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze zeigt mit zunehmender Rütteltiefe einen leichten Anstieg, beim betrachteten Verdichtungsschritt steigt sie bis zum Zeitpunkt $t_2 = 916\,\text{s}$ auf etwa $2{,}7\,\text{mm}$ an. Als Konsequenz des Anhebens des Tiefenrüttler nach dem Erreichen der maximalen Absenktiefe, sinkt die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze vergleichsweise schnell wieder auf das ursprüngliche Niveau von etwa $2{,}33\,\text{mm}$ und bleibt bis zum Beginn des kommenden Verdichtungsschrittes (Zeitpunkt $t = 936\,\text{s}$) nahezu konstant. Abbildung 5.8 zeigt die Bewegung der Rüttlerspitze in der horizontalen Ebene zu den bei-

[5]Das einschalige Rotationshyperboloid ist eine Fläche zweiter Ordnung, die man sich durch Rotation einer Geraden um eine zu ihr windschiefe Gerade (Achse) entstanden vorstellen kann [152].

den Zeitpunkten unmittelbar vor Beginn des Absenkvorgangs, zum Zeitpunkt $t_1 = 887\,\mathrm{s}$ (Abbildung 5.8a) bzw. unmittelbar vor dem Abbruch des Verdichtungsschrittes, zum Zeitpunkt $t_2 = 916\,\mathrm{s}$ (Abbildung 5.8b). Die Bewegung der Rüttlerspitze ist in beiden Fällen jeweils über zehn Erregerperioden dargestellt. Der Anstieg der Schwingwegamplitude ist klar ersichtlich, zum Zeitpunkt t_2 ist die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze größer als zum Zeitpunkt t_1 bzw. die Rüttlerbewegung ist zum Zeitpunkt t_2 unregelmäßiger. Zu beiden Zeitpunkten beschreibt die Rüttlerspitze eine nahezu kreisförmige Bahn, wobei im Gegensatz zur Rüttlerbewegung in der Luft die maximale Auslenkung in x-Richtung tendenziell geringfügig niedriger ist als in y-Richtung. Die unterschiedliche maximale Auslenkung in den beiden orthogonalen Achsenrichtungen ist auf die Rotationsasymmetrie des Rüttlerkörpers zufolge der beidseitig angeordneten Flügel zurückzuführen.

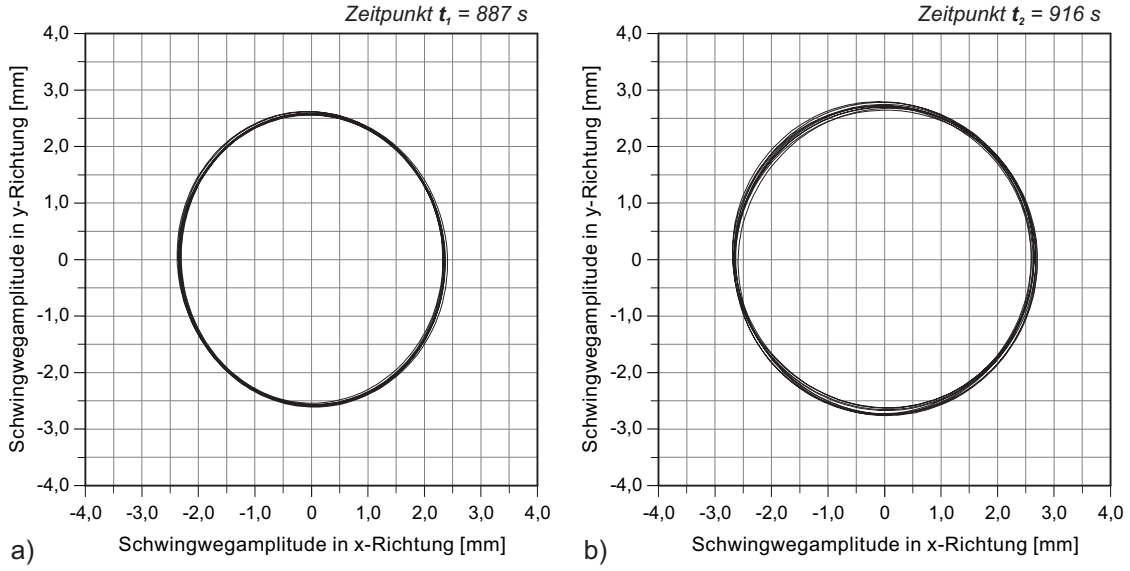


Abbildung 5.8: Bewegung der Rüttlerspitze in der horizontalen Ebene zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten: a) Zeitpunkt $t_1 = 887\,\mathrm{s}$ unmittelbar vor Beginn des Absenkvorgangs (links) und b) Zeitpunkt $t_2 = 916\,\mathrm{s}$ unmittelbar vor Abbruch des Verdichtungsschrittes (rechts) im standardmäßigen Rüttlerbetrieb [8].

Der Vorlaufwinkel zeigt während des Absenkvorgangs mit zunehmender Rütteltiefe eine markante Änderung und sinkt beim betrachteten Verdichtungsschritt vom ursprünglichen Wert von 173° bis zum Zeitpunkt t_2 auf etwa 125° ab. Im Zuge des anschließenden Anhebens des Rüttlers steigt der Vorlaufwinkel vergleichsweise rasch an, erreicht wieder das ursprüngliche Niveau von etwa 173° und bleibt analog zur Schwingwegamplitude bis zum Beginn des kommenden Verdichtungsschrittes beinahe konstant. Abbildung 5.9 zeigt schematisch die Position der Unwuchtmasse im Vergleich zur Auslenkrichtung des Rüttlerkörpers zu den beiden Zeitpunkten $t_1 = 887\,\mathrm{s}$ (Abbildung 5.9a) und $t_2 = 916\,\mathrm{s}$ (Abbildung 5.9b).

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen wurde der Tiefenrüttler an einem Anbaumäkler geführt eingesetzt (siehe Abschnitt 4.4). Im Falle einer Mäklerführung ist es möglich, eine erhöhte Anpresskraft über die Rüttlerspitze auf den Boden zu übertragen. Da

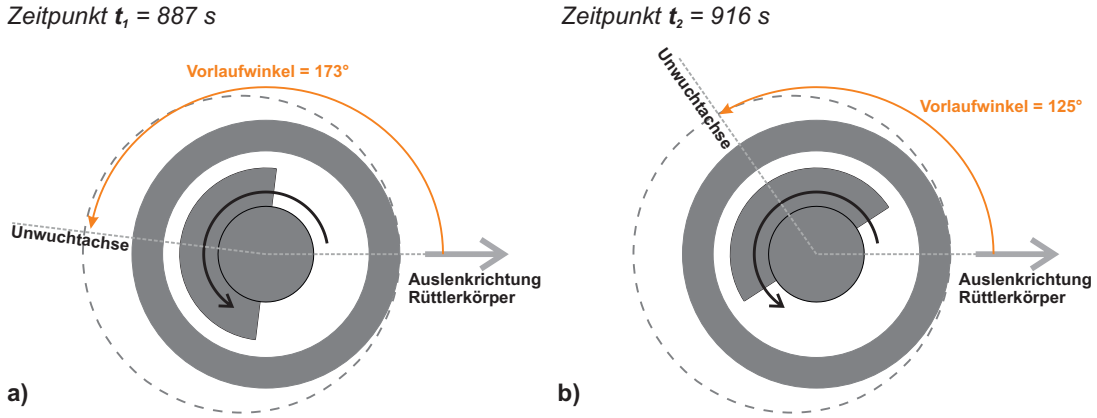


Abbildung 5.9: Schematische Darstellung des Vorlaufwinkels zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten: a) Zeitpunkt $t_1 = 887\,\text{s}$ unmittelbar vor Beginn des Absenkvorgangs (links) und b) Zeitpunkt $t_2 = 916\,\text{s}$ unmittelbar vor Abbruch des Verdichtungsschrittes (rechts) beim betrachteten Verdichtungsschritt.

hierbei eine Aktivierung des Eigengewichts der Tragraupe als Eindringhilfe erfolgt, wird die Anpresskraft oft auch als „Aktivierkraft“ bezeichnet. Die Steuerung der Anpresskraft erfolgt mittels Hydraulikanlage. Damit ist der Druck in der Hydraulikanlage (Rüttleranpressdruck) als indirekter Indikator für die Anpresskraft und damit für die Spannung zwischen Rüttlerspitze und Boden anzusehen. Der aktuelle Druck in der Hydraulikanlage wurde im Zuge der experimentellen Untersuchungen aus der Onboard-SPS-Steuerung des Verdichtungsgerätes aufgezeichnet. Der zeitliche Verlauf des Rüttleranpressdrucks ist in den Abbildungen 5.5 und 5.6 angeführt.

Zu Beginn des Absenkvorgangs steigt der Rüttleranpressdruck vergleichsweise rasch, von null auf etwa 30 bar, und der Tiefenrüttler beginnt sich mit nahezu konstanter Geschwindigkeit nach unten zu bewegen. Der Rüttleranpressdruck bleibt im betrachteten Verdichtungsschritt bis zum Zeitpunkt von etwa $t = 908\,\text{s}$ annähernd konstant, ab diesem Zeitpunkt ist bis zum Abbruch des Verdichtungsschrittes ein Anstieg auf etwa 60 bar im zeitlichen Verlauf des Rüttleranpressdrucks sichtbar. In Abbildung 5.6 ist ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem Rüttleranpressdruck und dem Bewegungsverhalten des Rüttlers erkennbar, welcher zwischen dem Rüttleranpressdruck und dem Vorlaufwinkel am stärksten ausgeprägt ist. Beim lokalen Maximum des Rüttleranpressdrucks weist der Vorlaufwinkel sein lokales Minimum sowie die Schwingwegamplitude ihr lokales Maximum vor.

Der Zusammenhang zwischen dem Rüttleranpressdruck und dem Bewegungsverhalten des Rüttlers ist in Abbildung 5.10, über mehrere Verdichtungsschritten hinweg, besonders klar erkennbar und mit blauen Pfeilen veranschaulicht. Hier ist es sichtbar, dass der Rüttleranpressdruck zu Beginn des Absenkvorgangs, abgesehen von geringfügigen Schwankungen, bei allen Verdichtungsschritten konstant bleibt. Es kommt zu einem leichten Anstieg des Rüttleranpressdrucks wenige Sekunden vor dem Abbruch des jeweiligen Verdichtungsschrittes. Der konstante Rüttleranpressdruck zu Beginn des Absenkvorgangs kann auf verfahrensbedingte Gründe zurückgeführt werden. Er bleibt so lange konstant, bis der zur vorgegebenen Eindringgeschwindigkeit erforderliche Hydraulikdruck niedriger ist als etwa

30 bar. Reicht dieser Hydraulikdruck nicht mehr aus, den zunehmenden Widerstand des zu verdichtenden Bodens gegen das Eindringen der Rüttlerspitze zu überwinden, wird die erforderliche Anpresskraft erhöht, was sich im ansteigenden Hydraulikdruck widerspiegelt. Aufgrund dieses verfahrenstechnisch bedingten Prozesses kann nicht angenommen werden, dass der konstante Anpressdruck zu Beginn des Absenkvorgangs im Zusammenhang mit der Spannung zwischen Rüttlerspitze und Boden zu bringen ist.

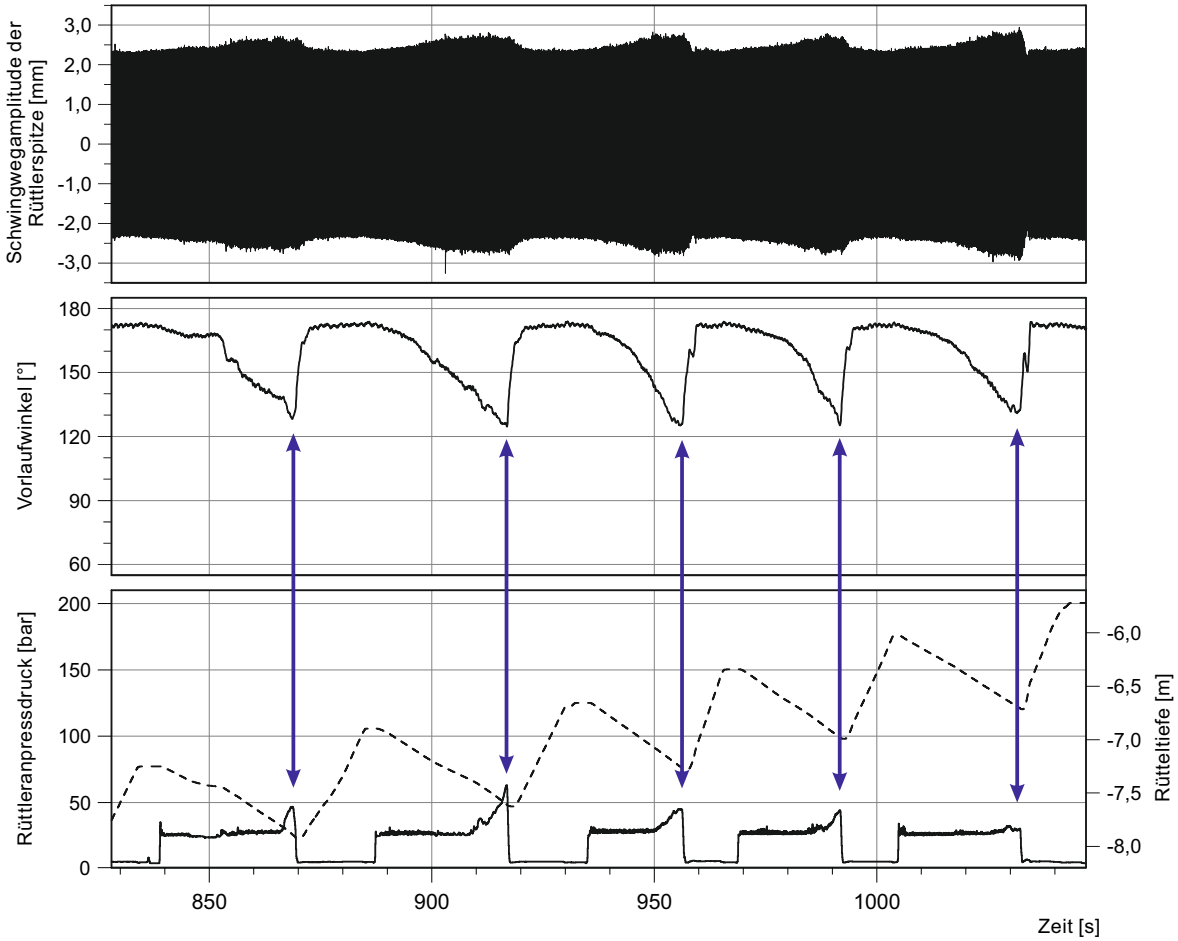


Abbildung 5.10: Rütteltiefe, Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel und Rüttleranpressdruck bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke des in Abbildung 5.5 dargestellten Verdichtungsversuchs, die blauen Pfeile kennzeichnen den Zusammenhang zwischen maximalem Rüttleranpressdruck sowie dem geringsten Vorlaufwinkel und der größten Schwingwegamplitude.

Demgegenüber kann der unmittelbar vor dem Abbruch des Verdichtungsschrittes ersichtliche ansteigende Rüttleranpressdruck als indirekter Indikator für die Anpresskraft und damit für die Spannung zwischen Rüttlerspitze und Boden angesehen werden. In diesem Zustand stellt der Rüttleranpressdruck einen äußerst wertvollen Parameter in den vorliegenden Untersuchungen dar. Eine exaktere Ermittlung des Widerstands des zu verdichtenden Bodens gegen das Eindringen der Rüttlerspitze wäre theoretisch – analog beispielsweise zu einer Drucksonde – mittels einer im Rüttlerkörper eingebauten Kraftmessdose möglich. Diese wäre insbesondere daher sinnvoll, weil im aufgezeichneten Rüttleranpress-

druck auch kurzfristige Schwankungen auftreten können, die nicht aus der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden resultieren.

Die zeitlichen Zusammenhänge der Schwingwegamplitude und des Vorlaufwinkels bzw. des Rüttleranpressdrucks sind bei sämtlichen Verdichtungsschritten des in Abbildung dargestellten 5.5 Verdichtungsprozesses zu beobachten. Das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers ändert sich während des gesamten Verdichtungsprozesses periodisch. Während des Absenkvorgangs steigt die Schwingwegamplitude mit zunehmender Absenktiefe und erreicht ihr lokales Maximum zwischen 2,7 und 2,9 mm, gleichzeitig sinkt der Vorlaufwinkel und erreicht sein lokales Minimum zwischen 120° und 130°, vereinzelt kommt es zu einem Vorlaufwinkel von 120°. Während des Anhebens des Tiefenrüttlers stellt sich relativ rasch die ursprüngliche Schwingwegamplitude von etwa $2,3 - 2,4$ mm und ein Vorlaufwinkel von etwa $171 - 173°$ ein. Bei den meisten Verdichtungsschritten ist, ähnlich zu den in Abbildung 5.10 vergrößert dargestellten Verdichtungsschritten, ein Anstieg des Rüttleranpressdrucks wenige Sekunden vor dem Abbruch des jeweiligen Verdichtungsschrittes ersichtlich. Beim Anheben des Rüttlers sinkt der Rüttleranpressdruck wieder rasch auf null ab. Die Periodizität im Bewegungsverhalten ist lediglich bei Rütteltiefen von weniger als 1,5 m nicht vollständig gegeben. Bei geringeren Rütteltiefen sind analog zum Beginn der Arbeitsphase Einvibrieren, tendenziell höhere Werte im zeitlichen Verlauf der Schwingwegamplitude wahrzunehmen, wie dies beispielsweise in Abbildung 5.5 zu erkennen ist.

Es sei an dieser Stelle erneut betont, dass die Rütteldruckverdichtung beim gegenständlichen Verdichtungsversuch im standardmäßigen Rüttlerbetrieb durchgeführt wurde und dabei der Verdichtungsvorgang von einem erfahrenen Gerätefahrer der Firma *Keller* nach eigenem Ermessen gesteuert wurde. Hinsichtlich des Abbruchs der einzelnen Verdichtungsschritte gab es keinerlei Kriterien. Wie die Messergebnisse des in Abbildung 5.5 dargestellten Verdichtungsversuchs zeigen, ändert sich das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers während des Verdichtungsvorgangs, ebenso bleiben die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und der Vorlaufwinkel nicht konstant. Nachdem sämtliche Verfahrensparameter, wie die Umdrehungsfrequenz des Rüttlermotors und die Menge des Spülwassers konstant gehalten wurden, ist eine Änderung des Bewegungsverhaltens ausschließlich auf die Änderung des Verdichtungszustandes des Bodens zurückzuführen. Analog zur Rüttlerbewegung kann die zunehmende Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden in Form des zunehmenden Drucks in der Hydraulikanlage ebenfalls als Indikator für die fortschreitende Verdichtung des Bodens herangezogen werden. Sowohl im Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers als auch im Rüttleranpressdruck ist eine ausgeprägte Periodizität und gleichzeitig, sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht, eine hohe Reproduzierbarkeit der Messsignale erkennbar.

Die Ergebnisse des Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb zeigen, dass die fortschreitende Verdichtung des Bodens einen maßgeblichen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers hat. Die Änderungen im Bewegungsverhalten treten periodisch auf und sind reproduzierbar. Damit ist eine wesentliche Voraussetzung für die Entwicklung eines Systems zur arbeits- und rüttlerintegrierten Verdichtungskontrolle auf Basis des dreidimensionalen Bewegungsverhaltens gegeben.

5.3.3 Einfluss der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden auf das Bewegungsverhalten des Rüttlers

Ausgewählte Verdichtungsstrecken wurden mit vorgegebenen, vom standardmäßigen Betrieb geringfügig abweichenden Verfahrensparametern bearbeitet. Im Zuge dieser Parametervariationen entsprach der Verdichtungsvorgang prinzipiell jenem im standardmäßigen Rüttlerbetrieb, mit geringfügigen Modifikationen, um den Einfluss diverser Parameter systematisch erkunden zu können. In diesem Abschnitt wird der Einfluss der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden diskutiert sowie die Ergebnisse des betrachteten Verdichtungsversuchs dem standardmäßigen Rüttlerbetrieb gegenübergestellt.

Wie in Abschnitt 5.3.2 aufgezeigt, manifestiert sich der zunehmende Widerstand des Bodens gegen das Eindringen der Rüttlerspitze im ansteigenden Rüttleranpressdruck. Somit kann der Rüttleranpressdruck als indirekterer Indikator für die Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden Berücksichtigung finden. Aus diesem Grund ist die eingehende Untersuchung des Zusammenhangs zwischen dem Rüttleranpressdruck und dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers von besonders großem Interesse.

Im standardmäßigen Rüttlerbetrieb ist ein leichter Anstieg des Rüttleranpressdrucks wenige Sekunden vor Beendigung des jeweiligen Verdichtungsschrittes ersichtlich (siehe Abbildung 5.10). Der Einfluss einer erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers wurde experimentell erforscht. Abbildung 5.11 zeigt den zeitlichen Verlauf der Rütteltiefe, der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, des Vorlaufwinkels und des Rüttleranpressdrucks für den gesamten Verdichtungsvorgang während dieses Versuchs. Auf eine Darstellung der Rüttlerbewegung in der Luft wird an dieser Stelle verzichtet.

Bei diesem Versuch erfolgte die Verdichtung – analog zum standardmäßigen Rüttlerbetrieb – von unten nach oben im Pilgerschrittverfahren, bei konstanter Rüttlerfrequenz von etwa 50 Hz bzw. bei konstanter Durchflussmenge des Wassers für die Wasserspülung. Der Gerätefahrer hat den Absenk- und Hebevorgang im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte hierbei auch manuell gesteuert. Der Unterschied zu dem in Abschnitt 5.3.2 beschriebenen standardmäßigen Rüttlerbetrieb besteht darin, dass hierbei der Absenkvorgang nicht bei einer – aus Sicht des Gerätefahrers – optimalen Absenktiefe abgebrochen wurde. Der Gerätefahrer hat diesen im vorliegenden Fall solange weitergeführt, bis beim jeweiligen Verdichtungsschritt praktisch kein weiteres Eindringen in den zu verdichtenden Boden möglich war. Dabei wurde das Eigengewicht der Tragraupe zu einem deutlich höheren Maß aktiviert als im Standardbetrieb, wodurch eine deutlich höhere Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden erreicht wurde. Bei einigen Verdichtungsschritten wurde sogar das Eingengewicht der Tragraupe vollständig aktiviert, was sich im Zuge der Versuchsdurchführung durch ein leichtes Abheben der Tragraupe vom Boden hervorstach. Dieses bedingte einen wesentlich höheren Rüttleranpressdruck im Vergleich zum standardmäßigen Rüttlerbetrieb.

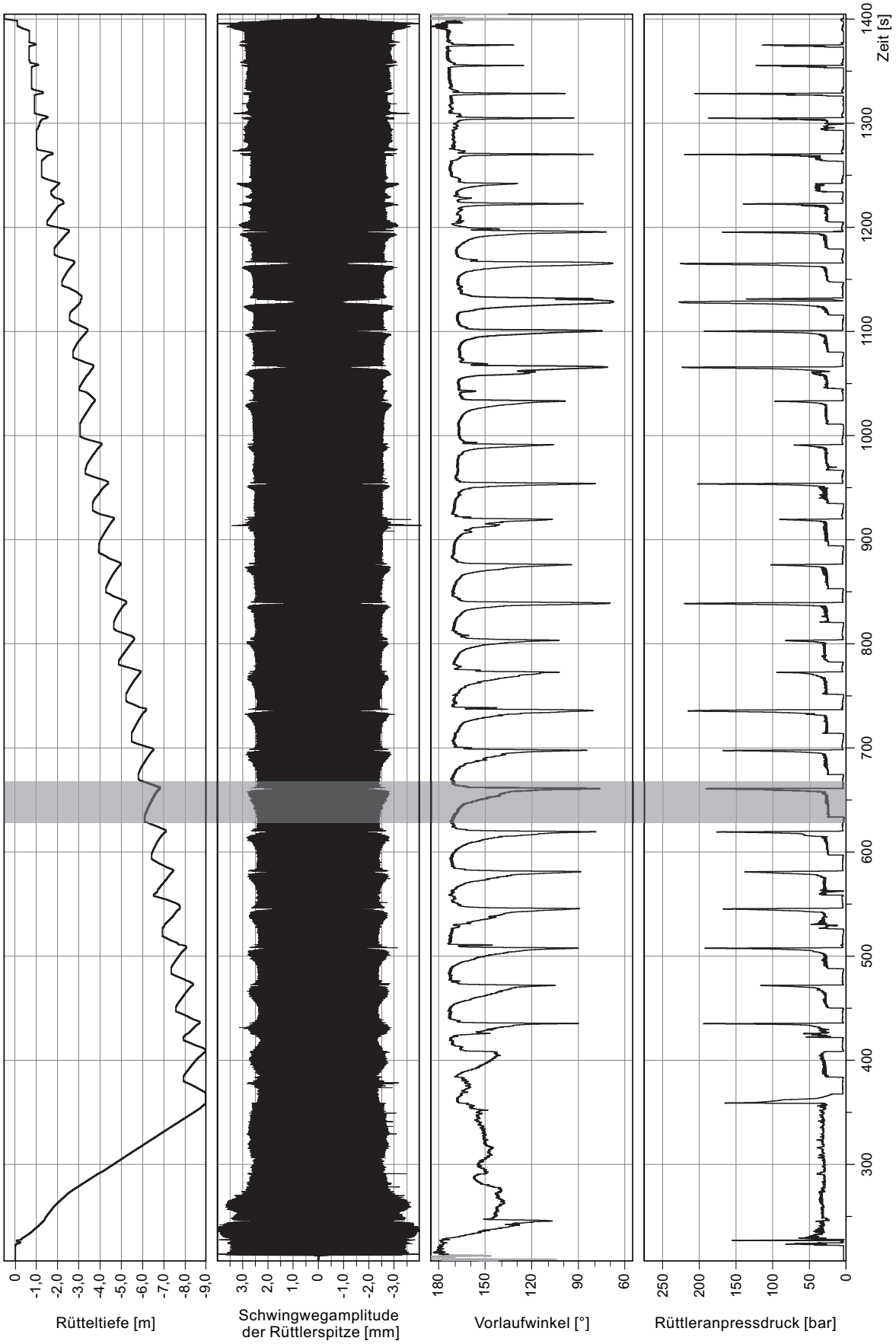


Abbildung 5.11: Rütteltiefe, Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel und Rüttleranpressdruck während eines Versuchs zur Untersuchung des Einflusses des erhöhten Rüttleranpressdrucks auf die Rüttlerbewegung.

Ein ausgewählter Verdichtungsschritt der in Abbildung 5.11 dargestellten Parametervariation ist in Abbildung 5.12 exemplarisch hervorgehoben und vergrößert. Wie anhand des zeitlichen Verlaufs der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und des Vorlaufwinkels erkennbar ist, entspricht das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers vor Beginn des Absenkvorgangs, bei konstanter Rütteltiefe (im Zeitintervall $t = 630 - 634\,\mathrm{s}$) und in der ersten Phase des Absenkvorgangs (im Zeitintervall $t = 634 - 657\,\mathrm{s}$), etwa dem in Abschnitt 5.3.2 gezeigten Bewegungsverhalten im Standardbetrieb. Während der Schwingung im Boden bei konstanter Rütteltiefe ist die Rüttleramplitude hierbei auch konstant und beträgt etwa $2,39\,\mathrm{mm}$, der Vorlaufwinkel ist ebenfalls nahezu konstant und beträgt etwa $171°$. In der ersten Phase des Absenkvorgangs steigt die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze bis zum Zeitpunkt $t_2 = 657\,\mathrm{s}$ auf etwa $2,7\,\mathrm{mm}$ an und ist als lokales Maximum im zeitlichen Verlauf der Schwingwegamplitude erkennbar. Der Vorlaufwinkel nimmt mit zunehmender Rütteltiefe ab und beträgt beim lokalen Maximum der Schwingwegamplitude etwa $135°$. Der Rüttleranpressdruck zeigt – analog zum standardmäßigen Rüttlerbetrieb – bereits vor dem Erreichen des lokalen Maximums der Schwingwegamplitude einen leichten Anstieg. Wie in Abschnitt 5.3.2 bereits dargestellt, wurde der Verdichtungsvorgang im standardmäßigen Rüttlerbetrieb vom Gerätefahrer etwa bei diesem Werteniveau der beiden Parameter, d. h. bei einer Schwingwegamplitude von etwa $2,7 - 2,9\,\mathrm{mm}$ und bei einem Vorlaufwinkel von $125 - 130°$ abgebrochen.

Bei diesem Versuch brach man den Verdichtungsvorgang nicht ab, sondern senkte den Tiefenrüttler weiter, mit konstanter Geschwindigkeit, in den zu verdichtenden Bodenbereich ab. Dabei zeigen die Versuchsergebnisse eine drastische Änderung des Bewegungsverhaltens des Rüttlers. Die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze sinkt beim betrachteten Verdichtungsschritt innerhalb von wenigen Sekunden auf etwa $1,4\,\mathrm{mm}$ und der Vorlaufwinkel auf etwa $81°$ ab (Zeitpunkt $t_3 = 660,7\,\mathrm{s}$). Durch das Erzwingen des Absenkvorgangs wird das Eigengewicht der Tragraupe in zunehmendem Maße aktiviert und damit die über den Rüttlerkörper in den zu verdichtenden Bodenbereich abgeleitete Kraft sukzessive erhöht. Der Druck in der Hydraulikanlage zeigt einen deutlichen Anstieg und nimmt im gegenständlichen Fall auf etwa $190\,\mathrm{bar}$ zu. Trotz der Eindringhilfe in Form des Eigengewichts des Trägergerätes ist das Absenken des Tiefenrüttlers in den zu verdichtenden Bodenbereich nun mehr beschränkt möglich, ab dem Zeitpunkt $t_2 = 657\,\mathrm{s}$ konnte man beim betrachteten Verdichtungsschritt nur noch eine vergleichsweise geringe Eindringtiefe von etwa $0,2\,\mathrm{m}$ erreichen. Im zu verdichtenden Bodenbereich werden hohe Kontaktspannungen generiert. In diesem Zustand ist die Rüttleramplitude klein, die Rüttlerspitze ist vom zu verdichtenden Bodenbereich praktisch festgehalten. Der Vorlaufwinkel gelangt in diesem Zustand zu seinem lokalen Minimum.

Beim betrachteten Verdichtungsschritt sowie bei weiteren Verdichtungsschritten des gegenständlichen Verdichtungsversuchs ist vor Beendigung des jeweiligen Verdichtungsschrittes eine leicht zunehmende Eindringgeschwindigkeit im zeitlichen Verlauf der Rütteltiefe augenfällig. Dieses Verhalten ist auf das eingesetzte Messsystem zurückzuführen. Die Rütteltiefe wurde als Relativverschiebung zwischen dem Anbaumäkler und dem Tiefenrüttler erfasst (siehe Abschnitt 4.5.2). Bei derartig hohen Rüttleranpressdrücken wird das Eigenge-

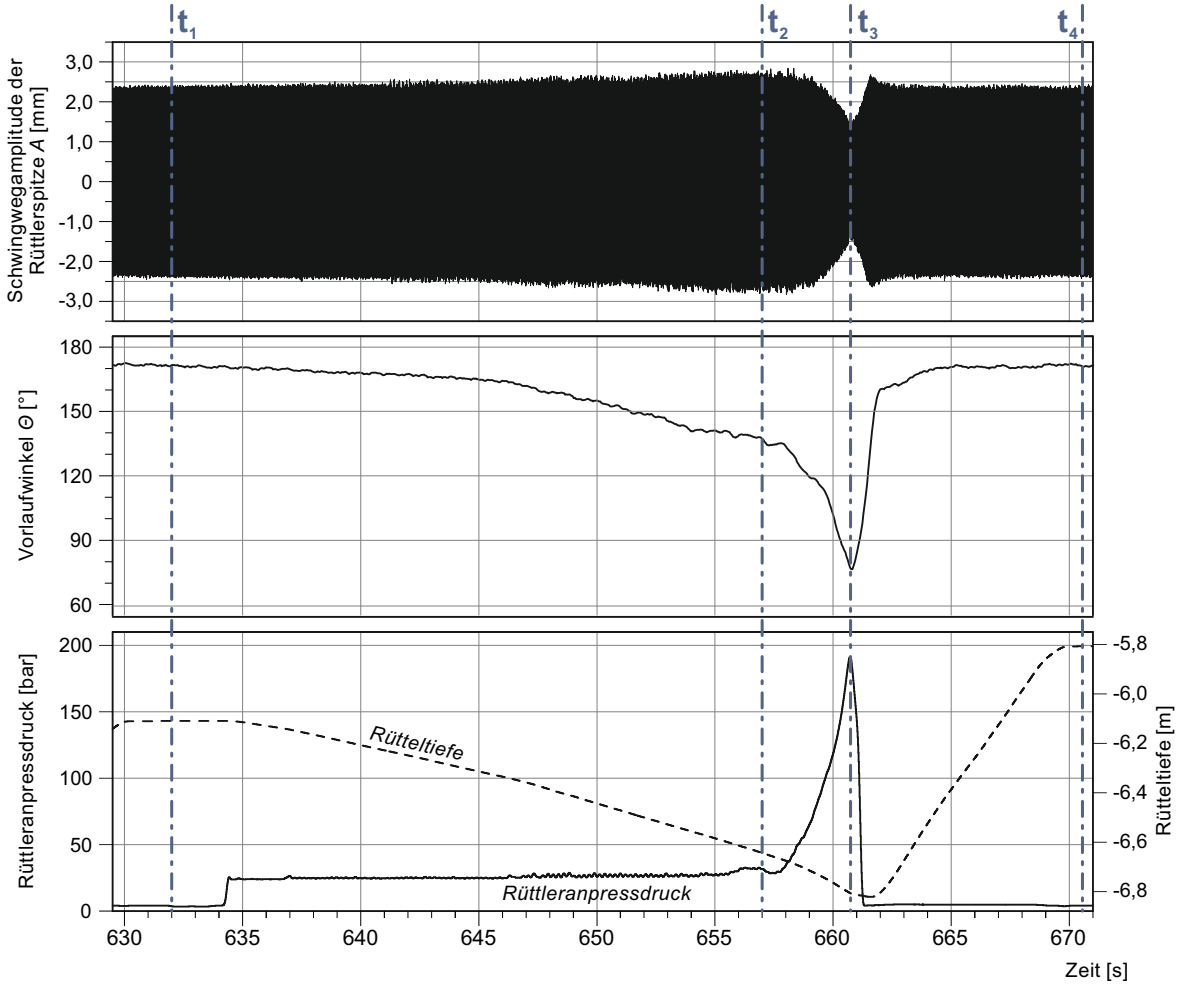


Abbildung 5.12: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe während eines Verdichtungsschrittes des in Abbildung 5.11 dargestellten Verdichtungsversuchs.

wicht der Tragraupe als Eindringhilfe nahezu zur Gänze aktiviert. In diesem Zustand wird die Tragraupe auf der Seite des Rüttlers leicht angehoben und neigt sich nach hinten. Dadurch entsteht eine Relativverschiebung zwischen Anbaumäkler und Tiefenrüttler. In den aufgezeichneten Messdaten ist dies durch eine zunehmende Eindringgeschwindigkeit trotz der praktisch gleichbleibenden Rütteltiefe wahrnehmbar.

Beim Anheben des Rüttlers steigen sowohl die Schwingwegamplitude als auch der Vorlaufwinkel auf das ursprüngliche Niveau, und betragen zum Zeitpunkt $t_3 = 660{,}7\,\mathrm{s}$ etwa $2{,}39\,\mathrm{mm}$ bzw. rund $171°$. Der Druck in der Hydraulikanlage sinkt wiederum auf annähernd null ab. Im zeitlichen Verlauf der Schwingwegamplitude ist auch während des Hebevorgangs ein lokales Maximum erkennbar.

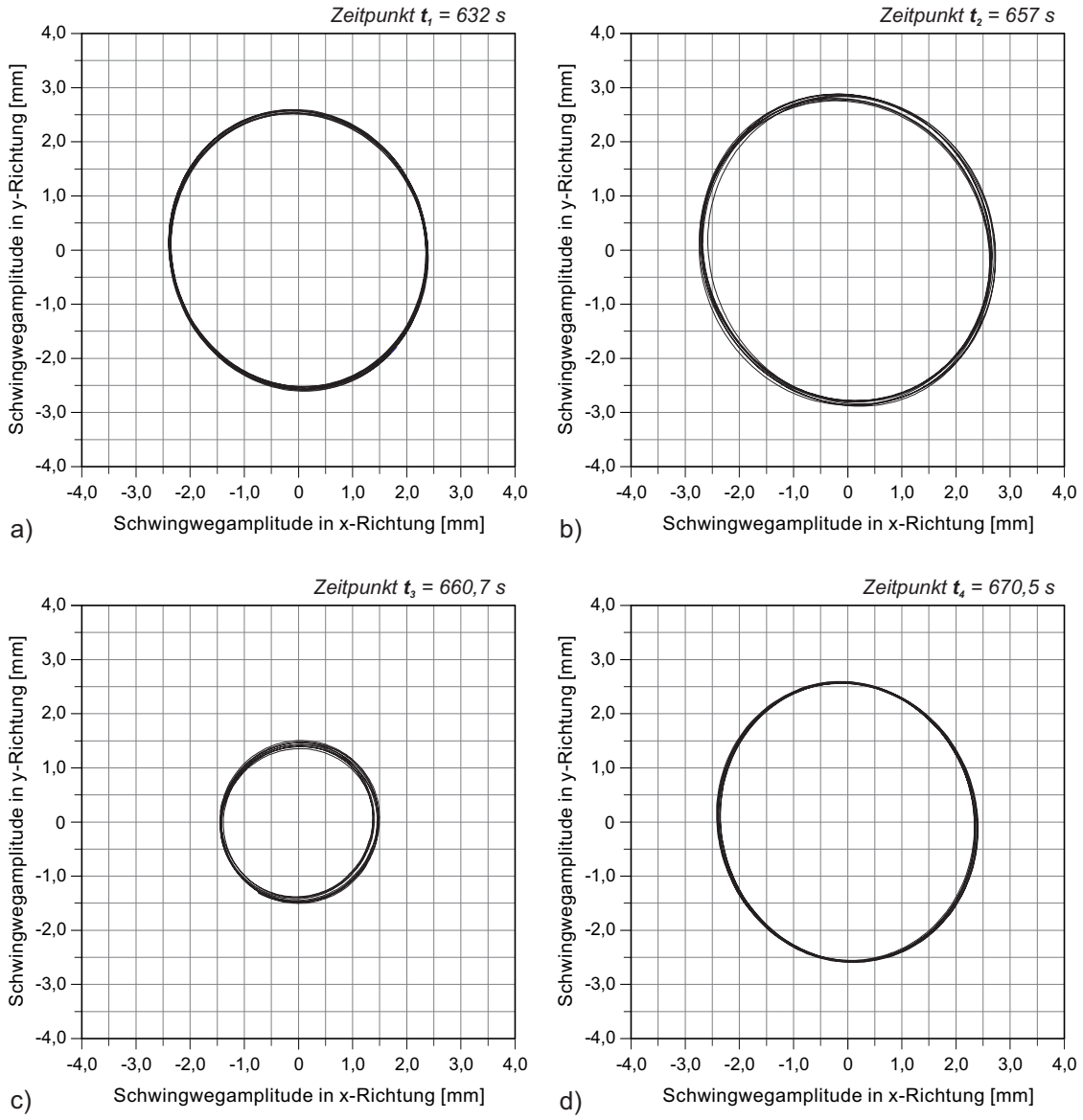


Abbildung 5.13: Bewegung der Rüttlerspitze in der horizontalen Ebene zu vier unterschiedlichen Zeitpunkten: a) unmittelbar vor Beginn des Absenkvorgangs ($t_1 = 632\,\mathrm{s}$), b) beim lokalen Maximum der Schwingwegamplitude ($t_2 = 657\,\mathrm{s}$), c) beim lokalen Minimum der Schwingwegamplitude ($t_3 = 660,7\,\mathrm{s}$) und am Ende des Hebevorgangs ($t_4 = 670,5\,\mathrm{s}$), während eines Verdichtungsversuchs zur Untersuchung des Einflusses vom erhöhten Rüttleranpressdruck auf das Bewegungsverhalten.

Abbildung 5.13 zeigt die Bewegung der Rüttlerspitze in der horizontalen Ebene zu vier unterschiedlichen Zeitpunkten während des betrachteten Verdichtungsschrittes: unmittelbar vor Beginn des Absenkvorgangs während der Rüttlerschwingung bei konstanter Tiefe (zum Zeitpunkt $t_1 = 632\,\mathrm{s}$), etwa beim lokalen Maximum der Schwingwegamplitude (zum Zeitpunkt $t_2 = 657\,\mathrm{s}$), beim lokalen Minimum der Schwingwegamplitude (zum Zeitpunkt $t_3 = 660,7\,\mathrm{s}$) und am Ende des Hebevorgangs (zum Zeitpunkt $t_4 = 670,5\,\mathrm{s}$), welche analog zum Zeitpunkt t_1 ebenfalls die Rüttlerschwingung bei konstanter Tiefe wiedergibt. Die Bewegung der Rüttlerspitze ist zu den vier Zeitpunkten jeweils über zehn Erregerperioden

dargestellt, die Reproduzierbarkeit der Bewegung ist für alle vier Zeitpunkte deutlich erkennbar. Das Bewegungsverhalten entspricht zu den Zeitpunkten t_1 und t_2 praktisch dem in Abschnitt 5.3.2 gezeigten Rüttlerbewegung. Zum Zeitpunkt t_2, in dem auch das lokale Maximum der Schwingwegamplitude auftritt, ist die Auslenkung in beiden Achsenrichtungen größer als zum Zeitpunkt t_1 und die Rüttlerbewegung ist etwas unregelmäßiger. Analog zum im Abschnitt 5.3.2 diskutieren Bewegungsverhalten ist die größte Auslenkung in x-Richtung tendenziell geringfügig niedriger, als jene in y-Richtung. Während der Schwingung bei konstanter Tiefe (Zeitpunkt t_4) ist erwartungsgemäß das gleiche Bewegungsverhalten zu beobachten wie während der quasi-stationären Schwingung vor Beginn des Absenkvorgangs (Zeitpunkt t_1).

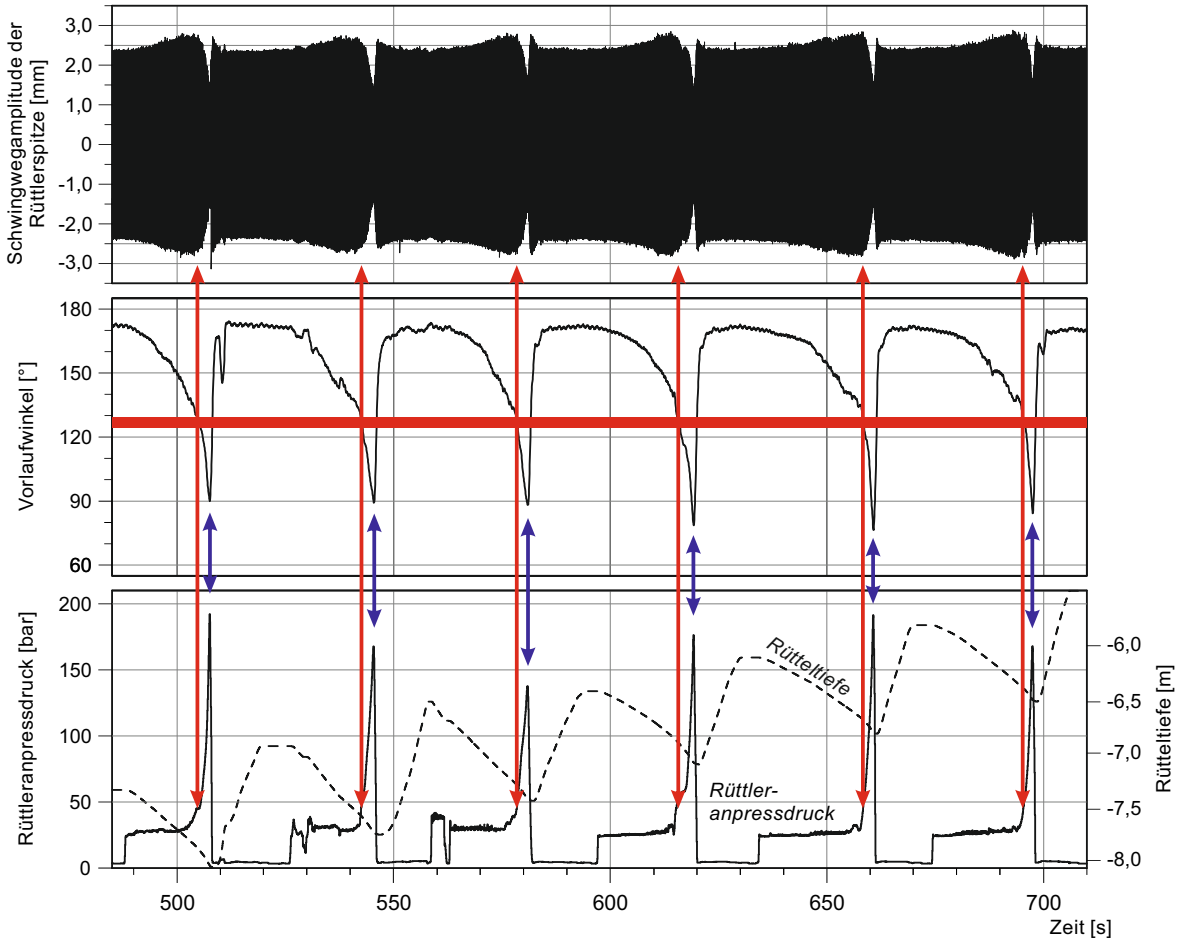


Abbildung 5.14: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke des in Abbildung 5.11 dargestellten Verdichtungsversuchs, die blauen Pfeile kennzeichnen den Zusammenhang zwischen maximalem Rüttleranpressdruck sowie dem geringsten Vorlaufwinkel und der größten Schwingwegamplitude, der rote Balken hebt das Werteniveau des Vorlaufwinkels beim Abbruch der Verdichtungsschritte im Standardbetrieb hervor.

Anhand der Ergebnisse des gegenständlichen Versuchs ist der Zusammenhang zwischen dem Rüttleranpressdruck und dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers besonders deutlich und ist über mehrere Verdichtungsschritte in Abbildung 5.14 dargestellt. Analog

zu dem in Abschnitt 5.3.2 diskutierten standardmäßigen Rüttlerbetrieb weist der Vorlaufwinkel auch in diesem Fall beim lokalen Maximum des Rüttleranpressdrucks sein lokales Minimum auf. Die blauen Pfeilen in Abbildung 5.14 kennzeichnen den Zusammenhang zwischen Rüttleranpressdruck und Vorlaufwinkel. Die lokalen Maxima des Rüttleranpressdrucks entsprechen aber hierbei im Gegensatz zum standardmäßigen Rüttlerbetrieb nicht den lokalen Maxima der Schwingwegamplitude, diese bilden sich bereits bei einem deutlich niedrigeren Rüttleranpressdruck aus.

In Abbildung 5.14 ist im zeitlichen Verlauf des Vorlaufwinkels die Bandbreite von $125 - 130^\circ$ mit rotem Balken markiert. Der Absenkvorgang wurde im Zuge der Verdichtungsversuche im standardmäßigen Rüttlerbetrieb im Regelfall bei diesem Werteniveau des Vorlaufwinkels abgebrochen (siehe Abbildung 5.5). Dieser Bereich ist bei allen Verdichtungsschritten etwa durch das lokale Maximum der Schwingwegamplitude und durch einen leicht ansteigenden Rüttleranpressdruck kenntlich gemacht.

Die Messergebnisse zeigen auch beim gegenständlichen Verdichtungsversuch eine hohe Reproduzierbarkeit in Hinblick auf die Rüttlerbewegung. Es tritt bei jedem Verdichtungsschritt ein lokales Maximum in der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze auf. Das rasche Absinken der Amplitude ist beinahe bei jedem Verdichtungsschritt erkennbar, bei dem der Druck in der Hydraulikanlage und damit die Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden rasch ansteigen.

Die Ergebnisse des Versuchs zeigen den Einfluss der Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden über den standardmäßigen Rüttlerbetrieb hinaus. Die Versuchsergebnisse bestätigen die bereits im Standardbetrieb erkennbaren Zusammenhänge, dass die Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden einen maßgeblichen Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers hat.

5.3.4 Ergebnisse von Sonderversuchen

Um das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers sowie die Vorgänge während des Verdichtungsprozesses im Rüttler-Boden Interaktionssystem tiefreichend erforschen zu können, wurden im Zuge der experimentellen Untersuchungen solche Verdichtungsversuche durchgeführt, bei denen der Arbeitsprozess von jenem im standardmäßigen Rüttlerbetrieb maßgeblich abwich. Die Bezeichnung für derartige Versuche lautet in der vorliegenden Arbeit Sonderversuch.

Dieser Abschnitt ist dem Diskussion des Einflusses der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden sowie der Einfluss der Wasserspülung auf die Rüttlerbewegung anhand der Ergebnisse von Sonderversuchen gewidmet.

5.3.4.1 Sonderversuch zur Untersuchung des Einflusses der erhöhten Kontaktspannung auf das Bewegungsverhalten des Rüttlers

Der Einfluss der erhöhten Kontaktspannung auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers wurde, über Parametervariationen hinaus (vgl. Abschnitt 5.3.3), im Zuge von Sonderversuchen betrachtet. Abbildung 5.15 zeigt den zeitlichen Verlauf der Schwingwegamplitude der

Rüttlerspitze, des Vorlaufwinkels, des Rüttleranpressdrucks und der Rütteltiefe während eines Sonderversuchs zur Untersuchung der Auswirkung der erhöhten Kontaktspannung auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers. Im Zuge dieses Versuchs bearbeitete man die Verdichtungsstrecke zuerst im Standardbetrieb. Der Sonderversuch wurde beim abermaligen Eindringen am fertig verdichteten Verdichtungspunkt, in einer Tiefe von 3,0 m unter Geländeoberkante gestartet.

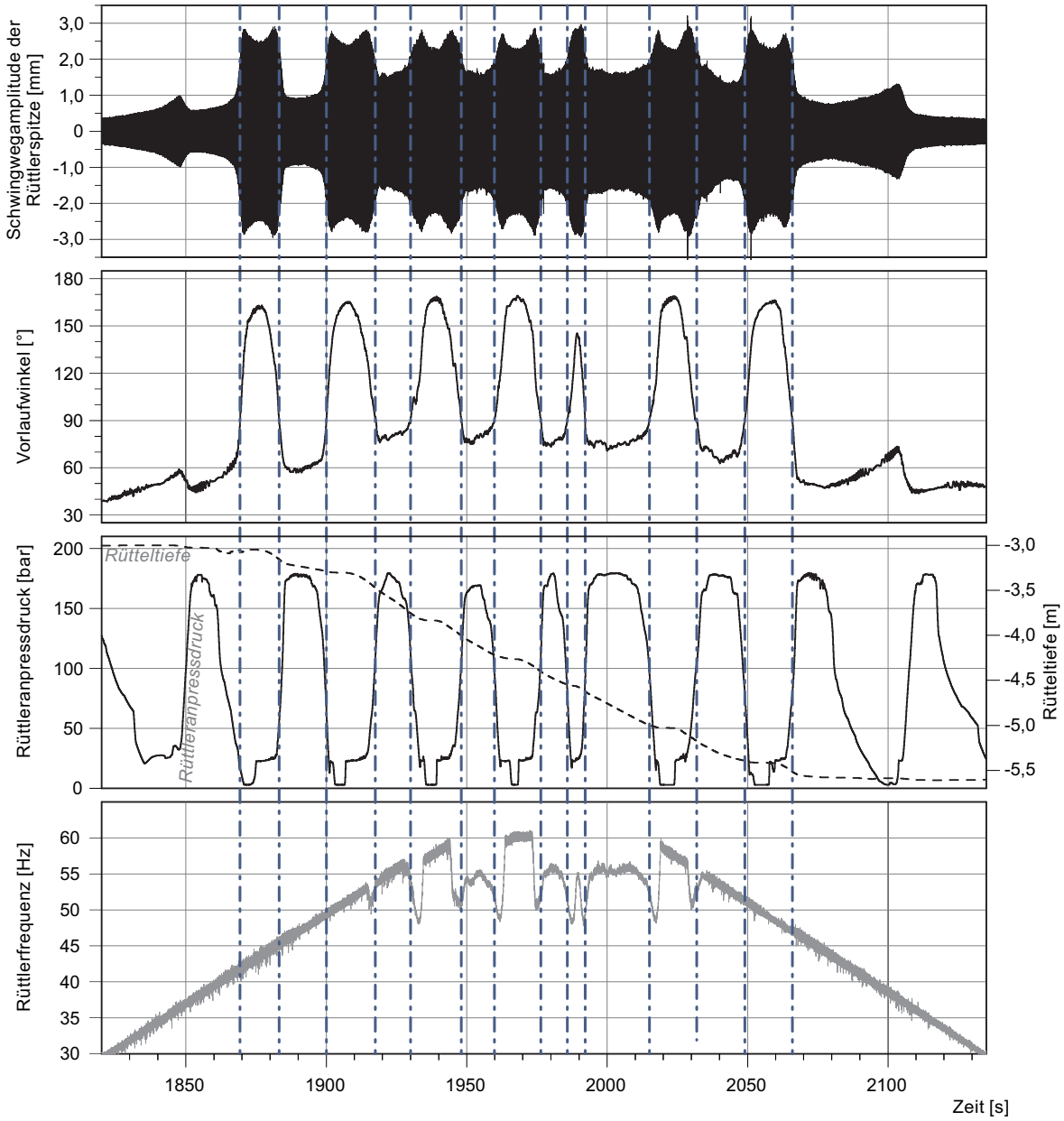


Abbildung 5.15: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Rüttleranpressdruck, Rüttlerfrequenz und Rütteltiefe während eines Sonderversuchs zur Untersuchung des Einflusses der erhöhten Kontaktspannung auf das Bewegungsverhalten; die vertikalen, blau strichlierten Linien kennzeichnen die Zeitpunkte, zu denen der Vorlaufwinkel 90° beträgt.

Die Rüttlerfrequenz wurde von Null an beginnend gleichmäßig auf 60 Hz gesteigert, möglichst konstant gehalten und anschließend wieder gleichmäßig auf 0 Hz herabgeregelt. Auf die Darstellung der Versuchsergebnisse bei einer Rüttlerfrequenz unter 30 Hz wird an dieser Stelle verzichtet. Während der Variation der Rüttlerfrequenz wurde der Rüttleranpressdruck ebenfalls variiert, in möglichst regelmäßigen Zeitintervallen manuell erhöht und wieder herabgesetzt. Aufgrund des großen Widerstandes des bereits verdichteten Bodens gegen das Eindringen der Rüttlerspitze erreichte man während der Versuchsdurchführung vergleichsweise rasch einen deutlich höheren Rüttleranpressdruck als jenen im Standardbetrieb (vgl. Abschnitt 5.3.2).

In den Auswerteergebnissen ist – analog zur in Abschnitt 5.3.3 diskutierten Parametervariation – ein eindeutiger Zusammenhang zwischen Rüttleranpressdruck und dem Bewegungsverhalten des Rüttlers feststellbar, der im höheren Frequenzbereich (über etwa 40 Hz) am stärksten ausgeprägt ist. Bei niedrigem Anpressdruck ist die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze annähernd konstant und beträgt etwa 2, 3 mm. Bei zunehmendem Rüttleranpressdruck entspricht das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers jenem bei der in Abschnitt 5.3.3 diskutierten Parametervariation. Dabei steigt die Schwingwegamplitude und erreicht ihr lokales Maximum bei etwa $2,7 - 2,9$ mm, anschließend verringert sie sich und erreicht ein lokales Minimum. In diesem Zustand wurde die Rüttlerfrequenz automatisch abgeregelt, um den Rüttlermotor vor Überlastung zu schützen. Die lokalen Minima der Schwingwegamplitude sind bei niedrigerer Rüttlerfrequenz deutlich niedriger als bei höherer Rüttlerfrequenz. Der Vorlaufwinkel sinkt mit zunehmendem Rüttleranpressdruck drastisch ab. Analog zum Rüttleranpressdruck zeigt der Vorlaufwinkel bei niedrigerer Rüttlerfrequenz niedrigere lokale Minima. Beim Herabsetzen des Rüttleranpressdrucks stellt sich bei den beiden Parametern das ursprüngliche Werteniveau ein, wobei sich in der Schwingwegamplitude auch im Zuge der Verringerung der Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden ein lokales Maximum ausbildet. Die Versuchsergebnisse bestätigen die oben diskutierte Erkenntnis, dass die Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden das Bewegungsverhalten des Rüttlers wesentlich beeinflusst. Des Weiteren jene, dass der Rüttleranpressdruck als Indikator für die Spannung zwischen Rüttlerspitze und Boden herangezogen werden kann.

Anhand der Ergebnisse dieses Versuchs ist der maßgebliche Einfluss der horizontalen Rüttlerschwingung im Rüttler-Boden Interaktionssystem eindeutig. Am Beginn des Versuchs, bis etwa zum Zeitpunkt $t = 1870$ s bzw. ab etwa dem Zeitpunkt $t = 2060$ s, ist trotz der Erhöhung des Rüttleranpressdrucks praktisch kein Eindringen in den Untergrund möglich. Daraus folgt, dass offensichtlich eine bestimmte Rüttlerfrequenz zu überschreiten ist, um den Tiefenrüttler in den Untergrund absenken zu können. Mit zunehmender Rüttlerfrequenz steigt auch die Eindringgeschwindigkeit der Rüttlerspitze, eine höhere Rüttlerfrequenz ermöglicht prinzipiell ein rascheres Eindringen in den Untergrund.

In Abbildung 5.15 sind jene Zeitpunkte mit vertikalen blau strichlierten Linien gekennzeichnet, zu denen der Vorlaufwinkel 90° beträgt[6]. Es ist augenfällig, dass diese Zeitpunkte

[6]Der Vorlaufwinkel von 90° entspricht dem Resonanzpunkt eines ungedämpften quadratisch angeregten Systems (siehe Anhang A).

niemals dem lokalen Maximum der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze entsprechen. Beim lokalen Maximum der Schwingwegamplitude ist der Vorlaufwinkel immer deutlich größer als 90°. Die Ursache für diesen Umstand ist in Abschnitt 6.3.1 eingehend diskutiert.

5.3.4.2 Einfluss der Wasserspülung auf das Bewegungsverhalten des Rüttlers

Unabhängig davon, ob die Rütteldruckverdichtung unter- oder oberhalb des Grundwasserspiegels erfolgt, stellt das Zuführen von Wasser über Öffnungen an diversen Stellen auf dem Rüttlerkörper generell einen wichtigen Bestandteil des Rütteldruckverfahrens dar. Die Erfahrungswerte der ausführenden Firma bestimmen im Regelfall die Durchflussmenge des zugeführten Wassers.

Das Zuführen von Wasser ist grundsätzlich über Öffnungen an der Rüttlerspitze oder eventuell zusätzlich entlang des Rüttlerkörpers und der Verlängerungsrohre möglich. Bei dem im Zuge der experimentellen Untersuchungen verwendeten Rüttlertyp ist dieses über zwei Austrittsöffnungen an der Rüttlerspitze möglich (siehe Abschnitt 4.4.2).

Der Einfluss der Wassermenge auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers wurde im Zuge der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen im Rahmen eines Sonderversuches erforscht. Dabei betrachtete man das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers lediglich während der Arbeitsphase Einvibrieren, das man im gegenständlichen Fall – gegenüber der herkömmlichen Vorgehensweise mit konstanter Eindringgeschwindigkeit – bei konstantem Rüttleranpressdruck durchgeführte. Der Rüttleranpressdruck betrug während des gesamten Versuchs 50 bar. Die Rüttlerfrequenz wurde während der Versuchsdurchführung ebenfalls konstant gehalten. Der Gerätefahrer senkte den Tiefenrüttler bis in eine Tiefe von 8,0 m ab, wobei er die Wassermenge über die Tiefe stufenweise variierte. Tabelle 5.1 zeigt die vier Tiefenintervalle mit unterschiedlichen Durchflussmengen des Wassers. Die Verdichtung des Untergrundes im standardmäßigen Rüttlerbetrieb vor der Durchführung des Sonderversuchs sicherte dessen Durchführung im möglichst homogenen Untergrund.

Tabelle 5.1: Durchflussmenge des Wassers für die Wasserspülung in den einzelnen Tiefenintervallen während des Sonderversuchs zur Untersuchung des Einflusses der Wassermenge auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers.

Intervall Nr.	Tiefenintervall [m]	Durchflussmenge [l/min]
I	0 - 2,0	400
II	2,0 - 4,0	300
III	4,0 - 6,0	400
IV	6,0 - 8,0	110

In Abbildung 5.16 ist der zeitliche Verlauf der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, des Vorlaufwinkels, der Durchflussmenge des Wassers und der Rütteltiefe während des Einvibrierens in den bereits verdichteten Untergrund dargestellt. Auf eine Darstellung des konstanten Rüttleranpressdrucks wird beim gegenständlichen Versuch verzichtet.

Im Zuge der Versuchsauswertung wird die Eindringgeschwindigkeit der Rüttlerspitze ermittelt und der zugeführten Wassermenge gegenübergestellt. Es ist anhand des zeitlichen

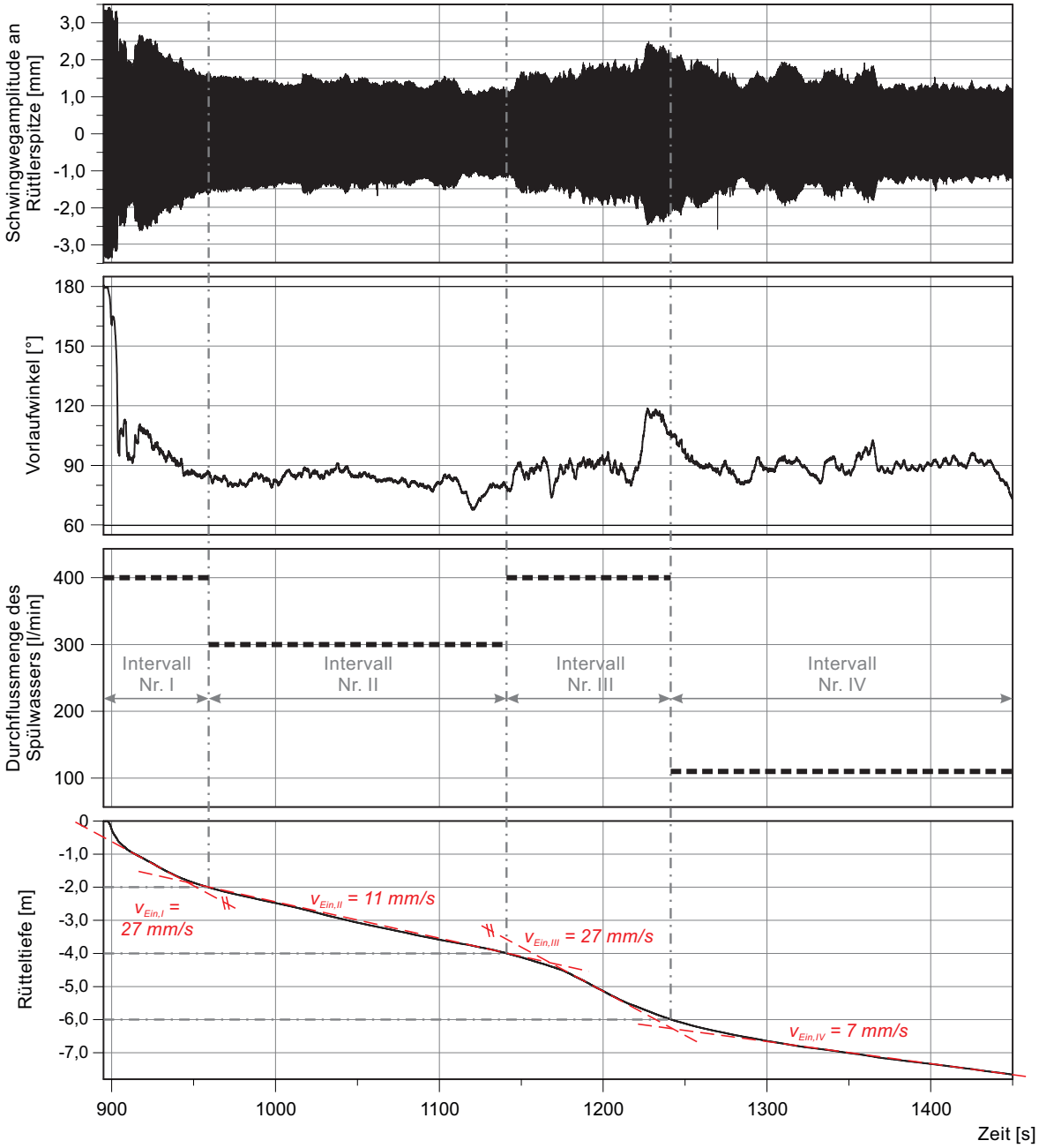


Abbildung 5.16: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Durchflussmenge des Wassers und Rütteltiefe während eines Sonderversuchs zur Untersuchung des Einflusses der Wassermenge auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers, bei einem konstanten Rüttleranpressdruck von 50 bar. Die rot strichlierten Linien kennzeichnen die jeweils konstante Eindringgeschwindigkeit.

Verlaufs der Rütteltiefe klar ersichtlich, dass die Eindringgeschwindigkeit des Tiefenrüttlers von der Durchflussmenge des Spülwassers bedeutend abhängt. Im zeitlichen Verlauf der Rütteltiefe ergeben sich in den einzelnen Tiefenintervallen annähernd lineare Bereiche, die eine konstante Eindringgeschwindigkeit bedeuten. Auf dem zeitlichen Verlauf der Rütteltiefe wird die konstante Eindringgeschwindigkeit für die einzelnen Tiefenintervalle mit roten strichlierten Linien markiert. In den Tiefenintervallen *Nr. I* und *Nr. III* mit der größten

Durchflussmenge ergeben sich Bereiche mit annähernd konstanter Eindringgeschwindigkeit jeweils erst im mittleren Bereich des Intervalls. In den beiden Tiefenintervallen *Nr. I* und *Nr. III* ist die Eindringgeschwindigkeit aufgrund der gleichen Durchflussmenge des Wassers etwa gleich groß und beträgt 27 mm/s, welche wesentlich höher ist als jene in den Tiefenintervallen *Nr. II* und *Nr. IV*. Das Tiefenintervall *Nr. IV* mit der geringsten Durchflussmenge zeigt gleichzeitig die geringste Eindringgeschwindigkeit von 7 mm/s. Im Tiefenintervall *Nr. II* ist sowohl die Durchflussmenge des Wassers als auch die Eindringgeschwindigkeit höher als im Tiefenintervall *Nr. IV*.

Die Ergebnisse des gegenständlichen Versuchs zeigen, dass eine höhere Durchflussmenge an der Rüttlerspitze prinzipiell ein schnelleres Erodieren des Korngefüges und damit eine höhere Eindringgeschwindigkeit der Rüttlerspitze sicherstellt. Des Weiteren weisen die Ergebnisse darauf hin, dass die Wasserspülung eine wesentliche Systemkomponente bei der Rütteldruckverdichtung darstellt.

Dieser Versuch ermöglicht zwar keine systematische Auswertung der Zusammenhänge zwischen der Durchflussmenge des Wassers und dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers, es sind jedoch bestimmte Tendenzen erkennbar. Die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und der Vorlaufwinkel bewegen sich während der gesamten Versuchsdurchführung, in den einzelnen Tiefenintervallen – vor allem in den Tiefenintervallen *Nr. II* und *Nr. IV* mit den geringeren Durchflussmengen – in einer vergleichsweise engen Bandbreite. In den beiden Tiefenintervallen *Nr. I* und *Nr. III* mit höherer Eindringgeschwindigkeit ist sowohl die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze als auch der Vorlaufwinkel tendenziell höher, als in den Intervallen mit niedrigerer Durchflussmenge.

5.4 Einfluss der Spannung an der Kontaktfläche zwischen Rüttlerspitze und Boden auf das Wellenfeld an der Geländeoberfläche

Die Rütteldruckverdichtung verursacht im zu verdichtenden Boden bleibende Verformungen, eine Reduktion des Porenvolumens im Boden sowie eine Erhöhung dessen Dichte und Steifigkeit. Ab einem bestimmten Abstand vom Tiefenrüttler treten jedoch keine bleibenden Verformungen auf. In diesem unbeeinflussten Bodenbereich hat der Verdichtungsprozess keinen nennenswerten Einfluss auf die Lage und Orientierung der Einzelkörner. Zufolge der Rüttlerschwingung treten jedoch auch hier zyklische Verformungen im Boden auf, die durch den Verdichtungsvorgang induzierten seismischen Wellen breiten sich in Form von Raumwellen und Oberflächenwellen aus.

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen stellte man Messaufnehmer an der Geländeoberfläche auf, um das Wellenfeld an der Geländeoberfläche während der Verdichtungsversuche messtechnisch zu erfassen. Dabei kamen hauptsächlich dreiaxiale Beschleunigungsaufnehmer des *Typs EpiSensor FBA ES-T* zur Anwendung. Die Messaufnehmer installierte man in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt, auf zwei Teilsysteme unterteilt, auf Fernfeld- und Nahfeldsensoren. Die Veränderung der Position der Sensoren im Nahfeld erfolgte regelmäßig. Diese stellte man in der Umgebung der jeweiligen

Verdichtungsstrecke in unterschiedlichen Abständen vom jeweiligen Rüttleransatzpunkt, um das Wellenfeld im unmittelbaren Nahbereich des Tiefenrüttlers erfassen zu können. Die Sensoren im Fernfeld blieben über die gesamte Versuchsserie in ihrer Position unverändert. Aus diesem Grund ergeben sich für die einzelnen Verdichtungsversuche geringfügig unterschiedliche Sensorkonfigurationen. Die Aufzeichnung der Messsignale der Oberflächensensoren erfolgte mit den weiteren Messsignalen zeitsynchronisiert. Eine ausführliche Beschreibung des Messsystems an der Geländeoberfläche ist Abschnitt 4.5.3 zu entnehmen.

Für die Betrachtung des Wellenfeldes an der Geländeoberfläche wird im Folgenden die Schwinggeschwindigkeit herangezogen. Diese kann entweder direkt gemessen, oder wie im gegenständlichen Fall durch einfache Integration des gemessenen Beschleunigungssignals ermittelt werden. Die resultierende Schwingschnelle v_R lässt sich anhand der Schwinggeschwindigkeit in drei orthogonalen Achsenrichtungen gemäß *ÖNORM S 9020* [111] wie folgt bestimmen:

$$v_R = \sqrt{{v_x}^2 + {v_y}^2 + {v_z}^2} \tag{5.1}$$

Im Zuge der Datenauswertung erfolgte die Ermittlung des zeitlichen Verlaufs der resultierenden Schwingschnelle $v_{R,i}$[7] nach Gleichung 5.1, für die einzelnen Messaufnehmer in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt. Anschließend wurde nach Gleichung 5.2 die Übertragungsfunktion Γ_i berechnet. Diese stellt jeweils das Verhältnis der zeitlichen Verläufe der resultierenden Schwingschnelle $v_{R,i}$ für die Messaufnehmer in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt und der Schwinggeschwindigkeitsamplitude des Tiefenrüttlers $v_{Rüttlerspitze}$ dar.

$$\Gamma_i = \frac{v_{R,i}}{|v_{Rüttlerspitze}|} \tag{5.2}$$

Im Folgenden wird die Übertragungsfunktion Γ_i betrachtet und dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers gegenübergestellt. Diese erfolgt vorerst für den standardmäßigen Rüttlerbetrieb, anschließend wird der Einfluss der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden untersucht. Die vorliegende Betrachtung beruht auf der detaillierten Diskussion der beiden Verdichtungsversuche aus Abschnitt 5.3.2 und 5.3.3.

5.4.1 Standardmäßiger Rüttlerbetrieb

Im Zuge des betrachteten Verdichtungsversuchs steuerte der Gerätefahrer den Verdichtungsprozess nach eigenem Ermessen, die Verdichtung erfolgte im standardmäßigen Rüttlerbetrieb. In Abbildung 5.17 ist die Übertragungsfunktion Γ_i für sieben Messaufnehmer aufgetragen, die beim betrachteten Verdichtungsversuch in einem Abstand zwischen 7,0 m und 119,2 m vom Rüttleransatzpunkt entfernt aufgestellt waren, wobei die zu den unterschiedlichen Sensoren zugehörigen Diagramme mit unterschiedlichen Farben gekennzeichnet sind. Darüber hinaus sind die beiden Parameter zur Charakterisierung des Bewegungsverhaltens, die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und der Vorlaufwinkel, sowie der Rütt-

[7] Der Index i steht für den Abstand des jeweiligen Sensors vom Rüttleransatzpunkt.

leranpressdruck und die Rütteltiefe dargestellt. Der Fokus ist hierbei auf einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke.

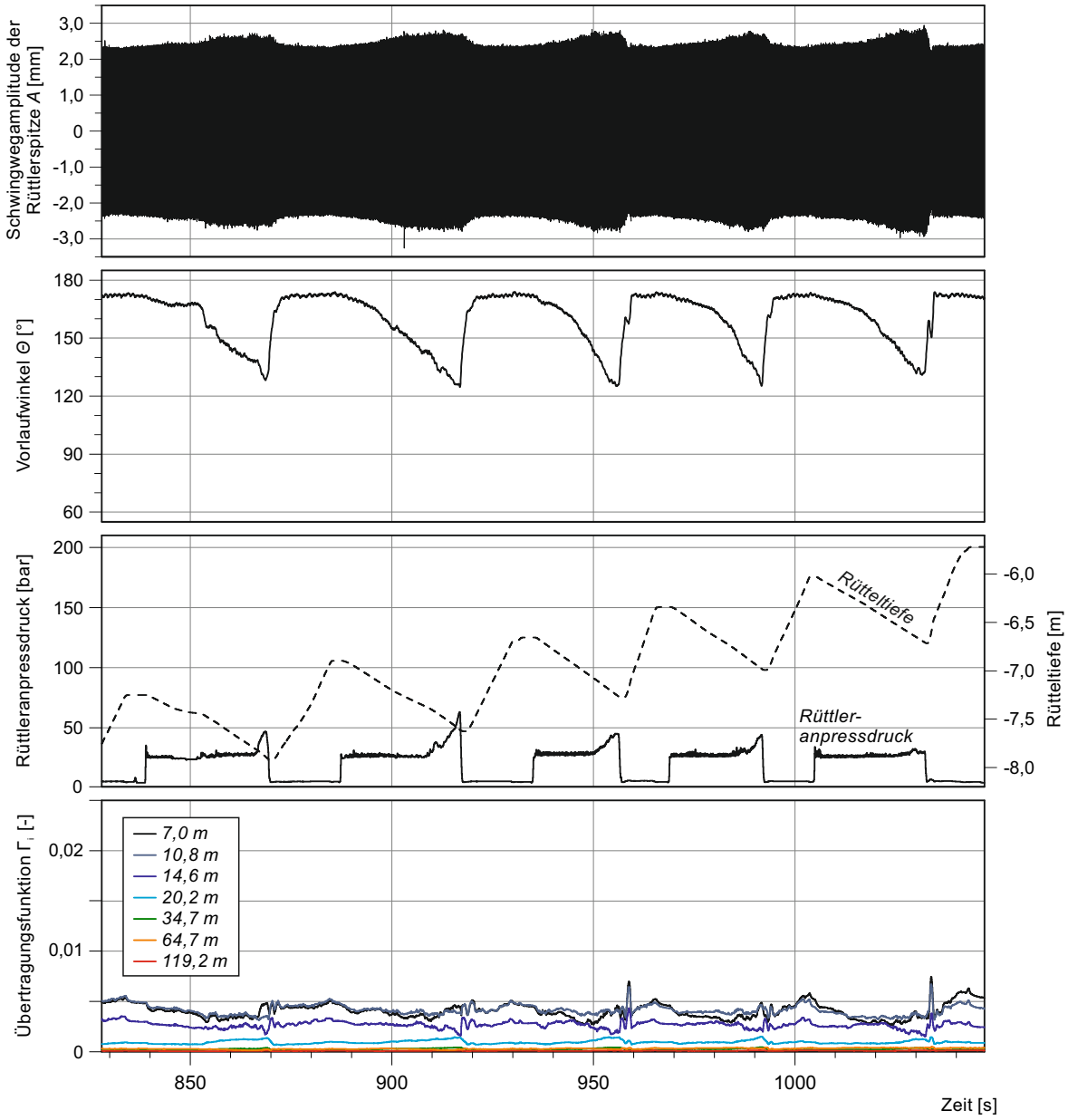


Abbildung 5.17: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe sowie die Übertragungsfunktion Γ_i in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke im standardmäßigen Rüttlerbetrieb.

Die Übertragungsfunktion Γ_i zeigt bei den Sensoren, die näher zum Rüttleransatzpunkt aufgestellt waren, tendenziell höhere Werte, und bewegt sich bei etwa 0,005. Mit zunehmendem Abstand vom Rüttleransatzpunkt ist die resultierende Schwingschnelle und damit das Werteniveau der Übertragungsfunktion Γ_i tendenziell niedriger.

Wie in Abschnitt 5.3.2 diskutiert, bleibt beim gegenständlichen Verdichtungsversuch die Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden vergleichsweise niedrig, da der Gerä-

tefahrer die einzelnen Verdichtungsschritte frühzeitig, bei einem vergleichsweise niedrigen Rüttleranpressdruck abbrach. Dieser Zeitpunkt ist von einem typischen Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers geprägt, von einem lokalen Maximum der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und von einem Vorlaufwinkel zwischen etwa 120° und 130°. Zu diesem Zeitpunkt zeigt der Rüttleranpressdruck auch sein lokales Maximum. Im zeitlichen Verlauf der Übertragungsfunktion Γ_i können beim gegenständlichen Verdichtungsversuch keine maßgeblichen Schwankungen beobachtet werden, in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt bleibt ihr Werteniveau während der betrachteten Verdichtungsschritte annähernd konstant. Dieser Umstand erlaubt die Schlussfolgerung, dass sich das Wellenfeld an der Geländeoberfläche im Zuge der Verdichtung im standardmäßigen Rüttlerbetrieb – bei einer vergleichsweise niedrigen Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden – nicht maßgeblich ändert.

5.4.2 Erhöhte Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden

Im Zuge des betrachteten Verdichtungsversuchs wurden die einzelnen Verdichtungsschritte – gegenüber dem in Abschnitt 5.4.1 diskutierten Verdichtungsversuch – im Sinne einer Parametervariation nicht bei einer aus Sicht des Gerätefahrers optimalen Absenktiefe abgebrochen. Diese wurden weitergeführt, bis beim jeweiligen Verdichtungsschritt praktisch kein weiteres Eindringen mehr in den zu verdichtenden Boden möglich war. Dadurch entstand eine deutlich höhere Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden als im Standardbetrieb.

Die erhöhte Kontaktspannung zeigte sich im deutlich höheren Rüttleranpressdruck im Vergleich zum standardmäßigen Betrieb. Wie in Abschnitt 5.3.2 aufgezeigt, hat die erhöhte Kontaktspannung einen entscheidenden Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers. In Abbildung 5.18 sind die Parameter zur Charakterisierung des Bewegungsverhaltens sowie der Rüttleranpressdruck und die Rütteltiefe dargestellt. Darüber hinaus ist analog zur Abbildung 5.17 die Übertragungsfunktion Γ_i für Messaufnehmer in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt aufgetragen. Da die beim gegenständlichen Verdichtungsversuch angewendete Sensorkonfiguration von jenem beim oben diskutierten Versuch abwich, ergaben sich für diesen Versuch geringfügig unterschiedliche Sensorabstände. Diese sind in Abbildung 5.18 aufgetragen.

Gegenüber dem standardmäßigen Rüttlerbetrieb ist hierbei im zeitlichen Verlauf der Übertragungsfunktion Γ_i eine maßgebliche Änderung im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte festzustellen. Am Beginn der Verdichtungsschritte, solange die Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden vergleichsweise niedrig ist, ist das Werteniveau des Verhältnisses Γ_i annähernd konstant und bewegt sich etwa der gleichen Größenordnung wie im oben diskutierten Standardbetrieb. Dieses Verhalten kann etwa bis zum typischen Bewegungsmuster des Tiefenrüttlers beobachtet werden, bei dem im Standardbetrieb die einzelnen Verdichtungsschritte abgebrochen werden. Dieses ist durch ein lokales Maximum der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und von einem Vorlaufwinkel zwischen etwa 120° und 130° charakterisiert. Gegenüber dem Standardbetrieb, d. h. bei einer erhöhten Kontakt-

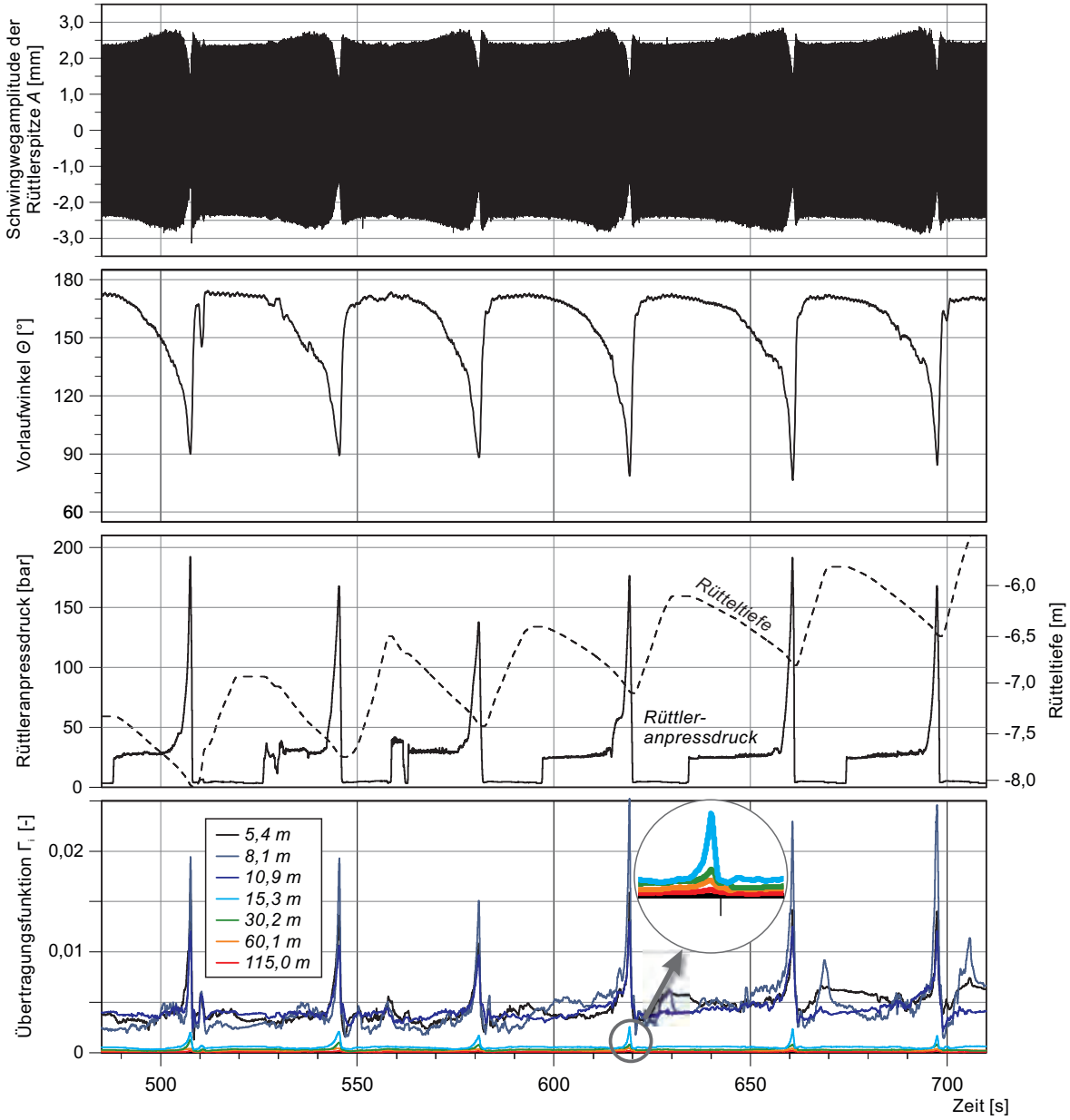


Abbildung 5.18: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe sowie die Übertragungsfunktion Γ_i in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke bei erhöhter Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden.

spannung zwischen Rüttlerspitze und Boden, welche vom markant ansteigenden Rüttleranpressdruck indiziert wird, steigt das Werteniveau der Übertragungsfunktion Γ_i bei sämtlichen betrachteten Messsensoren deutlich an. Der Anstieg ist bei den Messaufnehmern, die näher zum Rüttleransatzpunkt positioniert waren tendenziell stärker ausgeprägt. Bei den Messsensoren in größeren Abständen vom Tiefenrüttler ist ebenfalls ein eindeutiger Anstieg im zeitlichen Verlauf der Übertragungsfunktion Γ_i zu beobachten. Dies bedeutet, dass sich das Wellenfeld an der Geländeoberfläche bei einer erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden maßgeblich ändert. Dieser Zustand ermöglicht die Übertragung

eines deutlich höheren Anteils der Rüttlerschwingung über den zu verdichtenden Bodenbereich auf die Geländeoberfläche. Dieser Umstand lässt auf eine wesentliche Änderung im beeinflussten Bodenbereich zufolge der Einwirkungen durch den Tiefenrüttler im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte schließen. Der Einfluss der erhöhten Kontaktspannung zeigt sich somit nicht nur im Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers, sie beeinflusst zudem das Wellenfeld an der Geländeoberfläche maßgeblich. Eine mögliche Erklärung für dieses Verhalten wird in Abschnitt 6.7.2 aufgezeigt.

5.5 Arbeitshypothese zur Erklärung wesentlicher physikalischer Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem

Während der Rütteldruckverdichtung tragen vom Verdichtungsgerät induzierte bodenphysikalische Vorgänge zur tiefreichenden Verbesserung des anstehenden Bodens bei. Die Gesamtheit der unterschiedlichen bodenphysikalischen Vorgänge im zu verdichtenden Boden stellt ein äußerst komplexes Bild dar. Das grundlegende Verständnis des Verdichtungsprozesses und die Abgrenzung der Vorgänge, die bei der Veränderung des Verdichtungszustandes vom anstehenden Boden eine essenzielle Rolle spielen, sind jedoch für die Entwicklung der Grundlagen eines Systems zur arbeitsintegrierten Qualitätskontrolle der Rütteldruckverdichtung unerlässlich. Im Folgenden ist eine Arbeitshypothese zur Erklärung der wesentlichen physikalischen Vorgänge während der Verdichtung vorzustellen und zu diskutieren. Die maßgeblichen Einwirkungen durch den Tiefenrüttler auf das Korngerüst werden dabei auf Basis der Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen auf dem Versuchsfeld in Fisching aufgezeigt und erläutert.

Es sei an dieser Stelle erneut angemerkt, dass diese Arbeitshypothese zur Erklärung der wesentlichen physikalischen Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem auf Beobachtungen und Messergebnissen aus den im Rahmen der gegenständlichen Forschungsarbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen beruht. Daher kann dieses aus heutiger Sicht ausschließlich für die Randbedingungen während der Experimente auf dem Versuchsfeld in Fisching für das untersuchte Bodenart in Kombination mit dem angewendeten Tiefenrüttler als gültig angesehen werden.

Bei der Diskussion der Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem sind im Folgenden die beiden Arbeitsphasen Einvibrieren und der Verdichtungsvorgang gesondert zu betrachten.

5.5.1 Vorgänge beim Einvibrieren des Tiefenrüttlers

In der ersten Arbeitsphase der Rütteldruckverdichtung wird der Tiefenrüttler bis zur geplanten Verdichtungstiefe abgesenkt, diese Arbeitsphase ist als Einvibrieren bezeichnet. Um den Zeitaufwand für diese Arbeitsphase zu reduzieren, ist beim Einvibrieren des Tiefenrüttlers eine möglichst hohe Eindringgeschwindigkeit erzielt. Diese ist in der Regel nahezu konstant gehalten.

Abbildung 5.19: Kraterförmiger Bereich um den Tiefenrüttler während der Arbeitsphase Einvibrieren, gefüllt mit einem Gemisch aus erodiertem Boden und Wasser

Während der Arbeitsphase Einvibrieren findet im Untergrund ein Destrukturierungsprozess statt. Der Tiefenrüttler verändert das bestehende Korngefüge durch die von ihm ausgelösten Einwirkungen. Während des Absenkvorgangs schafft der Tiefenrüttler einen etwa kraterförmigen Bereich an der Geländeoberfläche (siehe Abbildung 5.19). Dieser Krater an der Oberfläche gibt Hinweis auf einen etwa zylinderförmigen Bereich um den Tiefenrüttler, in dem im Zuge des Einvibrierens die Kornstruktur sich ändert. Dieser mit Boden-Wasser Gemisch gefüllte zylinderförmige Bereich trägt in Abbildung 5.20 die Farbe hellblau.

Der Boden wird zwar im Bereich der Rüttlerspitze während des Einvibrierens zufolge des Eindringens der Rüttlerspitze in einem gewissen Maß auch seitlich verdrängt und dabei verdichtet, im Regelfall erfolgt jedoch keine maßgebliche Bodenverdichtung in dieser Arbeitsphase.

5.5.1.1 Maßgebliche Einwirkungen auf das Korngerüst während des Einvibrierens

Es sind drei wesentliche Einwirkungen auf das Korngerüst durch den Tiefenrüttler in den Vordergrund zu stellen, die zur Destrukturierung des Untergrundes während des Einvibrierens beitragen: die zufolge der Unwuchtrotation hervorgerufene horizontale Rüttlerschwingung, die Kontaktspannung zwischen Rüttler und Boden und die Wasserspülung an der Rüttlerspitze.

Horizontale Rüttlerschwingung

Das Einvibrieren des Tiefenrüttlers bis zur geplanten Verdichtungstiefe erfolgt im Allgemeinen bei konstanter Rüttlerfrequenz. Die durch die horizontale Rüttlerschwingung induzierten dynamischen Einwirkungen versetzen die Bodenkörner in Schwingung, wodurch der

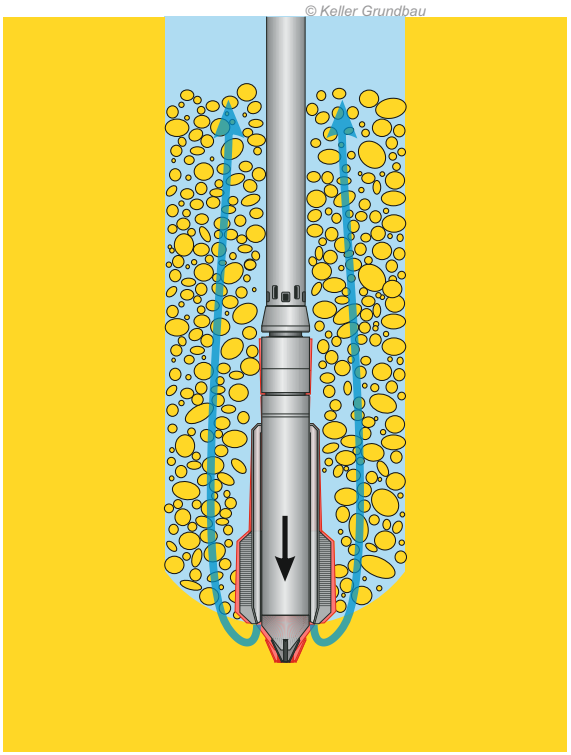


Abbildung 5.20: Erodieren des Korngefüges während der Arbeitsphase Einvibrieren mit blauen Pfeilen zur Kennzeichnung eines möglichen Strömungswegs des Wassers - schematische Darstellung.

Reibungswiderstand zwischen den einzelnen Körnern reduziert oder gegebenenfalls komplett aufgehoben wird. Die horizontale Rüttlerschwingung löst ebenfalls Kornbindungen, wie leichte Verkittung. Zufolge des verringerten Reibungswiderstands zwischen den einzelnen Körnern wird das Eindringen der Rüttlerspitze in den Untergrund erleichtert. Damit stellt die horizontale Rüttlerschwingung eine essenzielle Einwirkung auf das Korngerüst während der Arbeitsphase Einvibrieren dar. Ohne Verringerung des Reibungswiderstands zwischen den einzelnen Körnern wäre das Absenken des Tiefenrüttlers nicht möglich.

Gleichzeitig ist die Rüttler-Boden Interaktion im Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers in dieser Arbeitsphase deutlich. Wie in Abschnitt 5.3 demonstriert, ändert sich das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers laufend im Zuge des Einvibrierens. Sowohl die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze als auch der Vorlaufwinkel schwanken in einer bestimmten Bandbreite, trotz der gleichbleibenden Rüttlerfrequenz und der Durchflussmenge des Wassers für die Wasserspülung sowie der annähernd gleichbleibenden Eindringgeschwindigkeit des Rüttlers. Die Änderung des Bewegungsverhaltens des Rüttlers ist somit lediglich auf den Einfluss der über die Eindringtiefe unterschiedlichen Untergrundeigenschaften zurückzuführen.

Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden

Wie im Abschnitt 5.3.2 aufgezeigt ist, wird beim Einvibrieren eine möglichst hohe, nahezu konstante Eindringgeschwindigkeit erzielt. Um diese gewährleisten zu können, wird das

Eigengewicht der Tragraupe in einem gewissen Maß aktiviert. Demzufolge ist während des Absenkvorgangs durchgehend eine Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden vorhanden, welche eine effiziente Übertragung der horizontalen Rüttlerschwingung auf das Korngefüge ermöglicht und damit eine wesentliche Einwirkung auf das Korngerüst durch den Tiefenrüttler ausübt.

Wasserspülung

Bei der Rütteldruckverdichtung wird während des Absenkvorgangs über Austritte an der Rüttlerspitze oder eventuell an bestimmten Stellen entlang der Verlängerungsrohre Wasser zugeführt.

(a) Wasserspülung über zwei Öffnungen an der Rüttlerspitze.

(b) Austragen und Transport der Feinteile an die Geländeoberfläche durch das Wasser.

Abbildung 5.21: Wasserspülung während der Arbeitsphase Einvibrieren.

Die Menge des zugeführten Wassers hat einen bedeutenden Einfluss auf die erzielbare Eindringgeschwindigkeit. Wie anhand der Ergebnisse des im Abschnitt 5.3.4.2 diskutierten Sonderversuchs gezeigt wurde, kann bei einer höheren Durchflussmenge eine höhere Eindringgeschwindigkeit erzielt werden.

Zufolge der vergleichsweise großen Wassermenge und hohen Strömungsgeschwindigkeit des Wassers führt die Wasserspülung zur Suffosion[8] im Nahbereich des Tiefenrüttlers. Im teilgesättigten Untergrund mit vergleichsweise hoher Durchlässigkeit kann das Spülwasser im Untergrund versickern. Im Zuge der Verdichtung unter dem Grundwasserspiegel wird auch Wasser zugeführt. In vielen Fällen erreicht aber das Wasser die Geländeoberfläche, wobei dieses die abgetrennten feinkörnigen Bodenpartikel an die Geländeoberfläche transportiert (siehe Abbildung 5.21b). Die blauen Pfeile in Abbildung 5.20 zeigen schematisch den möglichen Strömungsweg des Wassers.

Es sind somit im Zusammenhang mit der Wirkung der Wasserspülung auf das Korngerüst im Zuge des Einvibrierens zwei wesentliche Vorgänge zu unterscheiden. Auf der einen Seite trägt die Wasserspülung zum Erodieren des Korngefüges bei. Diesen Effekt bestätigen die Ergebnisse des in Abschnitt 5.3.4.2 diskutierten Sonderversuchs. Auf der anderen Sei-

[8] Suffosion ist eine Erscheinungsform der inneren Erosion. Bei der Suffosion werden feinkörnige Bodenpartikel aus einem grobkörnigen Bodenskelett gelöst und abtransportiert [149]

te werden zufolge der Wasserspülung Feinteile aus dem Bodenskelett ausgetragen, welche seine hydraulische Durchlässigkeit erhöht.

5.5.2 Vorgänge bei der Verdichtung im Pilgerschrittverfahren

Im Abschluss an das Einvibrieren beginnt die zweite Arbeitsphase des Rütteldruckverfahrens, die eigentliche Verdichtung des Bodens. Diese erfolgt von unten nach oben, wobei prinzipiell zwei unterschiedliche Arten von Verdichtungsmethoden zu unterscheiden sind. Der Tiefenrüttler wird entweder stufenweise angehoben und bei den einzelnen Tiefenstufen bei konstanter Rütteltiefe gehalten, oder der Verdichtungsvorgang wird im Pilgerschrittverfahren ausgeführt (siehe Abschnitt 2.2.1.2). Im Zuge der gegenständlichen experimentellen Untersuchungen führte man die Rütteldruckverdichtung aufgrund der vorherrschenden Untergrundbedingungen bei sämtlichen Verdichtungsversuchen im Pilgerschrittverfahren durch. Folglich, beschäftigt sich dieser Abschnitt mit dieser Art der Verdichtungsmethoden.

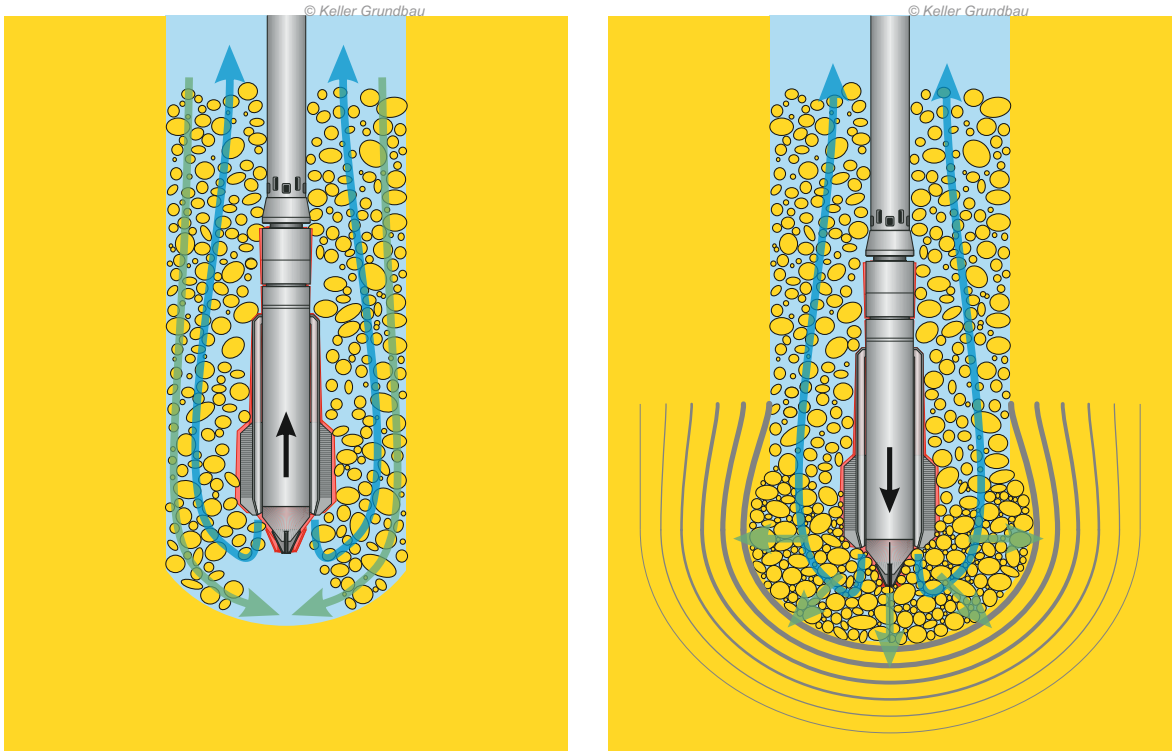
Im Zuge der Verdichtung im Pilgerschrittverfahren hebt der Gerätefahrer den Tiefenrüttler an und senkt ihn anschließend wieder in den zu verdichtenden Boden ab. Die Verdichtung führt als Restrukturierungsprozess zu Veränderungen in der Kornstruktur des zu verdichtenden Bodenbereiches. Im Folgenden erfolgt die Diskussion der wesentlichen physikalischen Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem während der Verdichtung im Pilgerschrittverfahren analog zur im Abschnitt 5.5.1 betrachteten Arbeitsphase Einvibrieren, weiterhin im Sinne einer Arbeitshypothese.

5.5.2.1 Rütteldruckverdichtung als Restrukturierungsprozess des Korngefüges

Nach dem Erreichen der geplanten Verdichtungstiefe hebt der Gerätefahrer den Tiefenrüttler an, wobei das den Tiefenrüttler umgebende Boden-Wasser-Gemisch entlang des Rüttlerkörpers nach unten, in den unterhalb der Rüttlerspitze zyklisch entstehenden, mit Wasser gefüllten Hohlraum strömt.[9] Anschließend wird der Tiefenrüttler wieder abgesenkt, in Folge dessen erfolgt eine Verdichtung und Verdrängung des Boden-Wasser-Gemisches im Bereich der Rüttlerspitze. Die grünen Pfeile in Abbildung 5.22a und 5.22b zeigen die maßgebliche Richtung der Bewegung des den Tiefenrüttler umgebenden Boden-Wasser-Gemisches während des Hebe- bzw. des Absenkvorgangs. Im standardmäßigen Rüttlerbetrieb wählen die Gerätefahrer den Maß des Absenkens und des Anhebens (siehe Abschnitt 5.3.2). Die Stromfrequenz und dadurch Rüttlerfrequenz sind im Regelfall während des gesamten Verdichtungsvorgangs konstant gehalten.

Im Zuge der Verdichtung im Pilgerschrittverfahren wird das Material periodisch verdichtet bzw. primär nach unten und seitlich verdrängt, wobei das Porenvolumen des Bodens reduziert und die Anzahl der Korn-zu-Korn Kontakte sowie die Kontaktspannung zwischen den Einzelkörnern sukzessive erhöht werden. Diese Arbeitshypothese besagt, dass im Zuge der Rütteldruckverdichtung in Pilgerschrittverfahren primär im Bereich der Rüttlerspitze bleibende Verformungen entstehen.

[9] Die Abwärtsbewegung des Bodens während des Verdichtungsprozesses zeigen auch die numerischen Simulationsergebnisse von *Henke et al.* [57] (siehe Abbildung 2.21).



(a) Anheben des Tiefenrüttlers vor dem ersten Verdichtungsschritt.

(b) Verdichtung und Verdrängung des Bodens im Bereich der Rüttlerspitze.

Abbildung 5.22: Beginn des Verdichtungsprozesses nach dem Erreichen der geplanten Verdichtungstiefe, mit grünen und blauen Pfeilen zur Kennzeichnung der maßgeblichen Bewegungsrichtung des Bodens sowie des Strömungswegs des Wassers bzw. mit grauen Linien zur Veranschaulichung von bleibenden Verformungen ohne nennenswerte Restrukturierung im Korngefüge.

Die Realisierung der messtechnischen Erfassung der Verformungen oder Spannungen im Bereich unterhalb der Rüttlerspitze war im Rahmen der gegenständlichen experimentellen Untersuchungen nicht möglich. Es sind jedoch in der Fachliteratur zahlreiche numerische und experimentelle Untersuchungen zu den Mechanismen bei monotonen und zyklischen Penetrationsprozessen bekannt. Ein umfassender Überblick der experimentellen und theoretischen Untersuchung zu Penetrationsprozessen ist beispielsweise bei *Vogelsang* [141] und bei *White und Bolton* [146] gegeben.

Abbildung 5.23 zeigt exemplarisch einen Vergleich von Verschiebungen im Boden zufolge monotoner Eindringung von Modellpfählen mit „60°-Spitze“ und mit flachem Pfahlfuß anhand von Modellversuchen von *Vogelsang* [141] in mitteldichten wassergesättigten Sand. *Chrisopoulos* [31] untersuchte diese Problemstellung mittels numerischen Simulationen. Bei den beiden untersuchten Pfahltypen treten sowohl vertikale als auch horizontale Verschiebungen im Bodenbereich unterhalb des Pfahlfußes auf. Die vertikalen Verschiebungen (Abbildung 5.23b und 5.23d) konzentrieren sich in einem zwiebelförmigen Bereich. Für die horizontalen Verschiebungen sind „ohrenförmige“ Bereiche mit den betragsgemäß größten Verschiebungen etwa einen Pfahlradius unterhalb der Pfahlschultern charakteristisch. Die Form der beiden Verschiebungsfelder weist große Ähnlichkeit auf, was darauf hindeu-

tet, dass der Geometrie des Pfahlfußes eher eine untergeordnete Bedeutung zukommt.

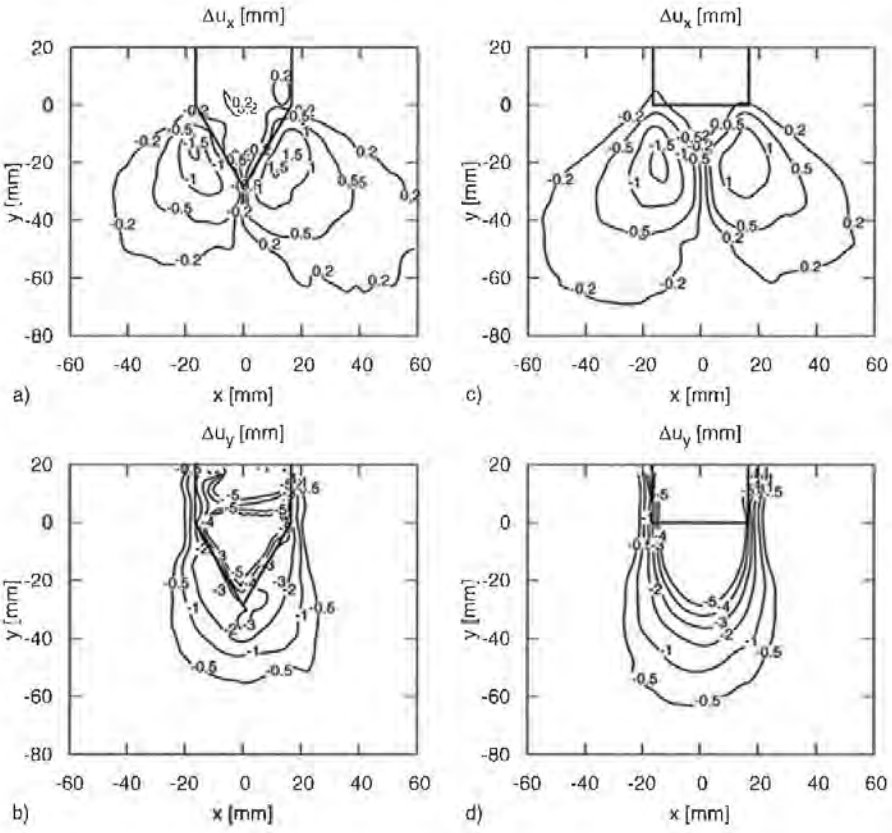


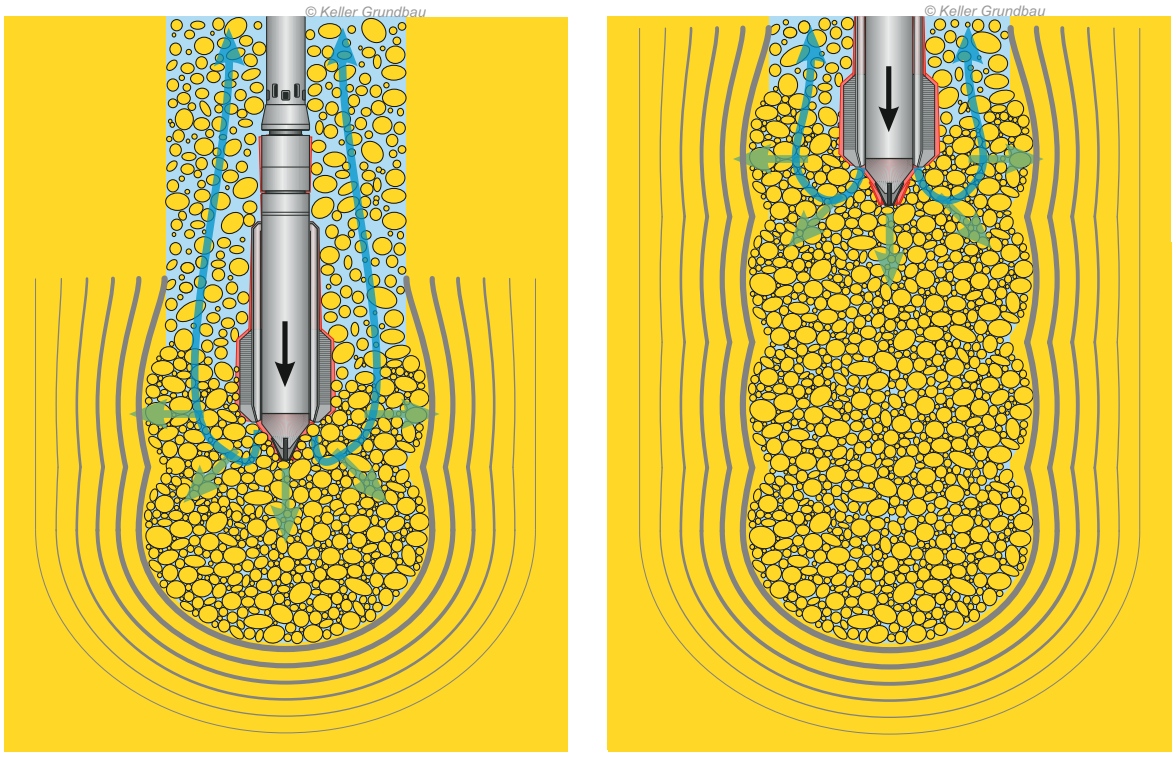
Abbildung 5.23: Vergleich von inkrementellen Verschiebungen in mitteldichten wassergesättigten Sand zufolge monotoner Pfahleindringung horizontale (a) und vertikale (b) Verschiebungen mit „60°-Spitze“ und horizontale (c) und vertikale (d) Verschiebungen mit flachem Pfahlfuß [141].

Das in Abbildung 5.23 dargestelltes Verschiebungsfeld wurde zufolge eines monotonen Penetrationsvorgangs ermittelt, beim Rütteldruckverfahren ist über diesen hinaus eine hochfrequente Schwingung in horizontaler Richtung vorhanden. Im Bodenbereich unterhalb der Rüttlerspitze ist jedoch ein qualitativ ähnliches Verschiebungsfeld wie beim gezeigten monotonen Penetrationsvorgang anzunehmen. Die Untersuchungsergebnisse von *Vogelsang* [141] bestätigen die Annahme der gegenständlichen Arbeitshypothese, dass während der Rütteldruckverdichtung im Pilgerschrittverfahren zufolge des Eindringens der Rüttlerspitze primär im Bodenbereich unterhalb der Rüttlerspitze bleibende Verformungen entstehen, wobei der Boden verdichtet sowie sowohl nach unten als auch seitlich verdrängt wird.

Als Folge der periodisch wiederholten Verdichtungsschritte werden in einem etwa zylinderförmigen Bodenbereich um den Tiefenrüttler bleibende Verformungen erzeugt. Die Verdichtungswirkung beschränkt sich dabei nicht lediglich auf den bereits im Zuge des Einvibrierens beeinflussten Bodenbereich. Abbildung 5.24 veranschaulicht die räumliche Ausbreitung der bleibenden Verformungen im ursprünglich nicht beeinflussten Bodenbereich qualitativ (graue Linien). In radialer Richtung ist mit zunehmendem Abstand vom

Tiefenrüttler von abnehmenden Verformungen des zu verdichtenden Bodens auszugehen. Die erhöhte Anzahl der Korn-zu-Korn Kontakte sowie die erhöhte Kontaktspannung zwischen den Einzelkörnern führt zur Erhöhung der Seitenbettung in radialer Richtung. Die erhöhte Seitenbettung dient gleichzeitig als „Widerlager“ für die zufolge des Eindringens der Rüttlerspitze sukzessive erhöhte Spannung im Korngerüst.

Nach Abschluss des jeweiligen Verdichtungsschrittes hebt man den Tiefenrüttler an und durch erneutes Absenken beginnt mit dem nächsten Verdichtungsschritt. Dieser Prozess führt man bis zur Geländeoberfläche weiter. Die Verdichtung und Verdrängung des Bodens durch periodisches Anheben und Absenken des Rüttlers sowie die fertiggestellte Verdichtungsstrecke sind in Abbildung 5.24 vereinfacht dargestellt. Es ist dabei zu beachten, dass im oberflächennahen Bereich (bis etwa 1,0 m unter Geländeoberkante) in der Regel keine zufriedenstellende Verdichtungswirkung erzielbar ist. Die aufnehmbare Horizontalspannung und damit die Größe der Seitenbettung ist im oberflächennahen Bereich aufgrund der geringen Überlagerungsspannung begrenzt. Eine erhöhte Spannung im Korngerüst zufolge des Eindringens der Rüttlerspitze kann somit in einem grundbruchartigen Versagen münden.



(a) Verdichtung und Verdrängung durch periodisches Anheben und Absenken des Rüttlers.

(b) Fertigstellung der Verdichtung, Ausbildung einer vertikalen Verdichtungsstrecke.

Abbildung 5.24: Verdichtung von unten nach oben im Pilgerschrittverfahren, mit grünen und blauen Pfeilen zur Kennzeichnung der maßgeblichen Bewegungsrichtung des Bodens sowie des Strömungswegs des Wassers bzw. mit grauen Linien zur Veranschaulichung von bleibenden Verformungen ohne nennenswerte Restrukturierung im Korngefüge.

Während des periodischen Anhebens und Absenkens strömt das den Tiefenrüttler umgebende Boden-Wasser-Gemisch entlang des Rüttlerkörpers nach unten in den unterhalb der Rüttlerspitze zyklisch entstehenden, primär mit Wasser gefüllten Hohlraum. Wie Abbil-

dung 5.25 demonstriert, wird der zufolge der Abwärtsbewegung des Materials an der Geländeoberfläche entstehende Hohlraum mit geeignetem Material regelmäßig nachgefüllt, damit der Ringraum um den Tiefenrüttler während des gesamten Verdichtungsprozesses etwa bis zur Geländeoberkante verfüllt bleibt. Somit ist der Tiefenrüttler während des gesamten Verdichtungsvorgangs vom Boden-Wasser-Gemisch umgegeben.

(a) Zulieferung des Verfüllmaterials.

(b) Einbringen des Verfüllmaterials in den zufolge der Abwärtsbewegung des Materials an der Geländeoberfläche entstehende Hohlraum.

Abbildung 5.25: Verfüllen des Hohlraumes um den Tiefenrüttler.

5.5.2.2 Maßgebliche Einwirkungen auf das Korngerüst während der Verdichtung

Während der Verdichtung des Bodens im Pilgerschrittverfahren spielen grundsätzlich die gleichen Einwirkungen durch den Tiefenrüttler auf den zu verdichtenden Boden eine wesentliche Rolle, aufgezeigt bei der Diskussion des Absenkvorgangs (siehe Abschnitt 5.5.1.1).

Horizontale Rüttlerschwingung

Die Rütteldruckverdichtung erfolgt standardmäßig bei konstanter, vergleichsweise hoher Rüttlerfrequenz. Durch die horizontale Rüttlerschwingung werden die Bodenkörner im Nahbereich des Tiefenrüttlers in Schwingung versetzt, welche zur erheblichen Reduktion des Reibungswiderstands zwischen den einzelnen Körnern führt.

Zufolge des abgeminderten Reibungswiderstands zeigt der Boden einen deutlich niedrigeren Widerstand gegen das Eindringen der Rüttlerspitze. Die horizontale Schwingung des Tiefenrüttlers spielt somit während des Verdichtungsvorgangs eine essenzielle Rolle. Gemäß Erfahrungen aus der Ausführungspraxis ist jedoch bei derartigen Untergrundverhältnissen, wie im Falle der gegenständlichen experimentellen Untersuchungen, lediglich durch die horizontale Rüttlerschwingung – d. h. durch Rütteln bei konstanter Rütteltiefe – eine geringere Verdichtungswirkung möglich. In solchen Fällen ist die Rütteldruckverdichtung in Pilgerschrittverfahren auszuführen.

Analog zur Arbeitsphase Einvibrieren gilt auch während der Verdichtung, dass die Rüttler-Boden Interaktion das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers beeinflusst. Wie im Abschnitt 5.3 eingehend diskutiert, zeigt sich die periodische Änderung des Bewegungs-

verhaltens bei fortschreitender Verdichtung im zeitlichen Verlauf der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und des Vorlaufwinkels.

Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden
Das periodische Absenken des Rüttlers spielt neben der horizontalen Rüttlerschwingung – bei Untergrundverhältnissen wie im Falle der gegenständlichen experimentellen Untersuchungen – für die Verdichtungswirkung eine essenzielle Rolle. Beim Eindringen in das zu verdichtende Boden-Wasser-Gemisch wird das Material im Bereich der Rüttlerspitze verdichtet sowie primär seitlich und nach unten verdrängt. Dabei verringert sich das Porenvolumen vom lockeren Boden-Wasser Gemisch, das Wasser entweicht aus dem Porenraum, wodurch sich dessen Steifigkeit sukzessive erhöht. Ohne Verringerung der Scherfestigkeit durch die horizontale Rüttlerschwingung wäre jedoch das Absenken des Tiefenrüttlers und damit eine Bodenverdichtung nicht möglich.

Zufolge der fortschreitenden Verdichtung und der sukzessive erhöhten Seitenbettung ist die Übertragung einer höheren Anpresskraft über den Rüttlerkörper auf den zu verdichtenden Boden möglich. Dadurch steigt die Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden sowie die über das Korngerüst übertragene Spannung sukzessive an. Der Widerstand des zu verdichtenden Bodens gegen das Eindringen Rüttlerspitze nimmt mit zunehmender Eindringtiefe zu (siehe Abschnitt 5.3.3). Ab einer bestimmten Eindringtiefe ist praktisch keine weitere Verdichtung möglich, wobei der Widerstand gegen das Eindingen der Rüttlerspitze – in Form des Rüttleranpressdrucks – rasch ansteigt.

Die zunehmende Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden, die sich – wie oben beschrieben – im ansteigenden Rüttleranpressdruck zeigt, ist damit ein deutliches Zeichen für eine fortschreitende Verdichtung beim aktuellen Verdichtungsschritt. Auch die Ergebnisse der gegenständlichen experimentellen Untersuchungen zeigen einen signifikanten Einfluss der Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers (siehe Abschnitt 5.3).

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden eine maßgebliche Einwirkung auf das Korngerüst durch den Tiefenrüttler während der Verdichtung im Pilgerschrittverfahren hat.

Wasserspülung
Während der Verdichtung wird in der Regel Wasser an der Rüttlerspitze zugeführt. Die Wasserspülung spielt während der Verdichtung jedoch eine untergeordnete Rolle. Diese wäscht die noch im Korngerüst verbleibenden Feinteile aus, bzw. verhindert das Verstopfen der Wasseraustritte durch den eindringenden Boden.

5.5.3 Unterteilung des Bodenbereichs um die fertiggestellte Verdichtungsstrecke

Die Verdichtungsstrecke kann in radialer Richtung sehr grob in zwei Teilbereiche: in einen „Kornumlagerungsbereich“ und in einen „Verdrängungsbereich “ unterteilt werden. Ab-

bildung 5.26 zeigt einen Ausschnitt der Verdichtungsstrecke mit schematisch dargestellter Unterteilung in Bereiche mit verschiedener Auswirkung der Tiefenverdichtung. Zusätzlich erfolgt eine qualitative Darstellung der Bodensteifigkeit in Abhängigkeit vom radialen Abstand vom Zentrum der Verdichtungsstrecke im Vergleich zum Ausgangszustand.

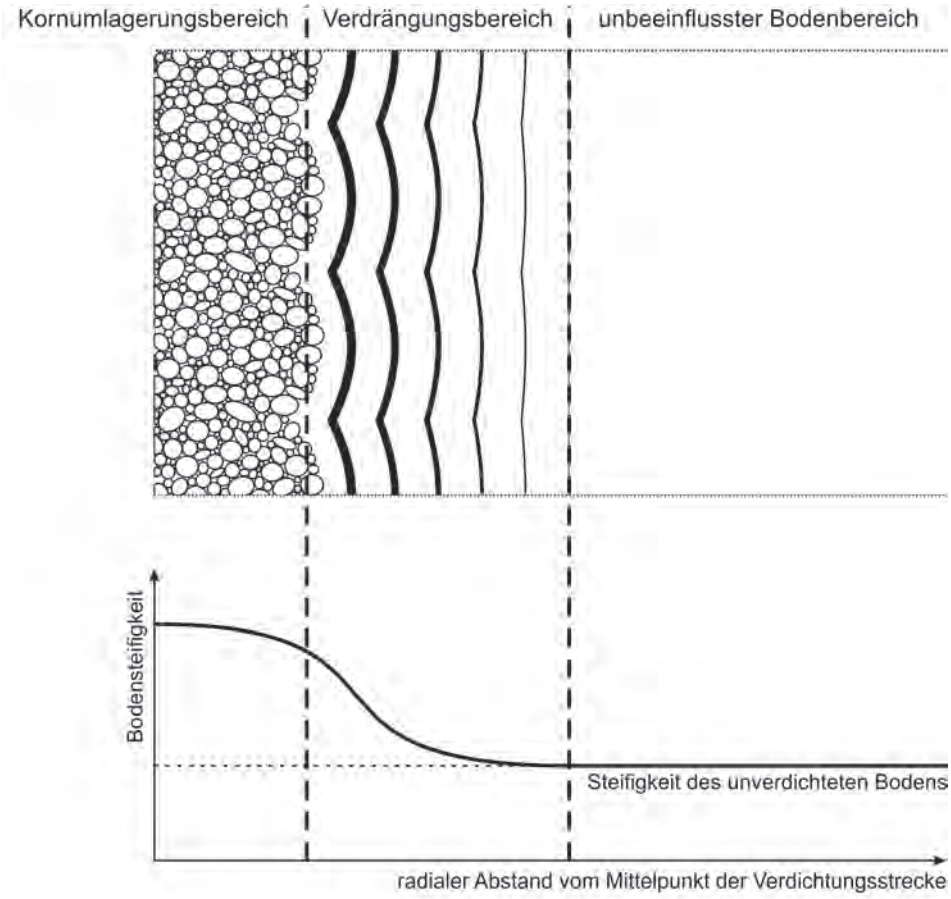


Abbildung 5.26: Schematische Darstellung der Unterteilung der fertiggestellten Verdichtungsstrecke mit qualitativer Darstellung der Bodensteifigkeit im Vergleich zum Ausgangszustand.

Kornumlagerungsbereich

Der zentrale Bereich der Verdichtungsstrecke erhält von nun an die Bezeichnung Kornumlagerungsbereich. In diesem Bereich wird das ursprüngliche Korngefüge restrukturiert, in dem der Boden während des Einvibrierens bis zur geplanten Verdichtungstiefe destrukturiert und im Zuge der Verdichtung von unten nach oben verdichtet wird. Dabei kann durch die Kornumlagerung bei gleichzeitiger Verringerung des Porenraumes eine vergleichsweise hohe Steifigkeit im Vergleich zum Ausgangszustand erzielt werden.

Verdrängungsbereich

Die seitliche Verdrängung des Bodens erzeugt angrenzend an den Kornumlagerungsbereich bleibende Verformungen. Dieser Bereich ist im Folgenden als Verdrängungsbereich

bezeichnet. Im Verdrängungsbereich wird die ursprüngliche Kornstruktur nicht nennenswert neu strukturiert, trotzdem durch den Verdichtungsprozess beeinflusst. Das Korngefüge wird vorrangig in radialer Richtung verformt, das Porenvolumen reduziert sich und die Lagerungsdichte des Bodens erhöht sich daher. Die Verdichtungswirkung nimmt mit zunehmendem Abstand vom Tiefenrüttler ab, dementsprechend verringert sich auch die Steifigkeit des verbesserten Bodens.

Unbeeinflusster Bodenbereich
Die räumliche Ausbreitung der bleibenden Verformungen ist begrenzt, ab einem bestimmten Abstand vom Tiefenrüttler treten keine bleibenden Verformungen auf, ab diesem Abstand entspricht die Bodensteifigkeit praktisch der Steifigkeit des Bodens vor Verdichtung. Im unbeeinflussten Bodenbereich hat der Verdichtungsprozess keinen nennenswerten Einfluss auf die Lage und Orientierung der Einzelkörner in der ursprünglichen Kornstruktur, zufolge der horizontalen Rüttlerschwingung treten jedoch, zyklische Verformungen auch hier in Form von seismischen Wellen auf.

5.5.4 Bodenverflüssigung als kritisch zu hinterfragende Modellvorstellung für die Rütteldruckverdichtung

Wie in Abschnitt 2.5.2 diskutiert, wird die Verflüssigung des Bodens im unmittelbaren Nahbereich des Tiefenrüttlers in zahlreichen Veröffentlichungen [12], [45], [70], [106], [130] als mögliche Ursache für die Verdichtung des Bodens bezeichnet.

Die Ergebnisse der gegenständlichen experimentellen Untersuchungen geben keinen Hinweis auf eine Bodenverflüssigung während der Rütteldruckverdichtung. Würde eine Bodenverflüssigung zufolge der Einwirkungen durch den Tiefenrüttler auf den Boden auftreten, wäre dieser Vorgang mit einer sukzessiven Entfestigung des beeinflussten Bodenbereiches verbunden. Die ansteigende Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden sowie die ansteigende Spannung im Korngerüst, die sich in Form des zunehmenden Rüttleranpressdrucks zeigen, sprechen nicht für eine Entfestigung, sondern vielmehr für eine Verfestigung des beeinflussten Bodenbereiches. Der sukzessive ansteigende Widerstand des zu verdichtenden Bodens gegen Eindringen der Rüttlerspitze im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte, stellt somit ein wesentliches Argument gegen die Verflüssigung des Bodens dar.

Aus Abschnitt 5.5.2 resultierend, beschränkt sich die Verdichtungswirkung nicht ausschließlich auf den Kornumlagerungsbereich. Maßgebliche bleibende Verformungen werden auch außerhalb des Kornumlagerungsbereichs, im Verdrängungsbereich, bewirkt. Die Voraussetzung für die vergleichsweise großen bleibenden Verformungen im Verdrängungsbereich sind hohe Spannungen, die ausschließlich über den Kornumlagerungsbereich auf den Verdrängungsbereich übertragen werden können. Würde sich der Boden im Kornumlagerungsbereich zufolge einer Bodenverflüssigung entfestigen, wäre die Übertragung von Korn-zu-Korn-Spannungen nicht möglich.

Bei der Rütteldruckverdichtung handelt es sich um eine hochzyklische Belastung eines

wassergesättigten kohäsionslosen Bodens. Somit sind zwei Voraussetzungen für die Bodenverflüssigung nach *Kramer* [75] (siehe Abschnitt 2.5.2.2) ebenfalls im Zuge der Untersuchungen im Rahmen der gegenständlichen Forschungsarbeit erfüllt (siehe Tabelle 5.2): Aufgrund der erhöhten hydraulischen Durchlässigkeit zufolge des Ausspülens der Feinteile aus der Kornstruktur und der kurzen Drainwege herrschen aber im unmittelbaren Nahbereich des Tiefenrüttlers – etwa im Kornumlagerungsbereich – höchstwahrscheinlich drainierte Verhältnisse. Aufgrund dessen, werden Porenwasserüberdrücke im unmittelbaren Nahbereich des Tiefenrüttlers rasch abgebaut und demzufolge ist keine Bodenverflüssigung in diesem Bereich möglich. *Baez* und *Martin* [12] diskutieren ebenfalls diese Vorgänge (siehe Abschnitt 2.5.2.2).

Tabelle 5.2: Voraussetzungen für die Verflüssigung des Bodens nach *Kramer* [75] und Randbedingungen während der Rütteldruckverdichtung im Zuge der gegenständlichen Verdichtungsversuche.

Voraussetzungen der Bodenverflüssigung	**Rütteldruckverdichtung**
wassergesättigter kohäsionsloser Boden	erfüllt
dynamische Belastung	erfüllt
undrainierte Verhältnisse	nicht erfüllt

Die Konklusion lautet, dass die Verflüssigung des Bodens während der Rütteldruckverdichtung im gegenständlichen Fall keine mögliche Erklärung für die Verdichtungswirkung ist. Demgegenüber spielt der Vorgang des (dynamischen) „Bodenfließens“ zufolge der dynamischen Belastung durch den Tiefenrüttler (siehe Abschnitt 2.5.2.1) bei der Rütteldruckverdichtung eine zentrale Rolle. Die vorübergehende Verringerung der Scherfestigkeit des grobkörnigen Materials, bewirkt durch die Rüttlerschwingung, trägt im vorliegenden Fall maßgeblich zur Verdichtungswirkung bei.

Kapitel 6

Analytische Modellierung des Rüttler-Boden Interaktionssystems

6.1 Einführung

Die wichtigste Schlussfolgerung von Kapitel 5 lautete, dass sich das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers aufgrund der fortschreitenden Verdichtung des Bodens ändert. Darüber hinaus wurde nachgewiesen, dass die Spannung an der Kontaktfläche Rüttlerspitze und Boden einen wesentlichen Einfluss auf das Bewegungsverhalten hat. Diese Erkenntnisse stellen eine essenzielle Grundlage für die Entwicklung der theoretischen Grundlagen eines Systems zur Qualitätskontrolle des Rütteldruckverfahrens dar. Das Gegenstand dieses Kapitels ist die Abbildung des Rüttler-Boden Interaktionssystems mittels eines analytischen Modells aufbauend auf den Erkenntnissen der Messdatenauswertung. Das übergeordnete Ziel der analytischen Modellierung ist eine grundlegende Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der aktuellen Steifigkeit des Bodens und dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers. Diese soll in weiterer Folge eine Quantifizierung des Verdichtungserfolgs in Form eines aus den messtechnisch erfassten Daten ableitbaren Indikators ermöglichen.

Die Verdichtung des Bodens setzt bleibende Verformungen voraus. Beim Absenken des Tiefenrüttlers wird der Boden im Bereich der Rüttlerspitze zufolge des Eindringens und der horizontalen Vibration verdichtet und verdrängt. Diese Einwirkungen verursachen eine Kornumlagerung und dadurch bleibende Verformungen im Einflussbereich des Tiefenrüttlers, die Dichte und die Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens werden erhöht, der Verdichtungszustand des Bodens verändert sich. Wie im Abschnitt 5.5 gezeigt, entsteht während der Rütteldruckverdichtung im Pilgerschrittverfahren eine Änderung des Verdichtungszustandes primär im Bereich der Rüttlerspitze. Der Tiefenrüttler ist während des gesamten Verdichtungsvorgangs in Interaktion mit dem zu verdichtenden Boden, die Änderung der Steifigkeit und des Verdichtungszustandes wirkt sich auf die Rüttlerbewegung aus. Die zunehmende Steifigkeit des verdichteten Bodens beeinflusst maßgeblich das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers. Nachdem sämtliche Verfahrensparameter während des Verdichtungsvorgangs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb konstant gehalten wurden, ist folglich eine Änderung im Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers ausschließlich auf die Änderung

der Steifigkeit des zu verdichten Bodens zurückzuführen.

Die Darstellung der hochkomplexen Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem kann anhand eines analytischen Modells nur in einer vereinfachten Form erfolgen. Das zugrunde gelegte analytische Modell soll jedoch die maßgeblichen physikalischen Prozesse im Rüttler-Boden Interaktionssystem abbilden können. Aus Sicht einer Verdichtungskontrolle sind diese die Veränderung der Steifigkeit sowie des Verdichtungszustandes im zu verdichtenden Boden.

Die aktuelle Steifigkeit des zu verbessernden Bodens ist ein übliches Maß für die Beurteilung des Bodenverdichtungs- bzw. Verbesserungserfolgs. Diese analytische Modellierung verfolgt das Ziel, aus dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers auf die aktuelle Steifigkeit des zu verdichtenden Untergrundes – und in weiterer Folge durch eine Interpretation der errechneten Steifigkeit aus bodenmechanischer Sicht – auf den Verdichtungszustand des Bodens zu schließen. Der Verdichtungserfolg soll durch einen Indikator definiert werden, der auf Basis der Rüttlerbewegung über den aktuellen Verdichtungszustand des Bodens Auskunft erteilt.

6.2 Das Rüttler-Boden Interaktionssystem als quadratisch angeregter Einmassenschwinger

Maschinen mit einer rotierenden Unwuchtmasse können in der Regel auf einen quadratisch angeregten Einmassenschwinger zurückgeführt werden [134]. Der Rüttlerkörper wird mittels einer um die vertikale Rüttlerachse rotierende Unwuchtmasse in Schwingung gebracht. Es ist daher naheliegend, das Rüttler-Boden Interaktionssystem als quadratisch angeregter Einmassenschwinger abzubilden. Bereits *Fellin* [45] zeigte den quadratisch angeregten Einmassenschwinger als möglicher Modellierungsansatz für das Rüttler-Boden Interaktionssystem auf. Bei einem Einmassenschwinger mit quadratischer Anregung handelt es sich um eine Anregungsart, bei dem die Größe der Erregerkraft F mit dem Quadrat der Erregerkreisfrequenz ω zunimmt. Eine Herleitung der allgemeinen Zusammenhänge für den quadratisch angeregten Einmassenschwinger ist Anhang A zu entnehmen. Die frequenzabhängige Belastung zufolge einer rotierenden Masse kann in folgender allgemeinen Form dargestellt werden:

$$F = m_u e\, \omega^2 \tag{6.1}$$

wobei m_u die rotierende Masse, e die Exzentrizität der rotierenden Masse und ω die Winkelgeschwindigkeit der Rotation sind.

Wie im Abschnitt 5.3 eingehend diskutiert, bilden sich während des Absenkvorgangs im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte im zeitlichen Verlauf der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze lokale Maxima aus. Deren Ausbildung ist besonders bei Verdichtungsschritten deutlich erkennbar, bei denen im Zuge des Absenkvorgangs eine hohe Spannung an der Kontaktfläche Rüttlerspitze-Boden erreicht ist (siehe Abschnitt 5.3.3 und Abschnitt 5.3.4.1). Die lokalen Maxima in der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und der gleich-

zeitig sinkende Vorlaufwinkel können durch den Resonanzbetrieb eines quadratisch angeregten Einmassenschwingers erklärt werden. Die beobachteten Resonanzerscheinungen des Rüttler-Boden Interaktionssystems stellen ein wesentliches Argument für dessen Abbildung als quadratisch angeregter Einmesserschwinger dar. Abbildung 6.1 zeigt eine Prinzipskizze des zugrunde gelegten analytischen Modells.

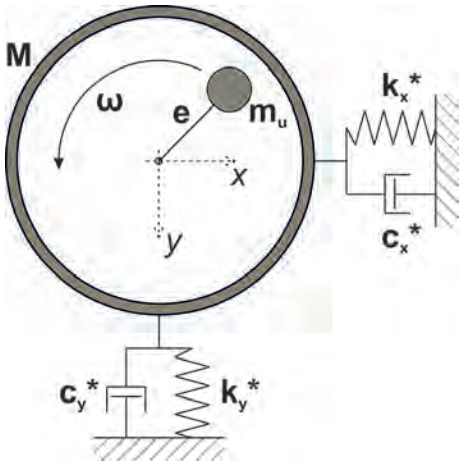


Abbildung 6.1: Prinzipskizze des zugrunde gelegten analytischen Modells für das Rüttler-Boden Interaktionssystem.

Im vorliegenden Modellierungsansatz wird angenommen, dass der Tiefenrüttler während des gesamten Verdichtungsvorgangs vom zu verdichtenden Boden allseitig gebettet ist. Die Einwirkungen durch den Tiefenrüttler auf den zu verdichtenden Boden führen zu einer Kornumlagerung bzw. zu einem Zusammendrücken der Kornstruktur und damit zur Erhöhung der Bodensteifigkeit. Generell gilt, dass Bodenverdichtung bleibende Verformungen in der Kornstruktur des zu verdichtenden Bodenbereichs voraussetzt. Demzufolge ist das Spannungs-Dehnungsverhalten während des Verdichtungsvorgangs hochgradig nichtlinear. Da im Fokus der vorliegenden Forschungsarbeit nicht die exakte Abbildung der bodenmechanischen Vorgänge im zu verdichtenden Bodenbereich steht, sondern die Reaktion des Rüttlerkörpers im Interaktion mit dem Boden, der aktuelle Zustand des Bodens wird im Sinne einer Zustandssimulation mit linear-äquivalenten Kennziffern abgebildet. Dieser Ansatz ist bei der analytischen Modellierung von dynamischen Interaktion mit dem Boden üblich und wird beispielsweise bei *Adam* [2], *Kopf* [73] und *Pistrol* [113] bei der Simulation der dynamischen Walze-Boden Interaktion angewendet, wobei zu diesem Zweck das Konus-Modell von *Wolf* [150] zur Anwendung kommt.

In diesem analytischen Modell ist die Rüttler-Boden Interaktion durch zwei zueinander orthogonale Kelvin-Voigt Körper, die aus je einer linear elastischen Feder der Steifigkeit k_x (k_y) und einem viskosen Dämpfer mit der Konstante c_x (c_y) bestehen, dargestellt.

Insbesondere die Federsteifigkeit k ist als potenzieller Indikator für den Verdichtungszustand des Bodens anzusehen, da diese von der aktuellen Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens abhängig ist. Das übergeordnete Ziel der analytischen Modellierung ist es, auf Basis der im Rahmen der experimentellen Untersuchungen messtechnisch erfassten Rüttlerbewegung die Federsteifigkeit k und das Dämpfungskoeffizienten c bzw. das Dämpfungsverhält-

nis D zurückzurechnen. Das Dämpfungsverhältnis stellt das Verhältnis der Dämpfung c zur kritischen Dämpfung c_c dar [134]:

$$D = \frac{c}{c_c} \tag{6.2}$$

Die zu identifizierende Federsteifigkeit entspricht nicht unmittelbar der Bodensteifigkeit, sie stellt im gegenständigen Modellierungsansatz eine von der aktuellen Verdichtungszustand des Bodens abhängige Reaktionssteifigkeit dar. Demzufolge, erhält die Federsteifigkeit k die Bezeichnung „zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit". Da es sich bei der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit um eine veränderliche Größe handelt, ist sie mit dem Symbol k^* kennzeichnet. Analog dazu, werden für den zustandsabhängigen Dämpfungskoeffizienten bzw. für das zustandsabhängige Dämpfungsverhältnis die Symbole c^* und D^* verwendet. Die dynamisch aktive Masse wird mit M kennzeichnet.

Das Bewegungsverhalten des in Abbildung 6.1 dargestellten Systems kann mit dem Gleichungssystem 6.3 beschrieben werden:

$$\begin{aligned} M\ddot{x} + c_x^*\dot{x} + k_x^* x &= m_u e\ \omega^2\ \cos(\omega t) \\ M\ddot{y} + c_y^*\dot{y} + k_y^* y &= m_u e\ \omega^2\ \sin(\omega t) \end{aligned} \tag{6.3}$$

Nachdem die Eigenschaften des zu verdichtenden Bodens um den Rüttlerkörper als gleichmäßig angenommen werden (d. h. $k^* = k_x^* = k_y^*$ und $c^* = c_x^* = c_y^*$), reduziert sich das Gleichungssystem nur auf eine Bewegungsgleichung:

$$M\ddot{x} + c^*\dot{x} + k^* x = m_u e\ \omega^2\ \cos(\omega t) \tag{6.4}$$

Die Lösung der Bewegungsdifferentialgleichung ist hinlänglich bekannt in Anhang A enthalten.

6.3 Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden Interaktionssystem

6.3.1 Analogie zwischen dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers und dem quadratisch angeregten Einmassenschwinger

Abbildung 6.2 zeigt eine prinzipielle Gegenüberstellung des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers in Form der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze A und des Vorlaufwinkels Θ exemplarisch, für einen Verdichtungsschritt mit den allgemeinen theoretischen Zusammenhängen zwischen dem Frequenzverhältnis β und dem Verstärkungsfaktor V_q bzw. dem Phasenwinkel Θ bei einem quadratisch angeregten Einmassenschwinger, für unterschiedliche Dämpfungsverhältnisse D. Auf eine Darstellung der Werte der Schwingwegamplitude unterhalb der Abszisse wird im gegenständlichen Fall, aufgrund der besseren Vergleichbarkeit mit den theoretischen Zusammenhängen, verzichtet.

Das Frequenzverhältnis β ergibt sich definitionsgemäß als Verhältnis der Winkelgeschwindigkeit der Anregung zur ungedämpften Eigenkreisfrequenz ω_0. Beim Tiefenrüttler entspricht ω der Winkelgeschwindigkeit der rotierenden Unwuchtmasse:

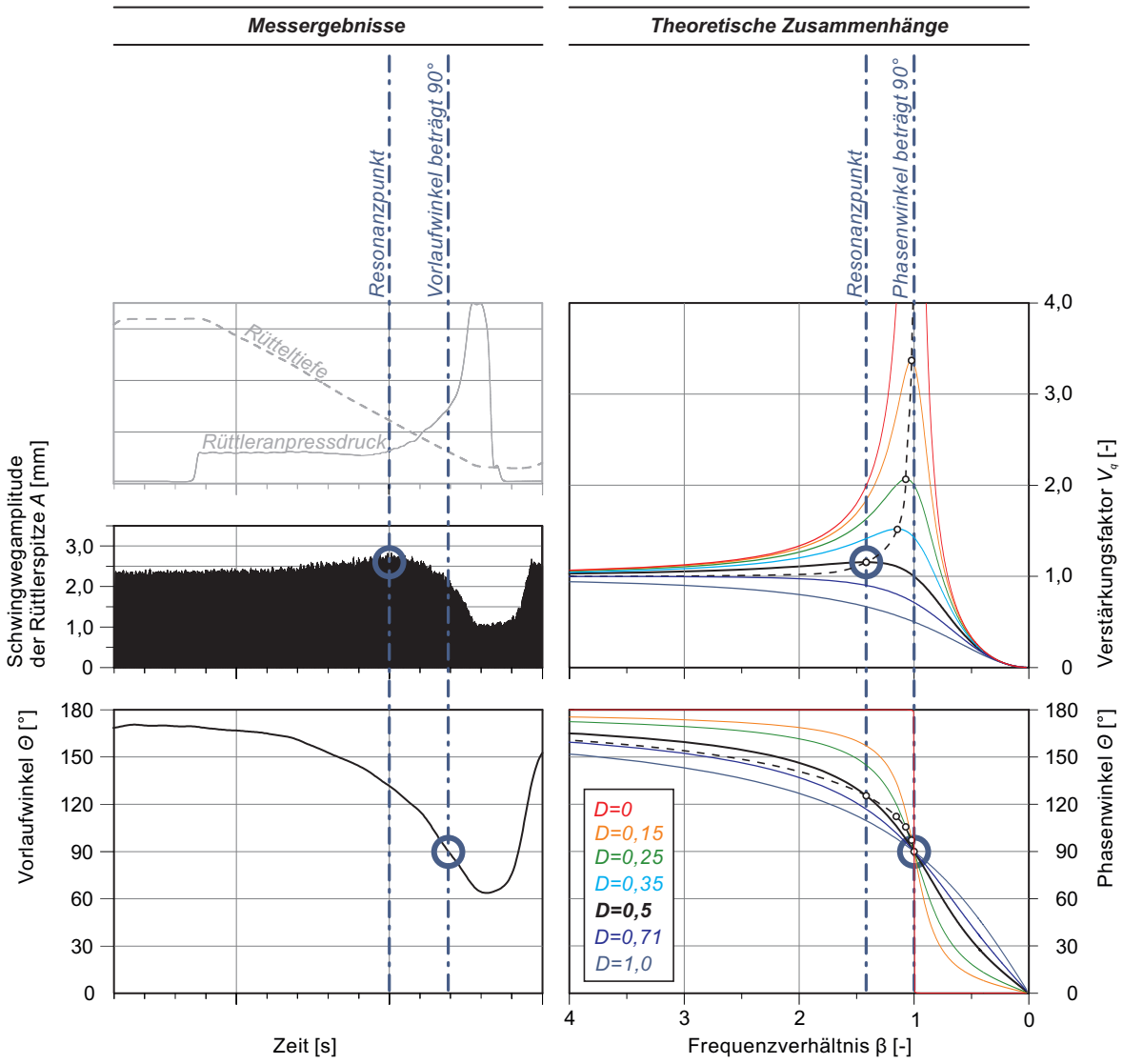


Abbildung 6.2: Prinzipielle Gegenüberstellung der Rüttlerbewegung (links) und der allgemeinen theoretischen Zusammenhänge für quadratisch angeregte Einmassenschwinger (adaptiert nach [134]) (rechts).

$$\beta = \frac{\omega}{\omega_0} \tag{6.5}$$

Die Eigenkreisfrequenz des Rüttler-Boden Interaktionssystems ω_0 ist mit dem allgemeinen Zusammenhang für einen quadratisch angeregten Einmassenschwinger bestimmt und ergibt sich zu:

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k^*}{M}} \tag{6.6}$$

wobei die Steifigkeit der elastischen Feder im gegenständlichen Fall durch die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit k^* als linear-äquivalente Ersatzgröße dargestellt und M die dynamisch angeregte Masse ist.

Es ist anhand der in Abbildung 6.2 (rechts) dargestellten theoretischen Zusammenhänge ersichtlich, dass es bei einem bestimmten Verhältnis der Erregerkreisfrequenz zur Systemeigenfrequenz zu einer Verstärkung der Schwingwegamplitude kommt. Die Größe des Verstärkungsfaktors V_q wird vom Dämpfungsverhältnis D bestimmt. Das lokale Maximum der Verstärkung wird als Resonanzpunkt bezeichnet. Wie es anhand der allgemeinen theoretischen Zusammenhänge ersichtlich ist, tritt Resonanz bei einem Frequenzverhältnis von $\beta = 1,0$ lediglich bei einem Dämpfungsverhältnis von $D = 0$ ein. Bei einem Dämpfungsverhältnis

$$D > \frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,71 \tag{6.7}$$

kommt es zu keinerlei Verstärkung der Schwingwegamplitude, für Dämpfungsverhältnisse zwischen 0 und 0,71 ist das zum Resonanzpunkt zugehörige Frequenzverhältnis $\beta_{q,res}$ wie folgt zu berechnen [74]:

$$\beta_{q,res} = \frac{1}{\sqrt{1-2D^2}} \tag{6.8}$$

Die Größe des Verstärkungsfaktors ergibt sich beim Resonanzpunkt zu:

$$V_{q,res} = \frac{1}{2D\sqrt{1-D^2}} \tag{6.9}$$

Der Phasenwinkel Θ ist analog zum Verstärkungsfaktor stark von der Größe des Dämpfungsverhältnisses D abhängig und berechnet sich wie folgt:

$$\Theta = arctan\left(\frac{2D\beta}{1-\beta^2}\right) \tag{6.10}$$

Bei gedämpften Verhältnissen beträgt der Phasenwinkel bei einem Frequenzverhältnis $\beta = 1,0$ unabhängig von der Größe des Dämpfungsverhältnisses, 90°. Nachdem sich der Resonanzpunkt beim gedämpften quadratisch angeregten Einmassenschwinger gemäß Gleichung 6.8 bei einem Frequenzverhältnis $\beta_{q,res} > 1,0$ ausbildet, ist der zum Resonanzpunkt zugehörige Phasenwinkel ist immer größer als 90°. Je größer das Dämpfungsverhältnis ist, desto größer ist der zum Resonanzpunkt zugehörige Phasenwinkel. In Abbildung 6.2 (rechts) sind die Resonanzpunkte und die zugehörigen Vorlaufwinkel mit Ringen kennzeichnet.

Eine qualitative Ähnlichkeit ist zwischen dem messtechnisch erfassten Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers und den allgemeinen theoretischen Zusammenhängen für den quadratisch angeregten Einmassenschwinger ist in Abbildung 6.2 auf dem ersten Blick erkennbar. Die annähernd konstante Schwingwegamplitude bei vergleichsweise hohem Vorlaufwinkel spricht für einen Verstärkungsfaktor $V_q \approx 1,0$ und für ein Frequenzverhältnis $\beta \gg 1,0$ und damit für eine überkritische Anregung des Rüttler-Boden Interaktionssystems. Im zeitlichen Verlauf der Schwingwegamplitude ist eindeutig eine Verstärkung erkennbar, bei ihrem lokalen Maximum ist die Schwingwegamplitude deutlich größer als bei überkritischer Anregung. Dieses Verhalten spricht für Resonanz im Rüttler-Boden Interak-

tionssystem und gleichzeitig für ein vergleichsweise hohes Dämpfungsverhältnis. Bei Resonanzpunkt beträgt der Vorlaufwinkel beim betrachteten Verdichtungsschritt etwa 130°. Dieses Verhalten entspricht den theoretischen Zusammenhängen. Nach dem Erreichen des Resonanzpunktes sinken Schwingwegamplitude und Vorlaufwinkel vergleichsweise rasch ab. Diese Tendenz stimmt wiederum mit den allgemeinen theoretischen Zusammenhängen qualitativ überein.

In Abbildung 6.2 sind die Messergebnisse über die Zeit, hingegen der Phasenwinkel und der Verstärkungsfaktor über das Frequenzverhältnis dargestellt. Eine Gegenüberstellung der beiden ist trotzdem möglich, da die Änderung des Bewegungsverhaltens mit der Zeit auf eine sukzessive Änderung der Systemeigenkreisfrequenz ω_0 zurückzuführen ist, die in weiterer Folge die Änderung des Frequenzverhältnisses β bewirkt. Durch diesen Umstand können die beiden Darstellungsweisen miteinander verknüpft und die allgemeinen theoretischen Zusammenhänge auf die messtechnisch erfasste Rüttlerbewegung übertragen werden. Der Vergleich der Messung mit den theoretischen Zusammenhängen zeigt, dass der quadratisch angeregte Einmassenschwinger grundsätzlich geeignet ist das Verhalten des Rüttlers im Rüttler-Boden Interaktionssystem abzubilden. Die Diskussion der sukzessiven Änderung der Systemeigenfrequenz im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte ist Gegenstand von Abschnitt 6.3.2, wobei die einzelnen Verdichtungsschritte in vier gut abgrenzbare Phasen unterteilt werden, diese erhalten von nun an die Bezeichnung „Betriebsphase“.

6.3.2 Betriebsphasen des Rüttler-Boden Interaktionssystems

Anhand der qualitativen Gegenüberstellung der Messergebnisse mit den allgemeinen theoretischen Zusammenhängen für einen quadratisch angeregten Einmassenschwinger ist erkennbar, dass im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte während der Rütteldruckverdichtung im Rüttler-Boden Interaktionssystem Resonanz auftreten kann.

Auf Basis des charakteristischen Bewegungsverhaltens werden die einzelnen Verdichtungsschritte gemäß Abbildung 6.3 in vier gut abgrenzbare Phasen unterteilt, welche im Folgenden als „Betriebsphase“ bezeichnet werden. Es sei angemerkt, dass die gegenständliche Abgrenzung der einzelnen Phasen eine willkürliche Unterteilung darstellt. Die vier Betriebsphasen werden folgendermaßen definiert:

- Einfahren (Prae-Resonanz)
- Post-Resonanz
- Überdrücken
- Heben

wobei die Betriebsphasen Einfahren (Prae-Resonanz), Post-Resonanz und Überdrücken im Absenkvorgang des Rüttlers auftreten, die Betriebsphase Heben den Übergang zwischen den einzelnen Verdichtungsschritten beim Ziehen des Rüttlers darstellt.

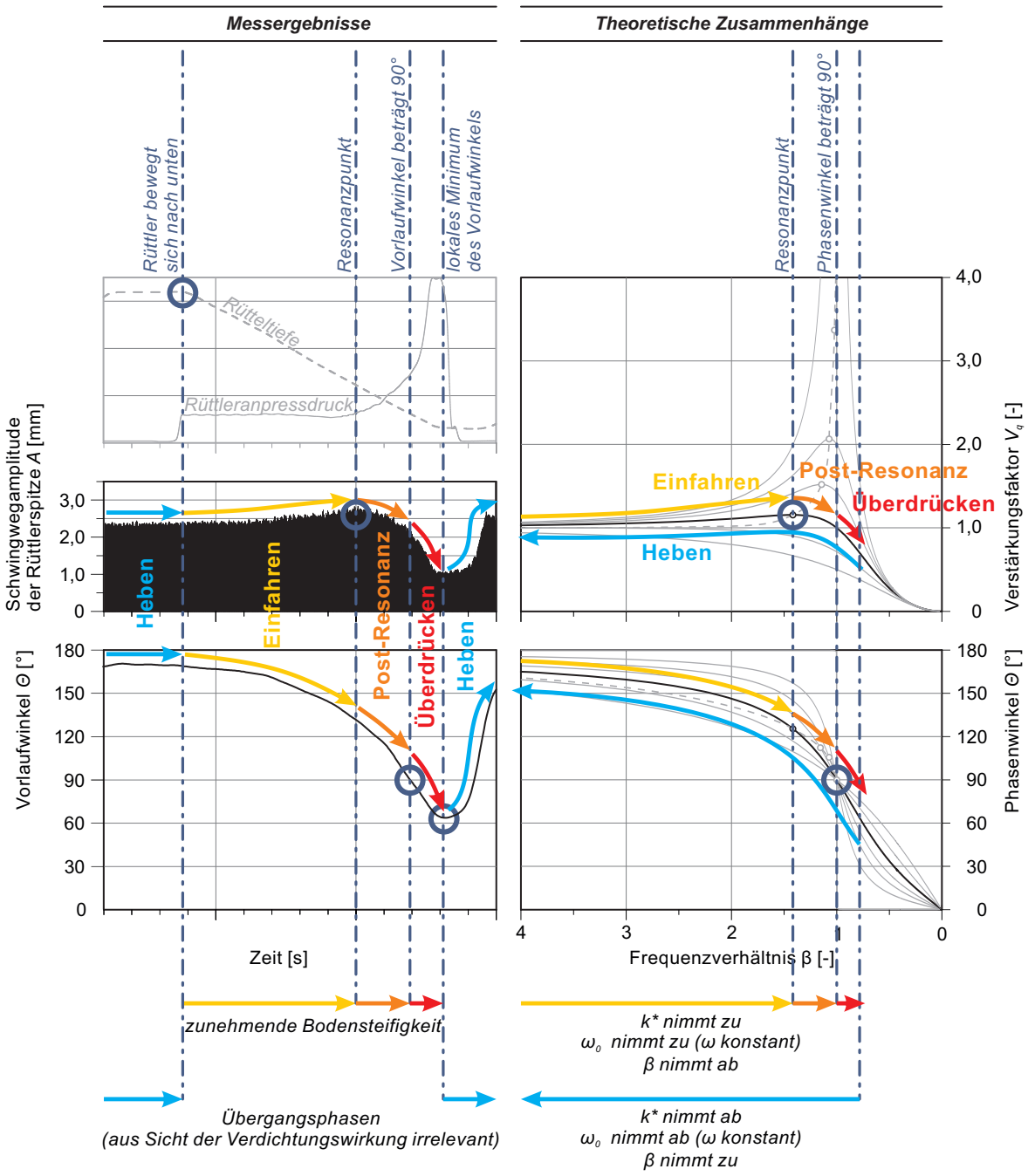


Abbildung 6.3: Gegenüberstellung der Rüttlerbewegung und die theoretischen Zusammenhänge für quadratisch angeregte Einmassenschwinger mit Darstellung der vier Betriebsphasen.

Im Folgenden wird das charakteristische Bewegungsverhalten in den einzelnen Betriebsphasen auf Basis der Analogie mit dem quadratisch angeregten Einmassenschwinger diskutiert und die Abgrenzung der einzelnen Betriebsphasen zueinander vorgenommen. Dabei wird die Ursache für Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden Interaktionssystem näher beleuchtet.

Resonanz tritt in einem quadratisch angeregten Einmassenschwinger bei einem bestimm-

ten Frequenzverhältnis β ein. Die Umdrehungsfrequenz des Rüttlermotors und damit die Erregerkreisfrequenz ω sind während der Verdichtung im standardmäßigen Rüttlerbetrieb, abgesehen von geringfügigen Schwankungen, konstant. Aus diesem Grund können die beobachteten Resonanzerscheinungen während der einzelnen Verdichtungsschritte nicht auf eine variable Erregerkreisfrequenz ω zurückgeführt werden. Demzufolge ist eine Änderung des Frequenzverhältnisses β, welche zur Resonanz führt, durch eine sich sukzessive ändernde Systemeigenkreisfrequenz ω_0 verursacht. Die Systemeigenkreisfrequenz des dynamischen Rüttler-Boden Interaktionssystems ist somit eine vom Fortschritt des jeweiligen Verdichtungsschrittes abhängige und demzufolge veränderliche Größe. Die Eigenkreisfrequenz eines quadratisch angeregten Einmassenschwingers wird nach Gleichung 6.6 definitionsgemäß durch die Größe der dynamisch aktiven Masse M und der Federsteifigkeit – die im gegenständigen Modellierungsansatz die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit k^* darstellt – bestimmt. Unter der Annahme, dass die dynamisch aktive Masse M während des gesamten Verdichtungsvorgangs konstant bleibt, ist die Änderung der Eigenkreisfrequenz des Rüttler-Boden Interaktionssystems damit nur auf die Änderung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit k^* zurückzuführen.

Einfahren

Die Betriebsphase Einfahren ist in Abbildung 6.3 mit gelber Farbe gekennzeichnet. Als Beginn der Betriebsphase Einfahren wird jener Zeitpunkt festgelegt, zu dem der Absenkvorgang beginnt. Zu Beginn des Absenkvorgangs ist der Boden im Bereich unterhalb der Rüttlerspitze noch unverdichtet, seine Steifigkeit ist niedrig. Demzufolge ist auch die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit k^* gering. Damit ist die Eigenkreisfrequenz des Rüttler-Boden Interaktionssystems ω_0 ebenfalls niedrig (siehe Gleichung 6.6) und demzufolge das Frequenzverhältnis β groß.

Die Messergebnisse zeigen eine signifikante Änderung der Rüttlerbewegung während des Absenkvorgangs. Die Betriebsphase Einfahren ist durch eine leicht ansteigende Rüttleramplitude und durch einen sich deutlich verringernden Vorlaufwinkel gekennzeichnet. Das beobachtete Systemverhalten lässt sich in einfacher Weise durch eine Erhöhung der Bodensteifigkeit zufolge Verdichtung erklären. Im Zuge des Absenkvorgangs verdichtet und verdrängt man den Boden im Bereich unterhalb der Rüttlerspitze, seine Steifigkeit erhöht sich dadurch sukzessive. Demzufolge steigt die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit k^* mit zunehmender Bodensteifigkeit. Die Erhöhung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit führt zu einer Erhöhung der Eigenkreisfrequenz des Rüttler-Boden Interaktionssystems ω_0. Damit ändert sich das Frequenzverhältnis β ebenfalls, es sinkt zufolge der steigenden Systemeigenkreisfrequenz ω_0 ab. Da der Resonanzpunkt sich beim gedämpften quadratisch angeregten Einmassenschwinger bei einem Frequenzverhältnis $\beta_{q,res} > 1,0$ ausbildet (siehe Gleichung 6.8), ist die zum Resonanzpunkt zugehörige Systemeigenkreisfrequenz ω_0 niedriger als die Erregerkreisfrequenz ω. Beim Resonanzpunkt ist der Vorlaufwinkel Θ entsprechend den allgemeinen theoretischen Zusammenhängen deutlich größer als 90°. Er beträgt in diesem Fall etwa 130°.

Das Ende der Betriebsphase Einfahren wird willkürlich beim Resonanzpunkt definiert.

Post-Resonanz

Die Betriebsphase Post-Resonanz ist in Abbildung 6.3 orange gekennzeichnet und zwischen dem lokalen Maximum der Schwingwegamplitude und jenem Zustand definiert, in dem der Vorlaufwinkel 90° beträgt. Nach dem Erreichen des Resonanzpunktes verringert sich die Schwingwegamplitude, währenddessen sich der Vorlaufwinkel auch weiter verringert. In dieser Betriebsphase ist der Rüttleranpressdruck deutlich höher als in der Betriebsphase Einfahren. Der erhöhte Rüttleranpressdruck indiziert eine erhöhte Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden.

Beim weiteren Absenken des Tiefenrüttlers steigt die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit k^* aufgrund der zunehmenden Bodensteifigkeit weiter an. Die allmähliche Erhöhung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit führt zur weiteren Erhöhung der Systemeigenkreisfrequenz ω_0, wodurch das Frequenzverhältnis β weiter absinkt. Das Frequenzverhältnis $\beta = 1,0$ entspricht in einem quadratisch angeregten Einmassenschwinger immer einem Phasenwinkel – im gegenständlichen Fall dem Vorlaufwinkel – von $\Theta = 90°$. In diesem Zustand sind Erregerkreisfrequenz ω und Systemeigenfrequenz ω_0 gleich groß, d. h. $\beta = 1,0$.

Bei einem theoretisch ungedämpften System würde sich Resonanz bei einem Vorlaufwinkel von $\Theta = 90°$ ausbilden. In diesem Fall würde die Betriebsphase Post-Resonanz komplett wegfallen. Nachdem es sich beim Rüttler-Boden Interaktionssystem um ein vergleichsweise stark gedämpftes System handelt, bildet sich der Resonanzpunkt bei einem Frequenzverhältnis $\beta_{q,res} > 1,0$ aus, welches einem Vorlaufwinkel von größer als 90° entspricht.

Überdrücken

Bei Fortsetzung des Absenkvorgangs verringert sich die Schwingwegamplitude drastisch, der Vorlaufwinkel sinkt unter 90°, im zeitlichen Verlauf des Rüttleranpressdrucks ist ein gravierender Anstieg ersichtlich. Trotz des hohen Rüttleranpressdruckes nimmt die Rütteltiefe kaum mehr zu, der Boden weist einen hohen Widerstand gegen das Eindringen der Rüttlerspitze auf. Über die Kontaktfläche Rüttlerspitze-Boden werden hohe Spannungen in den Untergrund abgeleitet.

Dieses Systemverhalten setzt einen weiteren Anstieg der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit k^* voraus. Dadurch steigt die Systemeigenkreisfrequenz ebenfalls weiter und überschreitet die Erregerkreisfrequenz. Ein Vorlaufwinkel unter 90° ist unabhängig von der Größe des Dämpfungsverhältnisses lediglich bei einem Frequenzverhältnis $\beta < 1,0$ möglich (vgl. Abbildung 6.3).

Die Abgrenzung der Betriebsphase Überdrücken von der Betriebsphase Post-Resonanz wurde beim Vorlaufwinkel 90° festgelegt (siehe Abbildung 6.3). Die Betriebsphase Überdrücken ist theoretisch beim Frequenzverhältnis $\beta = 0$ begrenzt, welches einem Vorlaufwinkel von 0° und einem Verstärkungsfaktor von 0 entspricht. Dieser Zustand ist nur theoretisch möglich, da er mit einer unendlich großen zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit k^* verbunden wäre.

Das Ende der Betriebsphase Überdrücken wird beim lokalen Minimum des Vorlaufwin-

kels festgelegt. Das lokale Minimum des Vorlaufwinkels entspricht im Regelfall dem lokalen Maximum des Rüttleranpressdrucks (vgl. Abschnitt 5.3.2). Aufgrund der in Abschnitt 5.3.2 diskutierten möglichen Ungenauigkeiten bei der messtechnischen Erfassung des Rüttleranpressdrucks kommt es bei bestimmten Verdichtungsschritten – wie auch im gegenständlichen Fall – zu einer geringen Zeitdifferenz zwischen dem lokalen Maximum des Rüttleranpressdrucks und dem lokalen Minimum des Vorlaufwinkels.

Heben
Die vierte hier definierte Betriebsphase Heben ist in Abbildung 6.3 mit blauer Farbe gekennzeichnet. Diese Betriebsphase ist aus Sicht der Verdichtungswirkung grundsätzlich irrelevant und stellt lediglich einen Übergang zwischen den einzelnen Verdichtungsschritten dar. In der Betriebsphase Heben wird der Rüttler nicht weiter in den Boden abgesenkt:

- Der Tiefenrüttler wird nach oben bewegt.
- Der Tiefenrüttler schwingt vor Beginn des Absenkvorgangs betriebsbedingt bei konstanter Tiefe, quasi-stationär im Untergrund.

Im Zuge des Anhebens des Rüttlers baut sich die Spannung an der Kontaktfläche Rüttler-Boden vergleichsweise schnell ab. Die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit k^* und die Systemeigenkreisfrequenz ω_0 verringern sich dadurch, das Frequenzverhältnis β erhöht sich. Dabei ist auch ein Resonanzpunkt ersichtlich, die Verstärkung ist dabei etwa gleich groß wie während des Absenkens. Der Vorlaufwinkel beträgt hierbei ebenfalls ungefähr 130°.

Im Zuge der Rüttlerschwingung bei konstanter Tiefe schwingt der Rüttler quasi-stationär im Boden-Wasser-Gemisch, dessen Steifigkeit gering ist. Da die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit k^* von der aktuellen Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens abhängig ist, ist sie in diesem Zustand auch niedrig. Damit ist die Eigenkreisfrequenz ω_0 des Rüttler-Boden Interaktionssystems ebenfalls niedrig und demzufolge das Frequenzverhältnis β hoch. Das System wird überkritisch, d. h. über seine Eigenkreisfrequenz angeregt, es kommt zu keiner nennenswerten Verstärkung der Rüttleramplitude.

6.3.3 Betriebsphasen während des standardmäßigen und nicht-standardmäßigen Rüttlerbetriebs

Abschnitt 6.3.2 beleuchtete, dass Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden Interaktionssystem auf eine allmähliche Erhöhung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte im Pilgerschrittverfahren zurückzuführen sind. Damit stellt die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit einen potenziellen Indikator für den Verdichtungserfolg dar. Es sei jedoch angemerkt, dass es sich hierbei lediglich um qualitative Aussagen hinsichtlich der Größe der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit handelt. Auf Basis des charakteristischen Bewegungsverhaltens wurde der Verdichtungsvorgang innerhalb der einzelnen Verdichtungsschritte in vier Betriebsphasen unterteilt. Diese ermöglicht

eine plakative Darstellung des Systemverhaltens und dadurch eine bessere Erkennbarkeit der Analogie zwischen dem Verhalten des Rüttler-Boden Interaktionssystems und einem quadratisch angeregten Einmassenschwinger.

In Abbildung 6.4 sind die Betriebsphasen bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke des im Abschnitt 5.3.2 diskutierten Verdichtungsversuchs farblich gekennzeichnet. Dabei ist Einfahren gelb, Post-Resonanz orange und Heben blau hinterlegt. Es treten bei den meisten Verdichtungsschritten im standardmäßigen Rüttlerbetrieb die Betriebsphasen Heben, Einfahren und Post-Resonanz auf. Der erfahrene Gerätefahrer brach die einzelnen Verdichtungsschritte etwa in der Betriebsphase Post-Resonanz ab.

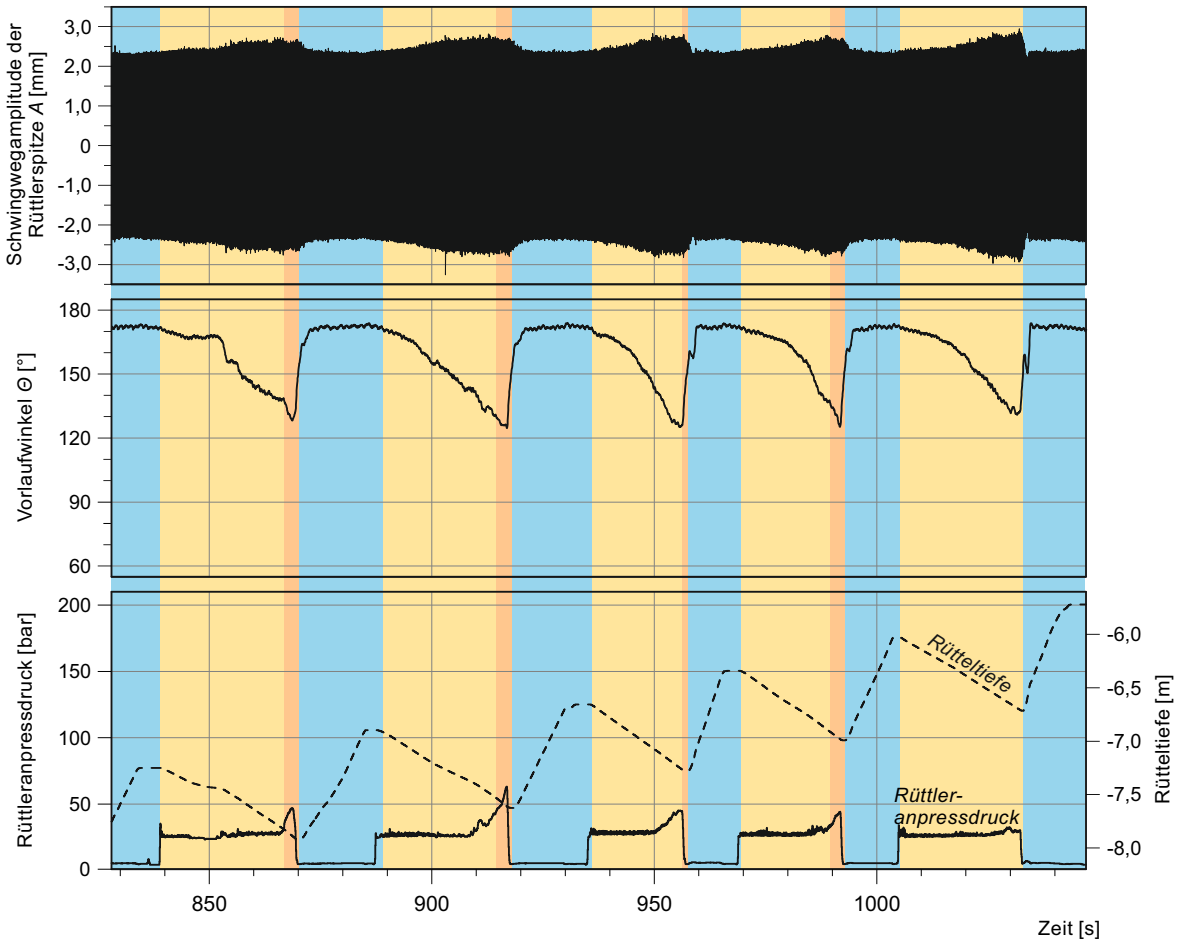


Abbildung 6.4: Betriebsphasen Einfahren (gelb), Post-Resonanz (orange) und Heben (blau) bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke während des standardmäßigen Rüttlerbetriebs.

Demgegenüber ist in den Ergebnissen des in Abschnitt 5.3.3 gezeigten Verdichtungsversuchs eindeutig eine sich verringernde Schwingwegamplitude im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte erkennbar. D. h. in diesem Fall tritt bei sämtlichen Verdichtungsschritten die Betriebsphase Post-Resonanz, bei manchen Verdichtungsschritten sogar die Betriebsphase Überdrücken auf. Ein erfahrener Gerätefahrer würde jedoch den Verdichtungsvorgang bereits vorher abbrechen. In diesem Versuch wurde der Rüttler bewusst weiter in den Boden abgesenkt.

Die Rütteldruckverdichtung im Pilgerschrittverfahren ist als sequenzielle Abfolge der vier Betriebsphasen anzusehen, wobei sich nicht notwendigerweise alle vier Betriebsphasen ausbilden. Es ist anhand der beiden betrachteten Verdichtungsversuche ersichtlich, dass der Absenkvorgang im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte im standardmäßigen Rüttlerbetrieb primär durch die Betriebsphase Einfahren und Post-Resonanz charakterisiert ist.

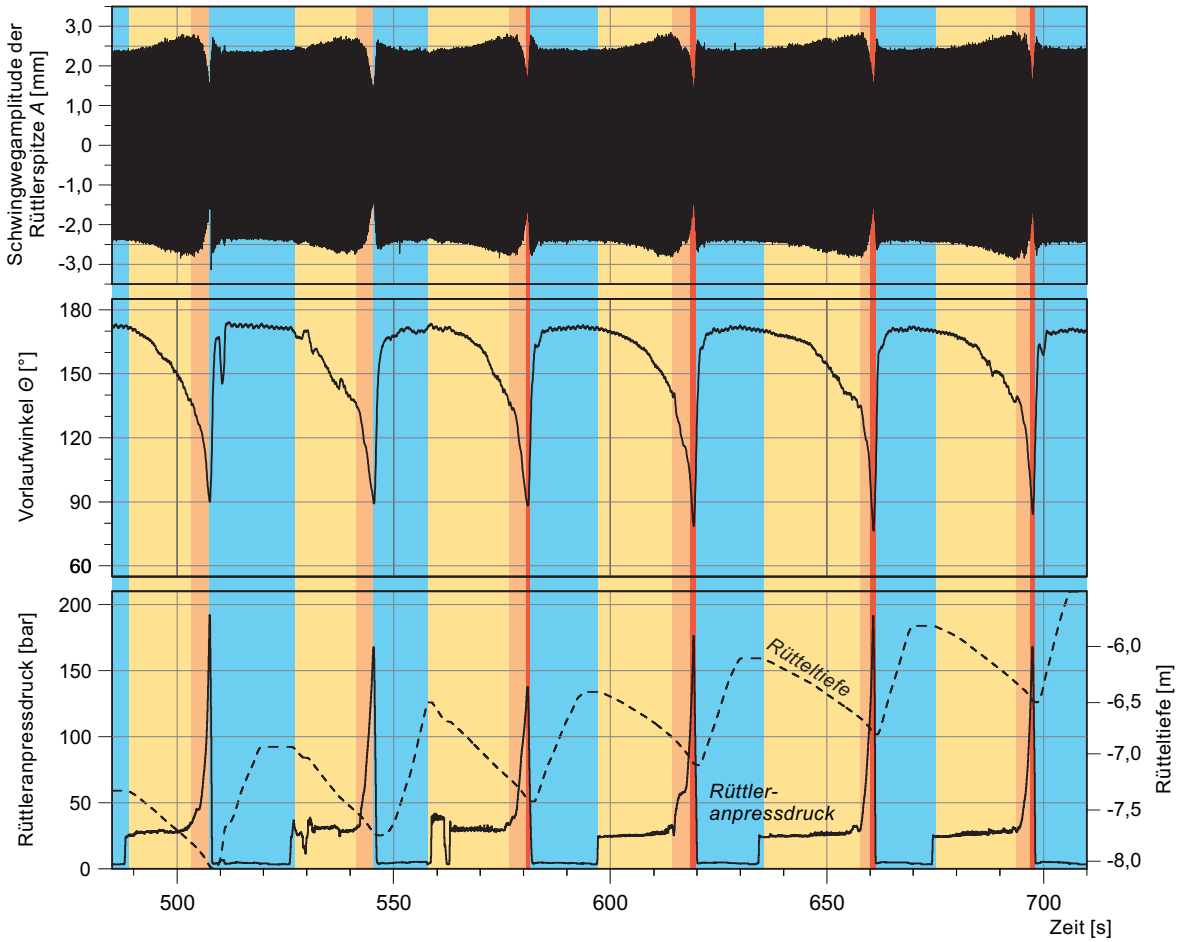


Abbildung 6.5: Betriebsphasen Einfahren (gelb), Post-Resonanz (orange), Überdrücken (rot) und Heben (blau) bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke während eines Verdichtungsversuchs im nicht-standardmäßigen Rüttlerbetrieb (erhöhter Rütteranpressdruck).

6.4 Berücksichtigung einer mitschwingenden Bodenmasse

Das zentrale Thema von Abschnitt 5.3 war das Bewegungsverhalten des in der Luft unbehindert schwingenden Tiefenrüttlers und das Bewegungsverhalten während des Verdichtungsvorgangs. Die Feststellung war, dass die Rüttlerbewegung in der Luft und im Boden prinzipiell ähnlich ist, während der Rüttlerbewegung im Boden sind jedoch tendenziell niedrigere Schwingwegamplituden zu erkennen. Dieser Unterschied wird im gegenständlichen Modellierungsansatz auf eine mit der Rüttlermasse mitschwingende Bodenmasse zurückgeführt, wobei die folgenden wesentlichen Vereinfachungen getroffen werden: Die mitschwingende Bodenmasse ist als eine mit der Rüttlermasse gekoppelte Punktmasse an-

gesehen und die Größe der mitschwingenden Bodenmasse während des gesamten Verdichtungsvorgangs als konstant angenommen.

6.4.1 Gegenüberstellung der Rüttlerbewegung in der Luft und im Boden zur Ermittlung der Größe der mitschwingenden Bodenmasse

Im Folgenden wird die Bestimmung der Größe der mitschwingenden Bodenmasse anhand der Ergebnisse des in Abschnitt 5.3.2 diskutierten Verdichtungsversuchs gezeigt. Im Zuge dieses Versuchs brachte man den Tiefenrüttler vor Beginn der Verdichtung in der Luft in Schwingung, wobei die Rüttlerfrequenz von null an beginnend auf 50 Hz gesteigert, konstant gehalten und wieder herabgeregelt wurde. Anschießend wurde der Verdichtungsstrecke im standardmäßigen Rüttlerbetrieb bearbeitet.

Abbildung 6.6 zeigt für einen etwa 2,0 m langen Ausschnitt aus der Verdichtungsstrecke den zeitlichen Verlauf der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, des Vorlaufwinkels und den Abstand d des Bewegungspols bzw. des lokalen Minimums der um die Vertikale rotierende Hyperbel von der Grundfläche des Rotationshyperboloides, der Rüttlerfrequenz und der Rütteltiefe für die Schwingung in der Luft. Der Abstand d stellt während der Rüttlerschwingung in der Luft die Höhe des unteren Kegels dar (vgl. Abbildung 6.6). Während der Rüttlerschwingung im Boden ist die Einhüllende der Rüttlerbewegung ein einschaliges Rotationshyperboloid, die Rüttlerachse hat keinen Schnittpunkt mit der Rotationsachse des Hyperboloides. In diesem Fall entspricht der Abstand d dem Abstand des lokalen Minimums der um die Vertikale rotierenden Hyperbel, von der Grundfläche des Rotationshyperboloides (siehe Abbildung 6.6).

Im Zuge der Schwingung in der Luft ist bei konstanter Rüttlerfrequenz die Rüttlerschwingung stationär. Dieses Zeitintervall ist in Abbildung 6.6 (links) mit grauem Balken markiert. Während der stationären Schwingung sind die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, der Vorlaufwinkel und der Abstand des Bewegungspols von der Grundfläche konstant. Der Tiefenrüttler wird in diesem Zustand überkritisch angeregt, d. h. die Erregerfrequenz ω ist deutlich höher als die Eigenkreisfrequenz ω_0 des frei hängenden Tiefenrüttlers. Zufolge der überkritischen Anregung ($\beta \gg 1,0$) kommt es praktisch zu keiner Verstärkung der Schwingwegamplitude, der Verstärkungsfaktor V_q beträgt etwa 1,0. Die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze ist in diesem Zeitintervall $A_{stat,Luft} = 3,48\,\text{mm}$ und entspricht aufgrund des hohen Frequenzverhältnisses β praktisch der Schwingwegamplitude bei unendlich großem Frequenzverhältnis (siehe Abbildung 6.8):

$$A_{stat,Luft} \approx A_{\beta=\infty,Luft} = 3,48\,\text{mm} \tag{6.11}$$

Der Vorlaufwinkel ist in diesem Zeitintervall ebenfalls konstant und beträgt:

$$\Theta_{stat,Luft} = 178^\circ \tag{6.12}$$

Der Tiefenrüttler schwingt unmittelbar vor Beginn des Absenkvorgangs der einzelnen Verdichtungsschritte betriebsbedingt bei konstanter Tiefe im Untergrund. Die Zeitinterval-

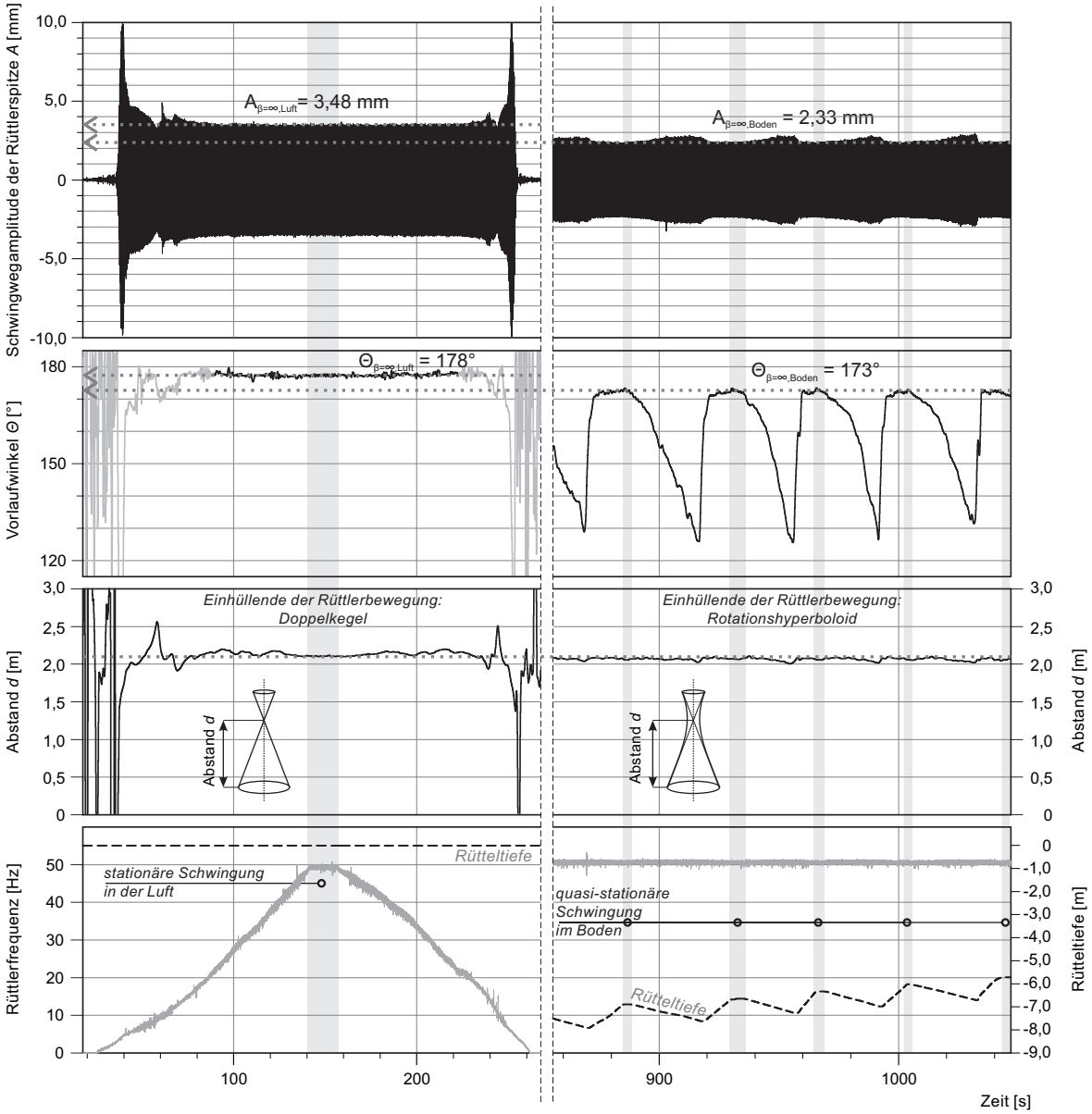


Abbildung 6.6: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Abstand des Bewegungspols bzw. des lokalen Minimums der um die Vertikale rotierende Hyperbel von der Grundfläche des Rotationshyperboloides, Rüttlerfrequenz und Rütteltiefe während der unbehinderten Rüttlerschwingung in der Luft (links) und während des Verdichtungsvorgangs bei einer etwa 2,0 m langen Verdichtungsstrecke (rechts).

le mit konstanter Rütteltiefe sind beim betrachteten Verdichtungsversuch in Abbildung 6.6 (rechts) ebenfalls mit grauen Balken hinterlegt. Während der Schwingung im Untergrund bei konstanter Tiefe zeigen die aufgezeichneten Messergebnisse praktisch keine Änderung im Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers. Diese Perioden sind in der Regel 4 bis 10 Sekunden lang und können aufgrund des unveränderlichen Bewegungsverhaltens als quasi-stationäre Zustände angesehen werden. Bei den in Abbildung 6.6 dargestellten Verdichtungsschritten sind die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und der Vorlaufwinkel in den einzelnen quasi-stationären Zuständen annähernd konstant. Das Werteniveau der bei-

den Parameter ist bei den einzelnen Verdichtungsschritten etwa gleich groß, die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze beträgt $A_{qstat,Boden} = 2,33\,\text{mm}$, der Vorlaufwinkel $\Theta_{qstat} = 173°$. Aufgrund des vergleichsweise hohen Vorlaufwinkels ist auch hierbei davon auszugehen, dass das Rüttler-Boden Interaktionssystem während der quasi-stationären Schwingung im Boden deutlich über seine Eigenkreisfrequenz angeregt wird ($\beta \gg 1,0$). Eine Anregung über der Eigenkreisfrequenz zieht einen Verstärkungsfaktor V_q von etwa $1,0$ mit sich. Die während der quasi-stationären Schwingung im Boden gemessene Schwingwegamplitude wird daher der Schwingwegamplitude bei theoretisch unendlich großem Frequenzverhältnis gleichgesetzt (siehe Abbildung 6.8):

$$A_{stat,Boden} \approx A_{\beta=\infty,Boden} = 2,33\,\text{mm} \tag{6.13}$$

In Abbildung 6.7 ist das prinzipielle Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers während der stationären Schwingung in der Luft und während der quasi-stationären Schwingung im Boden gegenübergestellt, wobei die Rüttlerachse mit grauen Geraden symbolisiert und die Rüttlerbewegung deutlich überhöht dargestellt ist.

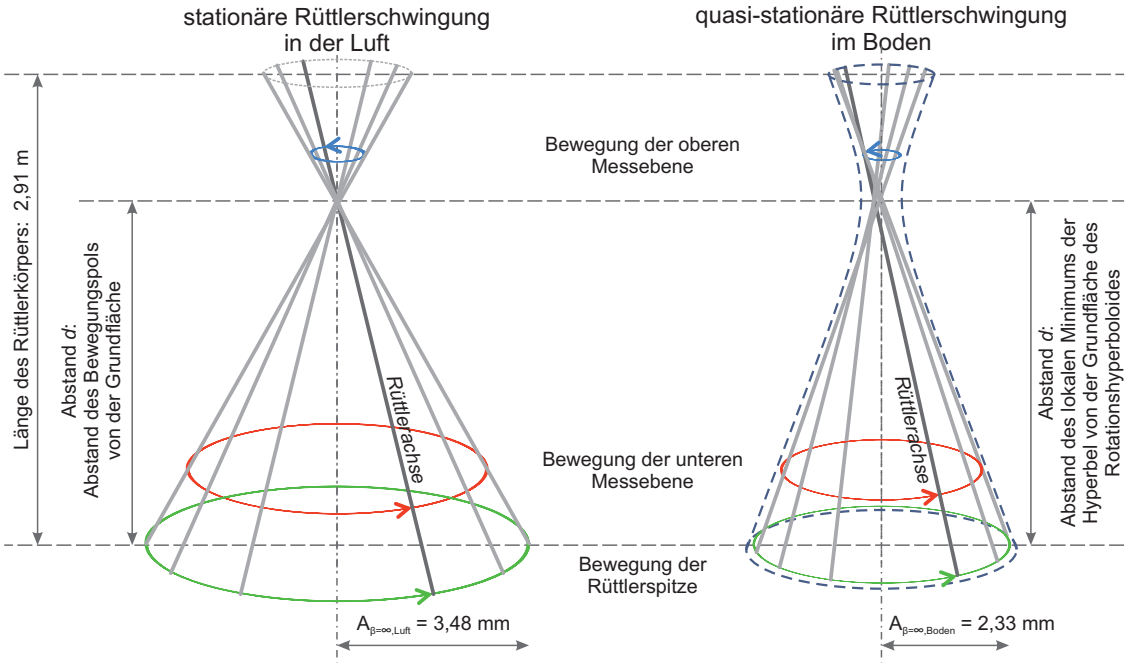


Abbildung 6.7: Gegenüberstellung der Rüttlerschwingung im Boden und in der Luft, mit deutlich überhöhter Darstellung der Schwingwegamplituden.

Der Abstand des Bewegungspols von der Grundfläche des Rotationshyperboloides beträgt während der stationären Schwingung in der Luft etwa $d_{stat,Luft} = 2,11\,\text{m}$. Der Abstand des lokalen Minimums der um die Vertikale rotierenden Hyperbel von der Grundfläche des Rotationshyperboloides während der quasi-stationären Schwingung im Boden ist geringfügig niedriger als der Abstand des Bewegungspols von der Grundfläche des Rotationshyperboloides während der stationären Schwingung in der Luft und bewegt sich beim betrachteten Verdichtungsversuch zwischen $d_{qstat,Boden} = 2,08$ und $2,10\,\text{m}$. Der Abstand d ändert

sich im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte des betrachteten Verdichtungsvorgangs in geringem Maße. Die vergleichsweise stabile Größe d ist ein Zeichen dafür, dass die Schwingungsformen des Tiefenrüttlers während der Rüttlerbewegung in der Luft und im Boden ähnlich sind sowie dafür, dass sich die Schwingungsform während des Verdichtungsvorgangs nur geringfügig ändert.

Die niedrigeren Schwingwegamplituden während der Rüttlerschwingung im Boden im Vergleich zur Rüttlerschwingung in der Luft können trotz der annähernd gleichbleibenden Schwingungsform auf eine mitschwingende Bodenmasse zurückgeführt werden. Es folgt nun die Erläuterung des Rechenwegs zur Ermittlung der Größe der mitschwingenden Bodenmasse M_B auf Basis der in Abbildung 6.6 gezeigten Messergebnissen.

Der allgemeine Zusammenhang

$$A_{\beta=\infty} = \frac{m_u e}{M} \tag{6.14}$$

ergibt die Schwingwegamplitude bei theoretisch unendlich großem Frequenzverhältnis. Zuerst wird die stationäre Schwingung in der Luft betrachtet. Durch Einsetzen der bekannten dynamischen Masse $M_R = 1515\,\text{kg}$, welche der Rüttlermasse entspricht und der Schwingwegamplitude bei theoretisch unendlich großem Frequenzverhältnis $A_{\beta=\infty,Luft} = 3,48\,\text{mm}$ während der stationären Schwingung in der Luft (Gleichung 6.14), ergibt sich das Produkt der Masse m_u und der Exzentrizität e der rotierenden Unwucht zu:

$$m_u e = A_{\beta=\infty,Luft}\, M_R = 5,27\,\text{kgm} \tag{6.15}$$

Unter Berücksichtigung einer mit der Rüttlermasse M_R gekoppelten mitschwingenden Bodenmasse M_B ergibt sich Gleichung 6.14 zu:

$$A_{\beta=\infty,Boden} = \frac{m_u e}{M_R + M_B} \tag{6.16}$$

Die Größe des Produkts der Masse m_u und der Exzentrizität e der rotierenden Unwucht während der Schwingung in der Luft und im Boden ist gleich groß. Daher kann unter der Berücksichtigung der Schwingwegamplitude bei theoretisch unendlich großem Frequenzverhältnis $A_{\beta=\infty,Boden} = 2,33\,\text{mm}$ während der quasi-stationären Schwingung im Boden, nach Umformen der Gleichung 6.16 die Größe der mitschwingenden Bodenmasse M_B wie folgt errechnet werden:

$$M_B = \frac{m_u e}{A_{\beta=\infty,Boden}} - M_R = 748\,\text{kg} \tag{6.17}$$

In Abbildung 6.8 sind die Resonanzkurven (im gegenständlichen Fall in Form von der Verstärkung der Amplitude) und die Vorlaufwinkel für den in der Luft schwingenden Tiefenrüttler und für das Rüttler-Boden Interaktionssystem anschaulich dargestellt. Es sei dabei angemerkt, dass diese Zusammenhänge unter Voraussetzung eines konstanten Dämpfungsverhältnisses, für eine qualitative Gegenüberstellung der beiden dynamischen Systeme ermittelt wurden. Es ist dabei ersichtlich, dass man aufgrund des vergleichsweise ho-

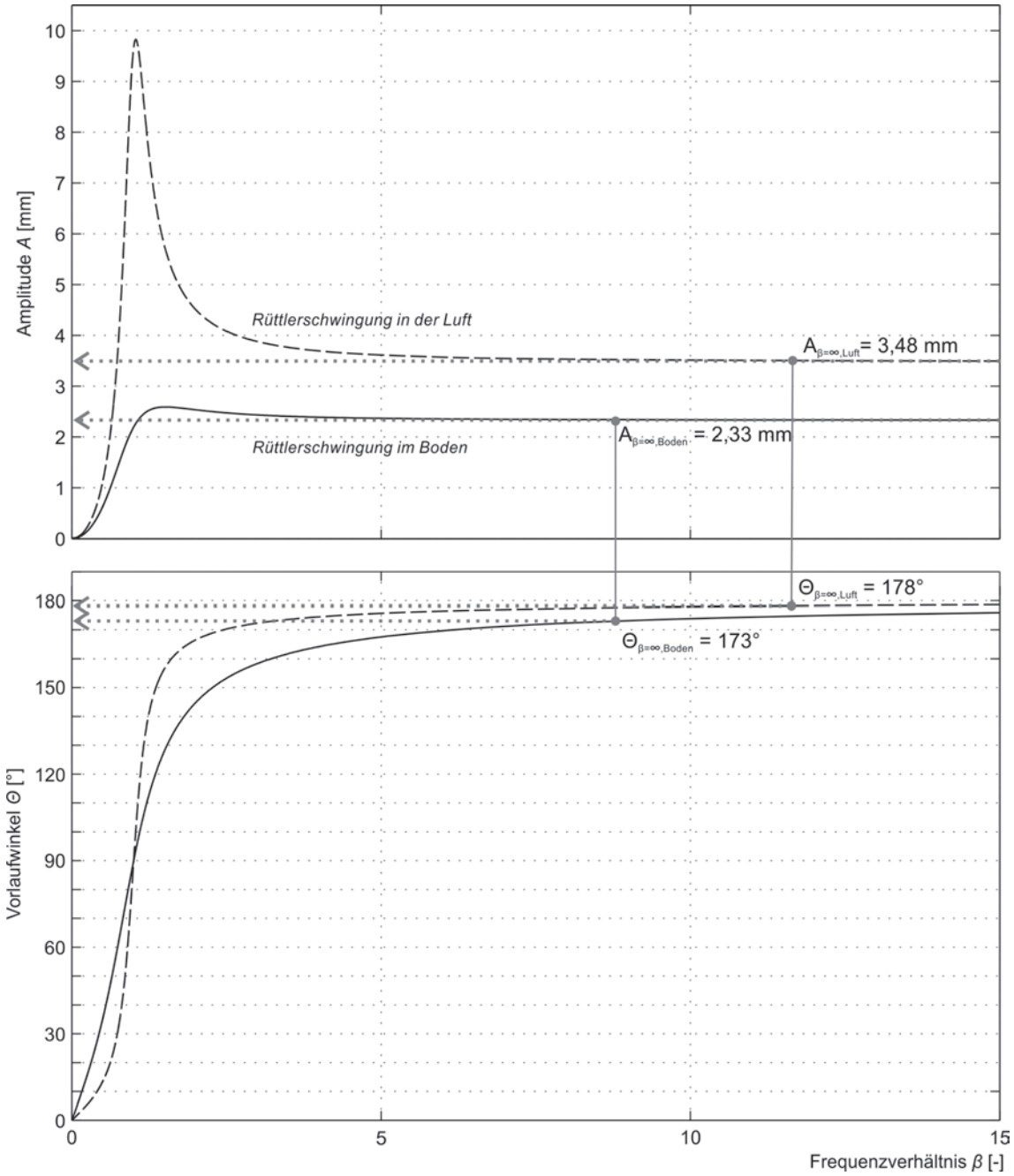


Abbildung 6.8: Resonanzkurven und Vorlaufwinkel für den in der Luft schwingenden Tiefenrüttler und für das Rüttler-Boden Interaktionssystem.

hen Vorlaufwinkels sowohl bei der stationären Rüttlerschwingung in der Luft als auch bei der quasi-stationären Rüttlerschwingung im Boden von einem vergleichsweise hohen Frequenzverhältnis β ausgegangen und in weiterer Folge von einer praktisch verschwindenden Verstärkung der Schwingwegamplitude ausgehen kann. Des Weiteren ist erkennbar, dass durch die Berücksichtigung einer mitschwingenden Bodenmasse der Unterschied zwischen dem Bewegungsverhalten in der Luft und jenem im Boden bei überkritischer Anregung erklärt und im analytischen Modell abbildbar ist.

Wie bereits angeführt, wird in der gegenständlichen Modellvorstellung die mitschwin-

gende Bodenmasse M_B als eine mit der Masse des Rüttlerkörpers M_R gekoppelte Punktmasse modelliert. Zwischen den beiden Massen M_R und M_B wird in weiterer Folge keine Kontaktbedingung modelliert. Des Weiteren wird die Größe der mitschwingenden Bodenmasse während des Verdichtungsvorgangs als konstant angenommen. Abbildung 6.9 zeigt die Prinzipskizze des zugrunde gelegten analytischen Modells unter Berücksichtigung der mitschwingenden Bodenmasse.

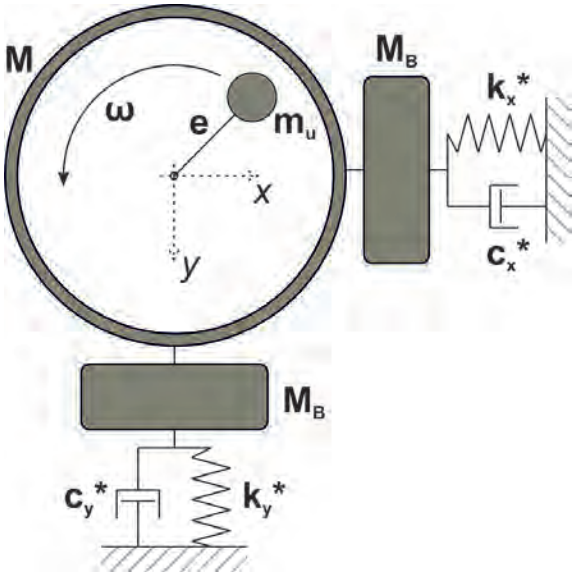


Abbildung 6.9: Mechanisches Modell des Rüttler-Boden Interaktionssystems unter Berücksichtigung einer mit der Rüttlermasse M_R gekoppelten mitschwingenden Bodenmasse M_B.

Das Bewegungsverhalten des in Abbildung 6.9 dargestellten Systems ist mit dem Gleichungssystem 6.18 zu beschreiben.

$$\begin{aligned}(M_R + M_B)\ddot{x} + c_x^*\dot{x} + k_x^* x &= m_u e\,\omega^2\,\cos(\omega t)\\ (M_R + M_B)\ddot{y} + c_y^*\dot{y} + k_y^* y &= m_u e\,\omega^2\,\sin(\omega t)\end{aligned} \tag{6.18}$$

Unter Berücksichtigung der mitschwingenden Bodenmasse gilt analog zur Gleichungssystem 6.3, dass sich das Gleichungssystem aufgrund der gleichmäßig angenommenen Eigenschaften des zu verdichtenden Bodens (d.h. $k^* = k_x^* = k_y^*$, $c^* = c_x^* = c_y^*$) auf eine Bewegungsgleichung reduzieren lässt:

$$(M_R + M_B)\ddot{x} + c\dot{x} + k^* x = m_u e\,\omega^2\,\cos(\omega t) \tag{6.19}$$

6.5 Rückrechnung der Parameter des Ersatzsystems aus der Rüttlerbewegung

Abschnitt 6.3 galt als Nachweis dafür, dass die Änderung des Bewegungsverhaltens mit fortschreitender Verdichtung auf eine allmähliche Erhöhung der Bodensteifigkeit zurückgeführt werden kann, welche sich beim gegenständlichen Modellierungsansatz in der zu-

standsabhängigen Reaktionssteifigkeit k^* manifestiert. Des Weiteren konnte qualitativ nachgewiesen werden, dass der quadratisch angeregte Einmassenschwinger prinzipiell eine geeignete Modellvorstellung für das Rüttler-Boden Interaktionssystem darstellt und die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit ein möglicher Indikator für die Steifigkeit und den Verdichtungszustand des Bodens ist.

Im gegenständlichen Abschnitt ist der Rechenweg zur Berechnung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit auf Basis der messtechnisch erfassten Rüttlerbewegung gezeigt und diskutiert.

Für die Bestimmung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit k^* sind die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze A und der Vorlaufwinkel Θ die wesentlichen Eingangsparameter. Das Verhältnis der aktuellen Schwingwegamplitude A zur Schwingwegamplitude bei theoretisch unendlich großem Frequenzverhältnis $A_{\beta=\infty,Boden}$ bildet den Verstärkungsfaktor V_q:

$$V_q = \frac{A}{A_{\beta=\infty,Boden}} \tag{6.20}$$

Die Schwingwegamplitude bei theoretisch unendlich großem Frequenzverhältnis $A_{\beta=\infty,Boden}$ ist aus der messtechnisch erfassten Rüttlerbewegung ableitbar. Dazu wird die quasi-stationäre Rüttlerschwingung bei konstanter Rütteltiefe vor Beginn des Absenkvorgangs betrachtet (vgl. Abschnitt 6.4).

Gleichung 6.21 zeigt den allgemeinen Zusammenhang zwischen den Schwingwegamplituden A und $A_{\beta=\infty,Boden}$ bzw. dem Frequenzverhältnis β und dem Dämpfungsverhältnis D^*, welches im gegenständlichen Fall analog zur zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit k^* eine veränderliche Größe darstellt. Die Herleitung des grundsätzlich bekannten Zusammenhanges ist im Anhang A angeführt.

$$V_q = \frac{\beta^2}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2D^*\beta)^2}} \tag{6.21}$$

Durch das Einsetzen von Gleichung 6.20 in Gleichung 6.21 ergibt sich der Zusammenhang zu:

$$\frac{A}{A_{\beta=\infty,Boden}} = \frac{\beta^2}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2D^*\beta)^2}} \tag{6.22}$$

Aus dem Umformen und Einsetzen von 6.23 in Gleichung 6.22

$$\Theta = arctan\left(\frac{2D^*\beta}{1-\beta^2}\right) \tag{6.23}$$

resultiert folgende Gleichung:

$$\frac{A}{A_{\beta=\infty,Boden}} = \frac{\beta^2}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (1+tan^2\Theta)}} \tag{6.24}$$

Lösung der Gleichung 6.24 liefert den folgenden Zusammenhang für das Frequenzver-

hältnis β:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 \pm \sqrt{\frac{\left(\frac{A_{\beta=\infty,Boden}}{A}\right)^2}{1+tan^2\Theta}}}} \tag{6.25}$$

Allgemein gilt, dass die Größe des Vorlaufwinkels Θ vom Frequenzverhältnis β und vom Dämpfungsverhältnis D abhängig ist. Der Verlauf der Kurve wird von der Größe des Dämpfungsverhältnisses bestimmt. Der allgemeine Zusammenhang zwischen dem Frequenzverhältnis β und dem Vorlaufwinkel Θ ist – für unterschiedliche Dämpfungsverhältnisse $D > 0$ – in Abbildung 6.10 dargestellt.

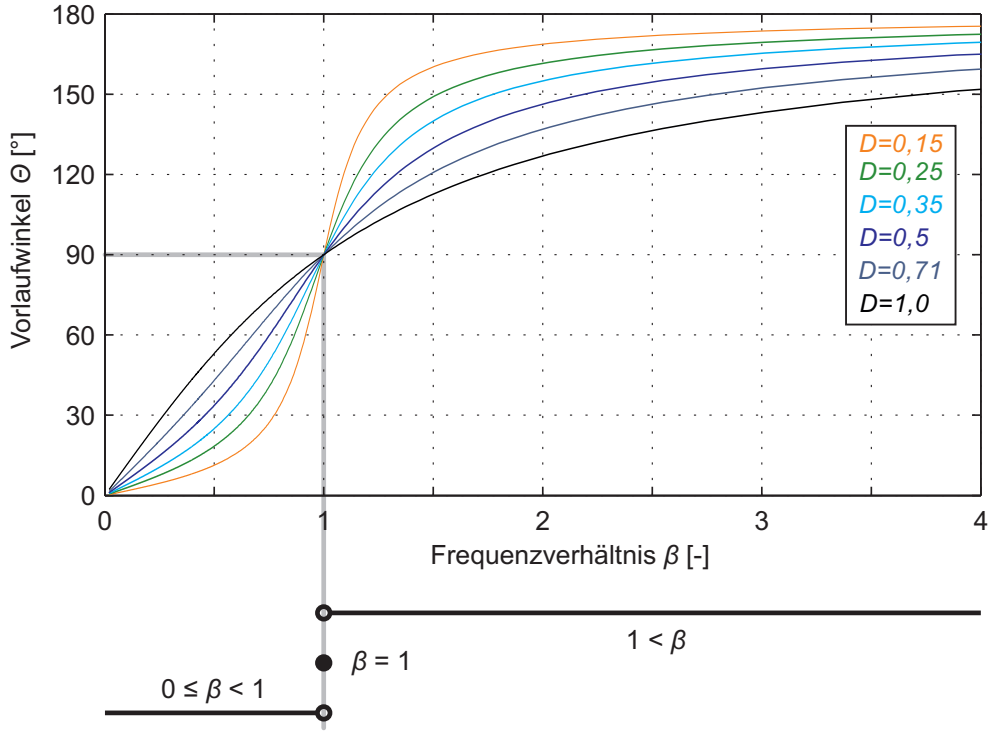


Abbildung 6.10: Allgemeiner Zusammenhang zwischen dem Frequenzverhältnis β und dem Vorlaufwinkel Θ für unterschiedliche Dämpfungsverhältnisse $D > 0$ mit den drei zu betrachtenden Bereichen bei der Fallunterscheidung von $0 \leq \beta < 1$, $\beta = 1$, $1 < \beta$.

Anhand von Abbildung 6.10 ist ersichtlich, dass zwischen dem Frequenzverhältnis β und dem Vorlaufwinkel Θ folgender Zusammenhang vorherrscht:

$$0^\circ \leq \Theta < 90^\circ,\ 0 \leq \beta < 1 \tag{6.26a}$$

$$90^\circ < \Theta \leq 180^\circ,\ 1 < \beta \tag{6.26b}$$

$$\Theta = 90^\circ,\ \beta = 1 \tag{6.26c}$$

Aus diesem Grund ist bei der Lösung von Gleichung 6.25 eine Fallunterscheidung durchzuführen, wobei drei Fälle zu betrachten sind. Im Bereich $0° \leq \Theta < 90°$ ist $0 \leq \beta < 1$ und gilt für β:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 + \sqrt{\frac{\left(\frac{A_{\beta=\infty,Boden}}{A}\right)^2}{1 + tan^2\Theta}}}} \tag{6.27}$$

im Bereich $90° < \Theta \leq 180°$ ist $1 < \beta$ und gilt für β:

$$\beta = \frac{1}{\sqrt{1 - \sqrt{\frac{\left(\frac{A_{\beta=\infty,Boden}}{A}\right)^2}{1 + tan^2\Theta}}}} \tag{6.28}$$

bei $\Theta = 90°$ gilt für ein beliebiges Dämpfungsverhältnis $D > 0$:

$$\beta = 1 \tag{6.29}$$

Aus dem Frequenzverältnis β ergibt sich nach Gleichung 6.5 bei bekannter Erregerkreisfrequenz[1] ω die vom aktuellen Zustand des Bodens abhängige, veränderliche ungedämpfte Eigenkreisfrequenz des Rüttler-Boden Interaktionssystems ω_0 zu:

$$\omega_0 = \frac{\omega}{\beta} \tag{6.30}$$

Im weiterer Folge ergibt sich nach Umformen von Gleichung 6.6 unter Berücksichtigung der Rüttlermasse M_R und der mitschwingenden Bodenmasse M_B die Größe der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit k^*:

$$k^* = (M_R + M_B)\,\omega_0^2 \tag{6.31}$$

Das zustandsabhängige Dämpfungsverhältnis D^* berechnet sich nach Umformen der Gleichung 6.23 zu

$$D^* = tan\Theta\,\frac{1 - \beta^2}{2\beta} \tag{6.32}$$

Das Dämpfungskoeffizient c^* ist nach Umformen von Gleichung 6.2

$$c^* = D^* c_c \tag{6.33}$$

Bei der folgenden Diskussion der Ergebnisse für die gegenständlichen Parameteridenti-

[1] Die Umdrehungsfrequenz des Rüttlermotors f ist im standardmäßigen Rüttlerbetrieb abgesehen von geringfügigen Schwankungen konstant und beträgt beim untersuchten Rüttlertyp im Regelfall etwa $f = 50\,\text{Hz}$. Damit ist die Erregerkreisfrequenz auch konstant und beträgt etwa $\omega = 2\pi f = 314\,\text{Hz}$

fizierung wird die zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit k^* und das zustandsabhängige Dämpfungsverhältnis D^* betrachtet.

6.6 Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit im standardmäßigen und nicht-standardmäßigen Rüttlerbetrieb

Der zeitliche Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit k^* und des zustandsabhängigen Dämpfungsverhältnisses D^* wurde mit den in Abschnitt 6.5 gezeigten Zusammenhängen für unterschiedliche Verdichtungsversuche im Sinne einer Parameteridentifizierung ermittelt. Dabei stellten die beiden Kenngrößen zur Charakterisierung des Bewegungsverhaltens, die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze A und der Vorlaufwinkel Θ, die wesentlichen Eingangsparameter für die Rückrechnung dar.

Im Folgenden ist der errechnete zeitliche Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit k^* und des zustandsabhängigen Dämpfungsverhältnisses D^* für Verdichtungsversuche im standardmäßigen und im nicht-standardmäßigen Rüttlerbetrieb eingehend diskutiert.

6.6.1 Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit im standardmäßigen Rüttlerbetrieb

Abbildung 6.11 zeigt den zeitlichen Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit k^* sowie der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze A, des Vorlaufwinkels Θ, des Rüttleranpressdrucks und der Rütteltiefe im Zuge eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb. Hierbei handelt es sich um den im Zuge der Diskussion des Bewegungsverhaltens, in Abschnitt 5.3.2 betrachteten Verdichtungsversuch.

Wie in Abbildung 6.11 erkennbar ist, wurde die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit nicht nur für den Verdichtungsvorgang, sondern auch für die Arbeitsphase Einvibrieren[2] ermittelt. Der gegenständliche Abschnitt beschäftigt sich mit der Arbeitsphase Verdichtung, eine eingehende Diskussion der in der Arbeitsphase Einvibrieren ermittelten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit erfolgt in Kapitel 7.

[2]Einvibrieren: Absenken des Tiefenrüttlers bis zur geplanten Verdichtungstiefe (vgl. Abschnitt 2.2.1.2).

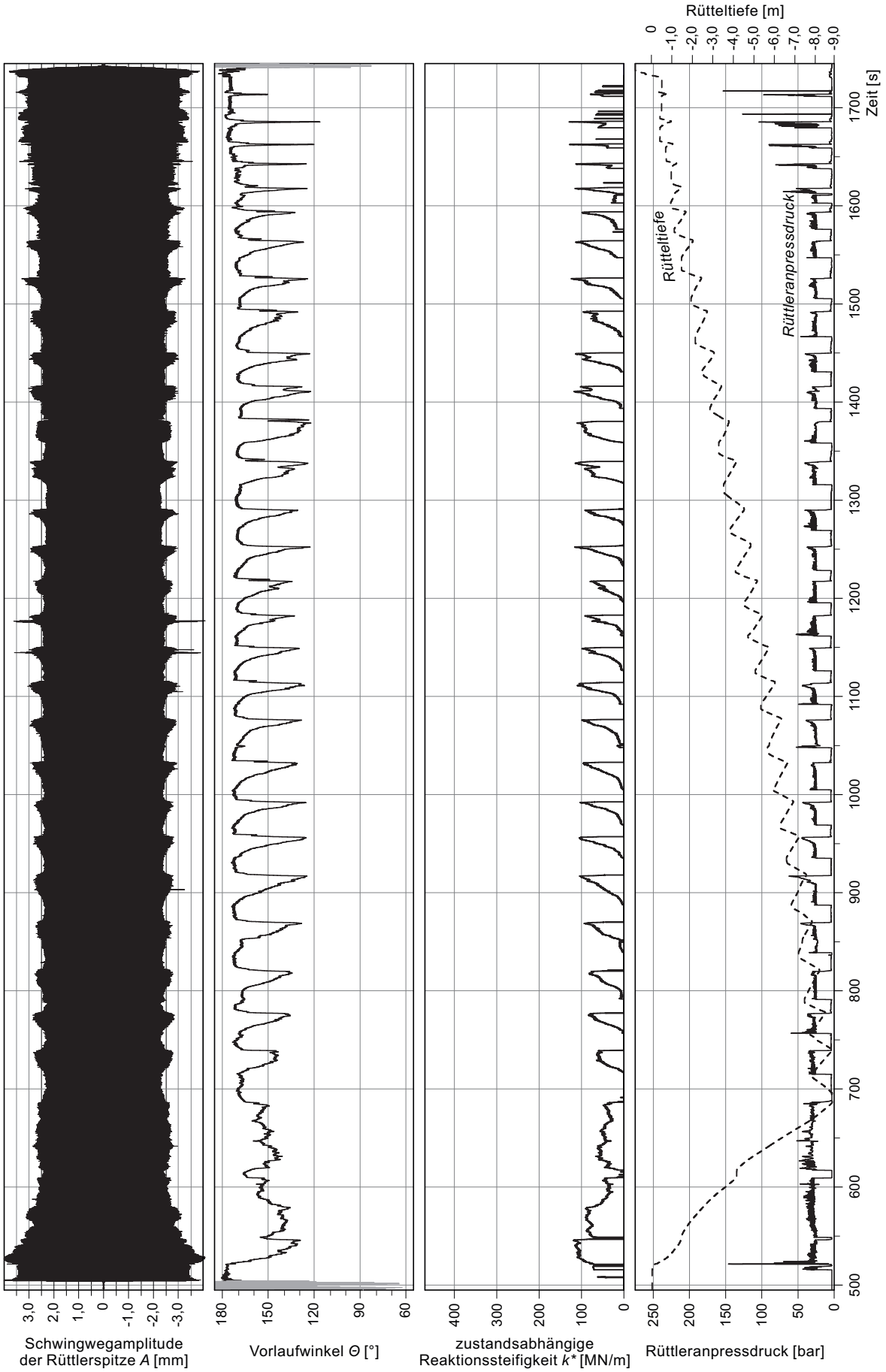


Abbildung 6.11: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit und Rütteltiefe während eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb.

Anhand des zeitlichen Verlaufes der Rütteltiefe ist erkennbar, dass man die Verdichtung im Pilgerschrittverfahren durchgeführt hat. Wie in Abschnitt 5.5.2 im Zuge der Diskussion der Arbeitshypothese zur Erklärung der wesentlichen physikalischen Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem gezeigt ist, ist unter derartigen Randbedingungen wie bei den gegenständlichen experimentellen Untersuchungen erst durch Rütteldruckverdichtung im Pilgerschrittverfahren eine maßgebliche Verdichtungswirkung erzielbar. Dabei wird eine nennenswerte Bodenverdichtung während des Absenkvorgangs bei den einzelnen Verdichtungsschritten im Bodenbereich unterhalb der Rüttlerspitze herbeigeführt. Nachdem der Verdichtungsvorgang im Zuge der Rütteldruckverdichtung im Pilgerschrittverfahren auf einzelne Verdichtungsschritte unterteilt ist, ist es sinnvoll, den Verdichtungserfolg für die einzelnen Verdichtungsschritte zu definieren. Aus diesem Grund wurde die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit k^* und das zustandsabhängige Dämpfungsverhältnis D^* erst für jene Zeitpunkte berechnet, in denen der Tiefenrüttler nach unten bewegt wird. In den Zeitpunkten, in denen der Tiefenrüttler nach oben bewegt wird oder bei konstanter Tiefe im Untergrund schwingt, sind diese auf null gesetzt. Diese Zustände entsprechen der Betriebsphase Heben.

In Abbildung 6.12 ist eine etwa $2,5\,\mathrm{m}$ lange Verdichtungsstrecke des in Abbildung 6.11 gezeigten Verdichtungsversuchs vergrößert dargestellt. In Abbildung 6.11 ist zusätzlich auch das zustandsabhängige Dämpfungsverhältnis D^* angeführt.

Im zeitlichen Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit ist mit zunehmender Rütteltiefe ein eindeutiger Anstieg ersichtlich. Bei den betrachteten Verdichtungsschritten werden lokale Maxima etwa bei $100\,\mathrm{MN/m}$ erreicht. Die weiteren Verdichtungsschritte des gegenständlichen Verdichtungsversuchs weichen von diesem Werteniveau kaum ab (vgl. Abbildung 6.11) und befinden sich in der Bandbreite zwischen etwa 90 und $110\,\mathrm{MN/m}$. Lediglich beim ersten Verdichtungsschritt des Verdichtungsversuchs ergibt sich eine vergleichsweise niedrige zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit von etwa $65\,\mathrm{MN/m}$. Beim Abbruch der einzelnen Verdichtungsschritte werden die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit und das zustandsabhängige Dämpfungsverhältnis auf null gesetzt und bleiben definitionsgemäß bis zum Beginn des kommenden Verdichtungsschrittes null.

Zu Beginn der einzelnen Verdichtungsschritte ergibt sich ein vergleichsweise hohes zustandsabhängiges Dämpfungsverhältnis D^*, beim ersten Verdichtungsschritt der in Abbildung 6.12 dargestellten Verdichtungsstrecke ist sogar $D^* > 1,0$, was für ein überkritisch gedämpftes System spricht. Mit zunehmender Rütteltiefe verringert sich das zustandsabhängige Dämpfungsverhältnis und bleibt bis zum Abbruch des jeweiligen Verdichtungsschrittes bei etwa $D^* = 0,5$ nahezu konstant.

Die Rückrechnung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und des zustandsabhängigen Dämpfungsverhältnisses erfolgt auf Basis der Rüttlerbewegung, in Form der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze A und des Vorlaufwinkels Θ. Aus diesem Grund ist im zeitlichen Verlauf der beiden Parameter im standardmäßigen Rüttlerbetrieb, analog zum Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers, eine klare Periodizität und gleichzeitig eine hohe Reproduzierbarkeit erkennbar.

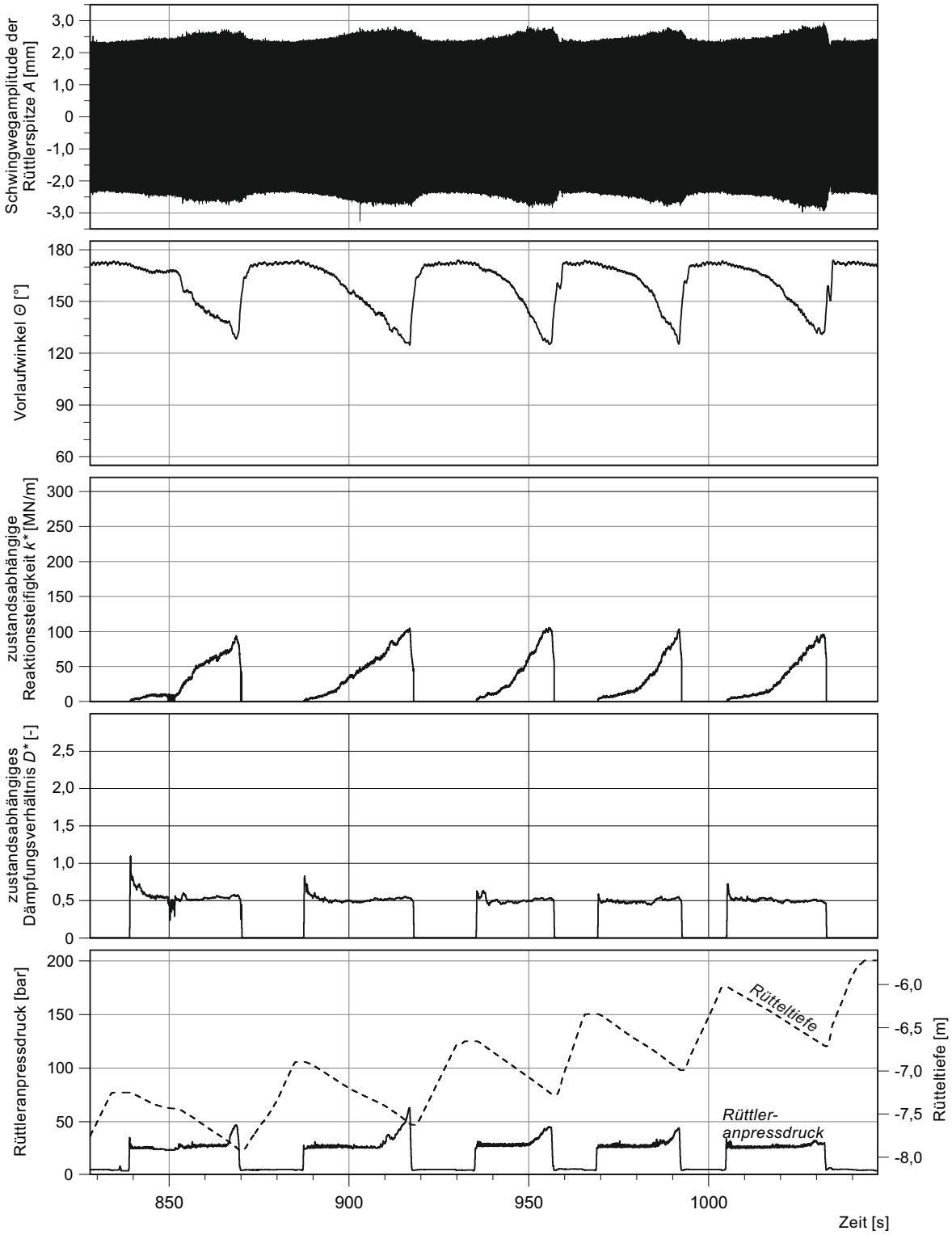


Abbildung 6.12: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit, zustandsabhängiges Dämpfungsverhältnis und Rütteltiefe bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke des in Abbildung 6.11 dargestellten Verdichtungsversuchs.

6.6.2 Einfluss der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden auf die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit

Die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit und das zustandsabhängige Dämpfungsverhältnis wurden auch für den in Abschnitt 5.3.3 diskutierten Verdichtungsversuch zur Untersuchung der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden ermittelt. Bei dem gegenständlichen Versuch handelt es sich um eine Parametervariation, wobei der Absenkvorgang im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte nicht bei einer aus Sicht des Gerätefahrers optimalen Absenktiefe abgebrochen, sondern solange weitergeführt wurde, bis beim aktuellen Verdichtungsschritt praktisch kein weiteres Eindringen in den zu verdichtenden Boden möglich war. Folglich erreichte man bei den meisten Verdichtungsschritten eine deutlich höhere Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden als im standardmäßigen Rüttlerbetrieb.

Abbildung 6.13 zeigt den zeitlichen Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit k^* sowie die zeitlichen Verläufe der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze A des Vorlaufwinkels Θ, des Rüttleranpressdrucks und der Rütteltiefe.

Beim gegenständlichen Verdichtungsversuch zeigt die zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit prinzipiell einen ähnlichen Verlauf wie im standardmäßigen Rüttlerbetrieb (vgl. Abschnitt 6.6.1). Sie steigt mit zunehmender Rütteltiefe an und erreicht ihr lokales Maximum bei größten Absenktiefe im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte. Das Werteniveau der zum lokalen Maximum zugehörigen zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit ist beim gegenständlichen Verdichtungsversuch jedoch deutlich höher als im standardmäßigen Rüttlerbetrieb. Solange im standardmäßigen Rüttlerbetrieb die einzelnen Verdichtungsschritte bei einer zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit von etwa $90 - 110\,\mathrm{MN/m}$ abgebrochen wurden (vgl. Abbildung 6.11), erreichte man im gegenständlichen Fall bei bestimmten Verdichtungsschritten sogar Werte deutlich über $400\,\mathrm{MN/m}$.

Beim ersten Verdichtungsschritt des Verdichtungsversuchs ergab sich analog zu dem in Abschnitt 6.6.1 diskutierten Verdichtungsversuch eine vergleichsweise niedrige zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit von etwa $55\,\mathrm{MN/m}$. Beim kommenden Verdichtungsschritt senkte man den Rüttler annähernd in die gleiche Tiefe ab, dabei ist aber eine deutlich höhere zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit ersichtlich. Dieser Umstand spricht für eine Pfropfenbildung unterhalb der Rüttlerspitze und bestätigt die Annahme, dass während der Rütteldruckverdichtung im Pilgerschrittverfahren eine nennenswerte Bodenverdichtung im Bodenbereich unterhalb der Rüttlerspitze entsteht.

Für sämtliche Verdichtungsschritte des betrachteten Verdichtungsversuchs gilt, dass der Gradient der ansteigenden zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit mit zunehmender Verdichtungstiefe maßgeblich steigt.

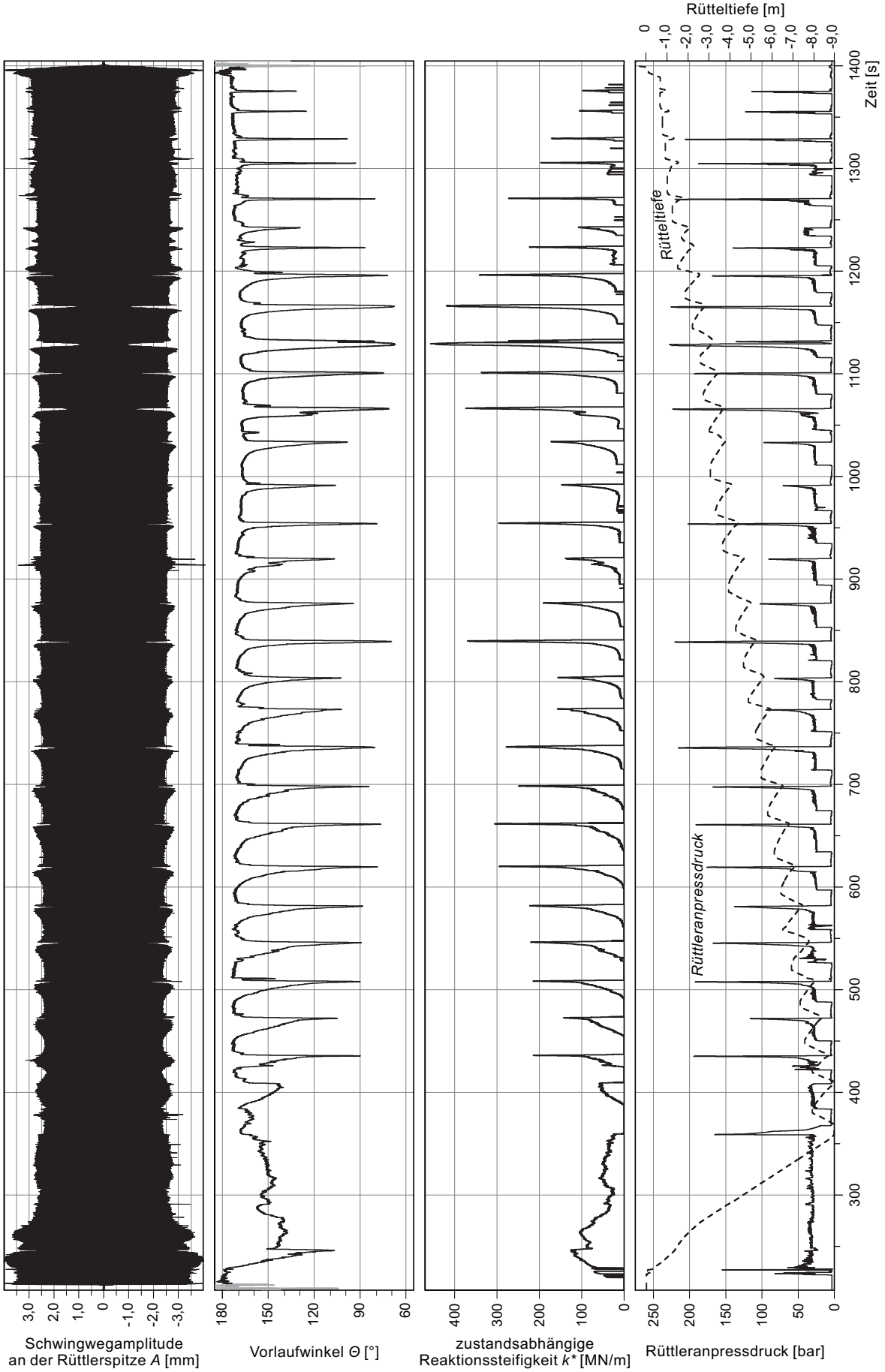


Abbildung 6.13: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit und Rütteltiefe während eines Sonderversuchs zur Untersuchung des Einflusses des erhöhten Rüttleranpressdrucks auf die Rüttlerbewegung [7].

Anhand Abbildung 6.13 wird ein Zusammenhang zwischen der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und dem Rüttleranpressdruck klar. Lokale Maxima im zeitlichen Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit ergeben sich etwa an jenen Stellen, wo der Rüttleranpressdruck seine lokalen Maxima hat. Wie in Abschnitt 5.3.3 aufgezeigt, ist der Rüttleranpressdruck als indirekter Indikator für die Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden und damit für die Spannung im Bodenbereich unterhalb der Rüttlerspitze anzusehen.

Die stark ausgeprägte Änderung im Gradienten der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit sowie der klare Zusammenhang zwischen der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und der Spannung zwischen Rüttlerspitze und Boden in Form des Rüttleranpressdrucks sind in Abbildung 6.14 besonders klar erkennbar. In Abbildung 6.14 ist eine etwa $2,5\,\mathrm{m}$ lange Verdichtungsstrecke des in Abbildung 6.13 dargestellten Verdichtungsversuchs vergrößert gezeigt, wobei zusätzlich zu den in Abbildung 6.13 dargestellten Parameter das zustandsabhängige Dämpfungsverhältnis D^* angeführt ist.

In dieser Darstellung ist erkennbar, dass der Gradient der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte bei höherer Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden deutlich größer ist als bei geringer Kontaktspannung. Des Weiteren ist ersichtlich, dass der Gradient der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit bei hohem Werteniveau bei den einzelnen Verdichtungsschritten annähernd gleich groß ist. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 6.14 mit strichlierten violetten Linien gekennzeichnet. Die stark ausgeprägte Änderung des Gradienten der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit tritt bei einem Werteniveau zwischen etwa 100 und $130\,\mathrm{MN/m}$ auf. Diese Bandbreite ist in Abbildung 6.14 mit violetten Balken markiert.

Das zustandsabhängige Dämpfungsverhältnis D^* ist analog zum standardmäßigen Rüttlerbetrieb am Beginn der einzelnen Verdichtungsschritte vergleichsweise hoch, im gegenständlichen Fall ist es bei manchen Verdichtungsschritten deutlich größer als $1,0$, was einer überkritischen Dämpfung entspricht. Mit zunehmender Rütteltiefe verringert es sich und bleibt bei $D^* \approx 0,5$ annähernd konstant. Bei stark zunehmender zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit zeigt das zustandsabhängige Dämpfungsverhältnis einen leichten Anstieg, bei sich verringernder zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit sinkt es wieder ab.

Im Zuge der gegenständlichen Parameteridentifizierung konnte während der einzelnen Verdichtungsschritte eine mit zunehmender Rütteltiefe ansteigende zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit ermittelt werden. Dieses bestätigt die in Abschnitt 6.3.2 vorausgesetzte Annahme, wobei die Änderung des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte auf eine Erhöhung der Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens zufolge Verdichtung zurückgeführt ist. Der errechnete Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit bestätigt somit die Zulässigkeit des gewählten Modellierungsansatzes, das Rüttler-Boden Interaktionssystem als quadratisch angeregter Einmassenschwinger abzubilden.

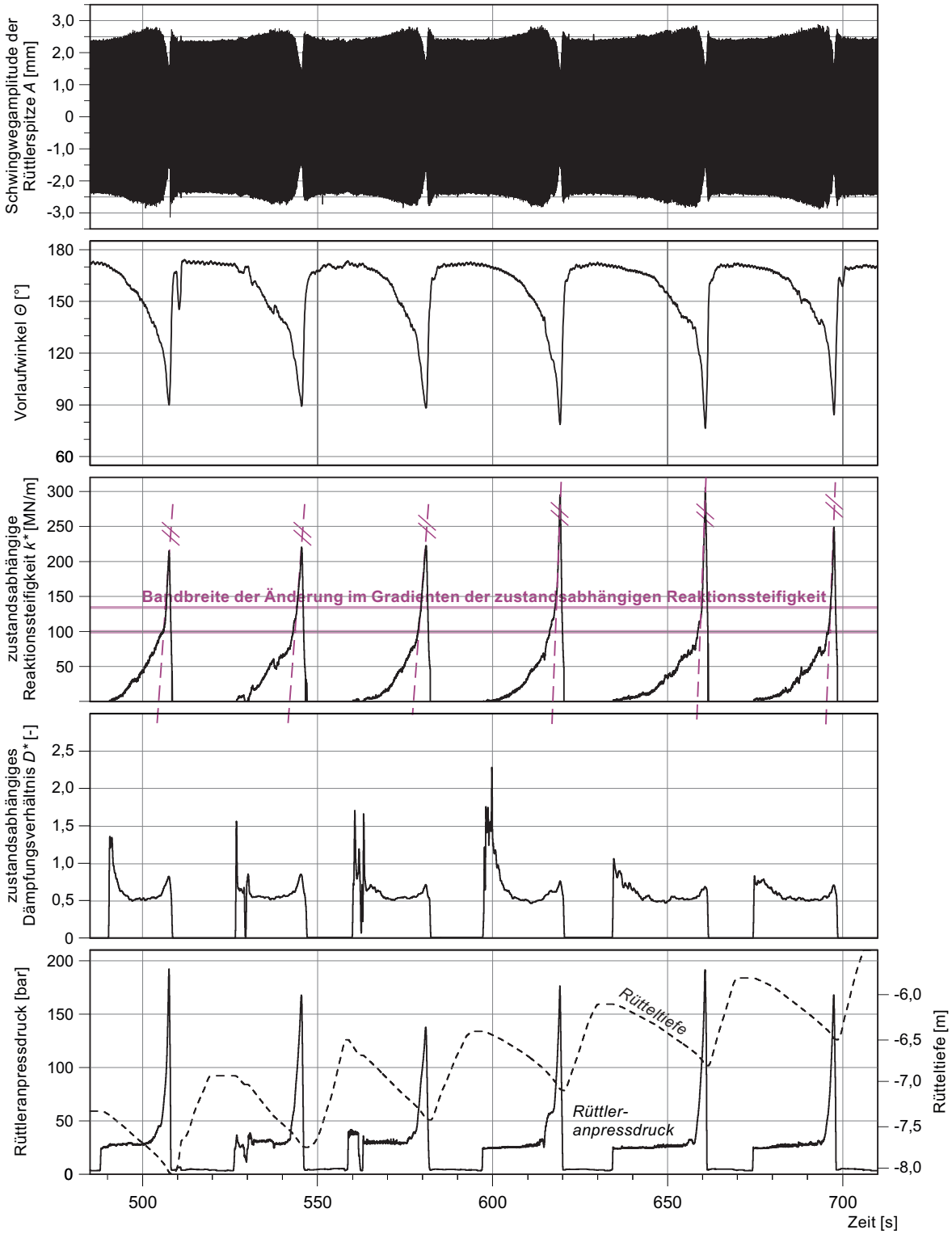


Abbildung 6.14: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit, zustandsabhängiges Dämpfungsverhältnis, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke des in Abbildung 6.13 dargestellten Verdichtungsversuchs.

6.6.3 Gegenüberstellung der errechneten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit mit dem Rüttleranpressdruck

Die in Abschnitt 6.6.2 diskutierten Auswertungsergebnisse zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit des Bodens und der Spannung an der Kontaktfläche zwischen Rüttlerspitze und Boden in Form des Rüttleranpressdrucks. Der Zusammenhang zwischen den beiden Parametern ist bei einer hohen Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden besonders klar erkennbar. Bei geringerem Rüttleranpressdruck, d. h. bei geringerer Spannung zwischen Rüttlerspitze und Boden sowie im Bodenbereich unterhalb der Rüttlerspitze, ist die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit auch tendenziell geringer, bei höherer Kontaktspannung ist die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit höher.

Es wurde bei diversen Sondierverfahren, wie in etwa bei Ramm- und Drucksondierungen, beobachtet, dass der Eindringwiderstand der Sonde von der Bodensteifigkeit abhängig ist, somit der Widerstand gegen Eindringen der Sondierspitze als Indikator für die Steifigkeit des Bodens verwendbar ist. Für die beiden Sondierverfahren erarbeitete man zahlreiche Zusammenhänge zwischen dem Einringwiderstand der Sonde und diversen Steifigkeitsparametern des Bodens. Empirischische Zusammenhänge zum Eindringwiderstand der Drucksonde sind beispielsweise in [14], [42], [80], [124], zum Eindringwiderstand der Rammsonde in [20], [115], [132] angegeben. Es ist in der Praxis üblich, anhand von Ergebnissen von Sondierungen auf Steifigkeitsparameter zu schließen. Im *Eurocode 7* [110] sind Beispiele für Korrelationen zwischen dem spannungsabhängigen Steifemodul und dem Eindringwiderstand der Ramm- und Drucksonde angegeben. Zur Ermittlung der Bodensteifigkeit verwendet man in der Regel bei der Drucksondierung den Spitzenwiderstand der Sonde q_c oder q_t[3], bei der Rammsondierung den Parameter N_{10}.

Wie in Kapitel 5 aufgezeigt, kann das Eindringen der Rüttlerspitze – analog zu einer Drucksonde – als weggesteuerter Eindringprozess angesehen werden, da um dabei eine konstante Eindringgeschwindigkeit zu erzielen, der Rüttleranpressdruck geregelt wird. Die Eindringgeschwindigkeit der Sonde ist bei der Drucksondierung normativ geregelt und beträgt $20 \pm 0,5\,\mathrm{mm/s}$. *Dayal* und *Allen* [37] untersuchten der Einfluss der Eindringgeschwindigkeit auf den gemessenen Spitzenwiderstand. Die Ergebnisse dieser Experimente zeigten, dass in kohäsionslosen Böden die Eindringgeschwindigkeit der Sonde praktisch keinen Einfluss auf den gemessenen Eindringwiderstand hat.

Auf Basis der Analogie zwischen dem Eindringvorgang einer Sonderspitze und der Rüttlerspitze ist ein Zusammenhang zwischen dem Eindringwiderstand des Tiefenrüttlers in Form des Rüttleranpressdrucks und der im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte mit zunehmender Rütteltiefe steigenden Steifigkeit des Bodens anzunehmen. Damit stellt in weiterer Folge der messtechnisch erfasste Rüttleranpressdruck eine hervorragende Möglichkeit zur Verifizierung der auf Basis der Rüttlerbewegung errechneten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit dar. Aufgrund der in Kapitel 5 diskutierten möglichen Ungenauigkeiten der messtechnischen Erfassung des Rüttleranpressdrucks erfolgt hierbei vorerst eine

[3] q_t: Spitzenwiderstand der Drucksonde, korrigiert um die Einflüsse des Porenwasserdruckes.

qualitative Gegenüberstellung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und des Rüttleranpressdrucks.

6.7 Interpretation der errechneten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit aus bodenmechanischer Sicht

In Abschnitt 6.6 wurde gezeigt, dass sich die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte mit zunehmender Rütteltiefe erhöht. Dieser Vorgang spricht für eine Erhöhung der Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens mit fortschreitender Verdichtung. Um den Zusammenhang zwischen der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und dem aktuellen Verdichtungszustand des Bodens zu erfassen, soll der auf Basis der Rüttlerbewegung rechnerisch ermittelte Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit aus bodenmechanischer Sicht interpretiert werden. Im Folgenden sind die maßgeblichen bodenmechanischen Prozesse im zu verdichtenden Boden zu schildern, welche zur Erhöhung seiner Steifigkeit beitragen.

6.7.1 Steifigkeit von granularen Medien

Das mechanische Verhalten von Böden bei einer dynamischen Belastung ist von mechanischen Parametern, Zustandsgrößen und von Parametern der zu betrachtenden dynamischen Belastung beeinflusst. Welche Parameter für das mechanische Verhalten eine maßgebende Rolle spielen, hängt vom Bodentyp, von der Belastungsart sowie von der Aufgabenstellung ab [134]. Einleitend zur Interpretation der errechneten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit sind im gegenständigen Abschnitt die wesentlichen Einflussfaktoren auf die Steifigkeit von grobkörnigen Böden zur Diskussion zusammengeführt.

Generell gilt, dass die Bodensteifigkeit von der Dehnungsrate abhängig ist. Mit zunehmender Dehnungsamplitude nimmt im Boden der Schubmodul ab. Trägt man die Steifigkeit als Funktion der Dehnungen auf, ergibt sich bei logarithmischer Skalierung der Dehnungen eine S-förmige Reduktionskurve, der auf Abbildung 6.15 exemplarisch dargestellten Kurve ähnlich ist.

Hardin und *Richard* [52] ermittelten anhand von Resonant-Column-Versuchen an unterschiedlichen Sanden die folgenden Zusammenhänge für den Schubmodul G_0, bei sehr kleinen Dehnungsamplitude[4] für rundkörnigen (Gleichung 6.34) und für gebrochenen Sand, (Gleichung 6.35):

$$G_0 = \frac{7000\ (2,17-e)^2}{1+e}\ (\sigma'_m)^{0,5} \quad [\mathrm{kN/m^2}] \tag{6.34}$$

$$G_0 = \frac{3260\ (2,97-e)^2}{1+e}\ (\sigma'_m)^{0,5} \quad [\mathrm{kN/m^2}] \tag{6.35}$$

[4]Der Schubmodul G, bei sehr kleinen Dehnungen wird in der Literatur als G_0 oder seltener als G_{max} bezeichnet.

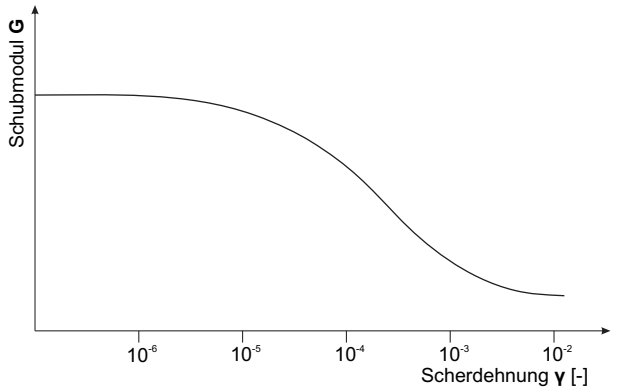


Abbildung 6.15: Qualitative Darstellung der Abhängigkeit des Schubmoduls G für von der Scherdehnungsamplitude γ (adaptiert nach [18])

.

Worin e die Porenzahl und σ'_m die effektive mittlere Hauptspannung sind. Diese vergleichsweise einfache Darstellung des Steifemoduls G_0 wurde gewählt, weil im Zuge der Untersuchungen die Porenzahl e und die effektive mittlere Hauptspannung σ'_m als wesentliche Einflussfaktoren auf die Schubsteifigkeit von Sanden ergaben. Demgegenüber spielen bei kohäsiven Böden weitere Einflussfaktoren, vor allem die Spannungsgeschichte des Bodens, eine essenzielle Rolle. *Hardin* und *Black* [53] verallgemeinerten die Zusammenhänge 6.34 und 6.35 zu:

$$G_0 = A f(e)\ \sigma_m^{'\,n} \tag{6.36}$$

wobei A und n Materialkonstanten sind und f eine zu definierende Funktion der Porenzahl e beschreibt.

Seed und *Idriss* [128] definieren den Zusammenhang für den Schubmodul von Sanden als Funktion der mittleren Hauptspannung σ'_m und des Parameters K_2 in folgender Form:

$$G = 220\ K_2\ \sigma_m^{'\,0,5} \quad [\mathrm{kN/m^2}] \tag{6.37}$$

Dabei sind sämtliche Einflussparameter im Parameter K_2 zusammenfasst. In Abbildung 6.16 ist der Einfluss des Reibungswinkels ϕ', der vertikalen Spannung σ'_v, der Porenzahl e und des Erdruhedruckbeiwerts K_0 auf den Faktor K_2 dargestellt. Es ist dabei ersichtlich, dass im Dehnungsbereich $\gamma < 10^{-1}\%$ die Porenzahl e einen maßgeblichen Einfluss auf die Größe des Parameters K_2 hat, der Einfluss des Reibungswinkels ϕ', des Erdruhedruckbeiwerts K_0 und der vertikalen Spannung $\sigma_v^{'\,5}$ ist vergleichsweise gering. Für praktische Anwendungen kann angenommen werden, dass die Größe des Schubmoduls G von der Porenzahl e, von der mittleren Hauptspannung σ'_m und darüber hinaus von der Dehnungsamplitude γ abhängig ist [134].

Aufgrund der beschränkten Untersuchungsmöglichkeiten im Labor und im Feld, sind für Kiese weniger Untersuchungsergebnisse in der Literatur zu finden. Generell gilt, dass

[5] Der Einfluss der vertikalen Spannung auf die Größe des Schubmoduls G wird hierbei nicht durch den Faktor K_2, sondern durch den Faktor $(\sigma'_m)^{0,5}$ berücksichtigt (siehe Gleichung 6.37).

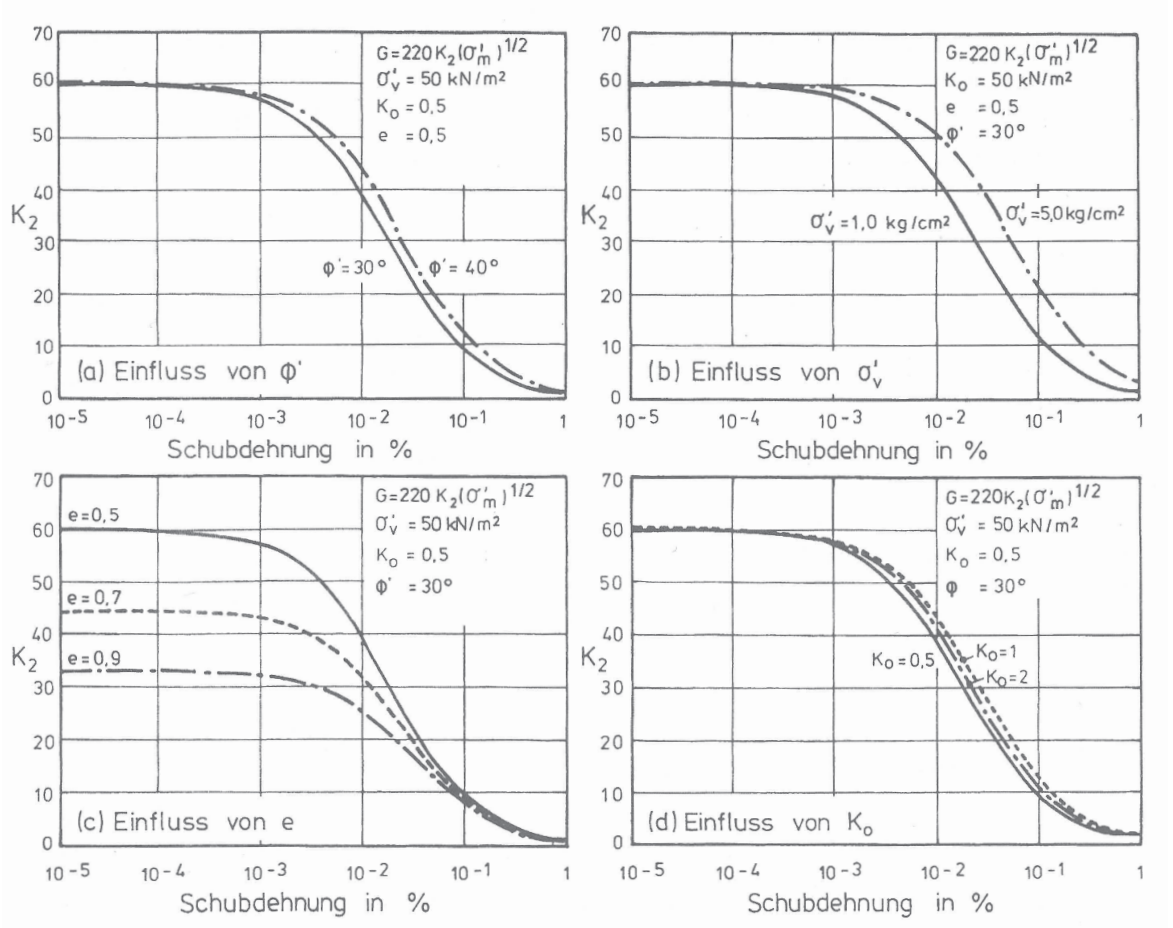


Abbildung 6.16: Einfluss verschiedener Parameter auf das Schubmodul bei Sanden [134] (nach [128]).

für sandige Kiese eine ähnliche Abhängigkeit des Schubmoduls von der Scherverformung angenommen werden kann. Sandige Kiese zeigen bedingt durch ihre Kornverteilung in der Regel deutlich höhere Steifigkeit als Sande. Beispielsweise *Gazetas* [49], *Seed* und *Idriss* [128] und *Szilvágyi* [135] untersuchten die Schubsteifigkeit von Kiesen und sandigen Kiesen.

Aufbauend auf den ersten Untersuchungsergebnissen wurden zahlreiche Zusammenhänge für die Bodensteifigkeit in Form des Schubmoduls G_0 und für das Dämpfungsverhältnis von unterschiedlichen Bodenarten erarbeitet. Eine umfangreiche Zusammenstellung von Korrelationen für unterschiedliche Böden ist beispielsweise in [17] zu finden.

Abbildung 6.18 zeigt die Abhängigkeit des Schubmoduls G_0 von der Porenzahl e bei unterschiedlichen Böden, bei einer mittleren effektiven Hauptspannung von $\sigma'_m = 100\,\text{kPa}$ und $\sigma'_m = 400\,\text{kPa}$. Anhand der beiden Diagramme ist bei allen dargestellten Zusammenhängen bei einer niedrigeren Porenzahl e ein deutlich höherer Schubmodul G_0 erkennbar. Bei der höheren mittleren effektiven Hauptspannung von $\sigma'_m = 400\,\text{kPa}$ ist das Werteniveau des Schubmoduls G_0 generell wesentlich höher.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Schubsteifigkeit von grobkörnigen Böden maßgeblich von der Größe des Porenvolumens und von der mittleren Hauptspannung im Korngerüst bestimmt ist. Darüber hinaus gilt auch für grobkörnige Böden, dass die Boden-

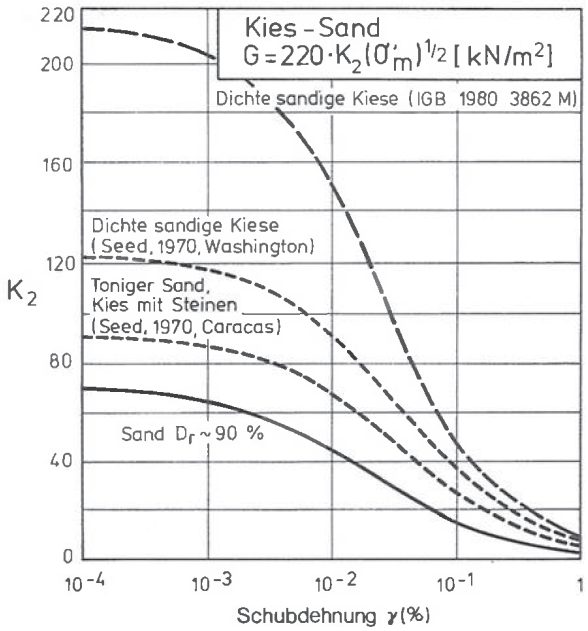


Abbildung 6.17: Abhängigkeit des Schubmoduls G für von der Scherdehnungsamplitude γ für unterschiedliche Kies-Sande [134] (nach [128]).

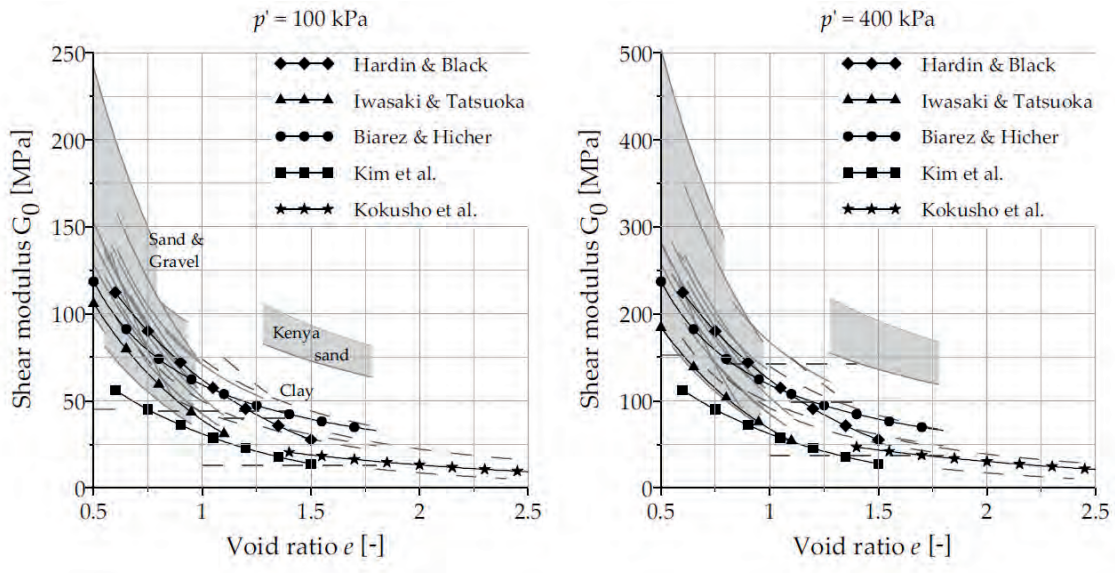


Abbildung 6.18: Abhängigkeit des Schubmoduls G_0 von der Porenzahl e bei unterschiedlichen Böden, bei einer effektiven Hauptspannung von 100 kPa und 400 kPa [17].

steifigkeit von der Dehnungsrate abhängt (vgl. Tabelle 6.1).

Wie im Abschnitt 6.2 diskutiert, entspricht die errechnete zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit nicht direkt der Bodensteifigkeit, sie stellt eine von der Steifigkeit des Bodens abhängige Größe dar. Im Rahmen der gegenständigen Forschungsarbeit wird ein Zusammenhang zwischen der errechneten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und der Bodensteifigkeit in Form eines Schubmoduls nicht weiter betrachtet. Die versuchstechnische Untersuchung des Einflusses der Rütteldruckverdichtung auf den Schubmodul G_0 erfolgte

Tabelle 6.1: Einflussfaktoren auf die Steifigkeit von Böden nach [17] (Auszug).

Parameter	**Importance to G_0**	
	Clean sands	Cohesive soils
Strain amplitude	V	V
Confining stress	V	V
Void ratio	V	V
Plasticity index (PI)*	-	V
Overconsolidation ratio	R	L
Diagenesis*	V*	V*
Strain history*	R	R
Strain rate	R	R
Effective material strength	L	L
Grain characteristics (size, shape, gradation)	L*	L*
Degree of saturation	R	V
Dilatancy	R	R

V: very important
L: less important
R: relatively unimportant
* Modified from the original table presented in [51]

jedoch im Rahmen der gegenständigen Forschungsarbeit. Diese Untersuchungen sind Gegenstand von Kapitel 9.

6.7.2 Arbeitshypothese zur Abgrenzung maßgeblicher bodenphysikalischer Einflussfaktoren auf die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit

Die Steifigkeit eines grobkörnigen Bodens wird neben der Dehnungsrate primär von seinem Porenvolumen und von der mittleren Hauptspannung im Korngerüst bestimmt (siehe Abschnitt 6.7.1). Weitere Einflussfaktoren haben einen untergeordneten Einfluss auf die Steifigkeit eines grobkörnigen Bodens. Die experimentellen Untersuchungen auf dem Versuchsfeld in Fisching erfolgten im grobkörnigen Material. Es ist daher anzunehmen, dass während der einzelnen Verdichtungsschritte der Rütteldruckverdichtung eine Veränderung dieser beiden Einflussparameter zur Erhöhung der Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens geführt hat, was sich auch in der errechneten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit k^* manifestiert.

Nun folgt die Interpretation der errechneten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit exemplarisch anhand eines ausgewählten Verdichtungsschrittes, um den Einfluss der beiden Parameter auf die Bodensteifigkeit abzugrenzen. Es sei angemerkt, dass es sich hierbei – analog zur Arbeitshypothese zur Erklärung der wesentlichen physikalischen Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem (siehe Abschnitt 5.5.2) – um eine vereinfachte Arbeitshypothese handelt. Abbildung 6.19 zeigt den zeitlichen Verlauf der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, des Vorlaufwinkels, der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit, des Rüttleranpressdrucks und der Rütteltiefe bei einem ausgewählten Verdichtungsschritt des in Abschnitt 6.6.2 diskutierten Verdichtungsversuchs. Darüber hinaus sind die beiden maß-

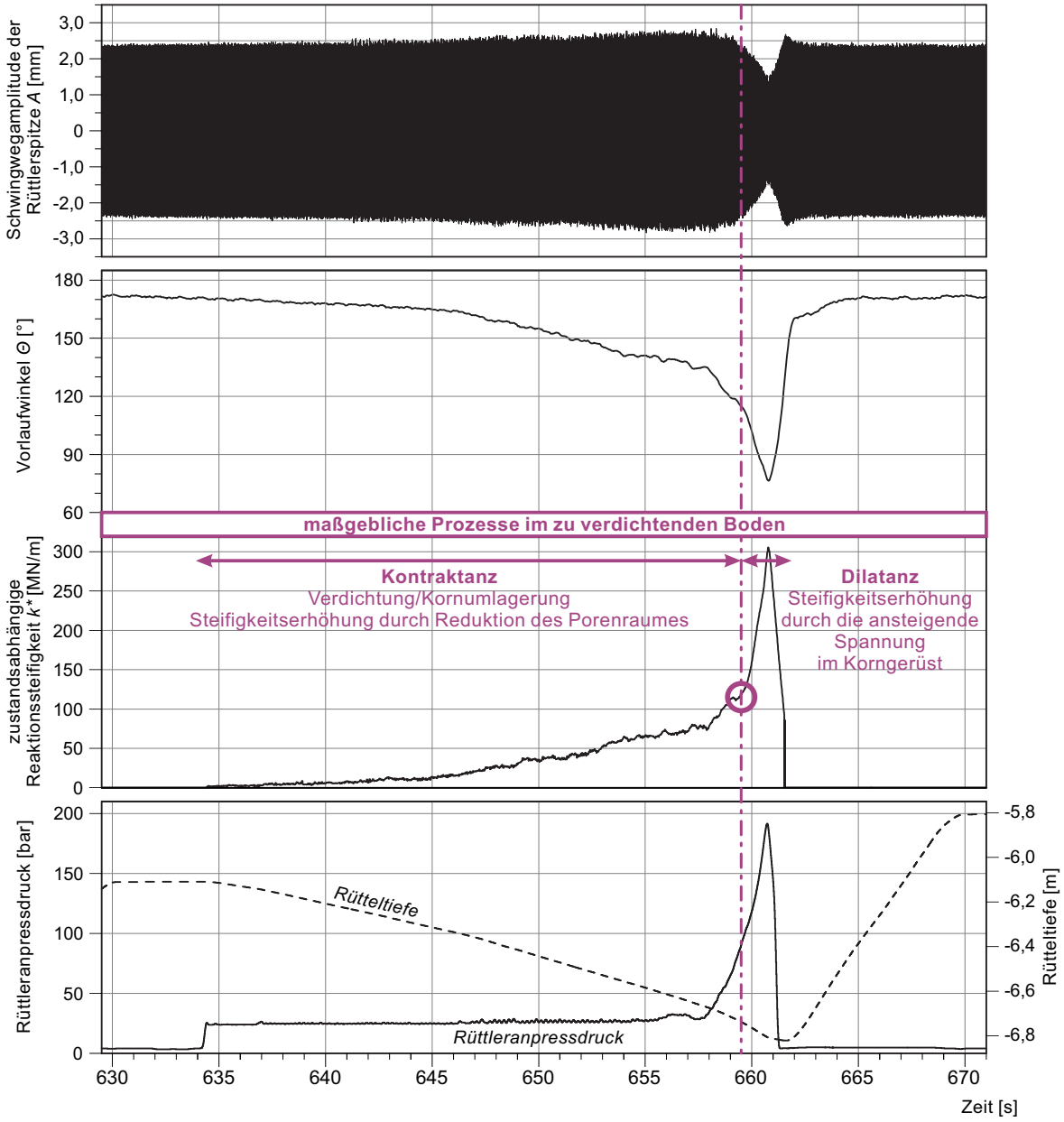


Abbildung 6.19: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe mit Abgrenzung der maßgeblichen Prozesse im zu verdichtenden Boden im Zuge eines ausgewählten Verdichtungsschrittes.

geblichen Prozesse im zu verdichtenden Boden, die zu seiner Steifigkeitserhöhung beitragen, angeführt. Solange bei Kontraktanz primär die Reduktion des Porenvolumens für die Erhöhung der Steifigkeit verantwortlich ist, dominiert bei Dilatanz die ansteigende Spannung im Korngerüst.

Wie in Abschnitt 5.5.2 diskutiert, ist bei der Rütteldruckverdichtung von leicht verkitteten Böden im Pilgerschrittverfahren ein maßgeblicher Verdichtungseffekt im Bodenbereich unterhalb der Rüttlerspitze vorauszusetzen. In Abbildung 6.20 ist aufbauend auf der in Abschnitt 5.5.2 diskutierten Arbeitshypothese zur Erklärung wesentlicher physikalischer Phä-

nomene im Rüttler-Boden Interaktionssystem, ein hypothetischer Spannungszustand im Korngerüst und an der Kontaktfläche zwischen Rüttler und Boden in drei unterschiedlichen Zuständen während eines beliebigen Verdichtungsschrittes dargestellt: Während der quasi-stationären Schwingung im Boden (Abbildung 6.20a), während des kontraktanten Verhaltens am Beginn des Verdichtungsschrittes (Abbildung 6.20b) und während des anschließenden dilatanten Verhaltens des Bodens (Abbildung 6.20c). Die Spannungen an der Kontaktfläche zwischen Rüttler und Boden werden mit roten Pfeilen, die über das Korngerüst übertragene Spannung mit orangefarbenen Linien symbolisiert. Die relative Größe der Spannung ist in beiden Fällen durch die Änderung der Symbolgröße veranschaulicht. Bei den drei Abbildungen ist lediglich der Kornumlagerungsbereich gezeigt, auf eine Darstellung des Spannungszustandes im Verdrängungsbereich[6] wird verzichtet. Es sei angemerkt, dass die dargestellte Spannungsausbreitung als qualitative Darstellung, beruhend auf der Arbeitshypothese zur Erklärung der wesentlichen physikalischen Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem, anzusehen ist. Eine versuchstechnische oder numerische Untersuchung der Spannungsausbreitung im Bereich der Rüttlerspitze während des Eindringvorgangs bildet nicht den Gegenstand der gegenständlichen Forschungsarbeit.

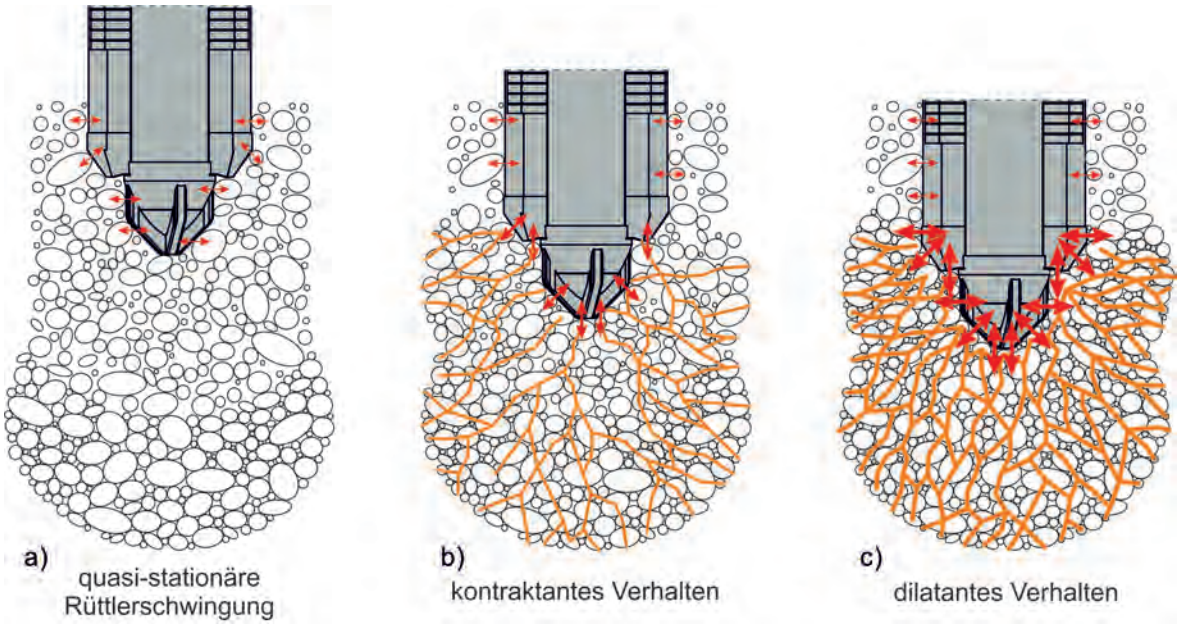


Abbildung 6.20: Darstellung des hypothetischen Spannungszustandes an der Kontaktfläche zwischen Rüttler und Boden sowie der Spannung im Korngerüst in drei unterschiedlichen Zuständen während eines Verdichtungsschrittes.

6.7.2.1 Quasi-stationäre Rüttlerschwingung

Während der quasi-stationären Schwingung im Boden vor Beginn des Absenkvorgangs (entspricht dem auf Abbildung 6.20a dargestellten Zustand) ist von einer geringen Verdichtungswirkung auszugehen. Der Tiefenrüttler ist jedoch in Interaktion mit dem zu verdich-

[6]Die Definition der Begriffe Kornumlagerungsbereich und Verdrängungsbereich kann Abschnitt 5.5.3 entnommen werden.

tenden Boden, wodurch sein Bewegungsverhalten beeinflusst ist (vgl. Abschnitt 5.3). Die Spannungen an der Kontaktfläche zwischen Rüttlerspitze und Boden sind in diesem Zustand gering, demzufolge werden über das Korngerüst im Bereich unterhalb der Rüttlerspitze geringe Spannungen übertragen.

6.7.2.2 Kontraktanz - Steifigkeitserhöhung primär zufolge Reduktion des Porenraumes

Während des Absenkvorgangs wird der Boden im Bereich der Rüttlerspitze verdichtet und verdrängt, der zu verdichtende Boden zeigt ein kontraktantes Verhalten (entspricht dem auf Abbildung 6.20b schematisch dargestellten Zustand). Im Kornumlagerungsbereich wird eine Restrukturierung des Korngefüges herbeigeführt, das Porenvolumen des Bodens reduziert sich, die Anzahl der Korn-zu-Korn Kontakte erhöht sich. Im Verdrängungsbereich wird die Kornstruktur in radialer Richtung zusammendrückt, was zwangsläufig eine Reduktion des Porenvolumens und in weiterer Folge den sukzessiven Aufbau einer Seitenbettung im Kornumlagerungsbereich nach sich zieht. Gleichzeitig wird sowohl im Kornumlagerungs- als auch im Verdrängungsbereich der Spannungszustand des Bodens verändert, die Horizontalspannungen[7] werden erhöht. Zufolge des Zusammendrückens reduziert sich das Volumen des Porenraumes, das regelmäßige Nachfüllen mit geeignetem Material gewährleistet jedoch während des gesamten Verdichtungsvorgangs praktisch eine Volumenkonstanz im zu verdichtenden Boden. In Abbildung 6.21 ist die Reduktion des Porenraumes im zu verdichtenden Boden unter Beibehaltung des Bodenvolumens vereinfacht dargestellt. Es sei angemerkt, dass in dieser Darstellung die Bezugsgröße im Zustand nach Rütteldruckverdichtung zufolge des höheren Feststoffvolumens größer ist als im Ausgangszustand.

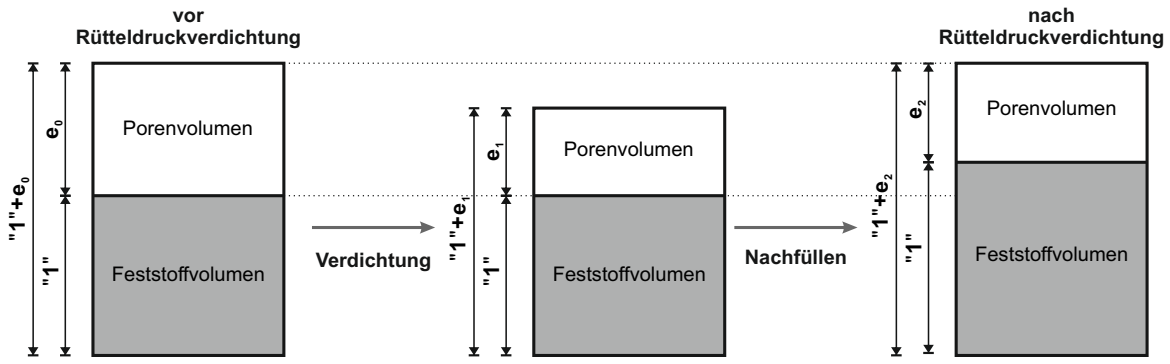


Abbildung 6.21: Reduktion des Porenraumes unter Beibehaltung des Bodenvolumens im zu verdichtenden Boden zufolge Verdichtung und Nachfüllen.

Die Kornstruktur und der Spannungszustand des Bodens verändern sich somit in Folge von Kornumlagerung bzw. Zusammendrückung des Korngerüsts maßgeblich. Die Reduktion des Porenraumes führt zwangsläufig zur Erhöhung der Bodensteifigkeit. Es wird sowohl

[7] Nach *Massarsch* [85] ist bei der Rüttledruckverdichtung aus einer Erhöhung der Horizontalspannungen bei etwa gleichbleibenden Vertikalspannungen auszugehen. Die erhöhte Horizontalspannung ist beispielsweise mittels Drucksondierung, durch eine erhöhte lokale Mantelreibung f_s im Vergleich zum Ausgangszustand nachweisbar [85] (vgl. Abbildung 3.2). Dieser Vorgang wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht untersucht.

im Kornumlagerungs- als auch im Verdrängungsbereich die über das Korngerüst übertragene Spannung sukzessive erhöht, die Spannung an der Kontaktfläche Rüttler-Boden steigt sinngemäß ebenfalls allmählich an. Das Eindringen des Tiefenrüttlers beeinflusst somit gleichzeitig die Kornstruktur und den Spannungszustand im zu verdichtenden Bodenbereich. Diese beiden Vorgänge im Untergrund führen zur Erhöhung der Bodensteifigkeit. Die Reaktion des Bodens beeinflusst aber gleichzeitig den Tiefenrüttler in seinem Bewegungsverhalten maßgeblich. Da die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit k^* auf Basis des im Zuge des Eindringvorgangs laufend sich ändernden Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers ermittelt wird, widerspiegelt sie die steigende Bodensteifigkeit im zu verdichtenden Bodenbereich.

6.7.2.3 Dilatanz - Steifigkeitserhöhung durch die ansteigende Spannung im Korngerüst

Das Porenvolumen des zu verdichtenden Bodens kann nur bis zu einem gewissen Maß reduziert werden. Ab einer bestimmten Eindringtiefe des Tiefenrüttlers ist beim aktuellen Verdichtungsschritt praktisch keine weitere Reduktion des Porenraumes, weder im Kornumlagerungsbereich noch im Verdrängungsbereich und damit keine weitere Bodenverdichtung, möglich. In diesem Zustand zeigt der Boden einen erhöhten Widerstand gegen das Eindringen der Rüttlerspitze, ein weiteres Absenken ist selbst bei hohem Rüttleranpressdruck nur beschränkt möglich. Beim betrachteten Verdichtungsschritt nimmt die Rütteltiefe unmittelbar vor dem Abbruch des Verdichtungsschrittes trotz des hohen Rüttleranpressdrucks kaum mehr zu (siehe Abbildung 6.19), was ein eindeutiger Hinweis darauf ist, dass sich das Porenvolumen nicht mehr verringern lässt.

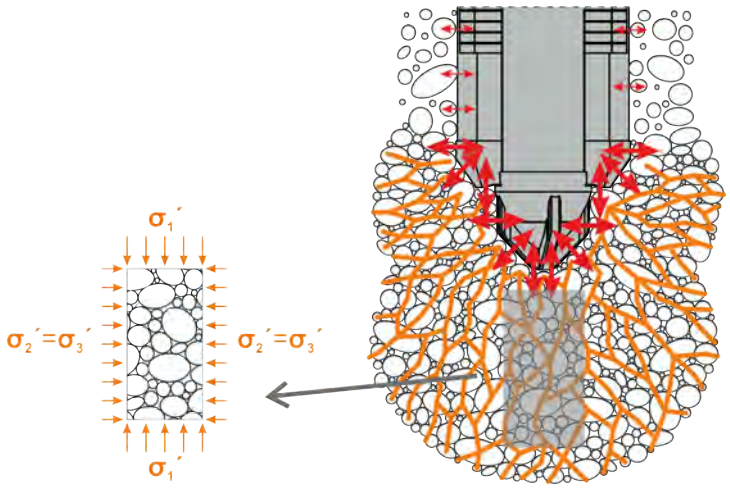


Abbildung 6.22: Triaxialer Spannungszustand im Bodenbereich unterhalb der Rüttlerspitze zufolge der behinderten Seitendehnung.

Durch das Erzwingen des Absenkvorgangs wird das Eigengewicht der Tragraupe aktiviert und werden damit hohe Kräfte über den Rüttlerkörper in den zu verdichtenden Bodenbereich eingeleitet. Der zu verdichtende Boden weist dabei dilatantes Verhalten auf und strebt danach, sein Volumen zu vergrößern. Die Vergrößerung des Volumens ist allerdings sehr beschränkt möglich, diese ist durch die bereits aufgebaute Seitenbettung behindert. Da-

her erhöht sich die Korn-zu-Korn Spannung rasch. Eine Grundvoraussetzung für die Spannungserhöhung bei dilatantem Verhalten ist die erhöhte Seitenbettung im Verdrängungsbereich. Somit verursacht das Erzwingen des Absenkvorgangs hohe Spannungen an der Kontaktfläche Rüttler-Boden und im Korngerüst bzw. dadurch eine Verspannung der Bodenkörner im Korngerüst. Aufgrund der behinderten Seitendehnung zufolge der abstützenden Wirkung des umgebenden Bodens herrscht somit im Bodenbereich unterhalb der Rüttlerspitze ein triaxialer Spannungszustand. In Abbildung 6.22 ist der triaxiale Spannungszustand im Bodenbereich unterhalb der Rüttlerspitze zufolge der behinderten Seitendehnung schematisch dargestellt. Das Erzwingen des Absenkvorgangs erhöht die vertikale Spannung (entspricht der Spannung $\sigma_1^{'}$ in der Darstellung in Abbildung 6.22), was aufgrund des dilatanten Verhaltens sowie der behinderten Seitendehnung zwangsläufig eine Erhöhung der Horizontalspannung ($\sigma_2^{'} = \sigma_3^{'}$) nach sich zieht. Die Erhöhung der Spannung in der vertikalen und in der horizontalen Richtung bedeutet die Erhöhung der mittleren effektiven Spannung. Die Verspannung im Korngerüst sowie die Seitenbettung in radialer Richtung ermöglicht somit die Übertragung hoher Spannungen über den Bodenbereich unterhalb der Rüttlerspitze.

Die hohe Spannung an der Kontaktfläche Rüttlerspitze-Boden hat einen maßgebenden Einfluss auf das Bewegungsverhalten des Rüttlers, der sich in der sukzessive kleiner werdenden Schwingwegamplitude und im abnehmenden Vorlaufwinkel im postresonanten Bereich zeigt. Der Einfluss des zu verdichtenden Bodens auf die Rüttlerbewegung wird im gegenständlichen Modellierungsansatz durch die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit abgebildet. Bei erhöhter Spannung an der Kontaktfläche Rüttler und Boden macht die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit ebenfalls einen markanten Anstieg deutlich. Das hohe Werteniveau der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit bei hohem Rüttleranpressdruck ist bei den Verdichtungsschritten des in Abbildung 6.13 dargestellten Verdichtungsversuchs zur Untersuchung der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden klar ersichtlich.

Abbildung 6.23 zeigt den zeitlichen Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und der Übertragungsfunktion Γ_i in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt bei einer etwa $2,5\,\mathrm{m}$ langen Verdichtungsstrecke bei erhöhter Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden. Hierbei handelt es sich um den in Abschnitt 5.4.2 und 6.6.2 bereits diskutierten Verdichtungsversuch. Bei erhöhter Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden ändert sich nicht nur das Bewegungsverhalten, sondern auch das Wellenfeld an der Geländeoberfläche maßgeblich. In diesem Zustand wird ein deutlich höherer Anteil der Rüttlerschwingung über den zu verdichtenden Bodenbereich an die Geländeoberfläche übertragen (siehe Abschnitt 5.4).

Beim Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz, der in Abbildung 6.23 mit violetten Ringen bzw. mit violetten strichlierten Linien gekennzeichnet ist, ist bei sämtlichen betrachteten Verdichtungsschritten eine maßgebliche Änderung in der Übertragungsfunktion erkennbar. Die Übertragungsfunktion steigt bei allen betrachteten Messaufnehmern etwa beim Übergang vom kontraktanten zum dilatanten Verhalten maßgeblich an. Dieser Umstand lässt auf eine wesentliche Änderung im beeinflussten Bodenbereich (im Kornumlagerungs-

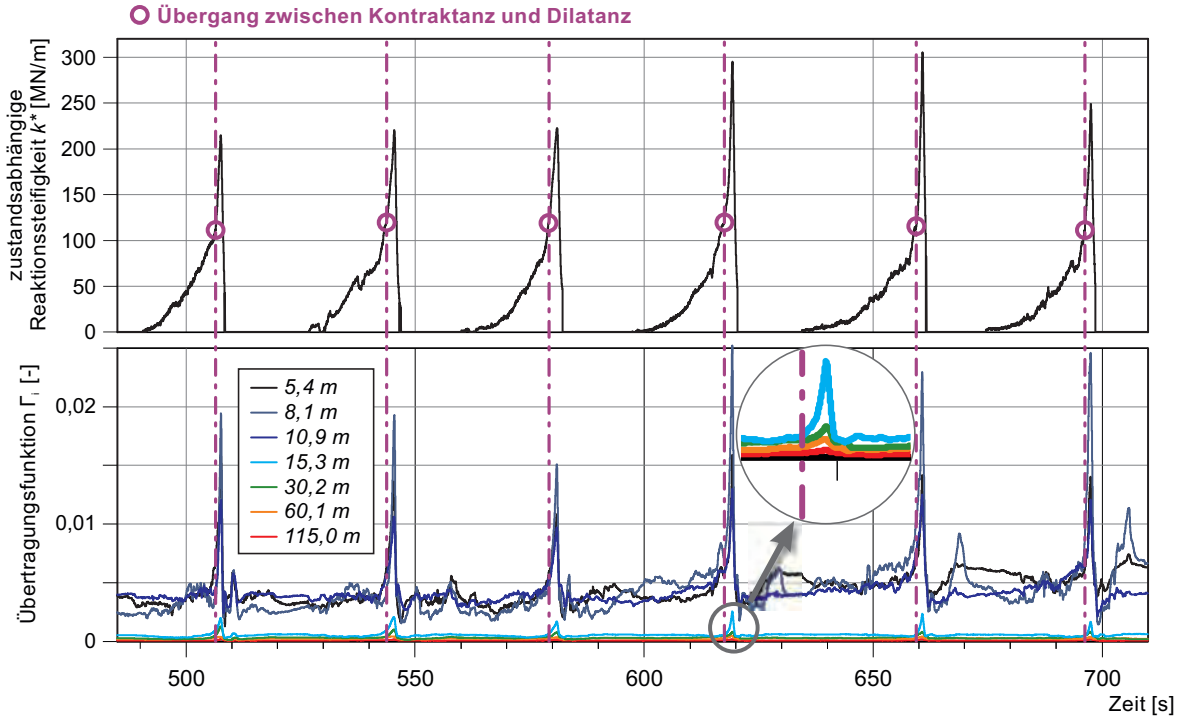


Abbildung 6.23: Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit und Übertragungsfunktion Γ_i in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke bei erhöhter Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden.

und im Verdrängungsbereich) zufolge der Einwirkungen durch den Tiefenrüttler schließen. Eine mögliche Erklärung für diesen Umstand ist, dass die Verspannung der Einzelkörner im Korngerüst bei dilatantem Verhalten des Bodens im Bereich der Rüttlerspitze eine deutlich effizientere Schwingungsübertragung ermöglicht als bei kontraktantem Verhalten. Die maßgebliche Verstärkung in der Übertragungsfunktion spricht somit für die oben beschriebene Arbeitshypothese zur Abgrenzung des kontraktanten und dilatanten Materialverhaltens.

6.7.2.4 Praktische Bedeutung der Abgrenzung des kontraktanten und dilatanten Bodenverhaltens

Ausgangspunkt ist, dass während der einzelnen Verdichtungsschritte der Rütteldruckverdichtung die Abminderung des Porenvolumens bzw. die Erhöhung der mittleren Spannung zu einer Erhöhung der Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens führen. Anhand des zeitlichen Verlaufs der berechneten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit lassen sich analog zu den in Abschnitt 6.3.2 definierten Betriebsphasen bei den einzelnen Verdichtungsschritten zwei Bereiche abgrenzen. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden ist, ob das sich sukzessive verringernde Porenvolumen (kontraktantes Verhalten) oder die ansteigende mittlere Hauptspannung im Korngerüst in der Entwicklung der Bodensteifigkeit zufolge des Eindringens der Rüttlerspitze (dilatantes Verhalten) dominant ist. Die beiden Bereiche werden anhand des zeitlichen Verlaufs der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit wie folgt definiert:

Kontraktanz
Beim kontraktanten Verhalten des Bodens hat, neben der Veränderung des Spannungszustands, die Reduktion des Porenvolumens einen maßgeblichen Einfluss auf die Erhöhung der Bodensteifigkeit und damit auf die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit.

Dilatanz
Während des dilatanten Verhaltens dominiert die ansteigende mittlere effektive Spannung zufolge der behinderten Seitendehnung im Korngerüst, welche in weiterer Folge zur Erhöhung der Bodensteifigkeit führt.

Die Abgrenzung von kontraktantem und dilatantem Verhalten ist anhand des ausgewählten Verdichtungsschrittes aus dem in Abbildung 6.19 dargestellten Verdichtungsversuch exemplarisch dargestellt. Der Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz wird bei der Änderung des Gradienten der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit definiert. Dieser Übergang ist bei den meisten Verdichtungsschritten des Sonderversuchs zur Untersuchung der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden klar erkennbar (vgl. Abbildung 6.14).

Sowohl bei kontraktantem als auch bei dilatantem Verhalten findet eine Erhöhung der Bodensteifigkeit zufolge der Einwirkungen auf das Korngerüst durch den Tiefenrüttler statt. Es ist jedoch aus Sicht der Verdichtungswirkung ein wesentlicher Unterschied zwischen den beiden bodenmechanischen Prozessen, die zur Erhöhung der Steifigkeit führen. Solange die Verringerung des Porenvolumens bei kontraktantem Verhalten einen irreversiblen Vorgang darstellt, die mittlere Spannung im Korngerüst wird beim dilatanten Verhalten erst vorübergehend erhöht. Nachdem mit dem Anheben des Tiefenrüttlers der jeweilige Verdichtungsschritt abgebrochen wird, reduziert sich die mittlere Spannung im Korngerüst und damit sinkt die Steifigkeit auch wiederum ab. Somit stellt die Erhöhung der Bodensteifigkeit während des dilatanten Verhaltens einen reversiblen Vorgang dar, welcher im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte vorübergehend auftreten kann. Demgegenüber, bleibt die veränderte Kornstruktur auch nach dem Abbruch des jeweiligen Verdichtungsschrittes erhalten. Damit ist die Verringerung des Porenraumes beim kontraktanten Verhalten ein irreversibler Vorgang, die bleibenden Verformungen im Korngerüst bleiben auch nach dem Abschluss des jeweiligen Verdichtungsschrittes erhalten. Die zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörige zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit kann als Indikator für das Ausschöpfen des Verdichtungspotenzials, d. h. als Obergrenze der mit dem angewendeten Tiefenrüttler erzielbaren Verdichtungswirkung, angesehen werden.

Es sei an dieser Stelle erneut angemerkt, dass sich der Spannungszustand des Bodens auch beim kontraktanten Verhalten ändert. Die Horizontalspannungen werden im Zuge der Verdichtung und Verdrängung des Bodens erhöht, welche zur Erhöhung der Bodensteifigkeit beitragen. In der gegenständlichen Arbeitshypothese wird angenommen, dass die Änderung des Spannungszustandes, welche zur bleibenden Verdichtungswirkung beiträgt, tritt bereits beim kontraktanten Verhalten ein. Des Weiteren wird angenommen, dass die beim dilatanten Verhalten auftretende zusätzliche Spannungserhöhung erst vorübergehend

ist und diese daher nicht zur Verdichtungswirkung in Form von Erhöhung der Bodensteifigkeit beiträgt.

Hohe Spannungen im Korngerüst beim dilatanten Verhalten können zum Kornbruch oder Kornabrieb führen, woraus ein geringfügiger zusätzlicher Verdichtungseffekt resultieren kann. Hohe Spannungen an der Kontaktfläche zwischen Rüttler und Boden führen allerdings gleichzeitig zu einem erhöhten Verschleiß am Rüttlerkörper. Aus diesem Grund ist eine übermäßig hohe Spannung an der Kontaktfläche Rüttlerspitze-Boden zu vermeiden. Um das erzielbare Verdichtungspotenzial auszuschöpfen bzw. unnötigen Verschleiß zu vermeiden, empfiehlt es sich, die einzelnen Verdichtungsschritte beim Übergang zwischen kontraktantem und dilatantem Verhalten abzubrechen. Das Weiterführen der Verdichtungsschritte nach dem Erreichen des zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörigen Werteniveaus bringt wesentliche Nachteile ohne eine maßgebliche zusätzliche Verdichtungswirkung mit sich. Dabei ist insbesondere der erhöhte Zeitaufwand, Energieverbrauch und Verschleiß am Verdichtungsgerät hervorzuheben. Allerdings erhöht sich in diesem Zustand der Anteil der durch das Korngerüst übertragenen Spannungen, welcher gegebenenfalls zu einer Erhöhung der Reichweite der Verdichtung führen kann. Des Weiteren kann eine bleibende Erhöhung der mittleren effektiven Spannungen um ein gewisses Maß nicht ausgeschlossen werden, welche zur Erhöhung der Bodensteifigkeit beitragen kann.

Wie anhand Abbildung 6.14 erkennbar ist, variiert die zum Übergang zwischen kontraktantem und dilatantem Verhalten zugehörige zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit in einer vergleichsweise schmalen Bandbreite, beim betrachteten Verdichtungsversuch zwischen etwa $k^* = 100$ und $130\,\mathrm{MN/m}$. Dilatantes Verhalten bildet sich allerdings nicht notwendigerweise aus. Im Zuge der Verdichtungsversuche im standardmäßigen Rüttlerbetrieb wurde der Absenkvorgang im Regelfall etwa bei der zum Übergang zugehörigen zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit abgebrochen. Es ist daher im standardmäßigen Rüttlerbetrieb (siehe Abbildung 6.11 und 6.12) dilatantes Verhalten, welches durch einen hohen Gradienten der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit gekennzeichnet ist, kaum erkennbar.

6.8 Gegenüberstellung des Bewegungsverhaltens des Rüttlers und der maßgeblichen bodenmechanischen Prozesse

Im Zuge der analytischen Modellierung des Rüttler-Boden Interaktionssystem wurden die Betriebsphasen Heben, Einfahren, Post-Resonanz und Überdrücken auf Basis des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers definiert. Die Interpretation der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit ermöglichte die Identifizierung die aus Sicht der Verdichtungswirkung bodenmechanisch wesentliche Prozesse im zu verdichtenden Boden. In Abbildung 6.24 sind die Betriebsphasen des Rüttler-Boden Interaktionssystems sowie die maßgeblichen bodenmechanischen Prozesse im zu verdichtenden Boden gegenübergestellt.

Es ist dabei ersichtlich, dass der Übergang zwischen kontraktantem und dilatantem Verhalten von der Abgrenzung der Betriebsphasen grundsätzlich unabhängig ist. Der Über-

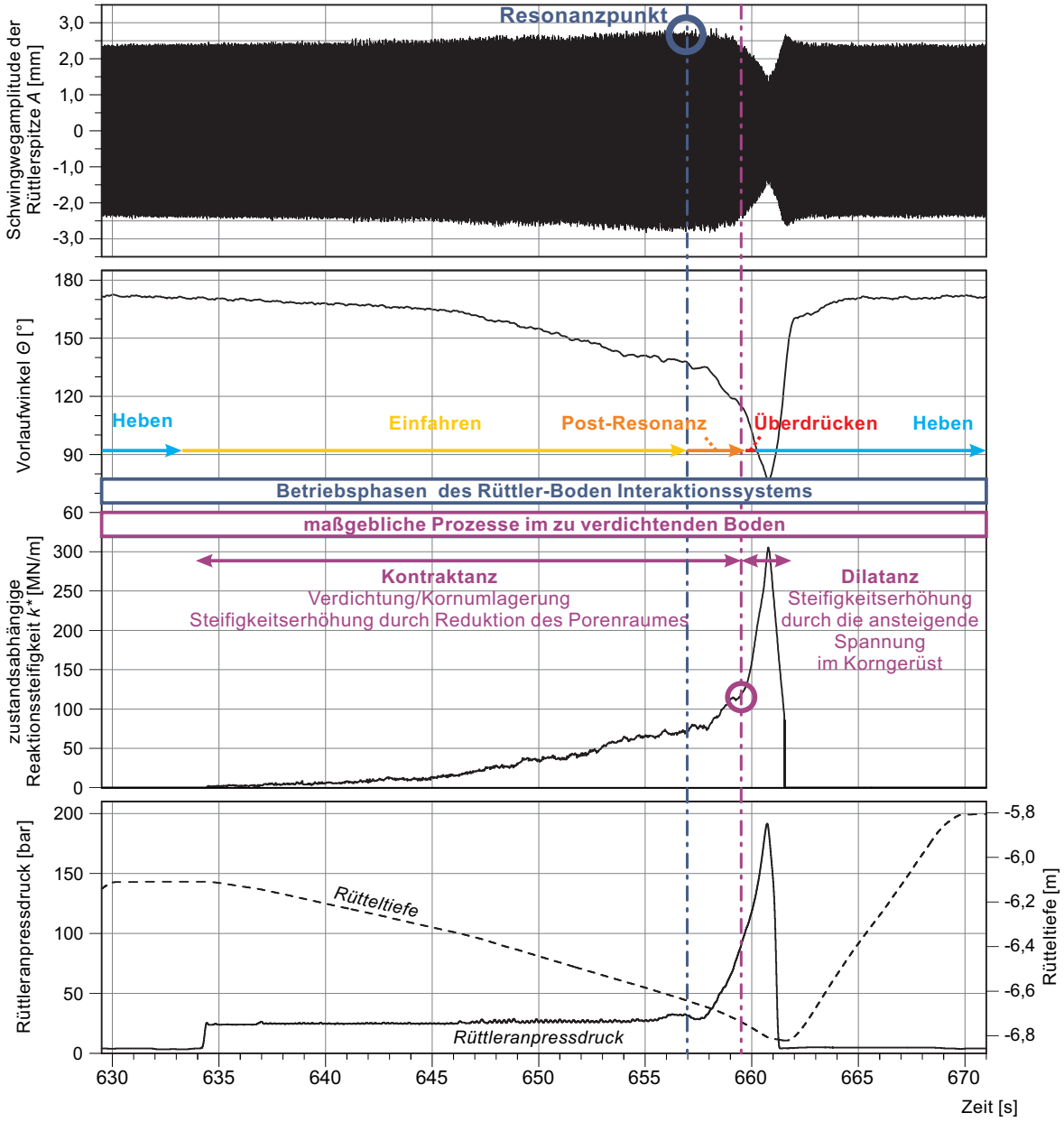


Abbildung 6.24: Gegenüberstellung des Bewegungsverhaltens vom Rüttler-Boden Interaktionssystem (Betriebsphasen) und der maßgeblichen Prozesse im zu verdichtenden Boden [100].

gang zwischen Kontraktanz und Dilatanz bildet sich im gegenständlichen Fall nicht bei einem charakteristischen Punkt des Bewegungsverhaltens, beispielsweise beim Resonanzpunkt oder bei einem Vorlaufwinkel $\Theta = 90°$ aus, (welche die Abgrenzung zwischen den Betriebsphasen Einfahren und Post-Resonanz bzw. Post-Resonanz und Überdrücken darstellen). Dieser fällt in diesem Fall in die Betriebsphase Post-Resonanz. Dieses bedeutet, dass beim betrachteten Verdichtungsschritt das Verdichtungspotenzial bis zum Resonanzpunkt nicht vollständig ausgeschöpft ist und daher ein Abbruch des Verdichtungsschrittes beim Resonanzpunkt aus bodenmechanischer Sicht nicht sinnvoll erscheint. Eine Ausbildung des Übergangs zwischen Kontraktanz und Dilatanz unmittelbar bei Resonanz des

Rüttler-Boden Interaktionssystems wäre theoretisch möglich, wäre aber als reiner Zufall anzusehen. Resonanz wird zwar durch die zunehmende Steifigkeit des Bodens verursacht, das Erreichen des Resonanzpunktes im Zuge des Absenkvorgangs bedeutet nicht, dass im zu verdichtenden Boden keine weitere Verringerung des Porenraumes möglich ist.

In Abschnitt 2.5.1 wurden wissenschaftliche Untersuchungen zu den Prozessen im Rüttler-Boden Interaktionssystem behandelt. *Wehr* [143] und *Nendza* [106] stellten Resonanz des Tiefenrüttlers im Rüttler-Boden Interaktionssystem als maßgeblicher Prozess in den Vordergrund, welche eine effektive Verdichtung des Bodens bewirkt. Nach *Wehr* [143] soll die Verdichtung bei Resonanz erfolgen, da die Rüttleramplitude und damit auch die auf den zu verdichtenden Boden übertragenen Schwingungen bei Systemresonanz am größten sind und daher die effektivste Verdichtungswirkung in diesem Zustand erzielt werden kann (vgl. Abschnitt 2.5.1.3). Nach *Nendza* [106] „wird eine besonders effiziente Verdichtung durch die Weckung von Resonanzerscheinungen im Rüttler-Boden-System sowie durch Bodenverflüssigung herbeigeführt." Die Untersuchung dieser Mechanismen stellte er im Rahmen der experimentellen Untersuchungen im Modellmaßstab (vgl. Abschnitt 2.5.1.4) in Vordergrund. Die oben diskutierten Ergebnisse bestätigen diese Annahmen nicht und sprechen für die Notwendigkeit einer entkoppelten Betrachtung der Rüttlerbewegung und der bodenmechanischen Prozesse im zu verdichtenden Boden.

Durch die Gegenüberstellung des Bewegungsverhaltens des Rüttler-Boden Interaktionssystems und der maßgeblichen Prozesse im zu verdichtenden Boden konnte eindrucksvoll gezeigt werden, dass eine Betrachtung des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers alleinig nicht ausreichend ist, um klare Aussagen über den Verdichtungszustand des Bodens zu formulieren. Die auf Basis der Rüttlerbewegung errechnete zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit k^* kann jedoch als Indikator für den Verdichtungszustand des Bodens herangezogen werden, da ihre Interpretation aus bodenmechanischer Sicht eine Berücksichtigung der bodenphysikalisch wesentlichen Prozesse im zu verdichtenden Boden ermöglicht.

Kapitel 7

Beurteilung des in-situ Zustands im ungestörten Boden und des Verdichtungsrasters

7.1 Einführung

In der ersten Arbeitsphase der Rütteldruckverdichtung wird der Tiefenrüttler mit annähernd konstanter Eindringgeschwindigkeit bis zur geplanten Verdichtungstiefe einvibriert. Dabei tritt der Rüttler mit dem zu verdichtenden Boden zum ersten Mal in Interaktion. Die eingehende Analyse des Einvibrierens ist von besonders großer Bedeutung, da die auf Basis der Rüttlerbewegung ermittelte zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit Auskunft über dem Ausgangszustand im Untergrund an der gleichen Stelle gibt, wo später die eigentliche Verdichtung erfolgt. Demzufolge repräsentiert die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens eine wertvolle Grundlage bei der Beurteilung des Verdichtungspotenzials und für die Ableitung eines Verbesserungsfaktors durch den Vergleich der erreichten Verdichtungswirkung mit dem Ausgangszustand dar. Die Ermittlung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit erfolgte hierbei nach dem gleichen Prinzip, wie für die Verdichtung im Pilgerschrittverfahren (siehe Kapitel 6).

Im gegenständigen Kapitel sind zwei wesentliche Aspekte behandelt. Vorerst wird die Möglichkeit der Anwendung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit zur Beurteilung des in-situ Untergrundzustandes diskutiert und dabei die Verifizierbarkeit der Ergebnisse mittels Rammsondierungen aufgezeigt. Darauf aufbauend erfolgt die Gegenüberstellung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens bei Verdichtungsstrecken im Sekundärraster, bei unterschiedlichen Verdichtungsrastern, jener im ungestörten Boden. Dadurch wird ihre Anwendbarkeit zur Beurteilung des Verdichtungsrasters aufgezeigt. Für diesen Zweck kommt die konventionelle Methode zur Beurteilung des Verdichtungsrasters – welche auf Ergebnissen von Rammsondierungen beruht – ebenfalls zur Anwendung.

7.2 Beurteilung des in-situ Zustandes im ungestörten Boden

Die für die Arbeitsphase Einvibrieren ermittelte zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit war bereits für den Verdichtungsversuch im standardmäßigen Rüttlerbetrieb (siehe Abschnitt 6.6.1) und beim Sonderversuch zur Untersuchung der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden (siehe Abschnitt 6.6.2) berechnet und grafisch dargestellt. Diese Versuche erfolgten an den beiden Rüttleransatzpunkten *Nr. 17* und *Nr. 25* (siehe Abbildung 7.1). Der Verdichtungsversuch zur Untersuchung der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden erfolgte zwar unter nicht-standardmäßigen Randbedingungen, die erste Arbeitsphase des Verdichtungsvorgangs, das Einvibrieren des Rüttlers, wurde jedoch hierbei auch im standardmäßigen Betrieb ausgeführt, d. h. der Gerätefahrer senkte den Tiefenrüttler mit annähernd konstanter Eindringgeschwindigkeit bis zur geplanten Verdichtungstiefe ab.

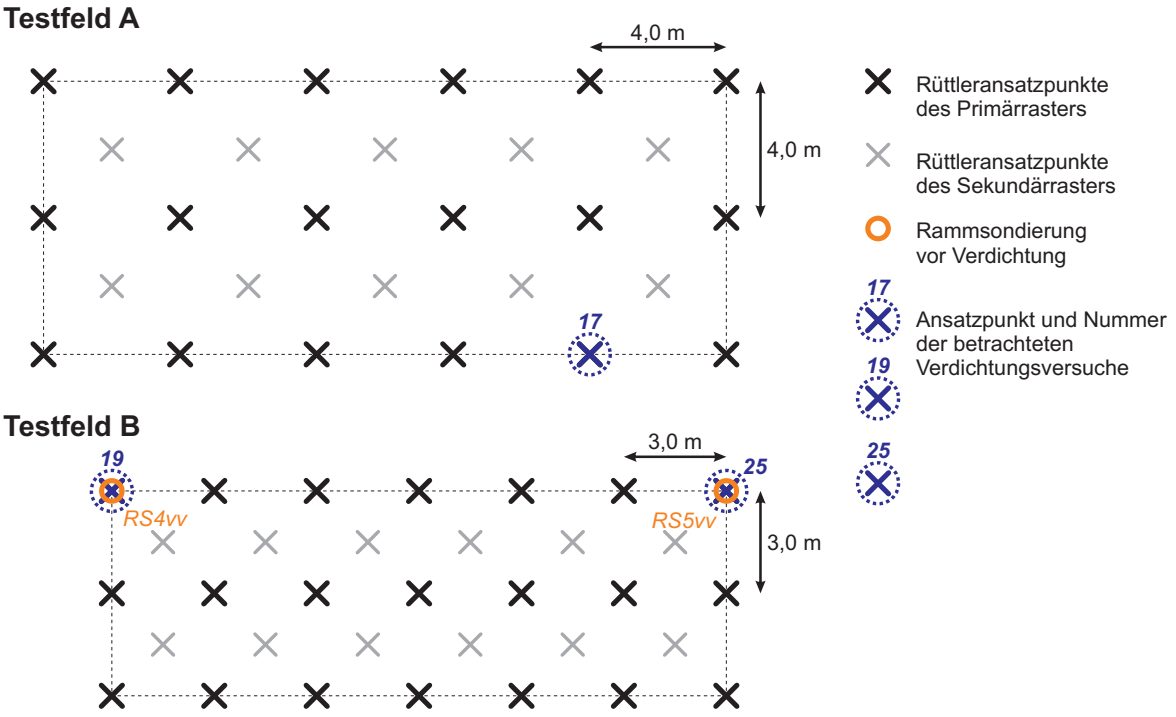


Abbildung 7.1: Überblick der Anordnung der betrachteten Verdichtungsversuche und Rammsondierungen.

Am Rüttleransatzpunkt *Nr. 25* wurde vor den Verdichtungsarbeiten eine Rammsondierung (*RS5vv*) durchgeführt. Da sich der Rüttleransatzpunkt *Nr. 17* erst etwa 5, 6 m vom Rüttleransatzpunkt *Nr. 25* entfernt befindet, ist die bei den beiden Verdichtungsversuchen während des Einvibrierens ermittelte zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit den Ergebnissen der Rammsondierung *RS5vv* gegenübergestellt. Darüber hinaus erfolgt die Betrachtung des Verdichtungsversuchs am Rüttleransatzpunkt *Nr. 19*, wobei die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens der Rammsondierung *RS4vv* gegenübergestellt ist. Abbildung 7.1 zeigt einen Überblick der Position der betrachteten Verdichtungsversuche und Rammsondierungen.

In Abbildung 7.2 sind die Verläufe der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit während der Arbeitsphase Einvibrieren bei den Verdichtungsversuchen *Nr. 17*, *19* und *25* über die Tiefe aufgetragenen und den zugehörigen Rammsondierungen *RS4vv* bzw. *RS5vv* gegenübergestellt. Die Verläufe der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit zeigen generell eine gute qualitative Übereinstimmung mit den zugehörigen Rammsondierungen. Eine besonders gute Übereinstimmung ist bis in eine Tiefe von etwa 7,0 m unter Geländeoberkante erkennbar. Im oberflächennahen Bereich – bis in eine Tiefe von etwa 2,0 m unter Geländeoberkante – befindet sich eine dicht bis sehr dicht gelagerte Decksicht, welche durch den Verkehr in der Kiesgrube, vor der Durchführung der gegenständlichen Verdichtungsversuche, verhältnismäßig stark vorverdichtet wurde. In diesem Tiefenbereich ermittelte man bei den beiden betrachteten Rammsondierungen hohe Schlagzahlen N_{10}. Hier zeigt die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit auch vergleichsweise hohe Werte, deutlich über 100 MN/m an. Im Tiefenbereich zwischen etwa 3,0 m und 7,0 m wurden vergleichsweise niedrige Schlagzahlen aufgezeichnet, hier ist die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit ebenfalls niedrig. Ab einer Tiefe von etwa 7,0 m ist eine größere Abweichung zwischen den beiden Kurven bemerkbar, wobei die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit etwa in der Größenordnung bleibt, wie im Tiefenbereich zwischen etwa 3,0 m und 7,0 m und sich die Schlagzahlen der beiden betrachteten Rammsondierungen tendenziell erhöhen. Die Abweichung bei größerer Tiefe ist gegebenenfalls auf die mit zunehmender Sondiertiefe ansteigende Mantelreibung zwischen Sondierstange und Boden bei der Rammsondierung zurückzuführen.

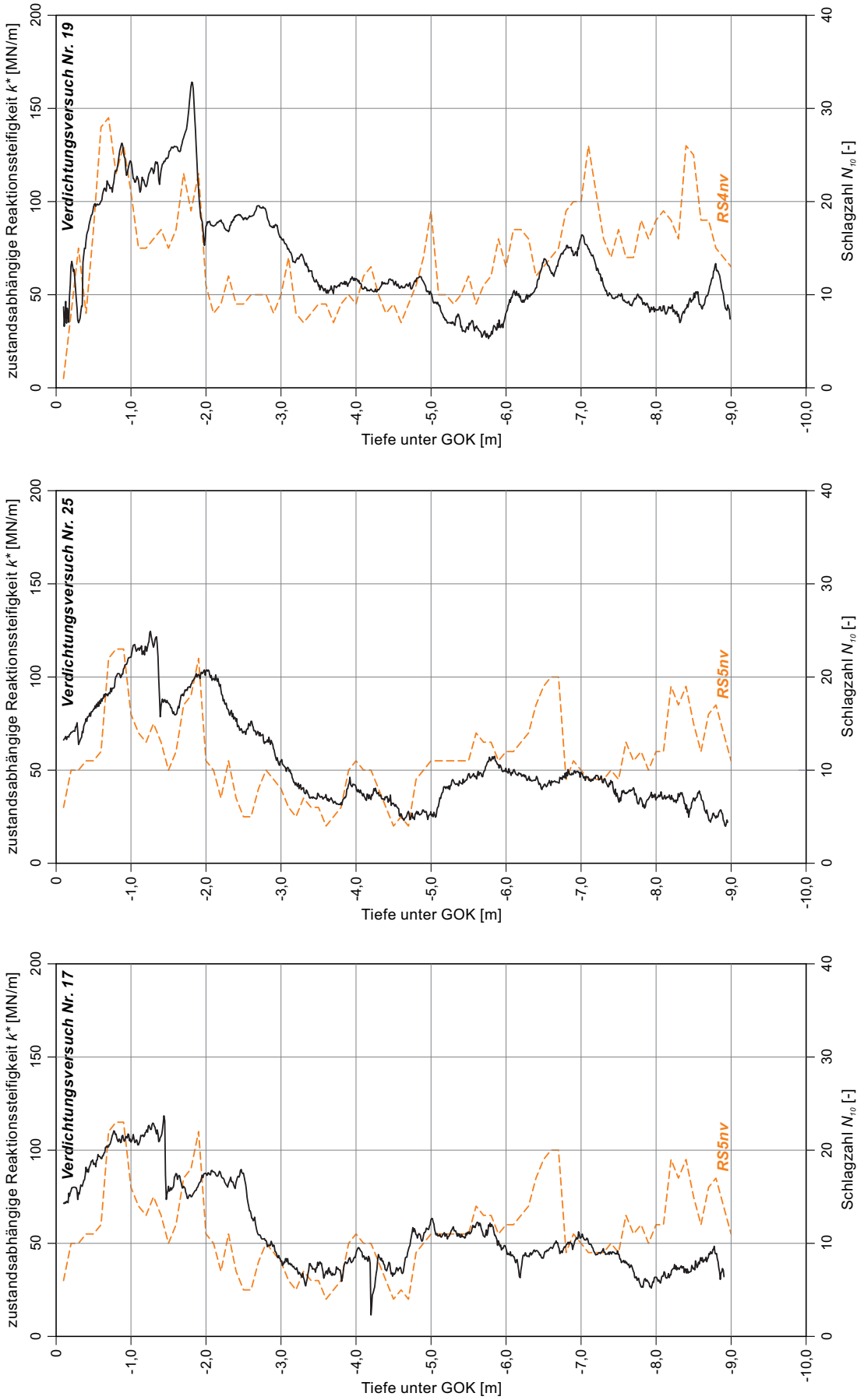


Abbildung 7.2: Gegenüberstellung der während des Einvibrierens bei den Verdichtungsversuchen *Nr. 17, 19* und *25* ermittelten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit (schwarz) mit Rammsondierungen *RS4vv* bzw. *RS5vv* (orange) [100].

Trägt man die Verläufe der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens bei den Verdichtungsversuchen *Nr. 17*, *19* und *25* in einem Diagramm auf, kommt es besonders anschaulich hervor, dass der Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit bei den drei betrachteten Verdichtungsversuchen sowohl qualitativ als auch quantitativ eine hohe Übereinstimmung zeigt. Nachdem auf dem Versuchsfeld auf Basis der Ergebnisse der umfangreichen Untergrunderkundung von gleichmäßigen Untergrundverhältnissen ausgegangen werden kann, scheint die gute Übereinstimmung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit während der Arbeitsphase Einvibrieren bei den unterschiedlichen Verdichtungspunkten plausibel und nachvollziehbar zu sein.

Wie in Abschnitt 6.7.2.4 eingehend diskutiert, ist die zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörige zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit als Verdichtungspotenzial, d. h. als Obergrenze der mit dem angewendeten Tiefenrüttler erzielbaren Verdichtungswirkung, anzusehen. Der Übergang bildet sich bei einem Werteniveau der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit zwischen etwa $k^* = 100$ und $130\,\mathrm{MN/m}$ aus, wobei der Übergang beim Verdichtungsversuch zur Untersuchung der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden – am Rüttleransatzpunkt *Nr. 25* durchgeführt – klar ersichtlich ist (siehe Abschnitt 6.6.2). Demgegenüber ist beim am Rüttleransatzpunkt *Nr. 17* im Standardbetrieb durchgeführten Verdichtungsversuch, der Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz im Vergleich zum Verdichtungsversuch zur Untersuchung der erhöhten Kontaktspannung kaum erkennbar. Der Grund dafür ist, dass der Gerätefahrer die einzelnen Verdichtungsschritte etwa beim Ausschöpfen des Verdichtungspotenzials, bei einem Werteniveau der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit zwischen $k^* = 90$ und $110\,\mathrm{MN/m}$ abbrach. In Abbildung 7.3 ist die zum Verdichtungspotenzial zugehörige Bandbreite der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit (zwischen $k^* = 100$ und $130\,\mathrm{MN/m}$) mit violetten Balken gekennzeichnet.

Ab einer Tiefe von $2,5$ bis $3,0\,\mathrm{m}$ unter Geländeoberkante ist durch die Gegenüberstellung der zum Ausgangszustand zugehörigen zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und zum Verdichtungspotenzial zugehörige Bandbreite der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit ein Verbesserungsfaktor von etwa $2,0 - 2,5$ abzuleiten. Weiters ist anhand der Diagramme in Abbildung 7.3 erkennbar, dass im oberflächennahen vorverdichteten Bodenbereich keine zusätzliche Verdichtungswirkung durch die Rütteldruckverdichtung erzielbar ist. Es sei angemerkt, dass der auf diese Weise ermittelte Verbesserungsfaktor für die einzelnen Verdichtungspunkte als gültig anzusehen ist, eine direkte Übertragung des bei einzelnen Verdichtungspunkten ermittelten Verbesserungsfaktors auf zusammenhängende verdichtete Bodenbereiche ist ohne Berücksichtigung des Verdichtungsrasters nicht sinnvoll. Kapitel 9 behandelt die Verifizierbarkeit von Verbesserungsfaktoren für einzelne Verdichtungsstrecken.

Es kann aufgrund der qualitativen Übereinstimmung der während der Arbeitsphase Einvibrieren ermittelte zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit mit Ergebnissen von Rammsondierungen festgestellt werden, dass die auf Basis der Rüttlerbewegung ermittelte zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit zur Beurteilung des Ausgangszustandes im Untergrund grundsätzlich als geeignet angesehen werden kann. Darüber hinaus zeigt die Gegen-

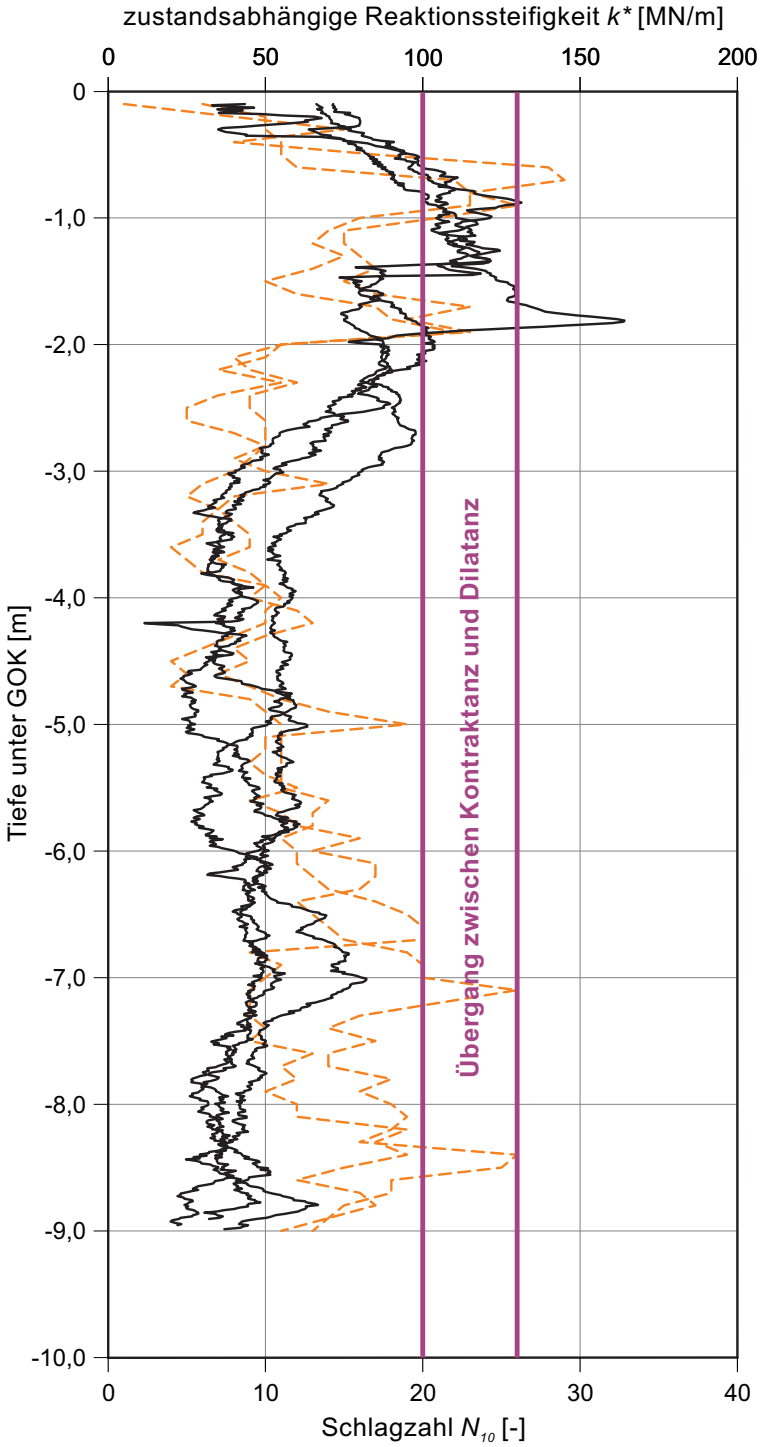


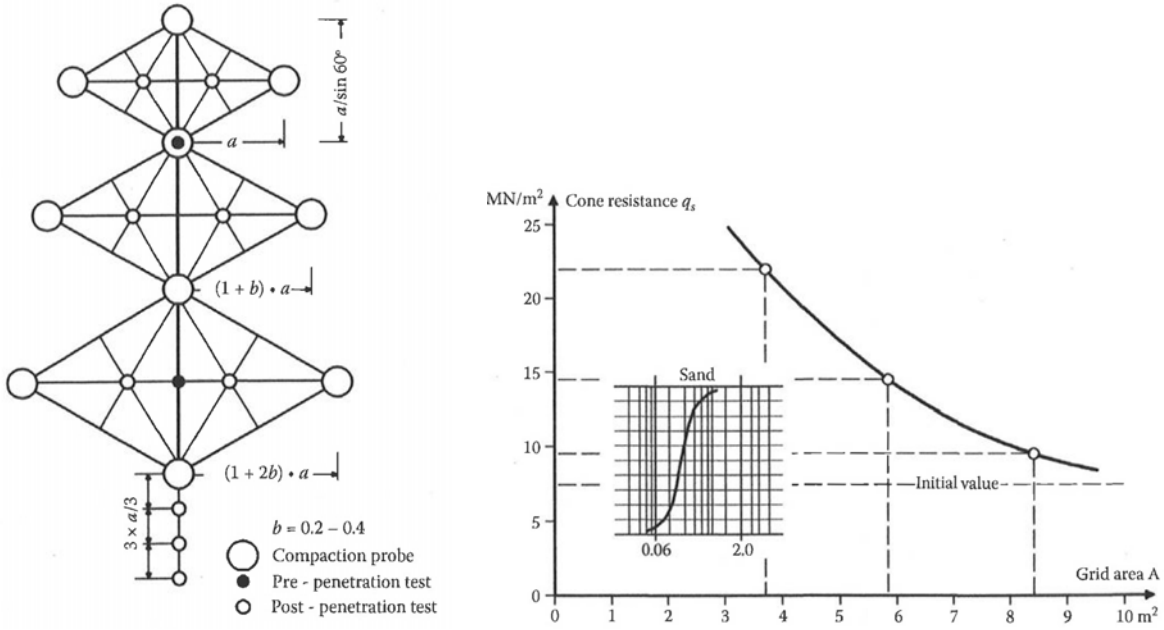
Abbildung 7.3: Während der Arbeitsphase Einvibrieren ermittelte zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit bei den Verdichtungsversuchen Nr. 17, 19 und 25 (schwarz), Rammsondierungen *RS4vv* bzw. *RS5vv* (orange) mit der in Abschnitt 6.7.2.4 definierten Bandbreite des Verdichtungspotenzials (violett).

überstellung der während der Arbeitsphase Einvibrieren ermittelten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit mit der erzielbaren Verdichtungswirkung Potenzial für eine arbeitsintegrierte Bestimmung eines Verbesserungsfaktors für einzelne Verdichtungsstrecken.

7.3 Anwendung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit zur Beurteilung des Verdichtungsrasters

Bei der Rütteldruckverdichtung werden durch eine rasterförmige Anordnung einzelner Verdichtungsstrecken zusammenhängende, quasi-homogen verdichtete Bodenbereiche erzeugt. Dabei kommen in der Regel entweder dreieck- oder viereckförmige Rasteranordnungen zur Anwendung (siehe Abschnitt 2.2.1.2). Die Rütteldruckverdichtung ist auch in mehreren Arbeitsgängen ausführbar. Im ersten Arbeitsgang bearbeitet man die Verdichtungsstrecken des Primärrasters, im zweiten Arbeitsgang erfolgt die Verdichtungsstrecken des Sekundärrasters, die zwischen den Verdichtungsstrecken des Primärrasters angeordnet sind.

Die gewählte Anordnung und der Abstand der Verdichtungsstrecken haben eine maßgebliche Auswirkung auf die Homogenität des erzeugten Bodenbereichs und dadurch auf die Qualität der Verdichtungsarbeiten. In der Ausführungspraxis erfolgt die Wahl des Verdichtungsrasters in der Regel auf Basis von Erfahrungen. Der optimale Abstand der Verdichtungsstrecken kann auf einem Probefeld bestimmt werden, wobei der Verdichtungserfolg – in der Regel mittels Ramm- oder Drucksondierungen – kontrolliert wird. Abbildung 7.4 veranschaulicht eine Gegenüberstellung des Eindringwiderstands der Drucksonde im enggestuften Sand in Form des Spitzendrucks bei drei unterschiedlichen Rasteranordnungen auf einem Testfeld aus [98]. Es wird dabei klar ersichtlich, dass bei einer engeren Rasteranordnung ein deutlich höherer Sondierwiderstand erzielbar ist, welche auf eine höhere Qualität der Verdichtungsarbeiten hinweist.



(a) Anordnung der Rüttler- und Sondieransatzpunkte.

(b) Sondierwiderstand der Drucksonde, in Form des Spitzendrucks.

Abbildung 7.4: Gegenüberstellung des Eindringwiderstands der Drucksonde bei drei unterschiedlichen Rasteranordnungen auf einem Testfeld [98].

Der Abstand der Verdichtungsstrecken im Verdichtungsraster stellt gleichzeitig einen

maßgeblichen Zeit- und Kostenfaktor dar. Ein engerer Verdichtungsraster führt zu einer markanten Erhöhung der Anzahl der Verdichtungsstrecken und damit zu einer Erhöhung des Zeitaufwandes für die Rütteldruckverdichtung. Damit stellt die Auswahl der optimalen Rasteranordnung eine zentrale Frage bei der Planung und Ausschreibung einer Bodenverbesserung mittels Rütteldruckverdichtung dar. Das optimale Verdichtungsraster ist von den Eigenschaften des zu verdichtenden Untergrundes und vom angewendeten Tiefenrüttler abhängig und wird idealerweise im Zuge einer Kalibrierung vor Ort, auf einem Probefeld, bestimmt. Im Zuge der Kalibrierung kontrolliert man die Verdichtungswirkung in der Regel durch Ramm- oder Drucksondierungen in den „Schwachstellen“ (siehe Abschnitt 3.2.1). Insbesondere bei inhomogenen Untergrundverhältnissen kann trotz der sorgfältigen Kalibrierung eine Adaptierung des Verdichtungsrasters an die geänderten Randbedingungen erforderlich sein. Bei ungünstigen Abweichungen vom kalibrierten Probefeld kann man zusätzliche Verdichtungstrecken anordnen [40]. Die optimierte Rasteranordnung ist anschließend wieder zu überprüfen, wobei auch Sondierungen zur Anwendung kommen.

Ramm- und Drucksondierungen stellen grundsätzlich ein nützliches Werkzeug zur Beurteilung des Verdichtungserfolgs der Rütteldruckverdichtung dar. Sondierungen können jedoch erst intermittierend und damit den Verdichtungsprozess unterbrechend durchgeführt werden, was einen bedeutenden Nachteil gegenüber einer arbeitsintegrierten Verdichtungskontrolle darstellt. Wie in Abschnitt 7.1 diskutiert, ist Beurteilung des in-situ Zustands im ungestörten Boden auf Basis der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit möglich. Es folgt das Aufzeigen und Diskutieren der Anwendbarkeit der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit zur Optimierung des Verdichtungsrasters.

Das Versuchsfeld in Fisching wurde in vier Testfeldern mit unterschiedlichen Verdichtungsrastern unterteilt (siehe Abschnitt 4.6.2). Im Folgenden erfolgt die Beurteilung von unterschiedlichen Verdichtungsrastern mit der konventionellen Methode anhand von Ergebnissen von Rammsondierungen und anhand der während der Arbeitsphase Einvibrieren ermittelten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit sowie anschließend die Gegenüberstellung der beiden Herangehensweisen.

Die detaillierte Beschreibung der Auswertung der Rammsondierergebnisse ist bei *Kvasina* [77] zu finden.

7.3.1 Rammsondierungen auf dem Versuchsfeld zur Beurteilung von unterschiedlichen Verdichtungsrastern

Auf dem Versuchsfeld in Fisching wurden Rammsondierungen jeweils vor und nach den Verdichtungsarbeiten durchgeführt. Die Schwere Rammsonde (DPH) wurde auf den Testfeldern A, B und C an jeweils $3-4$ Stellen abgeteuft. Die Ansatzpunkte der Sondierungen vor der Verdichtung waren auf den einzelnen Testfeldern etwa gleichmäßig verteilt, die Ansatzpunkte der Sondierungen auf den fertig verdichtenden Testfeldern wurden an den theoretisch ungünstigsten Stellen, in den „Schwachstellen“ zwischen den Ansatzpunkten abgeteuft. Abbildung 7.5 zeigt die Anordnung der Sondieransatzpunkte auf den Testfeldern A, B und C. Die Ansatzpunkte der Rammsondierungen vor und nach Verdichtung sind dabei

mit *RSXXvv* und mit *RSXXnv* gekennzeichnet.

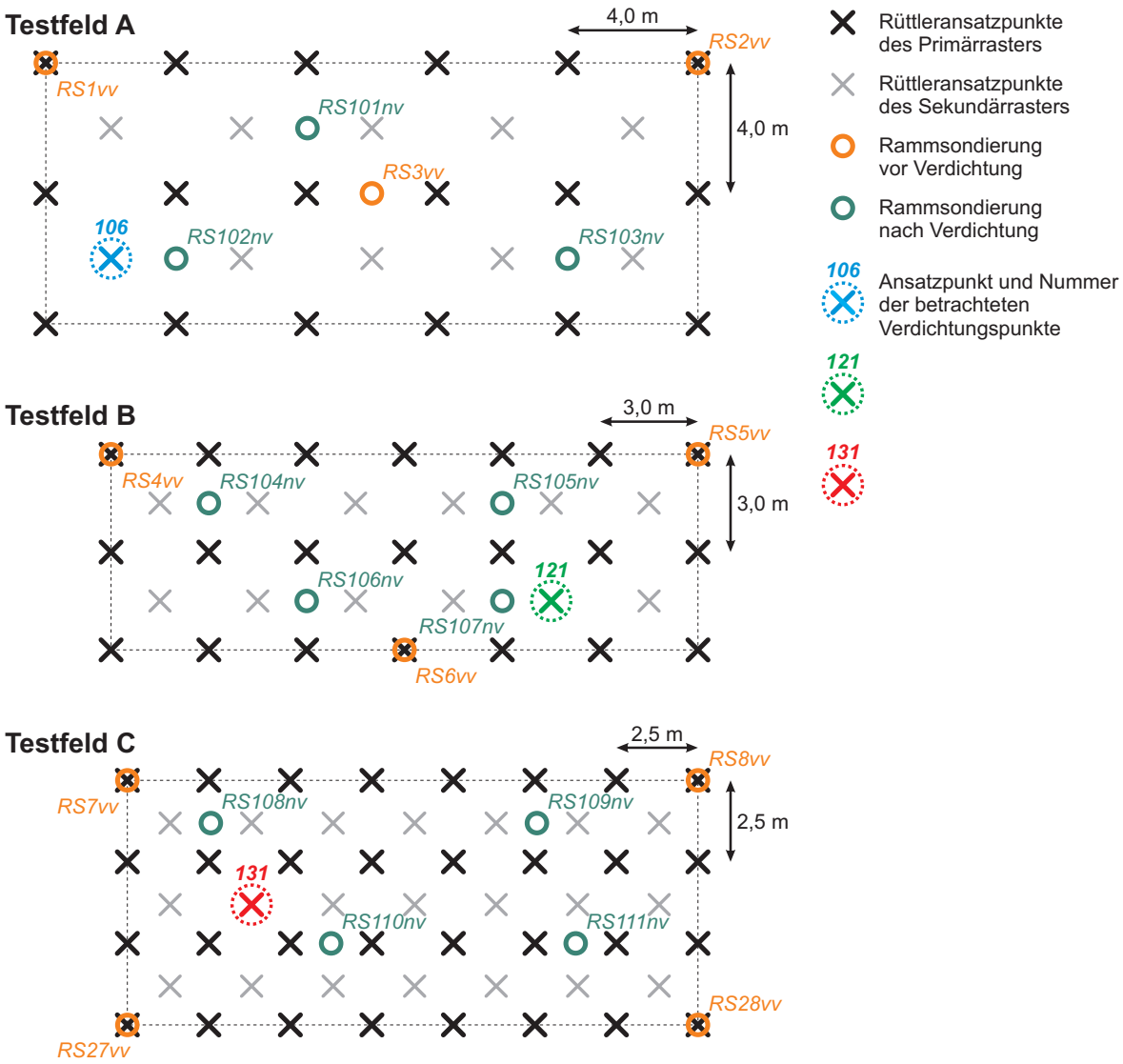


Abbildung 7.5: Ansatzpunkte der Rammsondierungen vor und nach Verdichtung auf dem Testfeld *A*, gekennzeichnet mit *RSXXvv* und mit *RSXXnv*.

Im Zuge der Auswertung der Rammsondierergebnisse wurden die Schlagzahlen N_{10} der Rammsondierungen jeweils vor und nach den Verdichtungsarbeiten gemittelt und anschließend wurde das Verhältnis der beiden Mittelwerte $N_{10,m,vor}$ und $N_{10,m,nach}$ gebildet. Das Verhältnis der beiden Mittelwerte in der jeweiligen Tiefenstufe stellt den Verbesserungsfaktor dar. Abbildung 7.6 zeigt die Verläufe der auf Basis von Rammsondierungen ermittelten Verbesserungsfaktoren für die Testfelder *A*, *B* und *C* über die Tiefe.

$$Verbesserungsfaktor = \frac{N_{10,m,nach}}{N_{10,m,vor}} \tag{7.1}$$

Beim Testfeld *A*, mit dem Verdichtungsraster von $4,0\,\text{m} \times 4,0\,\text{m}$ bewegt sich der Verbesserungsfaktor zwischen $0,5$ und $1,5$, was nur einer geringfügigen Bodenverbesserung bzw. einem praktisch unveränderten Verdichtungszustand oder sogar einer gewissen Verschlech-

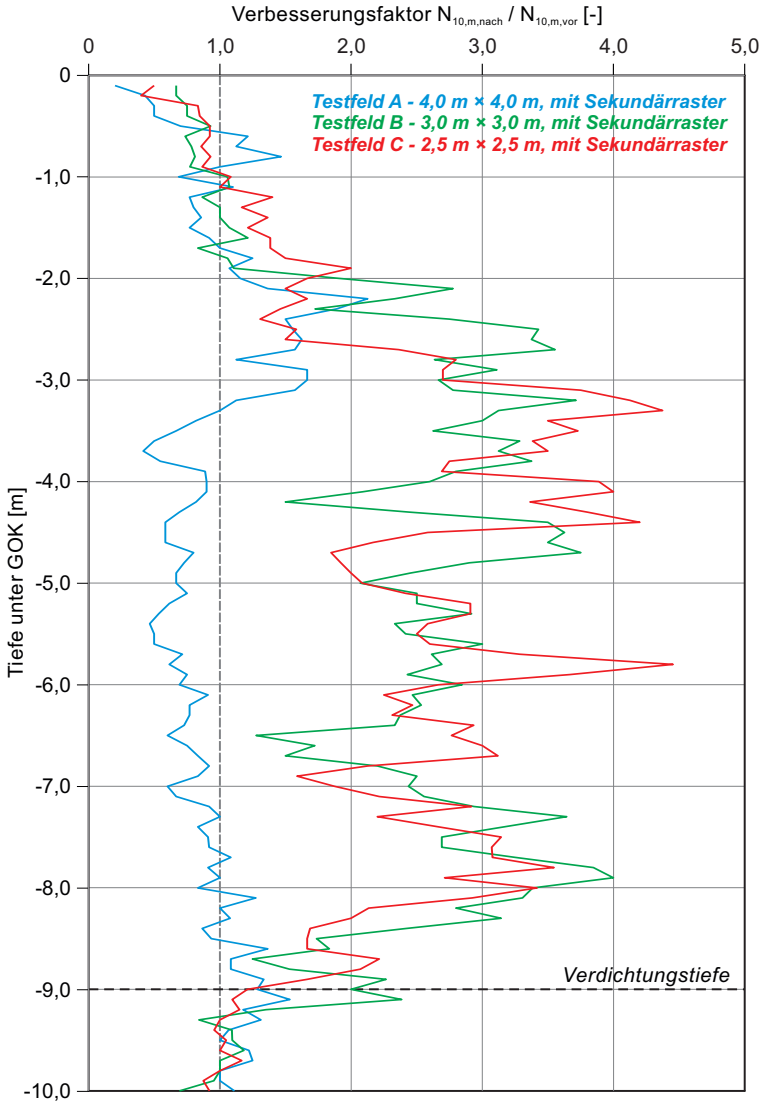


Abbildung 7.6: Auf Basis von Rammsondierungen ermittelte Verbesserungsfaktoren über die Tiefe für die Testfelder *A*, *B* und *C* [77].

terung in der „Schwachstelle“entspricht. Der Abstand der Verdichtungsstrecken auf diesem Testfeld ist eindeutig zu groß. Man konnte keinen zusammenhängenden, quasi-homogenen verdichteten Bodenkörper erzeugen.

Bei den Testfeldern *B* und *C* wurden deutlich höhere Verbesserungsfaktoren ermittelt als beim Testfeld *A*, wobei der Verlauf der beiden Kurven über die Tiefe prinzipiell eine große Ähnlichkeit aufweist. Der Verbesserungsfaktor bewegt sich im Tiefenbereich zwischen 2,0 und 9,0 m unter Geländeoberkante etwa zwischen 2,0 und 3,0, in bestimmten Tiefenstufen ergaben sich sogar höhere Werte. Die verhältnismäßig niedrigen Verbesserungsfaktoren im oberflächennahen Bereich sind primär auf die bereits vorhandene hohe Steifigkeit des Untergrundes zufolge der Vorverdichtung durch den Verkehr in der Kiesgrube zurückzuführen. Die hohen Verbesserungsfaktoren bei den Testfeldern *B* und *C* weisen eindeutig auf einen zusammenhängenden quasi-homogenen Bodenkörper hin, beide Verdichtungsraster sind als geeignet anzusehen. Der Verdichtungsraster 2,5 m×2,5 m auf dem Testfeld *C*

weist jedoch praktisch keine zusätzliche Verdichtungswirkung im Vergleich zum Verdichtungsraster $3,0\,\text{m} \times 3,0\,\text{m}$ auf dem Testfeld *B* auf. Von den drei gewählten Verdichtungsrastern stellt auf Basis der ausgewerteten Rammsondierungen somit der Verdichtungsraster $3,0\,\text{m} \times 3,0\,\text{m}$ mit Sekundärraster offensichtlich die optimale Anordnung der Rüttleransatzpunkte bei Wahl eines Viereckrasters für die Untergrundverhältnisse auf dem Versuchsfeld und für den angewendeten Tiefenrüttler dar.

7.3.2 Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens zur Beurteilung des Verdichtungsrasters

Wie in Abschnitt 7.1 demonstriert, ist die Beurteilung des in-situ Zustandes im Untergrund auf Basis der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens im unverdichteten Boden möglich. Im Folgenden erfolgt die Betrachtung von Verdichtungsstrecken im Sekundärraster, welche zwischen bereits fertiggestellten Verdichtungsstrecken des Primärrasters hergestellt worden sind. Das Ziel ist dabei, die Auswirkung der Rütteldruckverdichtung in benachbarten Verdichtungsstrecken auf den Verdichtungszustand an der Stelle der Verdichtungsstrecken im Sekundärraster bei unterschiedlichen Abständen der Rüttleransatzpunkte zu überprüfen. Zur Gegenüberstellung der unterschiedlichen Verdichtungsraster auf den Testfeldern *A*, *B* und *C* wird je Testfeld eine Verdichtungsstrecke im Sekundärraster betrachtet und die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens in Abbildung 7.7 dargestellt:

- Testfeld *A* - Verdichtungsstrecke *Nr. 106*
- Testfeld *B* - Verdichtungsstrecke *Nr. 121*
- Testfeld *C* - Verdichtungsstrecke *Nr. 131*

Die Position der betrachteten Verdichtungsstrecken ist in Abbildung 7.5 angegeben.

Verdichtungsstrecke im Sekundärrasters auf Testfeld *A*

Auf dem Testfeld *A* wird die Verdichtungsstrecke *Nr. 106* betrachtet. Abbildung 7.7 (oben) zeigt den zeitlichen Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit mit hellblauer Farbe und der Rütteltiefe während der Arbeitsphase Einvibrieren, beim Verdichtungsversuch *Nr. 106*. Es ist dabei ersichtlich, dass man die geplante Verdichtungstiefe von $9,0\,\text{m}$ vergleichsweise schnell, innerhalb von etwa 2,0 Minuten, erreichte. Das Werteniveau der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit ist dabei relativ niedrig, im oberflächennahen Bereich beträgt sie etwa 100 bis $120\,\text{MN/m}$, bei größerer Rütteltiefe ist sie noch deutlich niedriger.

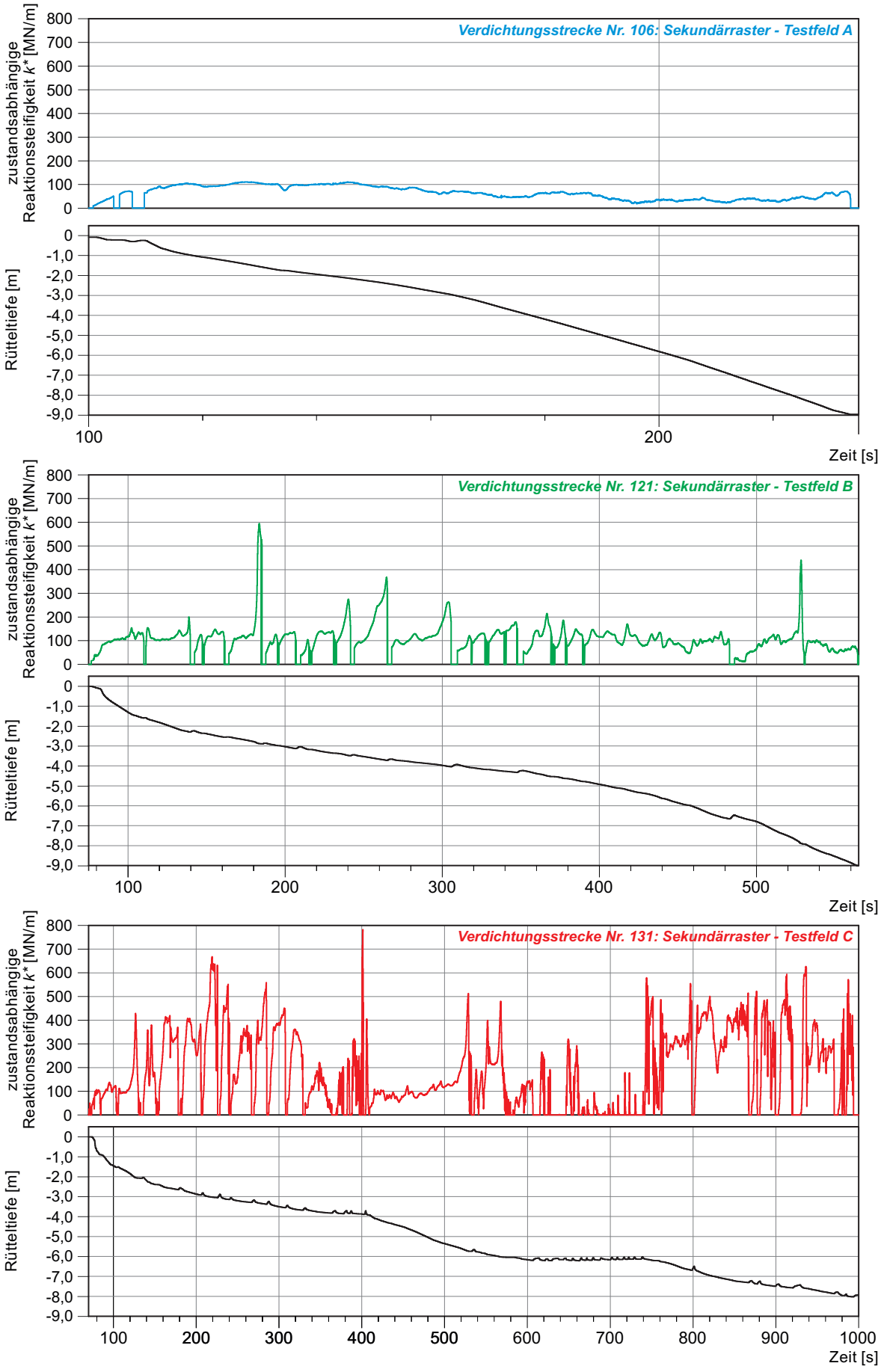


Abbildung 7.7: Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit und Rütteltiefe während der Arbeitsphase Einvibrieren bei den Verdichtungspunkten des Sekundärrasters Nr. 106 (hellblau), 121 (grün) und 131 (rot) jeweils auf dem Testfeld A, B und C

Verdichtungsstrecke im Sekundärraster auf Testfeld *B*

Betrachtet man eine Verdichtungsstrecke auf Testfeld *B*, ist ein unterschiedlicher Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit zu erkennen (siehe Abbildung 7.7 mitte). Das Werteniveau ist in diesem Fall höher als bei der Verdichtungsstrecke *Nr. 106* und bewegt sich etwa zwischen 100 und 200 MN/m, es sind aber vereinzelt auch deutlich höhere Werte ersichtlich. Die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit sinkt an bestimmten Stellen auf null ab, da der Tiefenrüttler abermalig, den Absenkvorgang unterbrechend, leicht angehoben wurde. Beim Heben des Tiefenrüttlers wird die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit definitionsgemäß auf null gesetzt (vgl. Abschnitt 6.6.1). Der Gerätefahrer hat mit dem regelmäßigen Anheben und abermaligen Absenken des Tiefenrüttlers das Überwinden von hohen lokalen Eindringwiderständen erzielt. Bei diesem Absenkvorgang war eine deutlich niedrigere Eindringgeschwindigkeit möglich als auf Testfeld *A*, die Rütteltiefe von 9,0 m erreichte man innerhalb von rund 8,0 Minuten.

Verdichtungsstrecke im Sekundärraster auf Testfeld *C*

Auf Testfeld *C* wurde bei der betrachteten Verdichtungsstrecke *Nr. 131* eine deutlich höhere zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit ermittelt als in den Testfeldern *A* und *B* (siehe Abbildung 7.7 unten). Aufgrund des hohen Widerstandes des Bodens erreichte man die Rütteltiefe von 8,0 m innerhalb von etwa 15,3 Minuten, welche im Vergleich zu den anderen betrachteten Verdichtungsstrecken einen übermäßig hohen Zeitaufwand darstellte. Das Absenken des Rüttlers bis zur geplanten Verdichtungstiefe von 9,0 m war in diesem Fall nicht möglich. Es ist – analog zur Verdichtungsstrecke *Nr. 121* – hierbei auch ersichtlich, dass der Gerätefahrer den Tiefenrüttler im Zuge des Absenkvorgangs oftmals anhob.

7.3.3 Vergleich der betrachteten Verdichtungsstrecken im Sekundärraster und Gegenüberstellung mit Rammsondierungen

In Abbildung 7.8 (links) ist der Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit bei den drei betrachteten Verdichtungsversuchen im Sekundärraster *Nr. 106* (hellblau), *121* (grün) und *131* (rot) über die Tiefe aufgetragen. Darüber hinaus sind jene bei den Verdichtungsversuchen *Nr. 17*, *19* und *25* (schwarz) – welche den Zustand des ungestörten Untergrundes widerspiegeln (siehe Abschnitt 7.2) – ebenfalls dargestellt. In Abbildung 7.8 (rechts) sind die Verläufe der auf Basis von Rammsondierungen ermittelten Verbesserungsfaktoren über die Tiefe für die Testfelder *A*, *B* und *C* wiederholt angezeigt.

Es ist dabei ersichtlich, dass die beim Verdichtungsversuch *Nr. 106* ermittelte zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit praktisch den gleichen Verlauf über die Tiefe zeigt, wie jene bei den Verdichtungsversuchen *Nr. 17*, *19* und *25*, was an dieser Stelle auf einen annähernd gleichen Untergrundzustand schließen lässt, wie beim ungestörten Boden. Dies bedeutet, dass der Verdichtungszustand des Untergrundes auf Testfeld *A*, bei einem Verdichtungsraster von 4,0 m × 4,0 m, an jenen Stellen, wo die Verdichtungsstrecken des Sekundärrasters angeordnet sind, durch die Rütteldruckverdichtung von den umgebenden Verdichtungsstrecken des Primärrasters praktisch nicht beeinflusst wurde. Bei der Verdichtungsstrecke

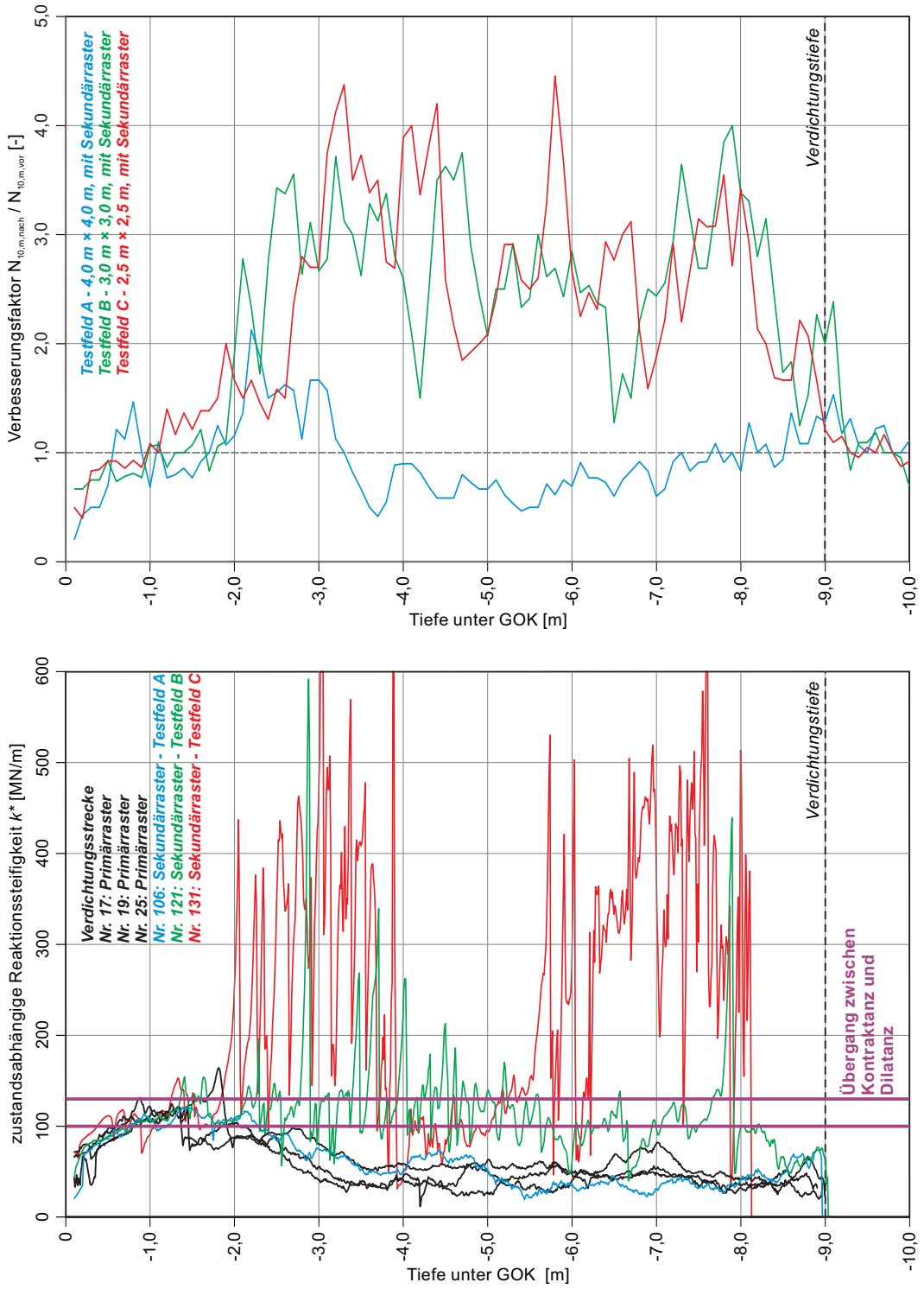


Abbildung 7.8: Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens bei den Verdichtungsversuchen im Sekundärraster *Nr. 106* (hellblau), *121* (grün) und *131* (rot) sowie bei den Verdichtungsversuchen *Nr. 17*, *19* und *25* (schwarz) im ungestörten Boden, mit der Bandbreite des Verdichtungspotenzials (links), auf Basis von Rammsondierungen ermittelte Verbesserungsfaktoren über die Tiefe für die Testfelder *A*, *B* und *C* [77] (rechts).

Nr. 121 ergaben sich gegenüber dem Ausgangszustand wesentlich höhere zustandsabhängige Reaktionssteifigkeiten, welche auf einen maßgeblichen Einfluss durch die Rütteldruck-

verdichtung von den umgebenden Verdichtungsstrecken zufolge des engeren Primärrasters von $3,0\,\mathrm{m} \times 3,0\,\mathrm{m}$ schließen lassen. Bei der Verdichtungsstrecke *Nr. 131*, auf Testfeld *C* ist das Werteniveau der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit tendenziell noch deutlich höher als auf Testfeld *B*. Dieser Umstand ist auf das engere Primärraster von $2,5\,\mathrm{m} \times 2,5\,\mathrm{m}$ zurückzuführen.

In Abbildung 7.8 (links) ist die Bandbreite der zum Übergang zwischen kontraktantem und dilatantem Verhalten zugehörige zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit dargestellt, die zwischen etwa $k^* = 100$ und $130\,\mathrm{MN/m}$ variiert und als Verdichtungspotenzial angesehen werden kann. Bei der betrachteten Verdichtungsstrecke auf dem Testfeld *A* ist diese Bandbreite weit unterschritten. Durch eine sorgfältige Verdichtung kann zwar in der Verdichtungsstrecke das Verdichtungspotenzial ausgeschöpft sein, dies bedeutet allerdings nicht zwingend das Erzeugen eines quasi-homogenen verdichteten Bodenbereichs. Diese wird durch die Ergebnisse der durchgeführten Rammsondierungen zur Verdichtungskontrolle ersichtlich. Im fertiggestellten Testfeld ergaben sich Verbesserungsfaktoren, welche auf eine geringfügige Bodenverbesserung bzw. auf einen praktisch unveränderten Verdichtungszustand in den „Schwachstellen" schließen lassen (siehe Abbildung 7.8 rechts). Beim Testfeld *B* ist das Verdichtungspotenzial laut Abbildung 7.8 (links) großteils ausgeschöpft oder punktuell sogar überschritten. Durch eine Homogenisierung des Untergrundes in den Verdichtungsstrecken im Sekundärraster kann man hier das Ziel einer Rütteldruckverdichtung – das Erzeugen eines zusammenhängenden, quasi-homogenen verdichteten Bodenbereichs – erreichen. Die Ergebnisse der Rammsondierungen bestätigen diese Annahme, im Tiefenbereich zwischen $2,0$ und $9,0\,\mathrm{m}$ unter Geländeoberkante ergaben sich Verbesserungsfaktoren etwa zwischen $2,0$ und $3,0$, welche für eine maßgebliche Verdichtungswirkung und für einen zusammenhängenden verdichteten Bodenbereich sprechen.

Die Auswertungsergebnisse zeigen beim Testfeld *C* höhere Werte der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit als beim Testfeld *B*. Diese überschreiten deutlich das zum Übergang zwischen kontraktanten und dilatanten Verhalten zugehörige Werteniveau. Aus diesem Grund sind diese auf hohe Spannungen an der Kontaktfläche Rüttlerspitze und Boden bzw. im Boden unterhalb der Rüttlerspitze zufolge ein dilatantes Verhalten des Bodens zurückzuführen, woraus vorübergehend eine hohe Steifigkeit resultiert. Sie widerspiegeln daher nicht eine höhere Verdichtungswirkung zufolge des engeren Verdichtungsrasters. Gemäß des auf Basis der Rammsondierergebnisse ermittelten Verbesserungsfaktor weist der Verdichtungsraster $2,5\,\mathrm{m} \times 2,5\,\mathrm{m}$ auf dem Testfeld *C* praktisch keinen zusätzlichen Verdichtungserfolg im Vergleich zum Verdichtungsraster $3,0\,\mathrm{m} \times 3,0\,\mathrm{m}$ auf. Dieser Umstand bestätigt die Hypothese, dass nach Ausschöpfung des Verdichtungspotenzials der Boden zufolge der hohen Kontaktspannung dilatantes Verhalten und in weiterer Folge aufgrund der behinderten Seitendehnung eine hohe Steifigkeit aufweist. Nachdem diese hohe Spannung vorübergehend auftritt, ist die während des dilatanten Verhaltens indizierte hohe Steifigkeit ebenfalls vorübergehend und aus Sicht der Verdichtungswirkung irrelevant. Diese Ergebnisse sprechen somit nicht für eine bleibende Erhöhung der mittleren effektiven Spannung und damit der Bodensteifigkeit bei dilatantem Verhalten.

Betrachtung von Verdichtungsstrecken im Sekundärraster ermöglichte es, die Auswir-

kung der Rütteldruckverdichtung von benachbarten Verdichtungsstrecken auf den Verdichtungszustand an der Stelle der Verdichtungsstrecken im Sekundärraster bei unterschiedlichen Abständen der Rüttleransatzpunkte zu zeigen. Anhand der diskutierten Auswertungsergebnisse scheint es möglich zu sein, die Eignung von unterschiedlichen Verdichtungsrastern auf Basis des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers beurteilen zu können. Die Ergebnisse konnten mit der konventionellen Methode, mit den Ergebnissen der zur Verdichtungskontrolle durchgeführten Rammsondierungen, verifiziert werden. Die Betrachtung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens hat jedoch einen wesentlichen Vorteil gegenüber Sondierverfahren. Sie ermöglicht, die Bodenbeschaffenheit gegenüber Sondierverfahren nicht intermittierend und damit den Verdichtungsprozess unterbrechend, sondern bereits während der Verdichtungsarbeiten und kontinuierlich zu überprüfen. Dieser Vorteil wäre besonders bei inhomogenen Untergrundverhältnissen von Bedeutung, da man ungünstige Abweichungen sofort erkennen und gegebenenfalls zusätzliche Verdichtungsstrecken anordnen könnte.

Kapitel 8

Stromaufnahme des Rüttlermotors als Verdichtungskontrolle

8.1 Einführung

Tiefenverdichtungsarbeiten, wie auch das Rütteldruckverfahren werden von den ausführenden Firmen hinsichtlich bestimmter Verfahrensparameter umfangreich dokumentiert. Zu diesem Zweck kommen Registriergeräte zum Einsatz, durch welche man relevante Verfahrensparameter wie die Rütteltiefe, die Stromaufnahme des Rüttlermotors, der Hydraulikdruck und gegebenenfalls die Durchflussmenge des Wassers zur Wasserspülung usw. über die Zeit aufzeichnet. Bestimmte Parameter kommen bei der Kontrolle der Verdichtungsarbeiten oder beim nachträglichen Qualitätsnachweis der durchgeführten Arbeiten zur Anwendung. Eine ausführliche Beschreibung der gängigen Methoden der Verdichtungskontrolle bei Tiefenrüttelverfahren auf Basis der dokumentierten Verfahrensparameter ist Abschnitt 3.3.1 zu entnehmen.

Vor allem die Stromaufnahme des Rüttlermotors hat sich in den letzten Jahrzehnten als Grundlage für einen Qualitätsnachweis der Verdichtungsarbeiten etabliert. Aus der Ausführungspraxis ist bekannt, dass sich die Stromaufnahme des Rüttlermotors im Zuge des Verdichtungsvorgangs maßgeblich ändert. Diesen Umstand wird auf den ändernden Verdichtungszustand des Bodens zufolge der Rütteldruckverdichtung zurückgeführt und daher die Stromaufnahme als Indikator für den Verdichtungserfolg angesehen. Beispielsweise *Falk et al.* [40] erläutern die praktische Anwendung der Stromaufnahme zur Kontrolle von Tiefenverdichtungsarbeiten. Die Stromaufnahme des Rüttlermotors wird in der Regel in den Tiefenschreiberprotokollen dargestellt, wobei für die Rütteldruckverdichtung im Pilgerschrittverfahren sägezahnförmige Diagramme typisch sind. D. h. im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte steigt die Stromaufnahme mit zunehmender Rütteltiefe (siehe Abbildung 3.5).

Derartige Methoden zur Qualitätskontrolle der Verdichtungsarbeiten basieren primär auf Erfahrungen der ausführenden Firmen. Zusammenhänge zwischen der Stromaufnahme des Rüttlermotors und dem Verdichtungserfolg, beispielsweise in Form der Bodensteifigkeit oder der Bodendichte, wurden bislang nicht nachgewiesen. *Fellin* [45] erwähnte im

Zuge seiner theoretischen Untersuchungen die Stromaufnahme des Rüttlermotors im Zusammenhang mit der Verdichtungskontrolle.

Es kommt nun zur Betrachtung der im Zuge der experimentellen Untersuchungen messtechnisch erfassten Stromaufnahme und zur Gegenüberstellung dieser der Rüttlerbewegung sowie der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit.

8.2 Antrieb und Stromversorgung des Rüttlermotors

Der Antrieb des Rüttlermotors kann grundsätzlich elektrisch oder hydraulisch erfolgen, wobei in den meisten Fällen ein elektronischer Antrieb zur Anwendung kommt. Beim Tiefenrüttler des Typs *M-1470* – angewendet im Zuge der gegenständlichen experimentellen Untersuchungen – erfolgt ein elektronischer Antrieb. Der Elektromotor befindet sich im Rüttlerkörper und wird über ein Starkstromkabel mit elektrischer Energie versorgt, welche in der Regel die Trägergeräte bereitstellen. Das dafür erforderliche Stromaggregat ist meistens auf der Rückseite der Tragraupe montiert (siehe Abbildung 8.1).

Abbildung 8.1: Tragraupe mit Stromaggregat auf der Rückseite.

Im angewendeten Rüttlertyp kommt ein Drehstrom-Asynchronmotor[1] zur Anwendung.

[1]Ein Drehstrom-Asynchronmotor wird häufig auch als Asynchronmaschine oder Induktionsmaschine bezeichnet.

Der Rüttlermotor wird zusammen mit einem Frequenzumrichter betrieben. Dadurch ist es möglich, die Stromfrequenz und damit die Umdrehungsfrequenz der Unwuchtmasse einzustellen.

Die Aufzeichnung der Stromstärke erfolgt mittels der Onboard-SPS-Steuerung des Verdichtungsgerätes. Diese wird in den Tiefenschreiberprotokollen dokumentiert und zu weiteren Auswertungen – wie beispielsweise die Ermittlung des Amperfaktors (vgl. Abschnitt 3.3.1.2) – herangezogen. In der Fahrerkabine scheint die Anzeige der aktuellen Stromstärke ebenfalls auf.

8.3 Zusammenhang zwischen Stromaufnahme und Rüttlerbewegung

Im Zuge der gegenständlichen experimentellen Untersuchungen wurde die Stromaufnahme des Rüttlermotors unmittelbar aus der Onboard-SPS-Steuerung des Verdichtungsgerätes in das angewendete Messsystem übertragen und mit den weiteren Messsignalen zeitsynchronisiert aufgezeichnet. Im Folgenden wird die messtechnisch erfasste Stromaufnahme dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers gegenübergestellt und Zusammenhänge zwischen den beiden erörtert. Dabei erfolgt die Betrachtung sowohl des standardmäßigen Rüttlerbetriebs als auch des Einflusses der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden.

8.3.1 Zusammenhang zwischen Stromaufnahme und Rüttlerbewegung im standardmäßigen Rüttlerbetrieb

Abbildung 8.2 zeigt den zeitlichen Verlauf der beiden Parameter zur Charakterisierung des Bewegungsverhaltens: der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und des Vorlaufwinkels. Die Stromaufnahme des Rüttlermotors wird diesen beiden Parametern gegenübergestellt. Darüber hinaus sind der Rüttleranpressdruck und der Rütteltiefe ebenfalls dargestellt. Hierbei handelt es sich um den in Abschnitt 5.3.2 betrachteten Verdichtungsversuch. Der Gerätefahrer steuerte im Zuge dieses Versuchs den Verdichtungsprozess nach eigenem Ermessen, die Verdichtung erfolgte im standardmäßigen Rüttlerbetrieb.

Anhand der Messsignale ist ein klarer Zusammenhang zwischen dem Bewegungsverhalten und der Stromaufnahme des Rüttlermotors erkennbar. Analog zum Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers zeigt die Stromaufnahme, während des gesamten Verdichtungsvorgangs, eine klare Periodizität und hohe Reproduzierbarkeit sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht. Zu Beginn der einzelnen Verdichtungsschritte ist die Stromaufnahme vergleichsweise niedrig, mit zunehmender Rütteltiefe zeigt sie einen markanten Anstieg. Dieser Umstand spricht für eine zunehmende Belastung des Rüttlermotors zufolge der fortschreitenden Verdichtung. Nach Beendigung des jeweiligen Verdichtungsschrittes sinkt die Stromaufnahme wieder auf das ursprüngliche Niveau vergleichsweise rasch ab.

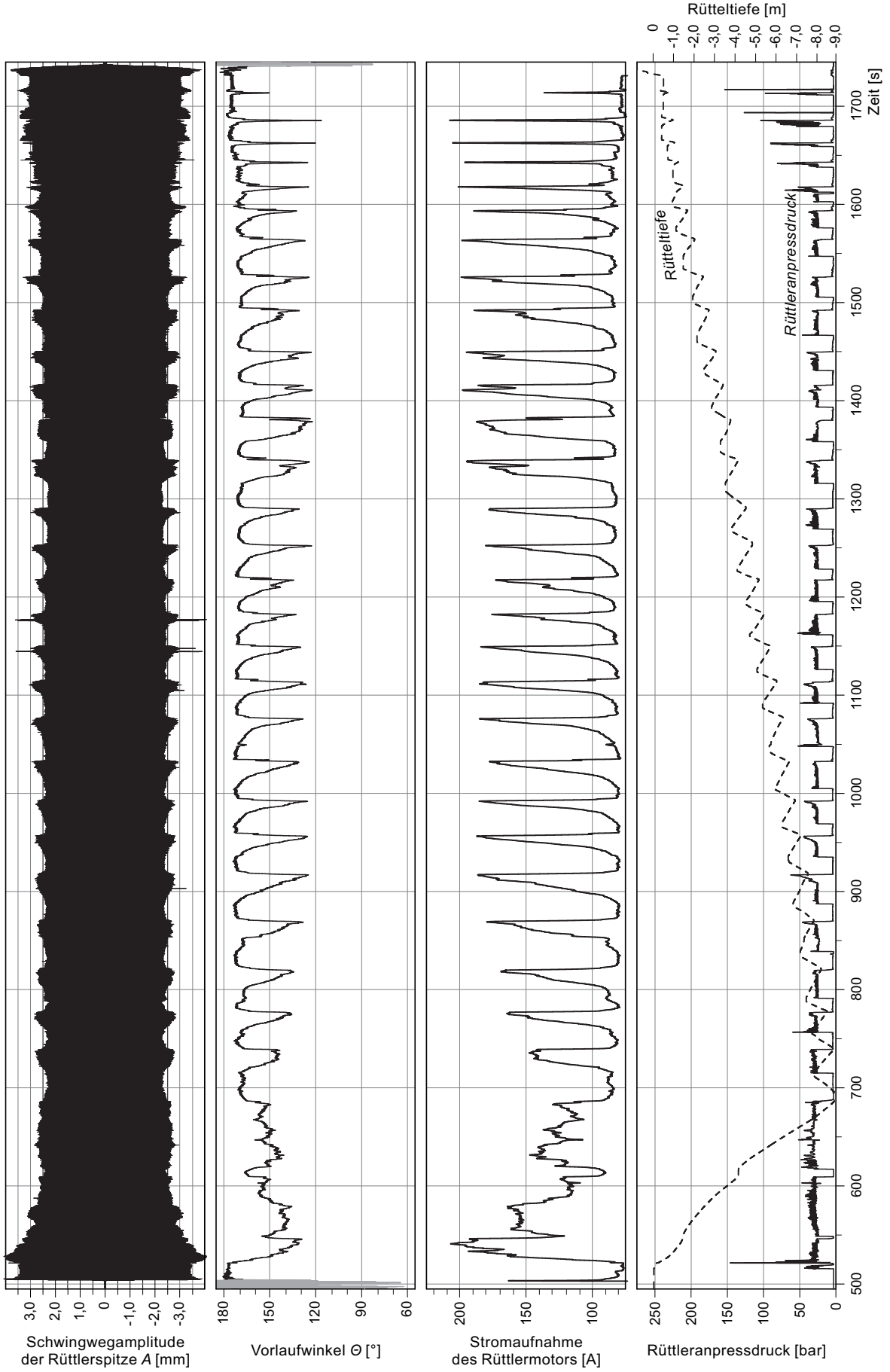


Abbildung 8.2: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Stromaufnahme des Rüttlermotors, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe während eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb.

Abbildung 8.3 zeigt die Rüttlerbewegung und die Stromaufnahme während der unbehinderten Rüttlerschwingung in der Luft (links) sowie die gleichen Parameter für eine etwa 2,0 m lange Verdichtungsstrecke vergrößert (rechts). Es ist dabei ersichtlich, dass sich die Stromaufnahme im Zuge des Anstiegs der Rüttlerfrequenz zwar ändert, während der stationären Schwingung in der Luft ist sie jedoch konstant und beträgt etwa 78 A, welche dem Leerlaufstrom des Motors entspricht.

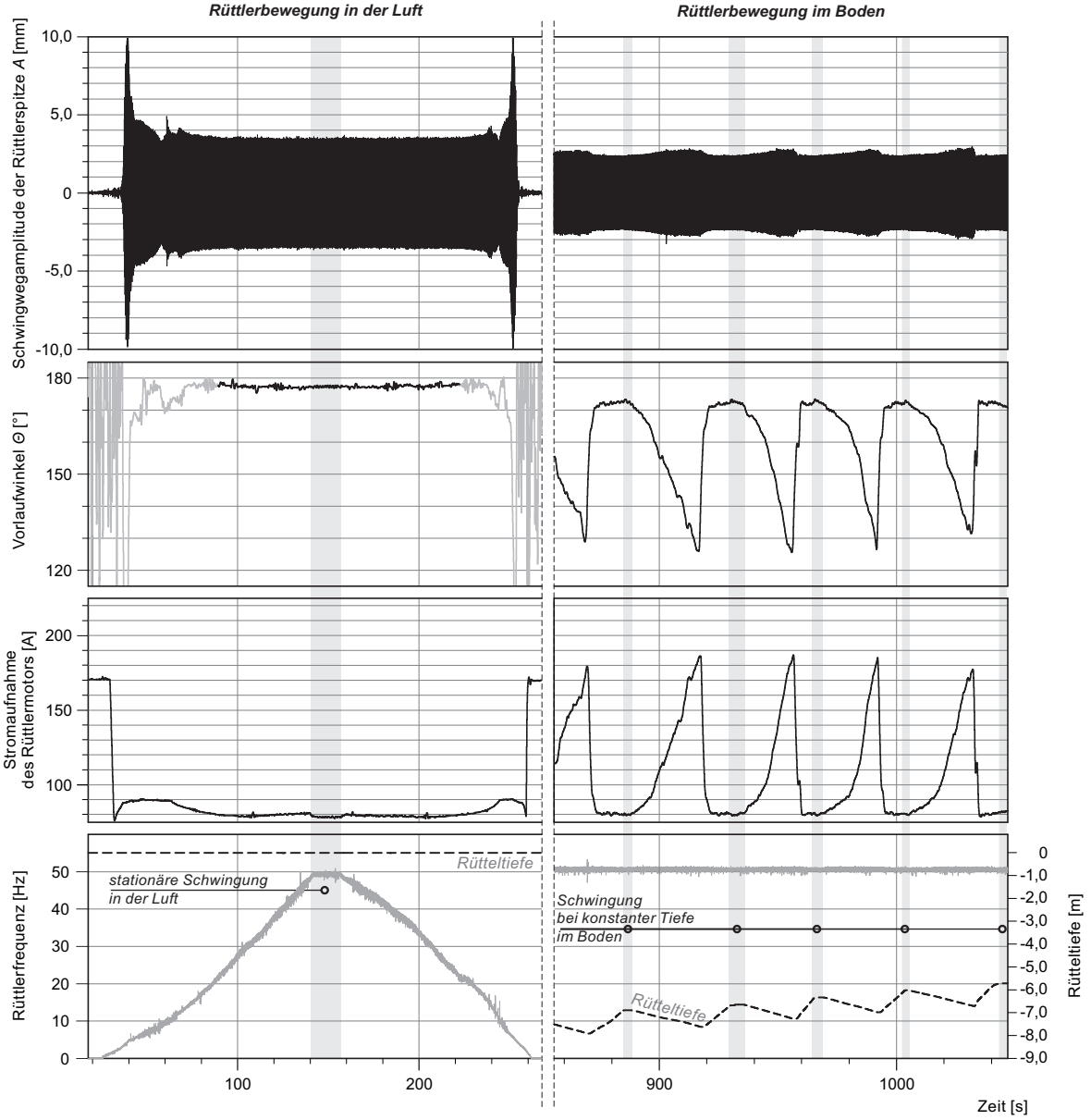


Abbildung 8.3: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Stromaufnahme des Rüttlermotors, Rüttlerfrequenz und Rütteltiefe während der unbehinderten Rüttlerschwingung in der Luft (links) und während des Verdichtungsvorgangs bei einer etwa 2,0 m langen Verdichtungsstrecke (rechts).

Die Stromaufnahme ist während der Rüttlerschwingung bei konstanter Tiefe im Untergrund unmittelbar vor dem Beginn der einzelnen Verdichtungsschritte erst geringfügig höher als während der stationären Schwingung in der Luft. Bei den betrachteten Verdichtungs-

schritten ist sie in diesem Zustand annähernd gleich groß und beträgt etwa 80 A, welche nur geringfügig größer ist als der Leerlaufstrom. Dieser Umstand spricht für eine verhältnismäßig geringe Belastung des Rüttlermotors während der Schwingung bei konstanter Tiefe im Untergrund.

Mit zunehmender Rütteltiefe steigt die Stromaufnahme signifikant an, bei den betrachteten Verdichtungsschritten auf etwa 180 bis 190 A. Nach Beendigung des jeweiligen Verdichtungsschrittes sinkt diese wieder rasch ab. In Abbildung 8.3 (rechts) ist der Zusammenhang zwischen dem Vorlaufwinkel und der Stromaufnahme klar ersichtlich. Mit zunehmender Rütteltiefe sinkt der Vorlaufwinkel, wobei die Stromaufnahme steigt. Die lokalen Minima und Maxima der beiden Diagramme stimmen annähernd überein. Beim Heben des Tiefenrüttlers stellt sich wieder das ursprüngliche Werteniveau bei den beiden Parametern verhältnismäßig rasch ein.

Dieses Verhalten entspricht erwartungsgemäß den Beobachtungen aus der Ausführungspraxis. Im Zuge einer Rütteldruckverdichtung im Pilgerschrittverfahren beobachtet man in der Regel während der einzelnen Verdichtungsschritte mit zunehmender Rütteltiefe eine ansteigende Stromaufnahme. Diese sind auch in den Tiefenschreiberprotokollen dokumentiert. Ein typischer sägezahnförmiger Verlauf der Stromaufnahme kann ebenfalls im Musterprotokoll beobachtet werden, welches in Abschnitt 3.3.1.1 angeführt ist (siehe Abbildung 3.5).

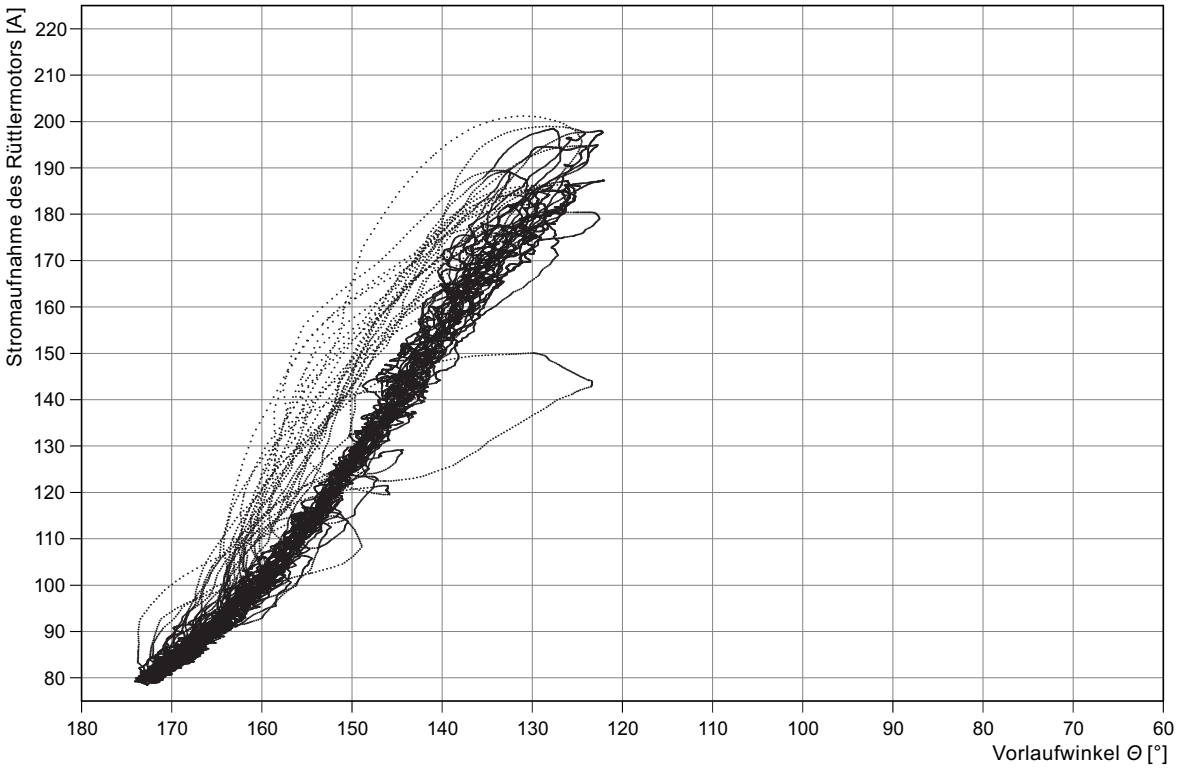


Abbildung 8.4: Stromaufnahme in Abhängigkeit vom Vorlaufwinkel während eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb.

Um den Zusammenhang zwischen der Rüttlerbewegung und der Stromaufnahme des Rüttlermotors näher zu beleuchten, ist die Stromaufnahme über dem Vorlaufwinkel für

sämtliche Verdichtungsschritte der betrachteten Verdichtungsstrecke dargestellt (siehe Abbildung 8.4). In der gewählten Darstellung ergeben sich für die einzelnen Verdichtungsschritte schleifenförmige Kurven. Das Diagramm hebt den Zusammenhang zwischen den beiden Parametern sowie seine Reproduzierbarkeit besonders anschaulich hervor. Die Ähnlichkeit der einzelnen Schleifen ist im Bereich zwischen etwa 170° und 130° (entspricht etwa der Betriebsphase Einfahren) besonders augenfällig. In Abbildung 8.5 ist exemplarisch eine zu einem bestimmten Verdichtungsschritt zugehörige Schleife gesondert angeführt. Es sind dabei die beiden Betriebsphasen (siehe Abschnitt 6.3.2) Einfahren und Heben ebenfalls gekennzeichnet. In der Betriebsphase Einfahren ist zwischen dem sinkenden Vorlaufwinkel und der steigenden Stromaufnahme – abgesehen von geringfügigen Schwankungen – ein annähernd linearer Zusammenhang zu erkennen. Der betrachtete Verdichtungsschritt wurde bei einem Vorlaufwinkel von etwa 125° abgebrochen. Nach Beendigung des Verdichtungsschrittes steigt der Vorlaufwinkel relativ rasch auf das ursprüngliche Niveau, die Stromaufnahme bleibt zu Beginn des Hebens bei steigendem Vorlaufwinkel für ein kurzes Zeitintervall konstant und anschließend sinkt sie wieder auf etwa 80 A ab.

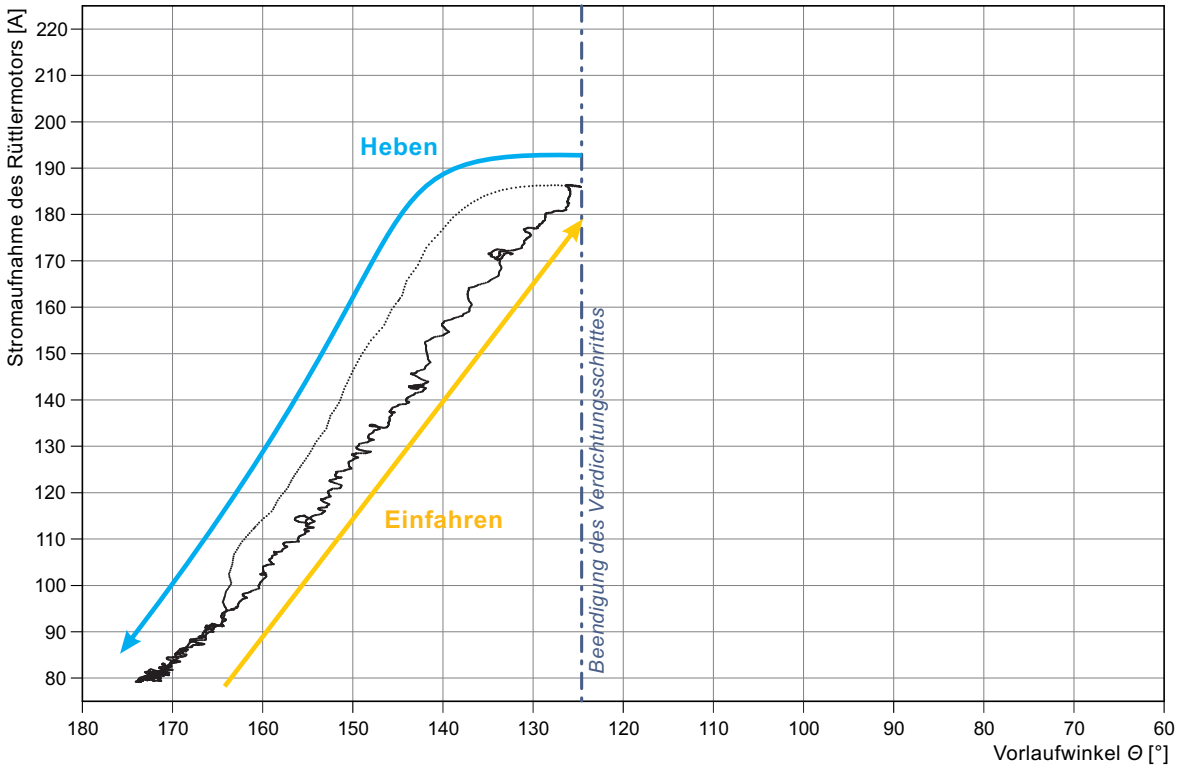


Abbildung 8.5: Stromaufnahme in Abhängigkeit vom Vorlaufwinkel während eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb mit den Betriebsphasen Einfahren und Heben.

Die Ergebnisse des Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Rüttlerbewegung und der Stromaufnahme des Rüttlermotors. Dieser ist zwischen dem Vorlaufwinkel und der Stromaufnahme besonders stark ausgeprägt. Daraus folgt, dass sich die fortschreitende Verdichtung nicht nur in der Rüttlerbewegung, sondern auch in der Stromaufnahme des Rüttlermotors zeigt.

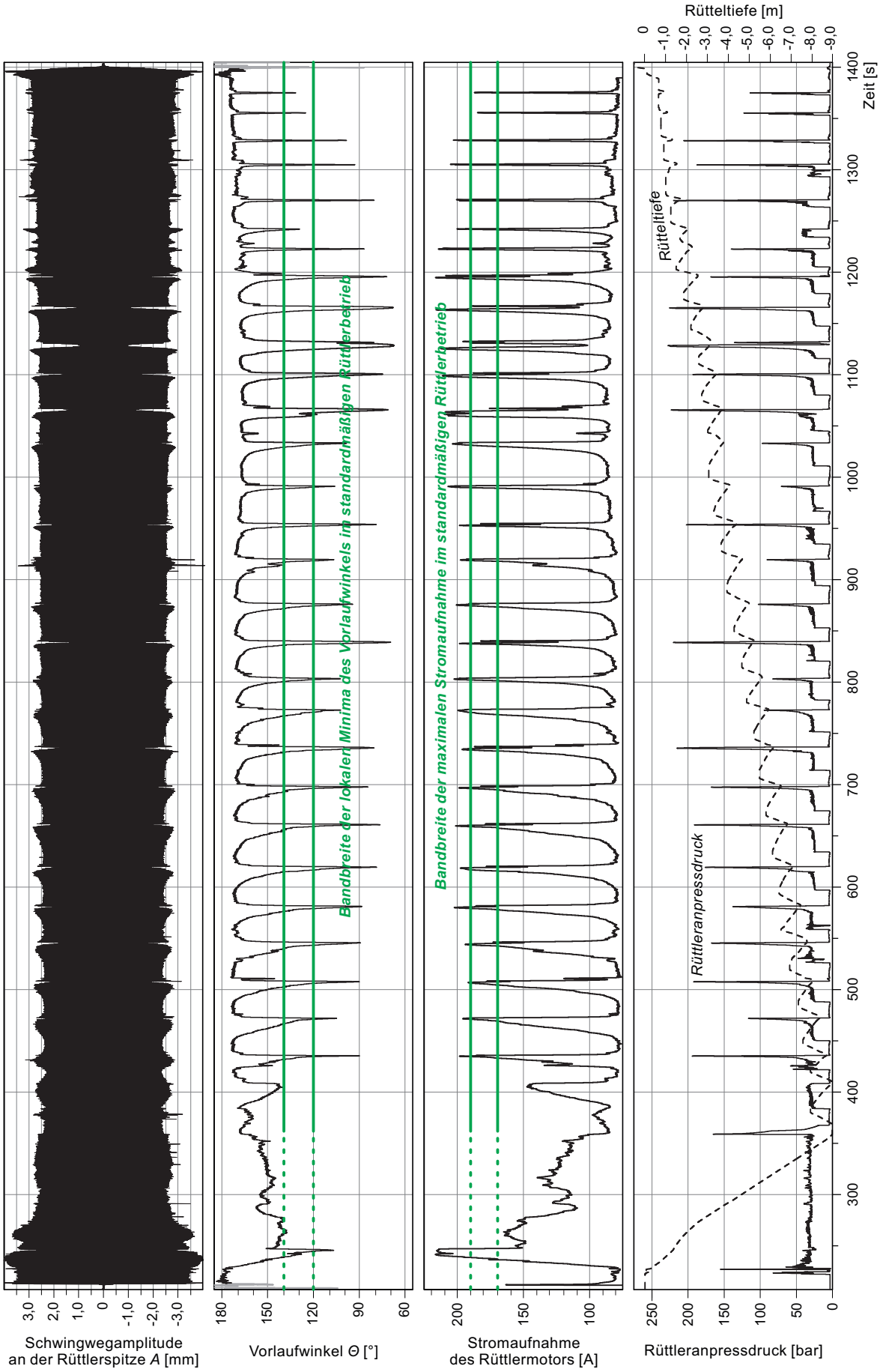


Abbildung 8.6: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Stromaufnahme des Rüttlermotors, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe während eines Verdichtungsversuchs bei erhöhter Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden.

8.3.2 Einfluss der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden auf die Stromaufnahme des Rüttlermotors

Der Zusammenhang zwischen der Stromaufnahme des Rüttlermotors und dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers wurde auch bei erhöhter Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden betrachtet. Abbildung 8.6 zeigt den zeitlichen Verlauf der Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, des Vorlaufwinkels, der Stromaufnahme des Rüttlermotors, des Rüttleranpressdrucks und der Rütteltiefe während eines Verdichtungsversuchs im nichtstandardmäßigen Rüttlerbetrieb. Dabei handelt es sich um den in Abschnitt 5.3.3 bereits diskutierten Versuch zur Untersuchung des Einflusses der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden auf das Systemverhalten. Im Zuge dessen brach der Gerätefahrer die einzelnen Verdichtungsschritte – gegenüber dem in Abschnitt 8.3.1 gezeigten Verdichtungsversuch – nicht bei einer aus seiner Sicht optimalen Absenktiefe ab. Er führte diese weiter, bis beim jeweiligen Verdichtungsschritt praktisch kein weiteres Eindringen mehr in den zu verdichtenden Boden möglich war. Dadurch erzielte er eine deutlich höhere Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden, welche sich im Rüttleranpressdruck zeigt. Hierbei ist im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte das Werteniveau des Rüttleranpressdrucks wesentlich höher als im standardmäßigen Rüttlerbetrieb.

Die Stromaufnahme des Rüttlermotors zeigt prinzipiell einen ähnlichen zeitlichen Verlauf wie im standardmäßigen Betrieb. Weiters ist hierbei auch ein enger Zusammenhang zwischen Vorlaufwinkel und Stromaufnahme auf den ersten Blick erkennbar. Am Beginn der einzelnen Verdichtungsschritte ist der Vorlaufwinkel verhältnismäßig groß und die Stromaufnahme vergleichsweise niedrig, mit zunehmender Rütteltiefe steigt diese bei sinkendem Vorlaufwinkel an. Nach Beendigung der einzelnen Verdichtungsschritte sinkt die Stromaufnahme bei steigendem Vorlaufwinkel wieder ab. Zufolge der deutlich höheren Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden trat bei den einzelnen Verdichtungsschritten des gegenständlichen Verdichtungsversuchs generell ein deutlich niedrigerer Vorlaufwinkel auf, wobei sich nach dem Erreichen eines lokalen Maximums (Resonanzpunkt) die Schwingwegamplitude auch deutlich reduzierte.

Trotz der deutlich niedrigeren lokalen Minima des Vorlaufwinkels zeigt die Stromaufnahme hier erst geringfügig höhere Maximalwerte als im Zuge des standardmäßigen Betriebs. Im Standardbetrieb betrug die maximale Stromaufnahme – abgesehen von wenigen Ausnahmefällen – etwa 170 bis 190 A, hierbei sind Maximalwerte zwischen etwa 200 bis 220 A ersichtlich. In Abbildung 8.6 sind die etwaige Bandbreite der lokalen Minima des Vorlaufwinkels und der Maximalwerte der Stromaufnahme im standardmäßigen Rüttlerbetrieb mit grünen Balken gekennzeichnet. Im gegenständlichen Fall ist bei zahlreichen Verdichtungsschritten unmittelbar nach dem lokalen Maximum eine zweite Spitze im zeitlichen Verlauf der Stromaufnahme ersichtlich. Dieses Verhalten ist besonders bei jenen Verdichtungsschritten zu erkennen, bei denen ein verhältnismäßig niedriger Vorlaufwinkel aufgetreten ist. Bei erhöhter Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden ist somit der in Abschnitt 8.3.1 diskutierte Zusammenhang zwischen dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers und der Stromaufnahme des Rüttlermotors in der gleichen Form nicht mehr gege-

ben. Dieser Umstand ist anhand eines ausgewählten Verdichtungsschrittes in Abbildung 8.7 veranschaulicht.

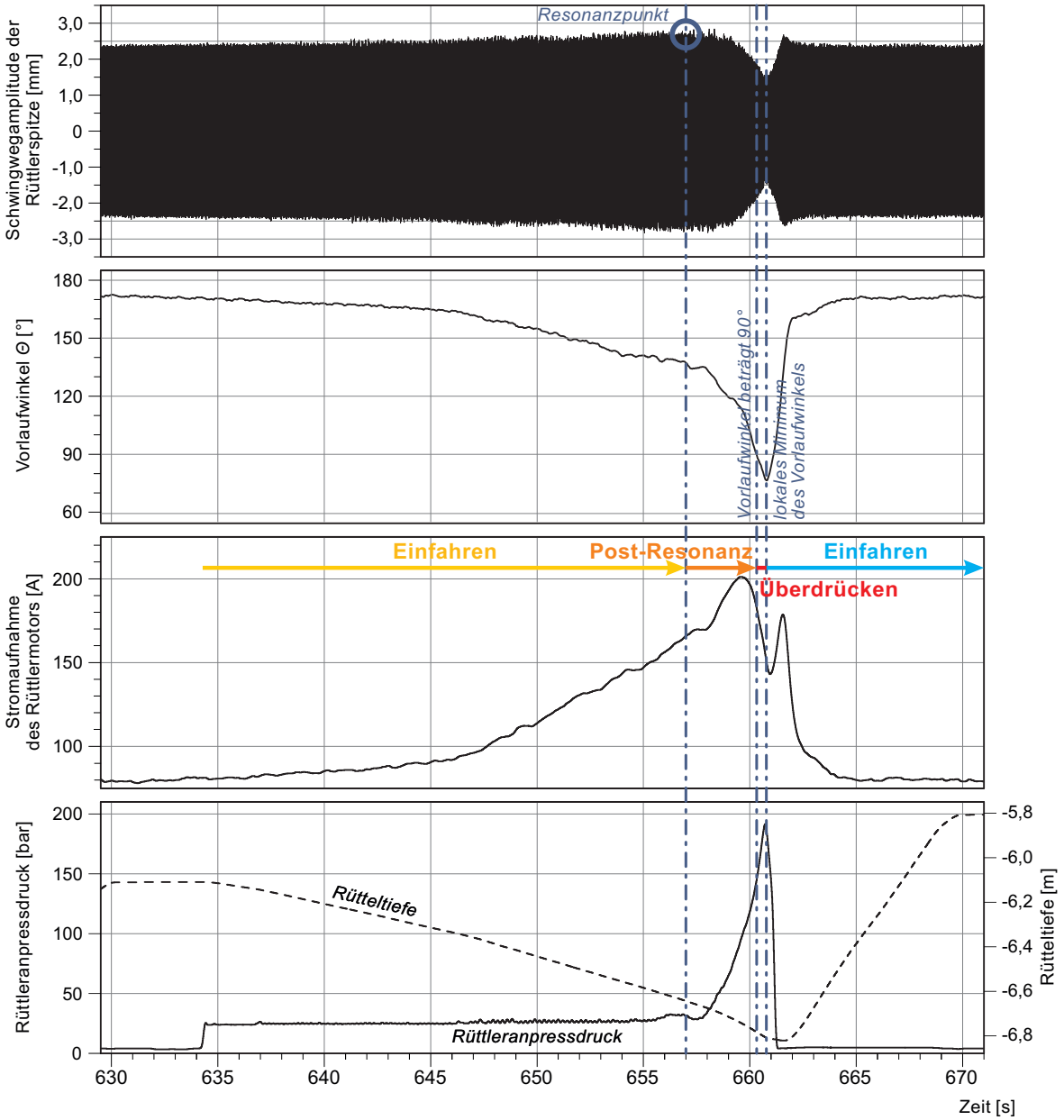


Abbildung 8.7: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Stromaufnahme des Rüttlermotors, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe während eines Verdichtungsversuchs des in Abbildung 8.6 dargestellten Verdichtungsversuchs mit den Betriebsphasen Einfahren, Heben, Post-Resonanz und Überdrücken.

Es ist anhand der Messsignale des betrachteten Verdichtungsschrittes ersichtlich, dass hierbei in der Betriebsphase Einfahren die Stromaufnahme des Rüttlermotors mit zunehmender Rütteltiefe ansteigt. Dieses Verhalten entspricht dem standardmäßigen Rüttlerbetrieb. Nach dem Erreichen des lokalen Maximums der Schwingwegamplitude – als Resonanzpunkt bezeichnet – steigt in der Betriebsphase Post-Resonanz die Stromaufnahme weiter und erreicht innerhalb dieser Betriebsphase ihr lokales Maximum bei etwa 200 A.

Das lokale Maximum der Stromaufnahme des Rüttlermotors entspricht somit nicht jenem der Schwingwegamplitude. Bei ihrem lokalen Maximum bleibt die Stromaufnahme für eine kurze Zeitspanne – welche wenigen Zehntelsekunden entspricht – annähernd konstant und anschließend beginnt sie bereits in der Betriebsphase Post-Resonanz vergleichsweise rasch abzusinken. Diese Tendenz setzt sich auch in der Betriebsphase Überdrücken fort. Die Stromaufnahme erreicht ihr lokales Minimum etwa an jener Stelle, wo der Vorlaufwinkel und die Rüttleramplitude ihre lokalen Minima bzw. der Rüttleranpressdruck sein lokales Maximum haben. Das lokale Maximum des Rüttleranpressdrucks indiziert das lokale Maximum der Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden. Nach Beendigung des Verdichtungsschrittes steigt die Stromaufnahme erneut an, im Zuge des Hebens ist ein zweites lokales Maximum in ihrem zeitlichen Verlauf zu identifizieren.

Stellt man die Stromaufnahme, die bei konstanter Spannung proportional zur elektrischen Scheinleistung ist, der mechanischen Leistung des schwingenden Rüttlerkörpers gegenüber, ergibt sich tendenziell ein ähnlicher Verlauf (siehe Abbildung 8.8). Die mechanische Rüttlerleistung P ist folgendermaßen definiert (Anteil der Erregerkraft $F = me\omega^2$ in Richtung der Schwinggeschwindigkeit, d.h. $F_T = F\ sin\Theta$, multipliziert mit der Schwinggeschwindigkeit des Rüttlers $v = A\omega$):

$$P = F_T\ v = F\ sin\Theta\ v = (me\omega^2)\ sin\Theta\ (A\omega) = (me\omega^3)\ A\ sin\Theta \tag{8.1}$$

Anhand von Gleichung 8.1 nimmt mit abnehmendem Vorlaufwinkel zunächst die Leistung zu, hat jedoch nicht bei $\Theta = 90°$ ihr Maximum, sondern bereits davor, da die Rüttleramplitude A nach Überschreiten des Resonanzpunktes abnimmt, wie dies beispielsweise Abbildung 8.7 zu entnehmen ist.

Die nähere Betrachtung der Ursachen für die absinkende Stromaufnahme erfolgt in Abschnitt 8.4.

In Abbildung 8.8 ist die Stromaufnahme in Abhängigkeit vom Vorlaufwinkel für den in Abbildung 8.7 gezeigten Verdichtungsschritt dargestellt. In dieser Darstellung ergibt sich zwischen Stromaufnahme und Vorlaufwinkel – analog zum standardmäßigen Rüttlerbetrieb – auch eine schleifenförmige Kurve. In der Betriebsphase Einfahren ist der Zusammenhang zwischen den beiden Parametern abgesehen von geringfügigen Schwankungen wiederum nahezu linear. Die Betriebsphase Post-Resonanz zeigt ein unterschiedliches Verhalten, der annähernd lineare Zusammenhang ist hier nicht mehr gegeben, die Stromaufnahme erreicht ihr lokales Maximum, im gegenständlichen Fall bei einem Vorlaufwinkel von etwa 115°. Anschließend nimmt sie vergleichsweise bei sinkendem Vorlaufwinkel rasch ab. Diese Tendenz setzt sich auch in der Betriebsphase Überdrücken, bis zur Beendigung des Verdichtungsschrittes fort. Diese erfolgt im gegenständlichen Fall bei einem Vorlaufwinkel von etwa 77°. Nach Beendigung des Verdichtungsschrittes nimmt die Stromaufnahme bei steigendem Vorlaufwinkel noch geringfügig weiter ab. Anschließend steigt sie wiederum an, bevor sich das ursprüngliche Werteniveau einstellt. Das zweite lokale Maximum in der Stromaufnahme während der Betriebsphase Heben ist ebenfalls in dieser Darstellung deutlich erkennbar.

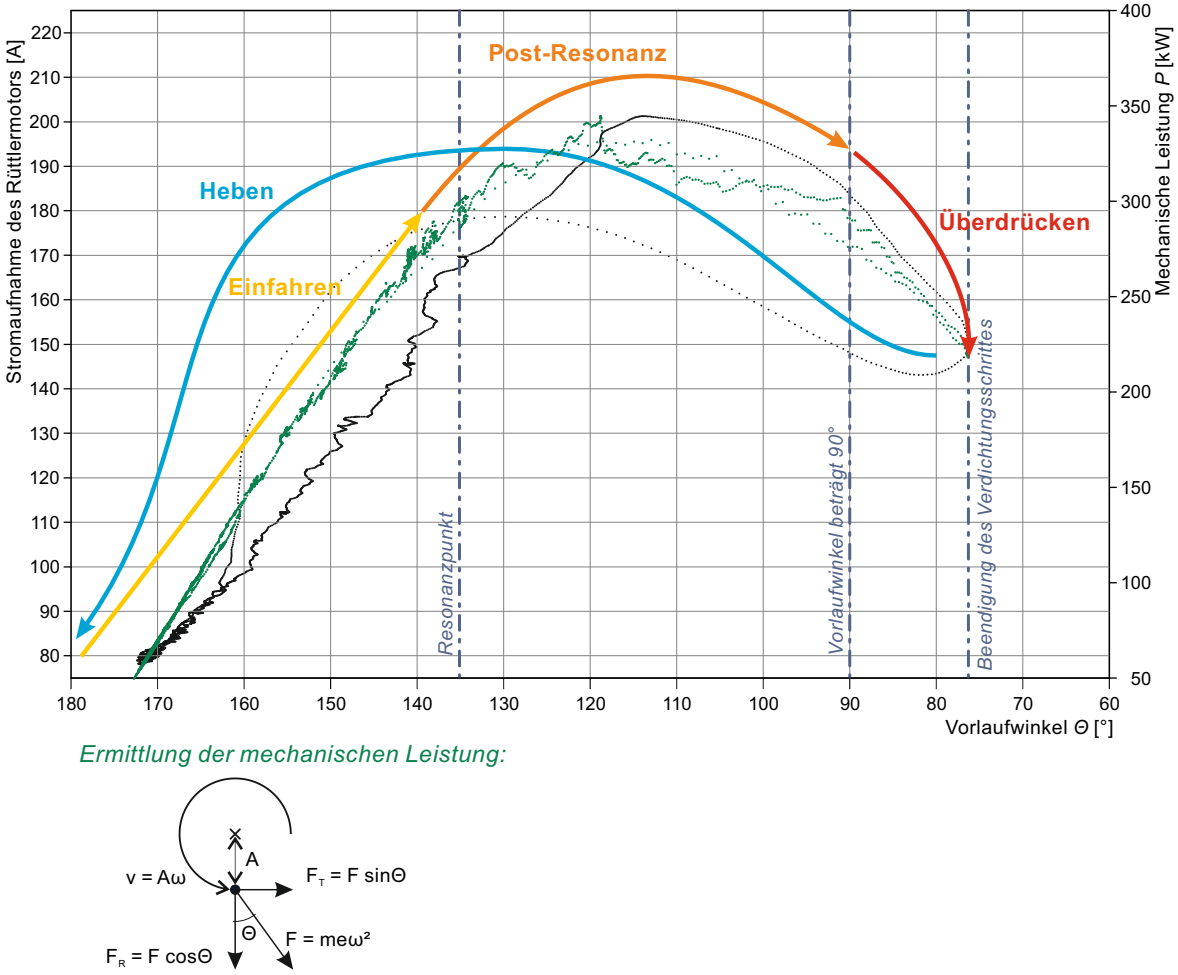


Abbildung 8.8: Stromaufnahme in Abhängigkeit vom Vorlaufwinkel während eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb mit den Betriebsphasen Einfahren, Heben, Post-Resonanz und Überdrücken. Im Vergleich dazu ist die mechanische Leistung des schwingenden Rüttlerkörpers mit grüner Farbe eingetragen.

Abbildung 8.9 zeigt die Stromaufnahme in Abhängigkeit vom Vorlaufwinkel für sämtliche Verdichtungsschritte des in Abbildung 8.6 dargestellten Verdichtungsversuchs. Es ist auch in diesem Fall eine hohe Reproduzierbarkeit im Zusammenhang zwischen den beiden Parametern zu sehen. Der annähernd lineare Zusammenhang ist auch hier bis zu einem Vorlaufwinkel von rund 130° – etwa in der Betriebsphase Einfahren – bei allen Verdichtungsschritten gegeben. Die Stromaufnahme erreicht ihr lokales Maximum bei den meisten Verdichtungsschritten bei etwa 200 A, in wenigen Ausnahmefällen liegt das lokale Maximum etwas höher. Die Form der einzelnen Schleifen ist jedoch unterschiedlich, abhängig davon, bei welchem Werteniveau des Vorlaufwinkels der jeweilige Verdichtungsschritt abgebrochen wurde. In der Betriebsphase Überdrücken gilt allerdings bei sämtlichen Verdichtungsschritten: je niedriger der Vorlaufwinkel ist, desto niedriger ist auch die Stromaufnahme des Rüttlermotors.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die Stromaufnahme des Rüttlermotors vom Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers abhängig ist. Der Zusammenhang zwischen der Strom-

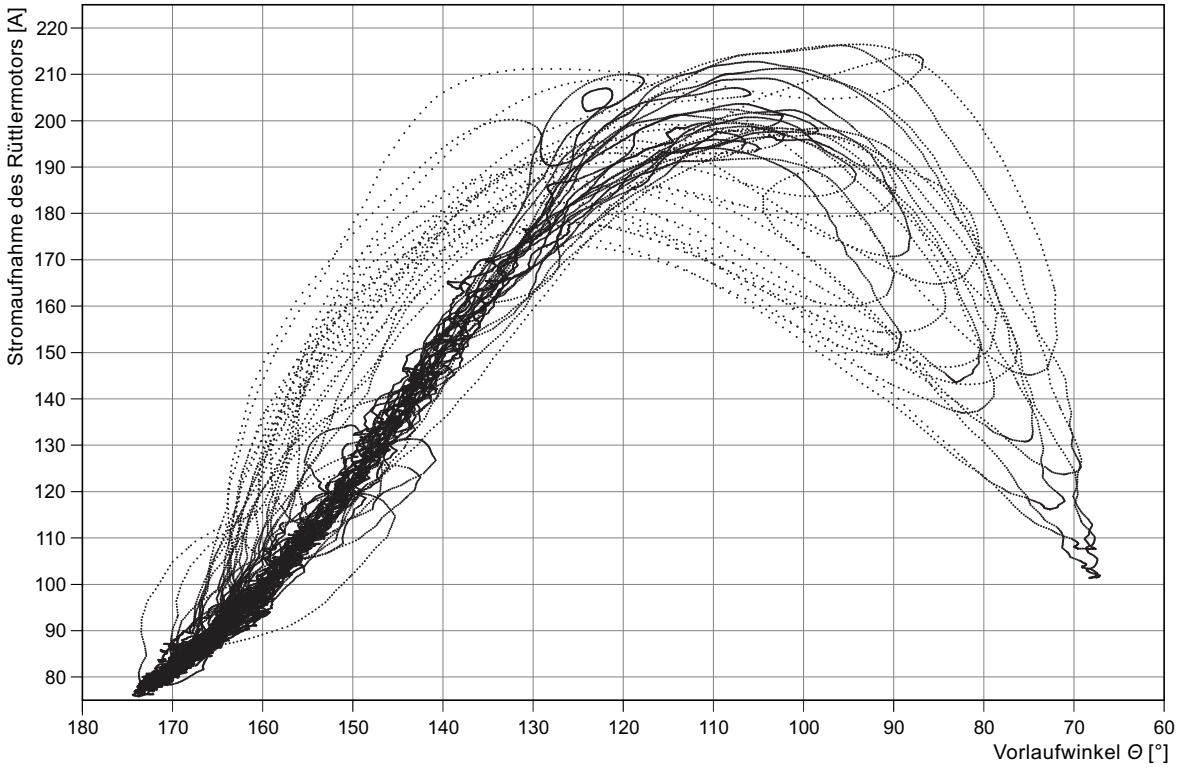


Abbildung 8.9: Stromaufnahme in Abhängigkeit vom Vorlaufwinkel während eines Verdichtungsversuchs im nicht-standardmäßigen Rüttlerbetrieb [100].

aufnahme und dem Vorlaufwinkel ist besonders stark ausgeprägt. Darüber hinaus konnte der Einfluss der Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden ebenfalls aufgezeigt werden. Diese spielt hierbei – analog zum Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers – ebenfalls eine maßgebliche Rolle. Bei erhöhter Kontaktspannung ist ein deutlicher Unterschied im Verhalten erkennbar als im standardmäßigen Betrieb, wo die Kontaktspannung vergleichsweise niedrig ist. Das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers ändert sich mit fortschreitender Verdichtung des Bodens, es ist daher vom aktuellen Verdichtungszustand des Bodens beeinflusst. Da die Stromaufnahme des Rüttlermotors in engem Zusammenhang mit dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers steht, ist diese als indirekter Indikator für den aktuellen Verdichtungszustand des Bodens anzusehen.

8.4 Zusammenhang zwischen Stromaufnahme und der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit

Das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers ist vom aktuellen Verdichtungszustand des Bodens beeinflusst, mit fortschreitender Verdichtung ändert sich die Rüttlerbewegung im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte periodisch. Durch die Gegenüberstellung der Rüttlerbewegung und der maßgeblichen Prozesse im zu verdichtenden Boden konnte jedoch gezeigt werden, dass eine Betrachtung des Bewegungsverhaltens an sich nicht ausreichend ist, um klare Aussagen über den Verdichtungserfolg zu formulieren (siehe Abschnitt 6.8).

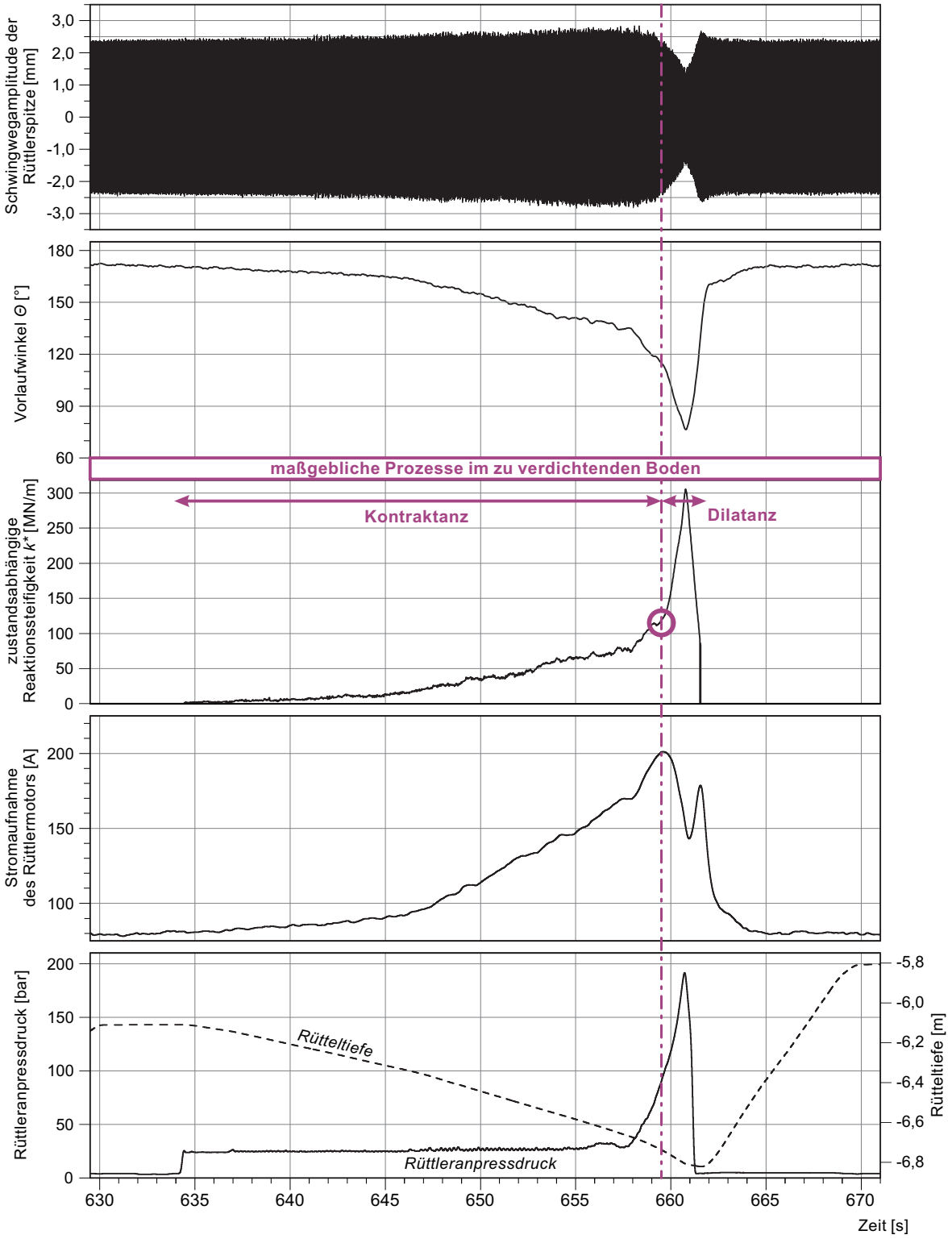


Abbildung 8.10: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit, Stromaufnahme des Rüttlermotors, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe während eines Verdichtungsversuchs des in Abbildung 8.6 dargestellten Verdichtungsversuchs mit den maßgeblichen Prozessen im zu verdichtenden Boden.

Die auf Basis des Bewegungsverhaltens ermittelte zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit k^* indiziert zwar die aktuelle Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens, sie kann trotzdem als Indikator für den Verdichtungszustand des Bodens angewendet werden. Ihre Interpretation aus bodenmechanischer Sicht ermöglicht eine Abgrenzung der wesentlichen bodenphysikalischen Prozesse im zu verdichtenden Boden und die Formulierung von Aussagen über den Verdichtungszustand. Aus diesem Grund ist die Untersuchung des Zusammenhanges zwischen Stromaufnahme des Rüttlermotors und der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit von besonderem Interesse, welcher im Folgenden betrachtet wird.

Die Gegenüberstellung der Stromaufnahme des Rüttlermotors und der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit erfolgt anhand dem in Abschnitt 8.3.2 betrachteten Verdichtungsschritt (siehe Abbildung 8.10). An dieser Stelle wird zusätzlich zu den bereits dargestellten Parametern der zeitliche Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit angeführt. Es sind dabei die maßgeblichen Prozesse im zu verdichtenden Boden ebenfalls gekennzeichnet.

In Abschnitt 6.7.2.4 ist eine vereinfachte Arbeitshypothese zur Erklärung der Erhöhung der Bodensteifigkeit zufolge Rütteldruckverdichtung im Pilgerschrittverfahren gezeigt. Dabei sind die einzelnen Verdichtungsschritte auf Bereiche mit unterschiedlichem Verhalten unterteilt. Zu Beginn der Verdichtungsschritte trägt primär die Abminderung des Porenvolumens (Kontraktanz) im zu verdichtenden Boden zur Erhöhung seiner Steifigkeit bei. Kann das Porenvolumen nicht weiter reduziert werden, zeigt der Boden dilatantes Verhalten bei behinderter Seitendehnung und ist demzufolge nur mehr die sukzessive ansteigende Spannung im Korngerüst für die Erhöhung der Bodensteifigkeit verantwortlich.

Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Prozessen besteht darin, dass die Kontraktanz im zu verdichtenden Boden einen irreversiblen Vorgang darstellt, die Erhöhung der Steifigkeit zufolge des dilatanten Verhaltens ist vorübergehend und leistet daher keinen Beitrag zur Verdichtung. Folglich ist der Übergang von Kontraktanz zu Dilatanz von großer Bedeutung, da dieser das Maximum erzielbare Verdichtungswirkung im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte darstellt. Dieser ist in Abbildung 8.10 mit violettem Ring bzw. mit violetter strichlierten Linie markiert.

Abbildung 8.10 ist zu entnehmen, dass bei Kontraktanz mit zunehmender Rütteltiefe sowohl die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit als auch Stromaufnahme des Rüttlermotors steigt. Das lokale Maximum der Stromaufnahme zeigt sich in der unmittelbaren Nähe des Übergangs zwischen Kontraktanz und Dilatanz. Bei ihrem lokalen Maximum bleibt die Stromaufnahme für eine kurze Zeitspanne annähernd konstant. Bei Dilatanz steigt die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit weiter, ihr Gradient ist deutlich höher als bei Kontraktanz. Dabei verringert sich aber die Stromaufnahme und erreicht ihr lokales Minimum etwa dort, wo die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit am größten ist. Diese Stelle entspricht etwa dem lokalen Minimum der Schwingwegamplitude und des Vorlaufwinkels sowie dem lokalen Maximum des Rüttleranpressdrucks (vgl. Abbildung 8.6).

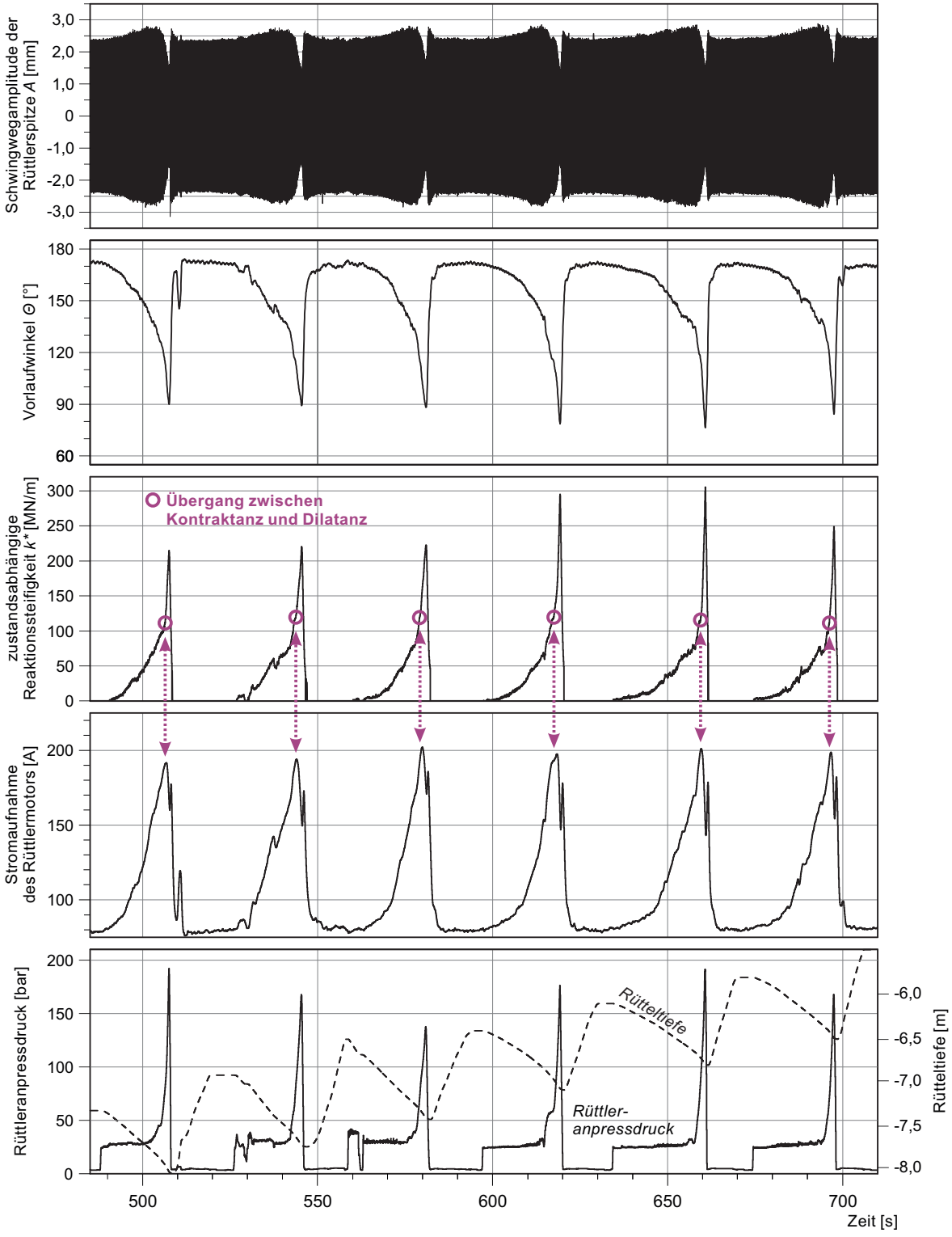


Abbildung 8.11: Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit, Stromaufnahme des Rüttlermotors, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe während einer etwa 2,0 m langen Verdichtungsstrecke des in Abbildung 8.6 dargestellten Verdichtungsversuchs. Die violetten Pfeile kennzeichnen den Zusammenhang zwischen der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und der Stromaufnahme des Rüttlermotors.

In Abbildung 8.11 sind mehrere Verdichtungsschritte aus dem oben diskutierten Verdichtungsversuch dargestellt. Es sind dabei die gleichen Größen wie in Abbildung 8.10 angeführt. Im zeitlichen Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit ist der Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz bei den einzelnen Verdichtungsschritten mit einem violetten Ring gekennzeichnet. Wie in Abschnitt 6.7.2.4 diskutiert, ist die zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörige zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit in der Bandbreite zwischen etwa $k^* = 100$ und 130 MN/m identifizierbar. Durch die Gegenüberstellung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und der Stromaufnahme wird hierbei eine ähnliche Tendenz deutlich wie beim in Abbildung 8.10 betrachteten Verdichtungsschritt. Bei Kontraktanz, bei der die Erhöhung der Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens primär durch die Verringerung des Porenvolumens hervorgerufen wird, steigen sowohl die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit als auch die Stromaufnahme mit zunehmender Rütteltiefe an. Demgegenüber ist bei Dilatanz eine sinkende Stromaufnahme bei zunehmender zustandsabhängiger Reaktionssteifigkeit wahrzunehmen. Hierbei kann zudem beobachtet werden, dass die lokalen Maxima in der Stromaufnahme sich etwa beim Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz ausbilden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 8.10 mit violetten Pfeilen gekennzeichnet.

Im Bereich des dilatanten Verhaltens wird das Bewegungsverhalten des Rüttlerkörpers aufgrund der zunehmenden Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens bzw. der hohen Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden maßgeblich beeinflusst. Nach dem Erreichen des Übergangs zwischen Kontraktanz und Dilatanz wird der Rüttler in seiner Bewegung zunehmend behindert. Der Übergang zwischen kontraktantem und dilatantem Verhalten ist offensichtlich im Zusammenhang mit der Stromaufnahme des Rüttlermotors von besonderer Bedeutung, da die Verspannung der Einzelkörner im Korngerüst zur Behinderung der Rüttlerbewegung und in weiterer Folge zur Verringerung der Stromaufnahme des Motors führt. Dieses Verhalten verstärkt sich sukzessive mit zunehmender Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden. Dieser Umstand führt zu einer Verringerung der Stromaufnahme beim eingesetzten elektrisch angetriebenen Rüttlermotor. Wäre die Bewegung des Rüttlerkörpers vom umgebenden Boden theoretisch komplett verhindert, würde die Stromaufnahme voraussichtlich auf das Werteniveau des Leerlaufstroms absinken. Dieser Zustand stellte sich allerdings im Zuge der gegenständlichen Untersuchungen nicht ein und konnte daher nicht beobachtet werden.

Um den Zusammenhang zwischen der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und der Stromaufnahme des Rüttlermotors besser erkennen zu können, ist die Stromaufnahme über der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit für sämtliche Verdichtungsschritte des betrachteten Verdichtungsversuchs aufgetragen (siehe Abbildung 8.12). Die zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörige zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit, die bei diesem Versuch zwischen etwa $k^* = 100$ und 130 MN/m definierbar ist, kennzeichnet der violette Balken. In dieser Darstellung ergeben sich – analog zum Zusammenhang zwischen Vorlaufwinkel und Stromaufnahme (siehe Abschnitt 8.3) – schleifenförmige Kurven. Der in Abbildung 8.7 betrachtete Verdichtungsschritt ist dabei mit roter Farbe markiert.

Es ist dabei ersichtlich, dass der Zusammenhang zwischen der zustandsabhängigen Re-

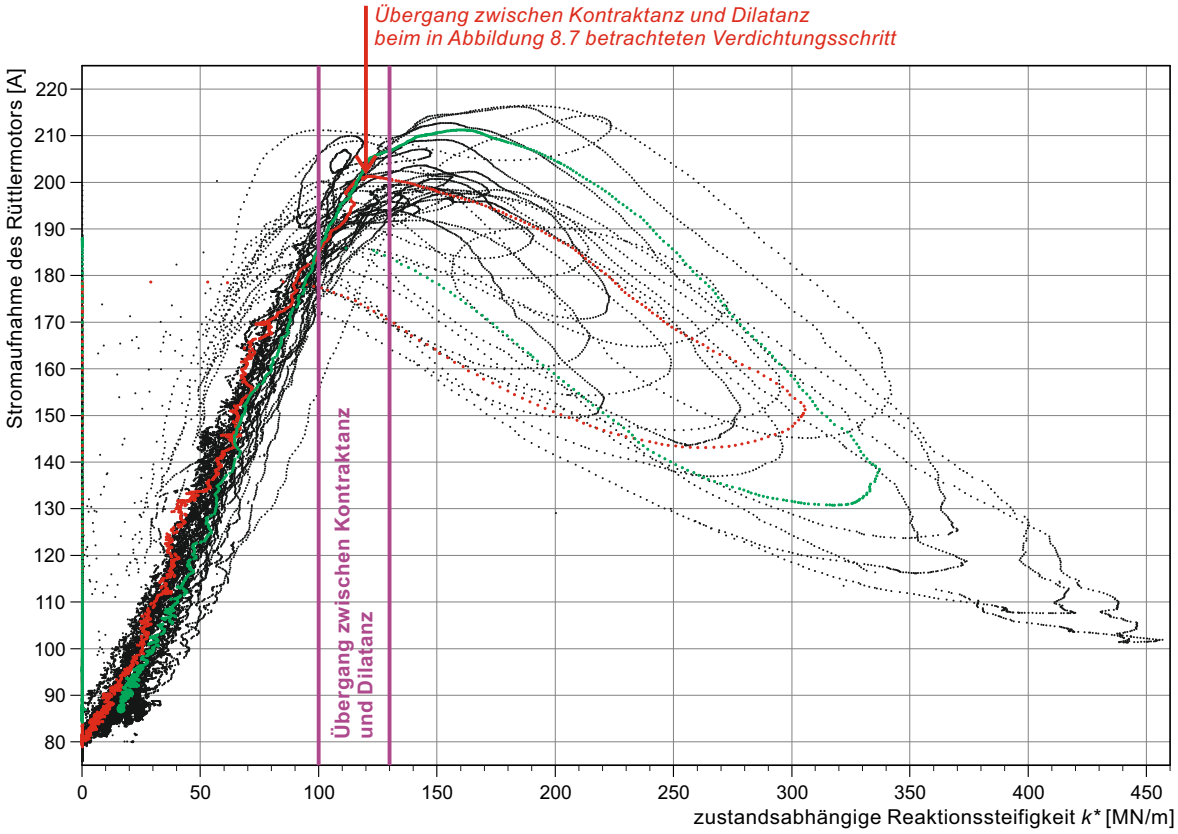


Abbildung 8.12: Stromaufnahme in Abhängigkeit von der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit während eines Verdichtungsversuchs im nicht-standardmäßigen Rüttlerbetrieb mit den maßgeblichen Prozessen im zu verdichtenden Boden; Kontraktanz und Dilatanz.

aktionssteifigkeit und der Stromaufnahme bei Kontraktanz annähernd linear ist, mit zunehmender zustandsabhängiger Reaktionssteifigkeit steigt die Stromaufnahme. Weiters spricht die Ähnlichkeit der einzelnen Kurven in diesem Bereich für eine hohe Reproduzierbarkeit des Zusammenhanges bei Kontraktanz. Nach dem Erreichen des Übergangs zwischen Kontraktanz und Dilatanz ist der Zusammenhang zwischen den beiden Parametern weder linear, noch ist die hohe Reproduzierbarkeit vorhanden. Die lokalen Maxima in den einzelnen Schleifen bilden sich bei zahlreichen Verdichtungsschritten – wie beim betrachteten Verdichtungsschritt – im Übergangsbereich zwischen Kontraktanz und Dilatanz aus. Bei anderen Verdichtungsschritten sind diese bei Dilatanz ersichtlich. Diese Verdichtungsschritte sind tendenziell durch eine höhere maximale Stromaufnahme gekennzeichnet. Da sich die Stromaufnahme bei ihrem lokalen Maximum in einer kurzen Zeitspanne erst geringfügig ändert und die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit bei Dilatanz rasch zunimmt, verlaufen die Schleifen mit ihren lokalen Maxima bei Dilatanz tendenziell flacher. Ein derartiger Verdichtungsschritt ist in Abbildung 8.12 exemplarisch mit grüner Farbe hervorgehoben. Anschließend verringert sich die Stromaufnahme bei zunehmender zustandsabhängiger Reaktionssteifigkeit. Nach Beendigung des jeweiligen Verdichtungsschrittes sinkt die Stromaufnahme tendenziell noch geringfügig weiter, bei sinkender zustandsabhängiger Reaktionssteifigkeit steigt sie kurzfristig an und sinkt anschließend wieder auf das ursprüngliche

Niveau ab.

In Abbildung 8.13 ist – analog zur Abbildung 8.12 – die Stromaufnahme über der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit für sämtliche Verdichtungsschritte des in Abschnitt 8.3.1 betrachteten Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb dargestellt. Der zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörige zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit, zwischen etwa $k^* = 100$ und 130 MN/m ist an dieser Stelle ebenfalls mit violetten Balken gekennzeichnet. Ein beliebiger Verdichtungsschritt trägt die Farbe grün.

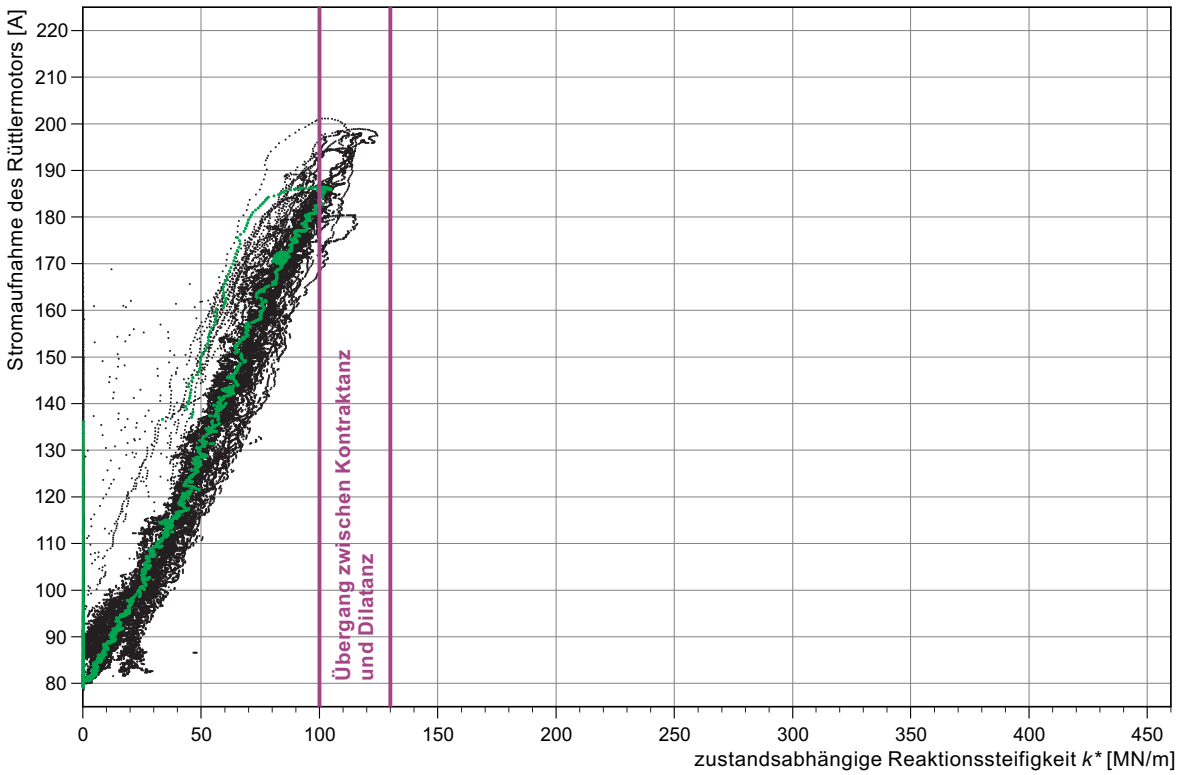


Abbildung 8.13: Stromaufnahme in Abhängigkeit von der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit während eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb mit den maßgeblichen Prozessen im zu verdichtenden Boden.

Hierbei ist der bereits diskutierte annähend lineare Zusammenhang zwischen der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und der Stromaufnahme des Rüttlermotors auch gegeben, welcher bei Kontraktanz mit jenem beim oben beschriebenen Verdichtungsversuch prinzipiell identisch ist. Weiters ist die hohe Reproduzierbarkeit auch anhand dieser Versuchsergebnisse erkennbar. Aufgrund der frühzeitigen Beendigung der Verdichtungsschritte bleibt hierbei die Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden vergleichsweise niedrig, die zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörige zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit wird kaum überschritten.

8.5 Kontrolle der Verdichtung unmittelbar über die Stromaufnahme des Rüttlermotors

Die oben diskutierten Auswertungsergebnisse zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Stromaufnahme des Rüttlermotors und der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit. Dieser Zusammenhang ist bei Kontraktanz, bei der die Erhöhung der Bodensteifigkeit primär auf die Verringerung des Porenvolumens zurückzuführen ist, besonders stark ausgeprägt. Dies bedeutet, dass ein bestimmtes Werteniveau der Stromaufnahme einer bestimmten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit entspricht. Anhand der gegenständlichen Untersuchungsergebnisse zeigt sich somit das mögliche Potenzial für die Anwendung der Stromaufnahme des Rüttlermotors als indirekter Indikator für die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit. In weiterer Folge könnte somit durch die Beobachtung der Stromaufnahme des Rüttlermotors das Erreichen des möglichen Verdichtungspotenzials beim jeweiligen Verdichtungsschritt angekündigt werden. Die Stromaufnahme des Rüttlermotors könnte dadurch ergänzend zur zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit grundsätzlich ein effizientes Werkzeug bei der Kontrolle der Verdichtungsarbeiten darstellen.

Es sei jedoch an dieser Stelle angemerkt, dass die oben diskutierten Zusammenhänge zwischen der Stromaufnahme und dem Verdichtungserfolg in Form der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit aus heutiger Sicht ausschließlich für die Randbedingungen der experimentellen Untersuchungen, für den angewendeten Tiefenrüttler und für die untersuchte Bodenart als gültig anzusehen sind. Eine direkte Übertragung dieser auf beliebige Boden-Rüttler Kombinationen ist nicht möglich. Zur Formulierung allgemeingültiger Zusammenhänge sind weitere Untersuchungen unter abweichenden Randbedingungen erforderlich. Um diese aufschließen zu können, ist die messtechnische Erfassung des Bewegungsverhaltens mit einer zeitsynchronen Aufzeichnung der Stromaufnahme zwingend erforderlich. Es empfiehlt sich im Zuge derartiger Untersuchungen spezielle Leistungsanalysatoren zu verwenden, welche eine Untersuchung des genauen zeitlichen Verlaufs der Leistungsaufnahme und dadurch tiefere Einblicke in das Verhalten des Rüttlermotors während der Verdichtung erlauben.

Des Weiteren empfiehlt es sich, die mechanische Leistung des schwingenden Rüttlerkörpers rechnerisch zu bestimmen und diese der Leistung des Rüttlermotors gegenüberzustellen, wie dies exemplarisch bereits in Abbildung 8.8 erfolgt ist. Die mechanische Leistung ist die aus Sicht der Verdichtungswirkung relevante Größe. Die Ermittlung der mechanischen Leistung kann auf Basis des in dieser Arbeit gewählten Modellierungsansatzes erfolgen. Bei der Gegenüberstellung der elektrischen und mechanischen Leistung sind jedoch die Energieverluste im Elektromotor zu berücksichtigen. Die Quantifizierung der Energieverluste erfordert gezielte Untersuchungen und gegebenenfalls spezielle Messausrüstung.

Darüber hinaus ist zur richtigen Interpretation der Messergebnisse eine Identifizierung der wesentlichen physikalischen Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem notwendig.

Kapitel 9

Veränderung dynamischer Bodenkenngrößen zufolge der Rütteldruckverdichtung

9.1 Einführung

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen auf dem Versuchsfeld in Fisching kam die seismische Drucksonde (SCPTu) zur Bestimmung von dynamischen Bodeneigenschaften zur Anwendung. Wellenlaufgeschwindigkeiten wurden sowohl im verdichteten als auch im unverdichteten Bodenbereich messtechnisch erfasst und auf Basis der gemessenen Scherwellengeschwindigkeit die Schubmoduln für die beiden Bodenbereiche berechnet. Das angewendete Verfahren ermöglicht es, den Schubmodul bei klar definierten Dehnungsamplituden im Bereich von sehr kleinen Dehnungen zu bestimmen. Ziel dieser Untersuchungen war, durch die Gegenüberstellung der Wellenlaufgeschwindigkeiten sowie der Schubmoduln im verdichteten und unverdichteten Boden die Auswirkung der Rütteldruckverdichtung auf dynamischen Bodenkenngrößen zu untersuchen.

Das gegenständliche Kapitel beschäftigt sich mit den Untersuchungen mittels seismischer Drucksonde. Nach einer Vorstellung des Verfahrens erfolgt die Vorstellung der Durchführung und Auswertung der Versuche sowie die Diskussion der Auswertungsergebnisse.

9.2 Anwendung von Bohrlochseismik zur Kontrolle von Bodenverbesserungsarbeiten

Wie in Abschnitt 3.2.3 anhand von Anwendungsbeispielen gezeigt, kamen seimische Verfahren auf Basis der Analyse von Oberflächenwellen (*SASW* und *MASW*) erfolgreich bei der Kontrolle des Verdichtungserfolgs von Tiefenverdichtungsverfahren zum Einsatz. Bohrlochseismik findet ebenfalls bei der Kontrolle von Bodenverbesserungsarbeiten ihre Anwendung. Ausgewählte Anwendungsbeispiele sind im Folgenden Gegenstand der Betrachtung.

Bohrlochseismik ist in der Regel bei geotechnischen Fragestellungen unter den geophy-

sikalischen Untergrunderkundungsverfahren als eine sehr zuverlässige Methode angesehen. Die verschiedenen Verfahren sind jedoch generell sehr arbeitsaufwendig und kostenintensiv. In den letzten Jahren finden Alternativmethoden, wie beispielsweise die seismische Drucksondierung (SCPTu) oder das seismische Dilatometer (SDTM) aufgrund der schnelleren und einfacheren Versuchsdurchführung zunehmend ihre Anwendung bei geotechnischen Untersuchungen. Obwohl bei der seismischen Drucksondierung zur Versuchsdurchführung kein Bohrloch erforderlich ist, ordnet man das Verfahren in der Fachliteratur, beispielsweise bei *Jamiolkowski et al.* [61], aufgrund des ähnlichen Untersuchungsprinzips der Bohrlochseismik zu.

Die klassischen Verfahren der Bohrlochseismik, wie die Crosshole- und Downhole- Untersuchungen erfordern meist aufwendige Geräte bzw. komplexes Untersuchungsprozedere und werden deshalb nur selten eingesetzt. Bei der Kontrolle des Verdichtungserfolgs von Tiefenverdichtungsarbeiten finden diese Methoden kaum ihre Anwendung. Es sind jedoch in der Fachliteratur Anwendungsbeispiele vorzufinden.

Massarsch [89] untersuchte die Veränderung der Scherwellengeschwindigkeit im Sand zufolge von Resonanzverdichtung[1]. Dabei kam das Crosshole-Verfahren zur Anwendung. Er stellte eine Erhöhung der Scherwellengeschwindigkeit in Folge der Tiefenverdichtung etwa um den Faktor 1, 4 bis 1, 6 fest (siehe Abbildung 9.1).

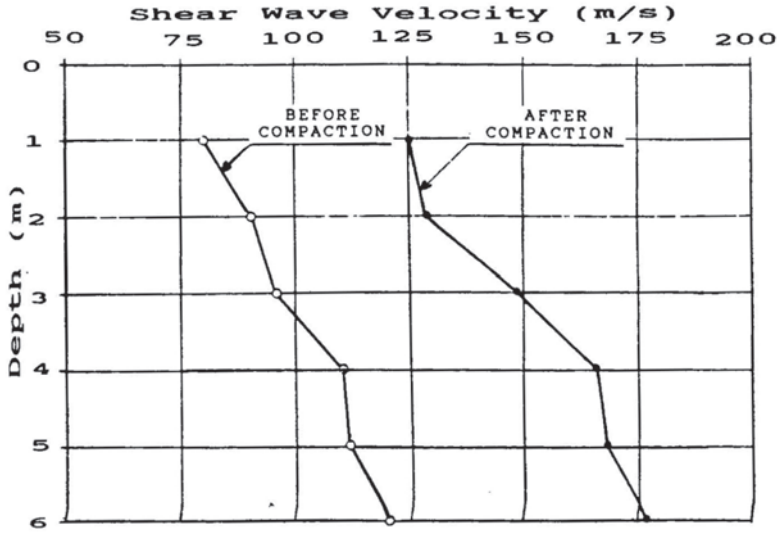


Abbildung 9.1: Erhöhung der Scherwellengeschwindigkeit zufolge von Resonanzverdichtung im Sand [89].

Wehr [144] berichtet über die Anwendung von Crosshole-Untersuchungen zur Kontrolle von Bodenverbesserungsarbeiten in einer setzungsgefährdeten Kippe bei Leipzig. Auf dem Testfeld verbesserte man inhomogenen, bindigen Untergrund mittels Rüttelstopfverfahren (RSV) mit Flugasche als Einbaumaterial. Im Zuge der Crosshole-Untersuchungen wurden Messungen in zwei Tiefenstufen, in drei Messrichtungen vor und nach der Installation der

[1]Diese Methode ist auch unter den Namen Vibro-Wing-Methode oder MRC-Methode (Müller Resonant Compaction) bekannt. Eine Beschreibung des Verfahrens ist Abschnitt 2.2.2 zu entnehmen.

Rüttelstopfsäulen durchgeführt. Es war dabei ein signifikanter Anstieg der Scherwellengeschwindigkeit infolge der Bodenverbesserungsarbeiten festzustellen (siehe Tabelle 9.1). Ergebnisse von zusätzlichen Resonant Column Versuchen im Labor verifizierten die Messergebnisse der Bohrlochseismik.

Tabelle 9.1: Scherwellengeschwindigkeit vor und nach Bodenverbesserung mittels Rüttelstopfverfahren (RSV) [144] (Auszug).

Messrichtung	**Messtiefe** [m]	**v_s vor RSV** [m/s]	**v_s nach RSV** [m/s]
1	3	177,1	237,3
2	3	179,6	222,3
3	3	179,3	244,2

Massarsch [86] wendete das Downhole-Verfahren zur Betrachtung der Steifigkeitsentwicklung[2] in bindemittelstabilisierten weichen bindigen Böden erfolgreich an. Durch die messtechnische Erfassung der Scherwellengeschwindigkeit in unterschiedlichen Zeitpunkten nach der Bodenverbesserung konnte dabei eine Erhöhung der Bodensteifigkeit im Feld nachgewiesen und im Labor durch Untersuchungen mittels Bender Elementen verifiziert werden (siehe Abbildung 9.2).

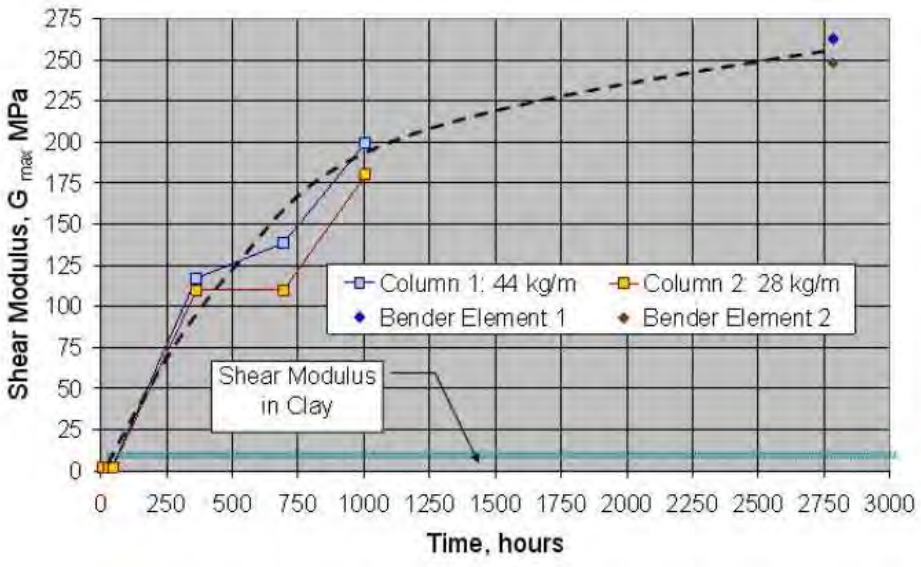


Abbildung 9.2: Ermittlung der Steifigkeitsentwicklung von bindemittelstabilisierten weichen bindigen Böden mittels Downhole-Verfahren und Bender Elementen [86].

[2]Hierbei handelt es sich um die Schubsteifigkeit bei sehr kleinen Dehungen, welche in der Literatur als G_{max} oder als G_0 bezeichnet wird.

9.3 Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde

9.3.1 Grundprinzip der seismischen Drucksondierung (SCPTu)

Bei der seismischen Drucksondierung SCPTu (Seismic Cone Penetration Test with pore pressure u) wird zusätzlich zur herkömmlichen CPTu Drucksondierung nach dem Prinzip des Downhole Tests das Kompressions- und Scherwellengeschwindigkeitsprofil im Untergrund ermittelt [29]. Die Verfahrensbeschreibung der herkömmlichen CPTu Drucksondierung, mit besonderem Augenmerk auf ihre Anwendbarkeit für Verdichtungskontrolle bei der Tiefenverdichtung, ist Kapitel 3 zu entnehmen. Im Folgenden wird das Grundprinzip der seismischen Drucksondierung erläutert und die wichtigsten Unterschiede zu den Crosshole- und Downhole-Untersuchungen aufgezeigt.

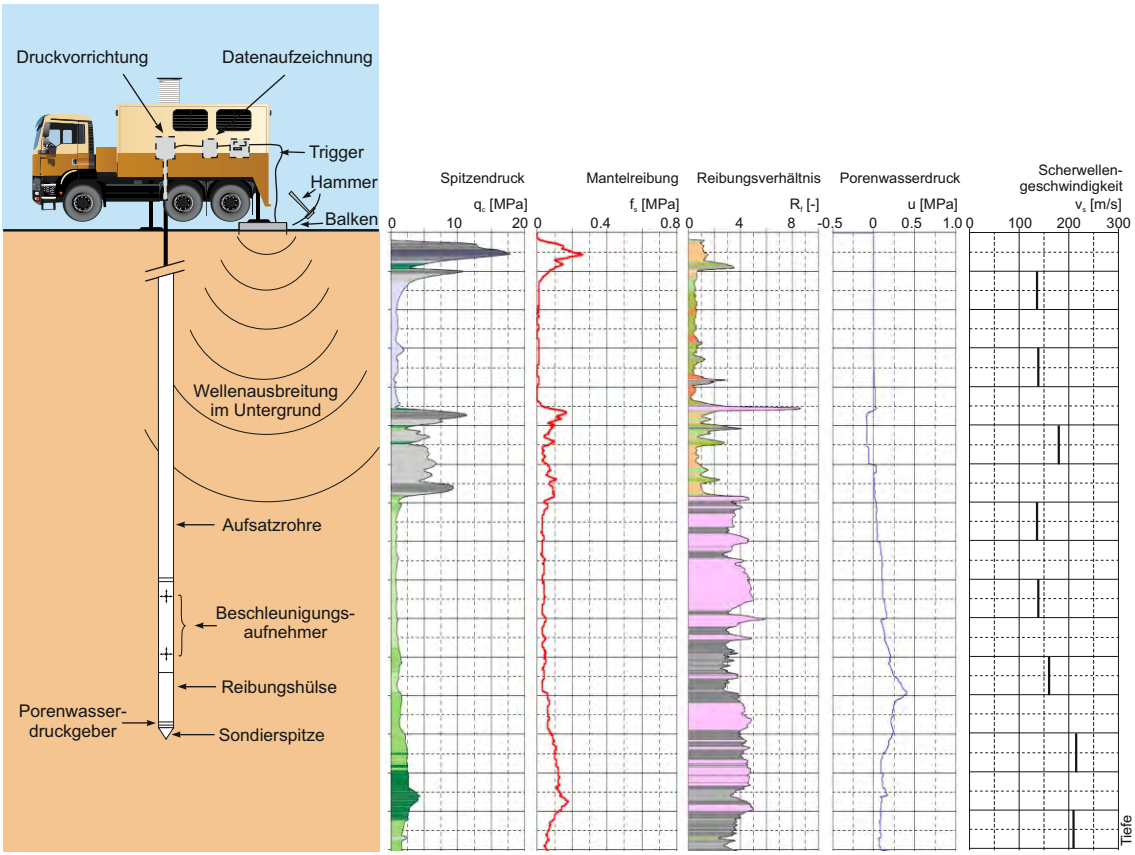


Abbildung 9.3: Qualitative Darstellung der Messergebnisse einer seismischen Drucksondierung SCPTu; Spitzendruck q_c, Mantelreibung f_s, Reibungsverhältnis R_f, lokaler Porenwasserdruck u und Scherwellengeschwindigkeit v_s (adaptiert nach [48]).

9.3.1.1 Gegenüberstellung der klassischen Bohrlochseismik und der seismischen Drucksondierung

Am häufigsten konnte sich in den vergangenen Jahrzehnten, bei geotechnischen Fragestellungen das Crosshole-Verfahren durchsetzten. Sie erlaubt eine zuverlässige Ermittlung der Wellenlaufgeschwindigkeit und dadurch die Bodensteifigkeit in jeder Tiefenlage. Zu einer

Crosshole-Messung sind mindestens zwei Bohrlöcher notwendig. Ab einem bestimmten Abstand der Bohrlöcher ist keine zuverlässige Signalerfassung möglich. Der maximale Abstand der Bohrlöcher ist durch die Eigenschaften des zu untersuchenden Bodens begrenzt. Zur Untersuchung größerer Bodenbereiche sind demzufolge mehrere Bohrlöcher notwendig, was zwangsläufig zur Erhöhung des Zeit- und Kostenaufwandes der Untersuchungen führt. Bei einer Crosshole-Untersuchung sind die Erschütterungsquellen und die Messaufnehmer in den Bohrlöchern positioniert. Dabei spielt die zuverlässige Übertragung der seismischen Wellen zwischen den Messaufnehmern und dem umgebenden Boden eine essentielle Rolle [61].

Bei einer Downhole-Messung sind die Messaufnehmer – analog zur Crosshole-Messung – im Bohrloch eingebaut. Bei diesem Verfahren erzeugt man durch Hammerschlag an der Geländeoberfläche seismische Wellen und registriert die seismischen Messsignale mit den Messaufnehmern in der Tiefe. Gegenüber dem Crosshole-Verfahren erfolgt hierbei die Wellenausbreitung in vertikaler Richtung. Crosshole- und Downhole-Messungen lassen sich idealerweise kombinieren.

Der Grundprinzip des Downhole-Verfahrens und einer seismischen Drucksondierung ist sehr ähnlich. Durch Hammerschlag an der Geländeoberfläche werden seismische Wellen erzeugt und mit Messaufnehmern Messsignale in der Tiefe registriert. Bei einem Downhole Test sind die Aufnehmer im Bohrloch eingebaut, bei der seismischen Drucksonde sind diese in der Sondierspitze installiert. Die Versuchsdurchführung ist bei einer seismischen Drucksondierung dadurch wesentlich einfacher, schneller und kostengünstiger als bei der Downhole-Untersuchung. Für eine seismische Drucksondierung ist kein Bohrloch notwendig, die in der Sondierspitze eingebauten Messaufnehmer werden mit der Sonde bewegt. Mittels seismischen Drucksonden lassen sich auch Crosshole-Messungen durchführen [76]. Bei der seismischen Drucksondierung ist die kraftschlüssige Verbindung und damit die zuverlässige Übertragung von seismischen Wellen zwischen dem umgebenden Boden und den in der Sondierspitze eingebauten Messaufnehmern gegeben [28].

Bohrlöcher sind vor Durchführung von den Crosshole- und Downhole- Untersuchungen sorgfältig zu vermessen, die eventuellen Abweichungen von der Vertikalen sind genau zu bestimmen und anschließend bei der Datenauswertung zu berücksichtigen. Bei der seismischen Drucksondierung erfolgt die Bestimmung der Abweichung der Sondierspitze von der Vertikalen automatisch während des Sondiervorgangs. Die während des Abteufens der Sondierspitze kontinuierlich aufgezeichneten herkömmlichen CPTu-Messdaten (Spitzendruck q_c, Mantelreibung f_s, Reibungsverhältnis R_f, lokaler Porenwasserdruck u) enthalten über dem Scherwellengeschwindigkeitsprofil hinaus zusätzliche wertvolle Informationen über die mechanischen Eigenschaften des Bodens und können als Interpretationshilfe bei der Auswertung der Untersuchungsergebnisse dienen.

9.3.2 Ermittlung des Scherwellengeschwindigkeitsprofils im verdichteten und unverdichteten Boden

Sämtliche Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde wurden im Rahmen der experimentelle Untersuchungen in Fisching auf dem Testfeld *SCPT* (vgl. Abschnitt 4.6.2) durchgeführt. Auf diesem Testfeld untersuchte man – gegenüber den Testfeldern *A*, *B* und *C* (vgl. Abschnitt 7.3) – keine zusammenhängenden verdichteten Bereiche, sondern nur einzelne Verdichtungsstrecken. Das Ziel der seismischen Drucksondierungen war es, die Wellenlaufgeschwindigkeiten durch den verdichteten Bodenbereich zu ermitteln und diese jenen im ungestörten Boden gegenüberzustellen.

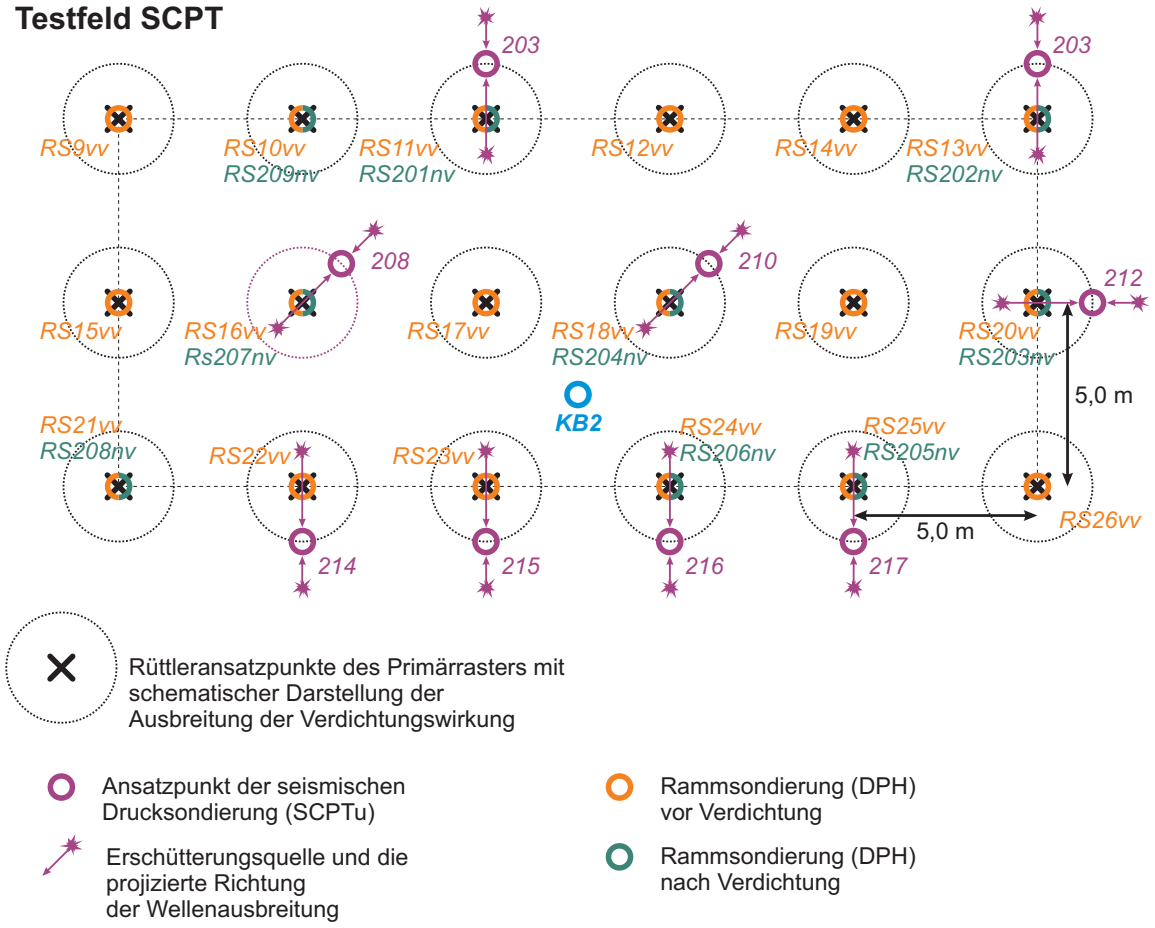


Abbildung 9.4: Anordnung der Rüttler- und Sondieransatzpunkte auf dem Testfeld *SCPT*. Die Ansatzpunkte der seismischen Drucksonde sowie die Position der Erschütterungsquellen und die projizierte Richtung der Wellenausbreitung sind mit violetter Farbe gekennzeichnet.

Um einzelne Verdichtungsstrecken untersuchen zu können, wurden die Rüttleransatzpunkte auf dem Testfeld *SCPT* im Rechteckraster in einem Abstand von 5,0 m voneinander angeordnet. Die Herstellung eines zusammenhängenden verdichteten Bodenbereichs kann bei diesem Abstand der Rüttleransatzpunkte mit dem angewendeten Rüttler ausgeschlossen werden (vgl. Abschnitt 7.3). Abbildung 9.4 verdeutlicht die Anordnung der Rüttler- und Sondieransatzpunkte auf dem Testfeld *SCPT*. Die Ansatzpunkte der seismischen Druckson-

de sowie die Position der Erschütterungsquellen und die projizierte Richtung der Wellenausbreitung sind mit violetter Farbe gekennzeichnet.

Sondierungen zur Kontrolle von Verdichtungsarbeiten führt man in der Regel vor und nach den Verdichtungsarbeiten, in zwei Untersuchungskampagnen durch. Anschließend erfolgt eine Gegenüberstellung der Sonderergebnisse (siehe Kapitel 3). Im Gegensatz dazu wurden die Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde im gegenständlichen Fall in einer einzigen Untersuchungskampagne, nach dem Abschluss der Verdichtungsversuche abgewickelt, welche wesentliche Vorteile mit sich brachte. Es war dadurch möglich, während eines Sondiervorgangs Messungen im unverdichteten und verdichteten Boden durchzuführen und damit die Eigenschaften des Ausgangsbodens und des behandelten Bodens lokal zu vergleichen. Durch die adaptierte Versuchsdurchführung reduzierte sich der Zeitaufwand der Untersuchungen. Weiters garantierte die Messung während eines Sondiervorgangs eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse.

(a) Anordnung der Verdichtungsstrecken auf dem Testfeld *SCPT*.

(b) Auslösen von Erschütterungen mit horizontalem Hammerschlag auf einen Stahlbalken.

Abbildung 9.5: Durchführung der Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde.

Im Zuge der Versuchsdurchführung teufte man die seismische Drucksonde bei sämtlichen Verdichtungspunkten in einem Abstand von etwa 1,5 bis 1,7 m vom jeweiligen Rüttleransatzpunkt ab. Die Sondierspitze wurde in Tiefenintervallen von 1,0 m positioniert, auf der Geländeoberfläche wurden Erschütterungen mittels horizontalen Hammerschlags auf einen Stahlbalken ausgelöst (siehe Abbildung 9.5b) und die Messsignale mit den Messaufnehmern in der Sondierspitze aufgezeichnet. Die Versuchsdurchführung wurde gegenüber der standardmäßigen seismischen Drucksondierung leicht modifiziert, es wurden Erschütterungen nicht nur auf einer, sondern auf zwei Positionen an der Geländeoberfläche ausgelöst. Die Anordnung der Erschütterungsquellen wählte man so, dass die Ermittlung der Scherwellengeschwindigkeit im verdichteten und im unverdichteten Boden bei der jeweiligen Messtiefe möglich war. Die Position der Erschütterungsquellen ist in Abbildung 9.4 angeführt. Abbildung 9.6 zeigt schematisch das Versuchsprinzip bei der seismischen Drucksondierung auf dem Versuchsfeld zur Überprüfung einzelner Verdichtungspunkte. Da der oberflächennahe Bodenbereich sich mit dem Rütteldruckverfahren nicht ideal verdichten lässt, führte man die erste Messung mit der seismischen Drucksonde bei einer Sondiertiefe

von 2,0 m durch. Es wurden im Zuge der seismischen Drucksondierung insgesamt 9 ausgewählte Verdichtungsstrecken untersucht.

Über diese Untersuchungen hinaus führte man an ausgewählten Rüttleransatzpunkten Rammsondierungen jeweils vor und nach der Rütteldruckverdichtung durch. Dabei kam – analog zu den Testfeldern *A*, *B* und *C* – die Schwere Rammsonde (DPH) zur Anwendung. Die Rammsondierungen vor den Verdichtungsarbeiten positionierte man etwa an der Stelle der künftigen Rüttleransatzpunkte, jene nach den Verdichtungsarbeiten in einem Abstand von 0,5 m vom jeweiligen Rüttleransatzpunkt.

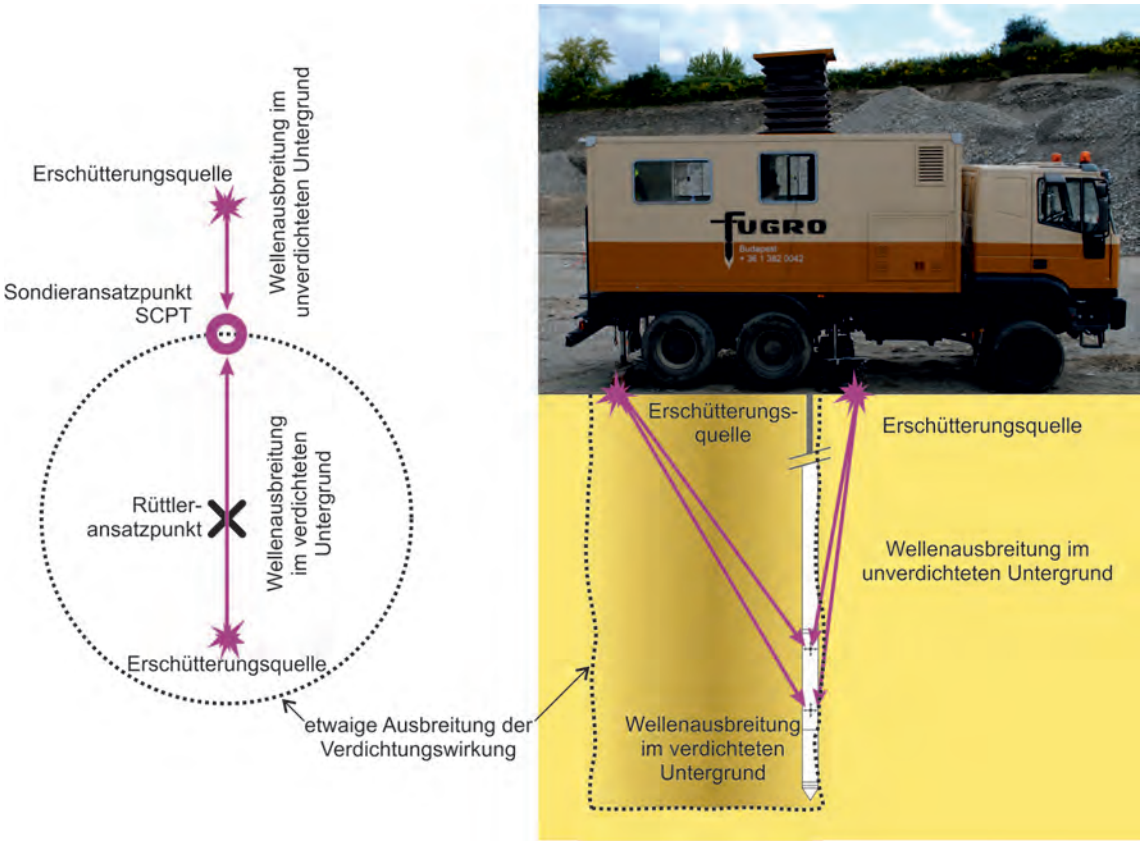


Abbildung 9.6: Versuchsprinzip bei der seismischen Drucksondierung auf dem Versuchsfeld zur Überprüfung einzelner Verdichtungspunkte (adaptiert nach [104]).

Generell gilt, dass die Drucksondierung in bindigen oder organischen Böden bzw. in locker gelagerten grobkörnigen Böden optimal einsetzbar ist. Steifere, zementierte Bodenschichten, große Blöcke oder Findlinge können Erschwernisse beim Abteufen der Sonde darstellen, da ein viel zu großer Spitzenwiderstand beim Antreffen eines Hindernisses im Untergrund mit dem Ausknicken der Sondierstange und dadurch mit dem Verlust der Sondierspitze einhergehen kann. Um Beschädigungen zu vermeiden, werden in der Regel Abbruchkriterien für den Sondiervorgang festgelegt. Gemäß Erfahrungen der ausführenden Firma erwiesen sich die folgenden Kriterien in der Praxis als sinnvoll. Diese kamen auch bei der gegenständlichen Untersuchungen zur Anwendung [125]:

- Spitzenwiderstand $q_c > 60\ MPa$

- Abweichung von der Vertikalen $> 15°$
- plötzlicher Anstieg der Abweichung von der Vertikalen $> 3°$

Aufgrund des zu erwartenden viel zu hohen Spitzenwiderstandes wurde die obere dicht bis sehr dicht gelagerte Deckschicht (vgl. Abschnitt 4.6.3) vor Durchführung der seismischen Drucksondierung an den Stellen der geplanten Sondieransatzpunkte punktuell aufgelockert. Es war geplant, die seismische Drucksonde bei sämtlichen Sondieransatzpunkten mindestens bis zur Verdichtungstiefe von 9,0 m abzuteufen und dynamische Bodeneigenschaften über der gesamten Verdichtungstiefe zu ermitteln. Obwohl das Erreichen der geplanten Sondiertiefe von 9,0 m nicht bei allen Sondieransatzpunkten möglich war, konnte man ausreichend seismische Messungen in verschiedenen Messtiefen durchführen. Trotz der Erschütterungen aus dem laufenden Abbaubetrieb in der Kiesgrube war es möglich Messdaten in hoher Qualität zu sammeln, die in weiterer Folge eine wertvolle Grundlage für die Ermittlung der Scherwellengeschwindigkeitsprofile im Untergrund darstellten.

9.3.3 Auswertung der Messdaten

Beim Auslösen einer transienten Anregung an der Geländeoberfläche – im gegenständlichen Fall mittels horizontalen Hammerschlags auf den Stahlbalken – breiten sich Kompressions- und Scherwellen im Untergrund aus [36]. Diese Raumwellen zeichnen die Beschleunigungsaufnehmer in der Sondierspitze auf. Die Scherwellen sind aufgrund ihrer größeren Amplitude in den Messsignalen deutlich stärker ausgeprägt und daher einfacher identifizierbar als die Kompressionswellen. Aus diesen Gründen betrachtet man bei der Auswertung der Messdaten einer seismischen Drucksondierung bevorzugt die Scherwellen.

Bei einer festgelegten Messtiefe wiederholt man den Hammerschlag auf den Stahlbalken mehrfach. Anschließend führt man diese in entgegengesetzter Richtung durch. Damit lassen sich die Scherwellen durch Überlagerung der Signale der beiden Anregungsrichtungen eindeutig identifizieren [142]. Zu einer Verbesserung des Signal- Rauschverhältnisses kommen Registriereinrichtungen zur Anwendung, die es ermöglichen, die Signale aus mehreren Hammerschlägen elektronisch zu überlagern. Diese erfolgt bereits im Zuge der Versuchsdurchführung. Dadurch ist es möglich diese an Ort und Stelle auf Plausibilität zu prüfen und eventuelle Messfehler oder Störungen zu eliminieren. Die Prüfung vor Ort gewährleistet eine hohe Qualität der Messdaten. Im Zuge der Datenauswertung werden die aufgezeichneten Messsignale gemittelt und diese in weiterer Folge zur Ermittlung der Scherwellengeschwindigkeit verwendet.

Die Auswertung der Messdaten einer seismischen Drucksondierung geschieht analog zur Auswertung eines Downhole-Tests. Es stehen dafür unterschiedliche Techniken zur Verfügung. In der Praxis kommt in der Regel entweder die direkte Methode oder die Intervallmethode zur Anwendung [67]. Falls im Zuge der Versuchsdurchführung eine Sondierspitze mit einem Messaufnehmer zur Anwendung kommt, ist die Auswertung der Messsignale lediglich mit der direkten Methode möglich. Die Anwendung einer Sondierspitze mit einem

Messaufnehmer ist heutzutage unüblich, man setzt im Regelfall Sondierspitzen mit zwei Messaufnehmern ein. Derartige Sondierspitzen ermöglichen in jeder Messtiefe eine zuverlässige Ermittlung der Wellenlaufgeschwindigkeit. Zur Auswertung der Messdaten wird in der Regel die Intervallmethode herangezogen. Bei der Intervallmethode bestimmt man die Wellenlaufgeschwindigkeit in der jeweiligen Messtiefe nach folgendem Zusammenhang [27]:

$$v = \frac{R_2 - R_1}{T_2 - T_1} \tag{9.1}$$

Darin bedeuten R_1 und R_2 die Strahlwege[3] zwischen der Erschütterungsquelle und dem oberen bzw. dem unteren Beschleunigungsaufnehmer, T_1 und T_2 die Zeitdauer, die die seismische Welle benötigt, um die Entfernungen R_1 und R_2 zurückzulegen (siehe Abbildung 9.7).

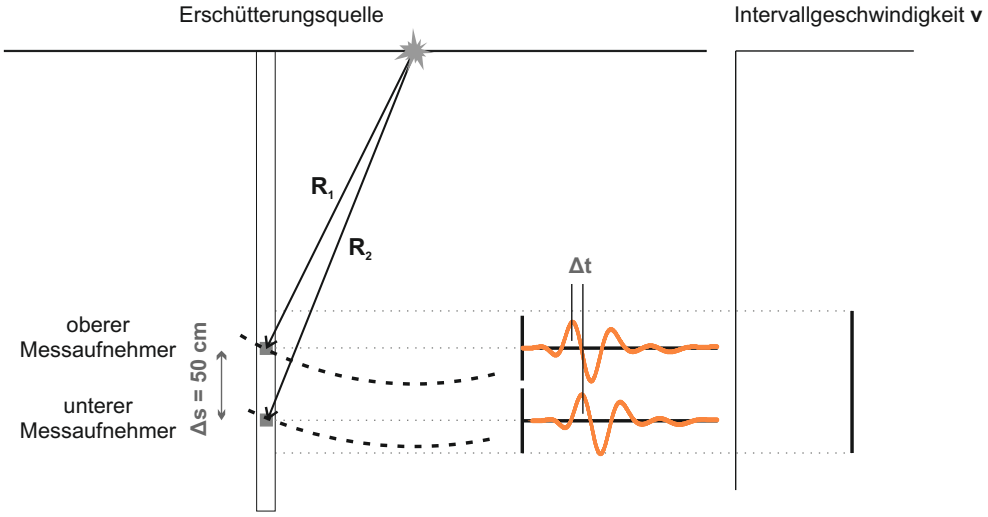


Abbildung 9.7: Grundprinzip der Intervallmethode zur Bestimmung der Wellenlaufgeschwindigkeit in einer bestimmten Messtiefe (adaptiert nach [67]).

Da im Zuge der Untersuchungen auf dem Versuchsfeld eine Sondierspitze mit zwei Beschleunigungsaufnehmern zur Anwendung kam, war die Auswertung der seismischen Messsignale mit der Intervallmethode möglich. Dabei wurde aufgrund der vergleichsweise geringen Untersuchungstiefe und der homogenen Untergrundverhältnisse ein gerader Strahlweg[4] angenommen. Diese Annahme erlaubt eine einfache geometrische Betrachtung der Wellenausbreitung bei der seismischen Downhole-Untersuchung. Sie liefert bei vergleichsweise homogenen Untergrundverhältnissen eine hinreichende Genauigkeit. Bei der Untersuchung komplexerer Untergrundstrukturen – vor allem bei größeren Untersuchungstiefen – kann jedoch diese Vereinfachung zu einem fehlerhaften Auswertungsergebnis füh-

[3] Strahlweg (oder Laufweg) bezeichnet in der Seismik und in der Seismologie den Weg, den eine seismische Welle von ihrem Entstehungsort bis zum Ort ihrer Registrierung durch einen Messaufnehmer durch die Erde zurücklegt. Er ist die senkrechte Trajektorie der Wellenfront [64].

[4] Auf Grundlage des *Fermatschen* Prinzips verläuft die Energieausbreitung einer seismischen Welle durch den Erdkörper auf jenem Weg, für den die benötigte Zeit zwischen dem Quellort und dem Ort der Detektierung minimal wird [34].

ren, da es an Schichtgrenzen zu einer Brechung der seismischen Wellen kommt, wodurch die Annahme eines geraden Strahlwegs nicht mehr zulässig ist. In solchen Fällen ist die Berücksichtigung des Einflusses von Bodenschichten mit unterschiedlichen Wellenlaufgeschwindigkeiten im Zuge der Messdatenauswertung unerlässlich. Ein Überblick und Gegenüberstellung unterschiedlicher Auswertemethoden ist bei *Kim et al.* [67] zu finden.

Bei der Datenauswertung erfolgte die Auswertung der Messsignale beim jeweiligen Verdichtungspunkt im unverdichteten und im verdichteten Untergrund gesondert. Anschließend wurden die beiden Scherwellengeschwindigkeitsprofile gegenübergestellt. Abbildung 9.8 zeigt die ermittelten Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten und im verdichteten Boden, exemplarisch bei zwei ausgewählten Rüttleransatzpunkten: Nr. *208* (oben) und Nr. *217* (unten). Zusätzlich sind die Ergebnisse der zugehörigen Rammsondierungen, vor und nach den Verdichtungsarbeiten, angeführt. Da die herkömmlichen CPTu-Parameter (Spitzendruck q_c, Mantelreibung f_s, Reibungsverhältnis R_f, lokaler Porenwasserdruck u) weder zum verdichteten noch zum unverdichteten Bodenbereich eindeutig zuzuordnen sind, sind diese nicht angeführt. Die Scherwellengeschwindigkeitsprofile und Rammsondierungen der weiteren untersuchten Verdichtungsstrecken sind in Anhang D angegeben. Es ist anhand von Abbildung 9.8 ersichtlich, dass sich bei den beiden betrachteten Verdichtungsstrecken im verdichteten Boden deutlich höhere Scherwellengeschwindigkeiten ergaben als im unverdichteten Untergrund. Folglich kommt es zufolge der Rütteldruckverdichtung zu einem signifikanten Anstieg in der Scherwellengeschwindigkeit. Diese Tendenz zeigt sich bei allen untersuchten Verdichtungsstrecken. Bei den meisten Messtiefen ist eine Erhöhung der Scherwellengeschwindigkeit um den Faktor $1,30$ bis $1,80$, bei bestimmten Messtiefen sogar um $2,30$ ersichtlich.

Eine ähnliche Tendenz zeigt sich bei Gegenüberstellung der Rammsondierergebnisse. Nach der Rütteldruckverdichtung zeichnete man deutlich höhere Schlagzahlen N_{10} auf als davor. Es ist dabei eine Erhöhung der Schlagzahlen etwa um den Faktor $1,5$ bis $2,5$ erkennbar, womit eine gute Übereinstimmung mit dem maximal erreichbaren Verbesserungsfaktor in zusammenhängenden verdichteten Bereichen gegeben ist (vgl. Abschnitt 7.3.1).

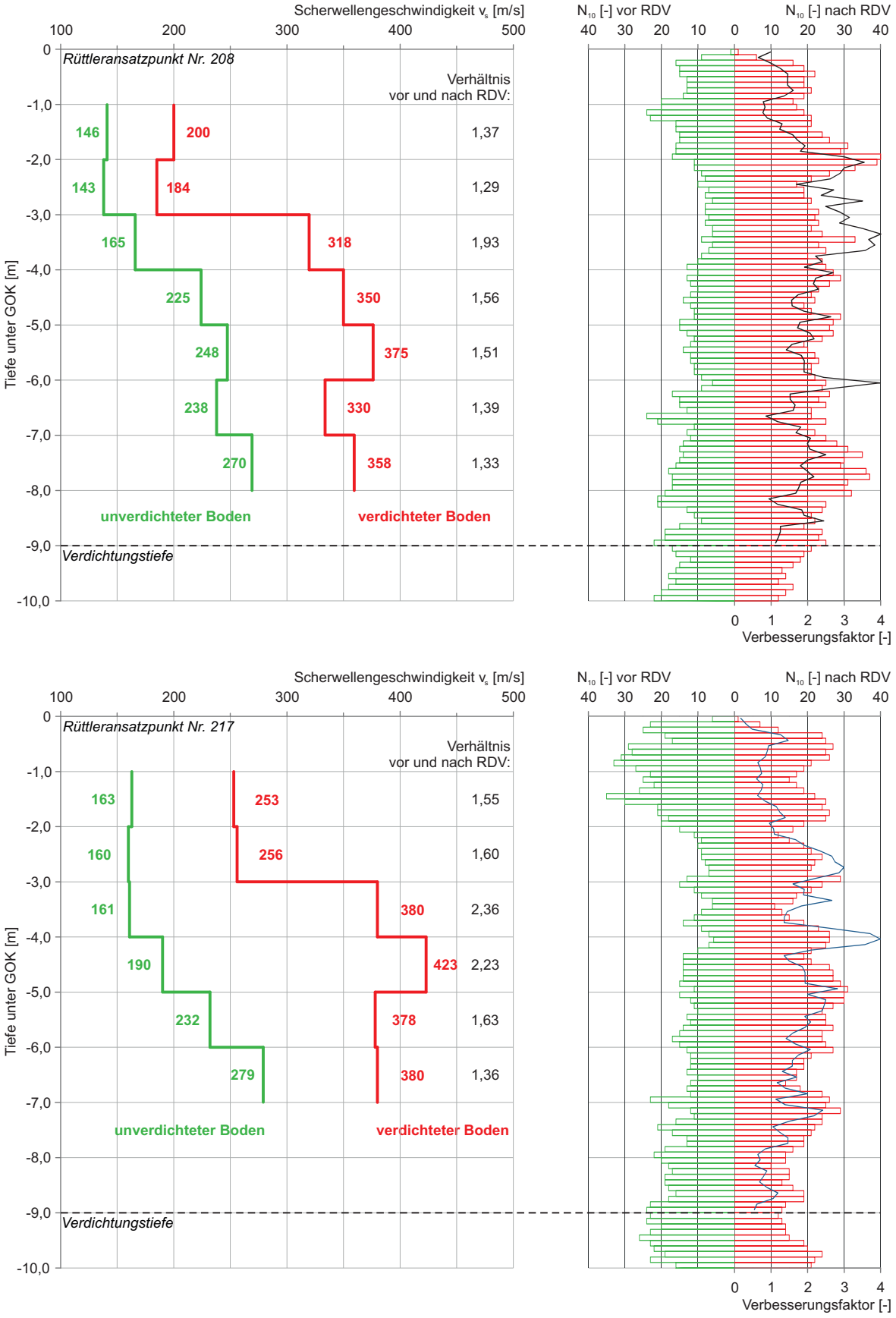


Abbildung 9.8: Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, bei den Rüttleransatzpunkten Nr. *208* (oben) und Nr. *217* (unten).

9.4 Bestimmung der Bodensteifigkeit beruhend auf der gemessenen Scherwellengeschwindigkeit

Wie in Abschnitt 6.7 bereits aufgezeigt, ist die Schubsteifigkeit von Böden stark von der Scherdehnung abhängig. Mit zunehmender Amplitude der Scherdehnung nimmt im Boden der Schubmodul drastisch ab. Es ist üblich, die Dehnungsachse abhängig von der Größe der Scherdehnungsamplitude in drei Bereiche zu unterteilen (siehe Abbildung 9.9). Solange die Scherdehnungsamplitude γ kleiner als die sogenannte lineare Grenzscherdehnung γ_{tl} ist, handelt es sich um „sehr kleine Dehnungen“. In diesem Bereich ist ein linear-elastisches Materialverhalten anzunehmen. Es entstehen bei Scherdehnungsamplituden kleiner als die Grenzscherdehnung keine bleibenden Verformungen im Korngerüst bzw. keine Veränderung der Porenwasserdrücke [60]. Nach *Ishihara* [60] nimmt die Grenzscherdehnung Werte an, die zwischen etwa 5×10^{-6} (grobkörnige Böden) und etwa 5×10^{-5} (hochplastische Tone) liegen. Die Schubsteifigkeit des Bodens ist im Bereich der sehr kleinen Scherdehnungen am größten. Für die Schubsteifigkeit bei sehr kleinen Scherdehnungen verwendet man in der deutschsprachigen Fachliteratur oft der Begriff „dynamische Schubsteifigkeit“.

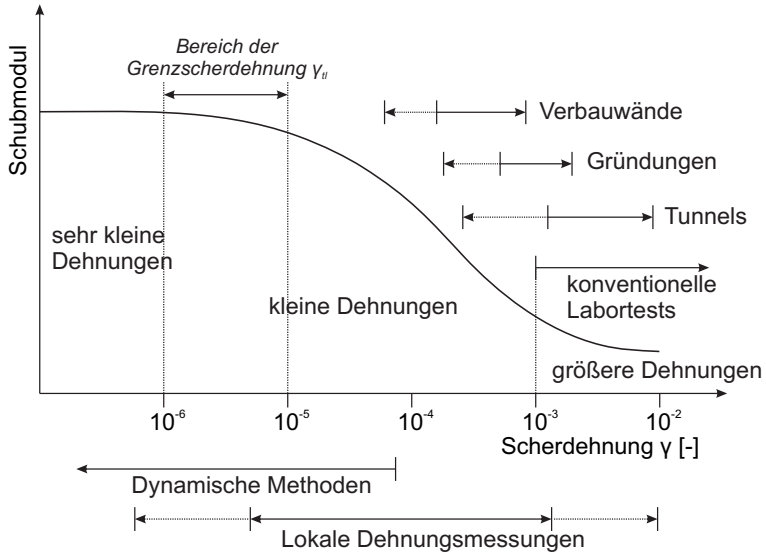


Abbildung 9.9: Qualitative Darstellung der Scherdehnungsabhängigkeit der Schubsteifigkeit mit qualitativer Darstellung von messtechnisch erfassbaren Grenzen von konventionellen Laboruntersuchungen (adaptiert nach [18]).

Überschreitet die Scherdehnungsamplitude die lineare Grenzscherdehnung, entstehen bleibende Verformungen im Boden, deren Größe von zahlreichen Einflussfaktoren, beispielsweise von der Lagerungsdichte, dem Sättigungsgrad und den Entwässerungsbedingungen, der Größe der mittleren Spannung, der Scheramplitude sowie der Zyklenzahl abhängt. Dabei wird die Bodensteifigkeit abgemindert. Überschreitet die Scherdehnungsamplitude eine weitere Grenze, die sogenannte volumetrische Scherdehnung, entstehen größere bleibende Verformungen und Porenwasserüberdrücke mit maßgeblicher Abminderung der Bodensteifigkeit. Scherdehnungsamplituden zwischen der linearen Grenzscherdehnung und der volumetrischen Scherdehnung bezeichnet man als „kleine Dehnungen“, Scherdehnungsam-

plituden über der volumetrischen Scherdehnung als „größere Dehnungen“ [142]. *Atkinson* [11] definiert Dehnungen unterhalb der messtechnisch erfassbaren Grenze von konventionellen Laboruntersuchungen, wie Triaxialversuche oder Ödometerversuche ohne spezielle Instrumentierung, als „kleine Dehnungen“, Scherdehnungen größer als $\gamma = 10^{-3}$ sind als „größere Dehnungen“ bezeichnet (siehe Abbildung 9.9).

Die Steifigkeit im Bereich der sehr kleinen Dehnungen kann ein Vielfaches der in klassischen Laboruntersuchungen ermittelten Steifigkeit betragen. Eine Vernachlässigung der dehnungsabhängigen Steifigkeit des Bodens kann zu einer fehlerhaften Interpretation von Ergebnissen von Feld- und Laborversuchen sowie in geotechnischen Berechnungen zu einem unrealistischen Last-Verformungsverhalten des Bodens führen [26].

9.4.1 Bestimmung der Bodensteifigkeit im Bereich der sehr kleinen Dehnungen

Im Bereich der sehr kleinen Dehnungen kann das Verhalten des Bodens als linear elastisch angesehen werden und für die Beschreibung des Materialverhaltens das *Hookesche* Gesetz herangezogen werden.

Der Schubmodul bei sehr kleinen Scherdehnungen wird in der Regel mit G_0 – oder seltener als G_{max} – bezeichnet und lässt sich unter Voraussetzung elastisch-isotroper Verhältnisse über die Bodendichte ρ und die Scherwellengeschwindigkeit v_s im Boden bestimmen:

$$G_0 = \rho \, {v_s}^2 \tag{9.2}$$

Analog lässt sich der Steifemodul E_s im Bereich der sehr kleinen Dehnungen über die Bodendichte ρ und die Kompresionswellengeschwindigkeit v_p im Boden ermitteln:

$$E_S = \rho \, {v_p}^2 \tag{9.3}$$

Die Poissonzahl ν ist versuchstechnisch mit konventionellen Laboruntersuchungen bestimmbar und ergibt sich als Verhältnis von Längsstauchung und Querdehnung im einaxialen Spannungszustand. Im Bereich der sehr kleinen Scherdehnungen kann die Poissonzahl aus der Kopressions- und der Scherwellengeschwindigkeit wie folgt ermittelt werden:

$$\nu = \frac{v_p - 2v_s}{2(v_p - 2v_s)} \tag{9.4}$$

Die Größe der Poissonzahl hängt grundsätzlich von der Bodenart ab, ist aber auch von der Dehnungsamplitude abhängig. Bei drainierten Verhältnissen zeigen Versuchsergebnisse bei kleinen Dehnungen Werte zwischen $0,15$ und $0,25$, mit zunehmender Dehnungsamplitude nimmt die Poissonzahl zu [142].

In Feldversuchen zur Bestimmung dynamischer Bodenkenngrößen, wie auch bei der seismischen Drucksondierung, wird mit sehr kleinen Dehnungen gearbeitet [61], [134]. Über den ermittelten Scherwellengeschwindigkeiten lässt sich somit der Schubmodul G_0 nach Gleichung 9.2 im verdichteten und unverdichteten Boden ableiten. Bei der Ermittlung des Schubmoduls ist für die Dichte ρ im Allgemeinen die Feuchtdichte des Bodens unter Be-

rücksichtigung des vorhandenen Wassergehaltes anzusetzen. Im Zuge der gegenständlichen Untersuchungen wurde die Scherwellengeschwindigkeit hauptsächlich im gesättigten Untergrund ermittelt, da sich der Grundwasserspiegel in einer Tiefe von 2, 10 m unter Geländeoberkante befand. Nach *Brandl et al.* [23] kann mit ausreichender Näherung die Sättigungsdichte ρ_{sat} des Bodens zur Bestimmung der Steifigkeit herangezogen werden. Zufolge der Rütteldruckverdichtung erhöht sich die Dichte des zu verdichtenden Bodens. Eine sehr grobe Abschätzung der Veränderung der Bodendichte ist durch Berücksichtigung der Menge des Verfüllmaterials möglich. Die Erhöhung der Bodendichte zufolge der Verdichtung wurde bei der Ermittlung der Bodensteifigkeit berücksichtigt, hat darauf jedoch nur einen geringen Einfluss [77].

9.4.2 Einfluss der Rütteldruckverdichtung auf die Bodensteifigkeit

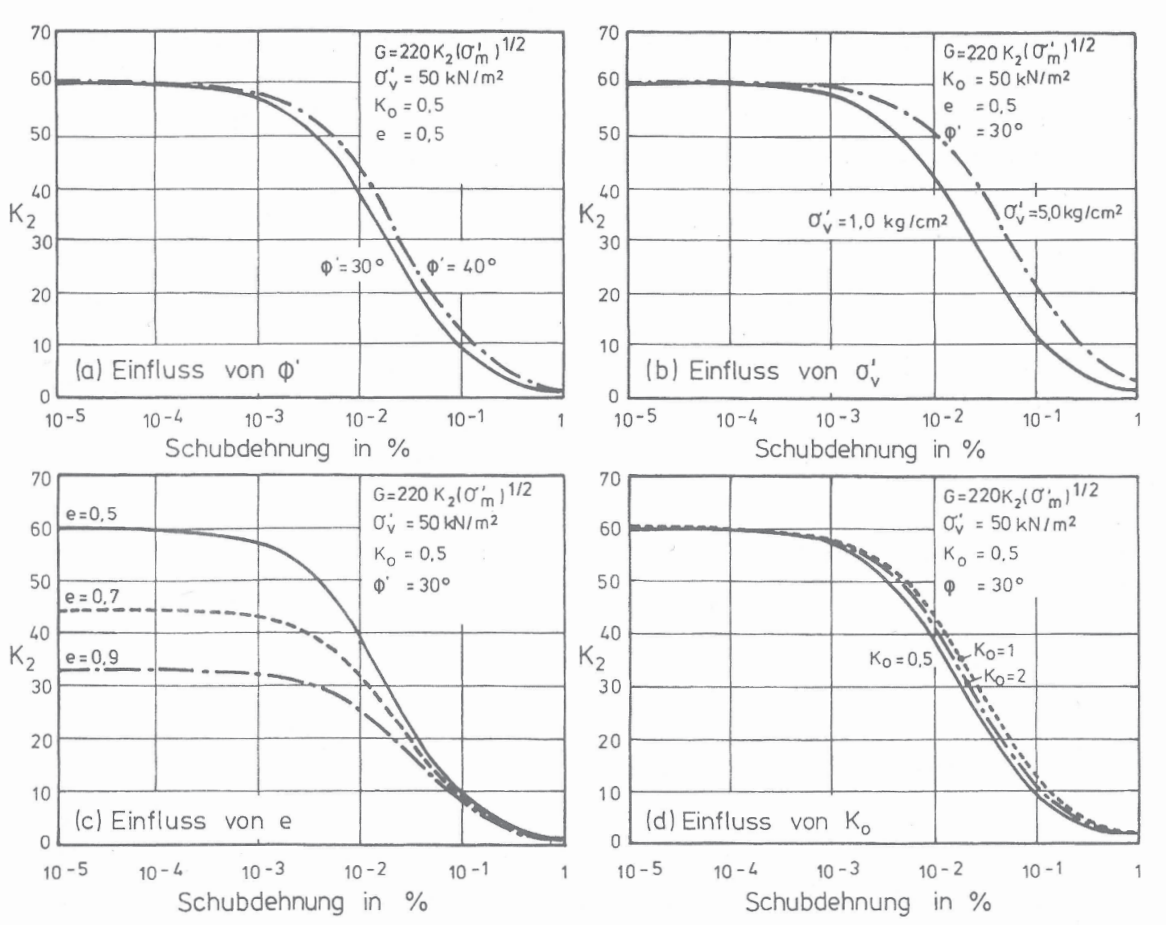


Abbildung 9.10: Einfluss verschiedener Parameter auf das Schubmodul bei Sanden [134] (nach [128]).

Die Schubsteifigkeit von grobkörnigen Böden ist maßgeblich von der Größe des Porenvolumens und von der mittleren Hauptspannung im Korngerüst determiniert (siehe Abschnitt 6.7.1). Untersuchungsergebnisse, beispielsweise von *Seed* und *Idriss* [128], zeigen einen besonders großen Einfluss der Größe der Porenzahl im Bereich der sehr kleinen und

kleinen Dehnungen (siehe Abbildung 9.10).

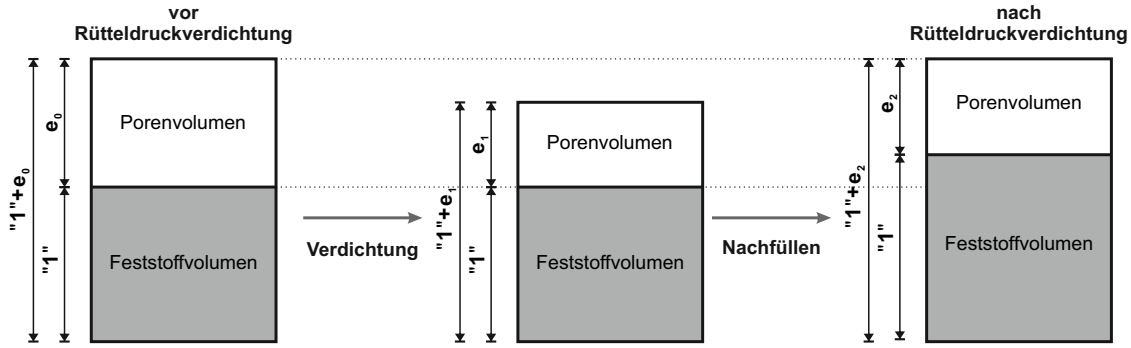


Abbildung 9.11: Verringerung des Porenraumes unter Beibehaltung des Bodenvolumens im zu verdichtenden Boden zufolge Verdichtung und Nachfüllen.

Wie in Abschnitt 6.7 eingehend diskutiert ist, verringert sich das Volumen des zu verdichtenden Bodens zufolge der Rütteldruckverdichtung. Durch regelmäßiges Nachfüllen mit geeignetem Material wird jedoch während des gesamten Verdichtungsvorgangs praktisch eine Volumenkonstanz im zu verdichtenden Boden gewährleistet. Abbildung 9.11 zeigt schematisch die Verringerung des Porenraumes im zu verdichtenden Boden unter Beibehaltung des Volumens.

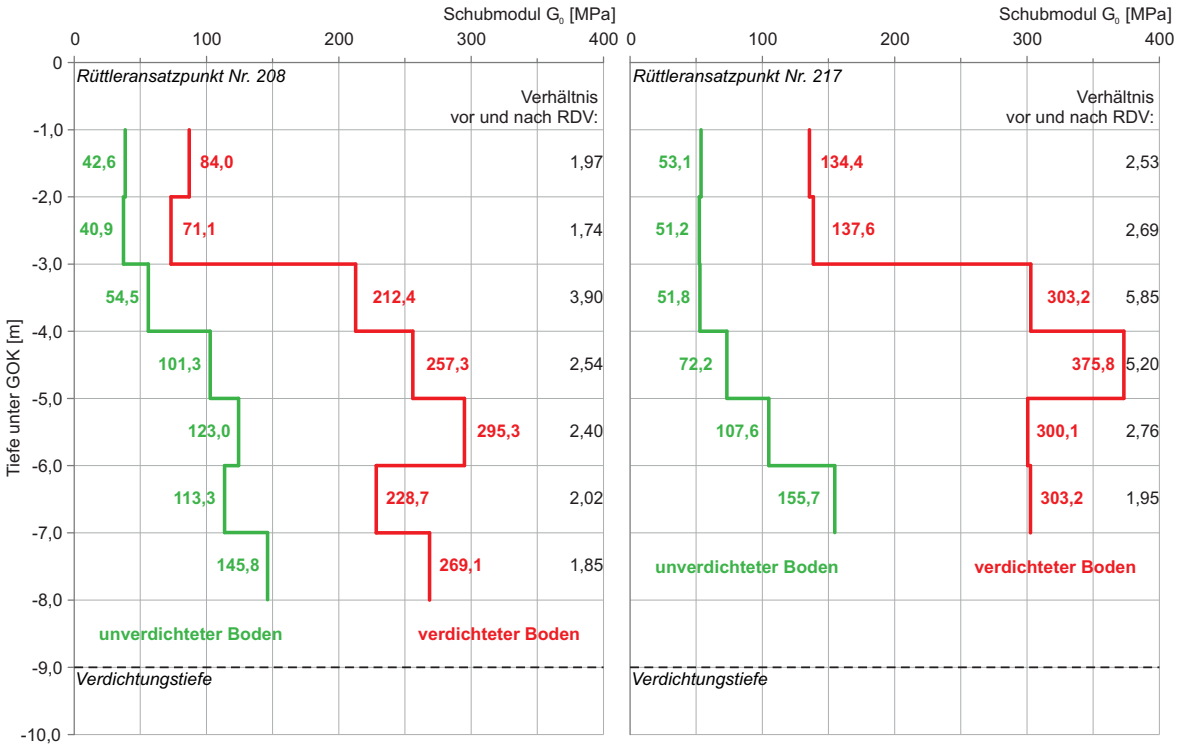


Abbildung 9.12: Schubmodul G_0 über die Tiefe im Boden vor und nach der Verdichtung mittels Rütteldruckverfahren.

Zufolge der Rütteldruckverdichtung ändert sich auch der Spannungszustand im Untergrund, nach *Massarsch* [85] ist aus einer Erhöhung der Horizontalspannungen bei etwa gleichbleibenden Vertikalspannungen auszugehen, welche eine Erhöhung der mittleren ef-

fektiven Hauptspannung mit sich zieht. Die erhöhte Horizontalspannung ist beispielsweise mittels Drucksondierung, durch eine erhöhte lokale Mantelreibung f_s im Vergleich zum Ausgangszustand nachweisbar [85] (vgl. Abbildung 3.2).

Die Verringerung des Porenvolumens und die Veränderung des Spannungszustandes in Folge von Rütteldruckverdichtung führen somit zu einer Erhöhung der Steifigkeit des Bodens, welche durch die gegenständlichen Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde eindeutig nachweisbar ist. Abbildung 9.12 repräsentiert die mit Gleichung 9.2 ermittelten Schubmoduln G_0 im Boden vor und nach Verdichtung bei den beiden betrachteten Verdichtungsstrecken Nr. *208* und Nr. *217*. Bestimmung der Schubmoduln erfolgte auf Basis der in Abbildung 9.3 dargestellten Scherwellengeschwindigkeitsprofile. Die Auswertungsergebnisse weiterer Verdichtungsstrecken können Anhang D entnommen werden. Es ist dabei ersichtlich, dass die Bodensteifigkeit bei sehr kleinen Dehnungen durch die Rütteldruckverdichtung deutlich erhöht wurde.

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen auf dem Versuchsfeld in Fisching wurde die Erhöhung der Bodensteifigkeit messtechnisch mit der seismischen Drucksonde (SCPTu) erfasst. Diese Methode ermöglichte den Nachweis einer signifikanten Erhöhung der Scherwellengeschwindigkeit v_s im Untergrund und dadurch der Schubsteifigkeit zufolge Rütteldruckverdichtung. Da im Zuge der seismischen Wellenausbreitung sehr kleinen Dehnungen auftreten, entspricht die ermittelte Schubsteifigkeit dem Schubmodul G_0 im Bereich der sehr kleinen Scherdehnungen. Im Zuge der gegenständlichen Versuche erfolgte zwar die Untersuchung einzelner Verdichtungsstrecken, aus praktischer Sicht ist jedoch die Veränderung der Scherwellengeschwindigkeit zufolge Rütteldruckverdichtung in zusammenhängenden verdichteten Bereichen von Bedeutung. Die einzelnen Verdichtungsstrecken wurden neben der seismischen Drucksondierung zudem mittels Rammsondierungen (DPH) geprüft, wobei ebenfalls eine signifikante Erhöhung der Schlagzahlen N_{10} ersichtlich ist. Mittels Rammsondierungen wurde der Verdichtungserfolg auch in zusammenhängenden verdichteten Bereichen ermittelt, wobei eine Erhöhung der Schlagzahlen etwa in gleichem Maße zu beobachten ist (siehe Abschnitt 7.3.1). Daraus folgt, dass der in den einzelnen Verdichtungsstrecken ermittelte Verbesserungserfolg für zusammenhängende verdichtete Bereiche – unter Voraussetzung eines wirksamen Verdichtungsrasters – als repräsentativ angesehen werden kann. Somit ist auch die für die einzelnen Verdichtungspunkte mittels seismischer Drucksondierung bestimmte Steifigkeitserhöhung auf zusammenhängende verdichtete Bodenbereiche prinzipiell übertragbar.

Kapitel 10

Arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle im Zuge der Rütteldruckverdichtung

10.1 Einführung

Das Ziel einer Rütteldruckverdichtung ist die Herstellung eines quasi-homogenen, zusammenhängenden verdichteten Bodenkörpers durch eine rasterförmige Anordnung der Verdichtungsstrecken. Um die Qualität der Verdichtungsarbeiten kontrollieren und nachweisen zu können, muss daher die Verdichtungskontrolle dreidimensional, über die Tiefe und flächendeckend erfolgen. Die übliche gleichmäßige, rasterförmige Anordnung der Verdichtungsstrecken stellt eine ausgezeichnete Voraussetzung für eine systematische Überprüfung des behandelten Bodens dar. Eine tiefenabhängige Verdichtungskontrolle soll den Verdichtungserfolg im Zuge der Herstellung der einzelnen Verdichtungsstrecken prüfen und nachweisen. Diese ist allerdings in sich nicht ausreichend, um verlässliche Aussagen über die Homogenität des erzeugten verdichteten Bodenkörpers treffen zu können. Eine flächendeckenden Verdichtungskontrolle soll daher überprüfen, ob die einzelnen Verdichtungsstrecken einen zusammenhängenden quasi-homogenen Bodenbereich bilden. Die Qualitätskontrolle bei der Rütteldruckverdichtung soll auf diesen zwei grundlegende Säulen aufbauen.

Dieses Kapitel beinhaltet eine Zusammenfassung der wichtigsten Erkenntnisse der vorliegenden Forschungsarbeit. Im Anschluss daran erfolgt die Diskussion der Umsetzbarkeit dieser zu einer arbeitsintegrierten tiefenabhängigen und flächendeckenden, d. h. raumfüllenden Kontrolle der Rütteldruckverdichtung. Der abschließende Teil dieses Kapitels behandelt die Bestimmung der Steifigkeit des behandelten Bodens.

10.2 Tiefenabhängige Verdichtungskontrolle in der Verdichtungsstrecke

10.2.1 Verdichtungskontrolle auf Basis der Rüttlerbewegung

In Kapitel 5 wurden die dreidimensionale Rüttlerbewegung und die wesentlichen physikalischen Prozesse im Rüttler-Boden Interaktionssystem während der Rütteldruckverdichtung im Pilgerschrittverfahren diskutiert. Diese stellen das elementare Fundament für eine arbeitsintegrierte Qualitätskontrolle auf Basis der Rüttlerbewegung dar. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen und der anschließenden Messdatenauswertung konnten bisher unzureichend geklärte bzw. nur zum Teil nachvollzogene Vorgänge, die während der Rütteldruckverdichtung auf dem Verdichtungsgerät und im Einflussbereich des Tiefenrüttlers stattfinden, klarstellen. Insbesondere sind die starke Periodizität der Rüttlerbewegung sowie der ausschlaggebende Einfluss der Spannung an der Kontaktfläche zwischen Rüttlerspitze und Boden auf das Bewegungsverhalten hervorzuheben.

Sämtliche Auswertungsergebnisse zeigen eine hohe Reproduzierbarkeit und gleichzeitig eine starke Periodizität im Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers während der einzelnen Verdichtungsschritte. Damit ist eine wesentliche Voraussetzung für die Verdichtungskontrolle auf Basis der Rüttlerbewegung erfüllt, die messtechnisch erfasste Rüttlerbewegung stellt eine äußerst wertvolle Basis für die arbeitsintegrierte Kontrolle der Verdichtungsarbeiten dar.

Die Spannung an der Kontaktfläche zwischen Rüttlerspitze und Boden beeinflusst das Bewegungsverhalten des Rüttlers. Diesen Umstand bestätigen Ergebnisse von mehreren Verdichtungsversuchen (siehe Abschnitt 5.3). Diese Erkenntnis bildet in weiterer Folge die Grundlage für die Arbeitshypothese zur Erklärung wesentlicher physikalischer Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem, welche in Abschnitt 5.5 vorgestellt ist.

Die Betrachtung der Rüttlerbewegung alleine lässt die Erkundung der Prozesse im zu verdichtenden Boden, welche im Zuge der Verdichtung zur Erhöhung ihrer Steifigkeit führen, nicht zu. Zur Quantifizierung des Verdichtungserfolgs in Form eines aus den Messergebnissen ableitbaren Indikators ist die analytische Modellierung des Rüttler-Boden Interaktionssystems erforderlich. Ein analytisches Modell kann die Gesamtheit der zusammengesetzten Vorgänge im zu verdichtenden Boden nur in vereinfachter Form abbilden. Im zugrundegelegten analytischen Modell sind jedoch die maßgeblichen physikalischen Prozesse im Rüttler-Boden Interaktionssystem zu berücksichtigen. Aus Sicht der Verdichtungskontrolle sind diese die Veränderung des Verdichtungszustandes und damit einhergehend der Steifigkeit des verdichteten Bodens. Der Verdichtungserfolg wurde durch einen Indikator definiert, welcher auf Basis des Bewegungsverhaltens des Rüttlers über die aktuelle Steifigkeit des Bodens Auskunft erteilt. Diese zeitlich veränderliche Größe erhielt die Bezeichnung zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit bezeichnet und das Symbol k^*. Sie errechnet sich auf Basis des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers unter Berücksichtigung eines linear-elastischen Materialverhaltens und einer mitschwingenden Bodenmasse. Die zu identifizierende Federsteifigkeit entspricht allerdings nicht unmittelbar der Bodensteifigkeit

figkeit, sie stellt in diesem Modellierungsansatz eine vom aktuellen Verdichtungszustand des Bodens abhängige Größe dar. Der zeitliche Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit sowie der beiden Parameter zur Charakterisierung des Bewegungsverhaltens – die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und der Vorlaufwinkel – sind in Abbildung 10.1 exemplarisch für eine etwa 2,5 m lange Verdichtungsstrecke angeführt. Hierbei handelt es sich um den Verdichtungsversuch zur Untersuchung des Einflusses der erhöhten Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden auf das Systemverhalten, welcher in den Abschnitten 5.3.3, 5.4.2, 6.6.2 und 8.3.2 eingehend diskutiert ist.

Der zeitliche Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit ist alleine nicht ausreichend, um Aussagen über die Prozesse im zu verdichtenden Boden treffen zu können. Eine Interpretation dieser Größe aus bodenmechanischer Sicht ist daher unerlässlich. Diese ermöglicht die Abgrenzung von zwei wesentlichen Prozessen im zu verdichtenden Boden im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte, welche dessen Steifigkeit steuern. Eine Arbeitshypothese wurde aufgestellt zur Abgrenzung von kontraktantem und dilatantem Verhalten des zu verdichtenden Bodens. Bei Kontraktanz hat die Reduktion des Porenvolumens einen maßgeblichen Einfluss auf die Erhöhung der Bodensteifigkeit. Demgegenüber dominiert während des dilatanten Verhaltens die ansteigende mittlere effektive Spannung im Korngerüst zufolge der behinderten Seitendehnung, welche in weiterer Folge zur Erhöhung der Bodensteifigkeit führt. Die Arbeitshypothese zur Abgrenzung zwischen kontraktantem und dilatantem Verhalten (siehe Abbildung 10.1) ist aus Sicht der Verdichtungskontrolle von besonderer Bedeutung, da diese für die Definition des Verdichtungspotenzials herangezogen werden kann. Diese Erkenntnis hat eine zentrale Bedeutung für die Beurteilung des Verdichtungszustandes beim jeweiligen Verdichtungsschritt. Erreicht die mit zunehmender Rütteltiefe steigende zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit das zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörige Werteniveau, bedeutet dieser Zustand eine Ausschöpfung des Verdichtungspotenzials mit dem angewendeten Tiefenrüttler. Kapitel 6 widmet sich der analytischen Modellierung des Rüttler-Boden Interaktionssystems und der anschließenden Diskussion der Arbeitshypothese zur Abgrenzung der beiden wesentlichen Prozesse im zu verdichtenden Boden.

Die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit weist damit offensichtlich ein großes Potenzial als Indikator für eine arbeitsintegrierte Beurteilung des Verdichtungszustandes auf, diese ist jedoch nicht der einzige Parameter, welcher über eine Ausschöpfung des Verdichtungspotenzials Auskunft erteilt. Während der Auswertung und Interpretation der aufgezeichneten Messdaten wurden weitere Wege gesucht, die zur arbeitsintegrierten Kontrolle der Verdichtungsarbeiten führen können.

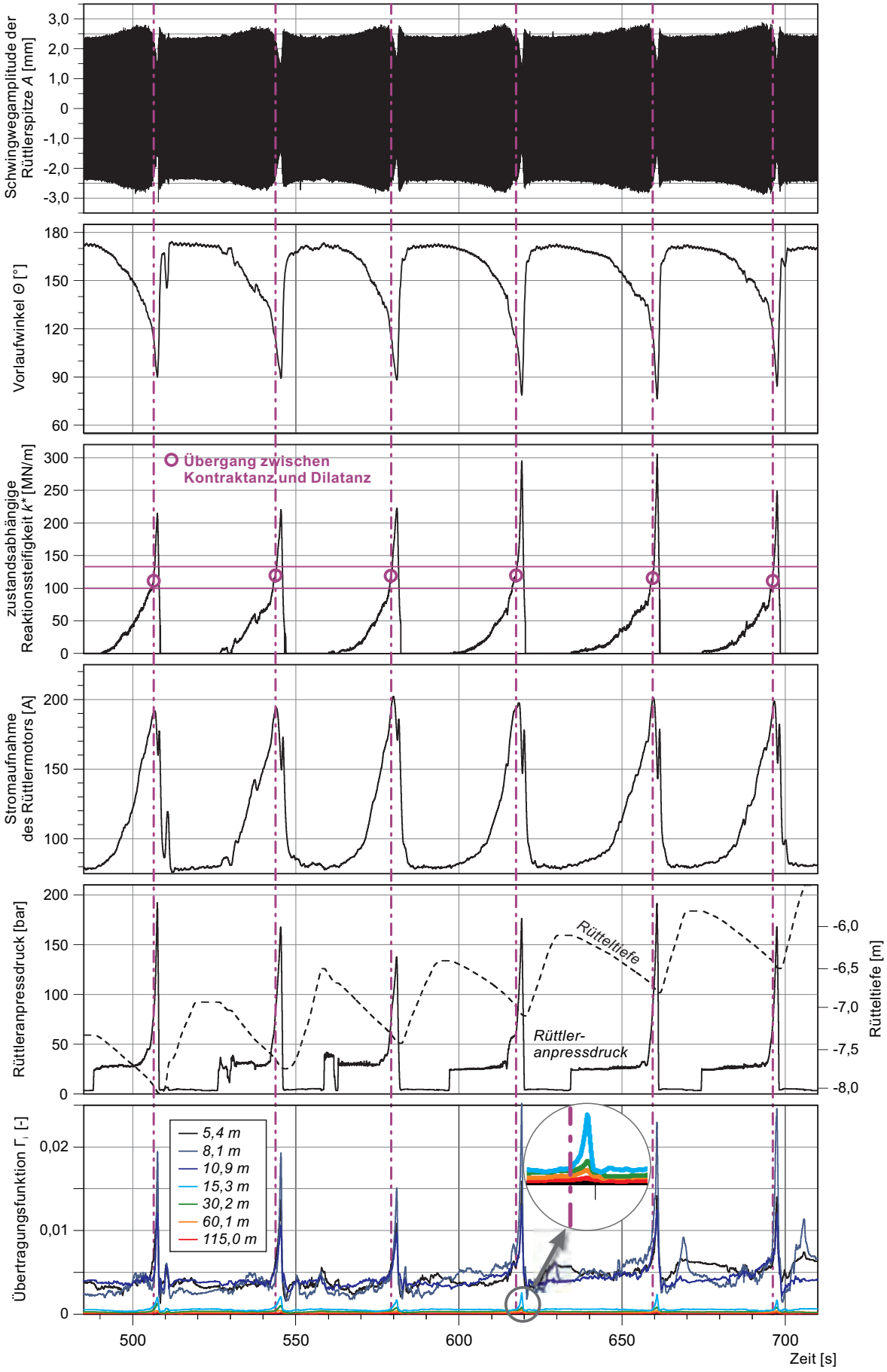


Abbildung 10.1: Verdichtungskontrolle anhand von unterschiedlichen Parametern.

Dabei handelt es sich um diverse Verfahrensparameter sowie um die Übertragungsfunktion, welche als Verhältnis der resultierenden Schwingschnelle an der Geländeoberfläche und der Schwinggeschwindigkeitsamplitude des Tiefenrüttlers errechnet ist. Über die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit hinaus zeichnen sich folgende Parameter als mögliche Interpretationshilfen bei der Bestimmung des Übergangs zwischen kontraktantem und dilatantem Verhalten ab und damit in weiterer Folge zur Kontrolle des Verdichtungsvorgangs:

- Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe
- Stromaufnahme des Rüttlermotors
- Übertragungsfunktion

In Abbildung 10.1 sind zusätzlich zu den oben diskutierten Parametern die zeitliche Verläufe der oben genannten Parameter angeführt. Dabei ist der Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz bei den einzelnen Verdichtungsschritten im zeitlichen Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit mit violettem Kreis und mit vertikalen violett strichlierten Linien gekennzeichnet. Im Folgenden erfolgt die Betrachtung der unterschiedlichen Verfahrensparameter sowie der Übertragungsfunktion gesondert.

10.2.2 Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe

Wie in Abschnitt 5.3 aufgezeigt, ist der Rüttleranpressdruck als indirekter Indikator für die Anpresskraft und damit in weiterer Folge für die Spannung an der Kontaktfläche zwischen Rüttlerspitze und Boden anzusehen. Der Rüttleranpressdruck stellt dadurch einen äußerst wertvollen Parameter für die Beurteilung des Verdichtungszustandes des Bodens dar. Es ist jedoch zu beachten, dass aus den in Abschnitt 5.3 diskutierten verfahrensbedingten Gründen eine exakte Bestimmung der Spannung zwischen Rüttlerspitze und Boden auf Basis des Rüttleranpressdrucks nicht möglich ist.

Solange der Boden kontraktantes Verhalten aufweist, ist das Absenken des Rüttlers bei einem vergleichsweise niedrigen Rüttleranpressdruck möglich (siehe Abbildung 10.1). Der Rüttleranpressdruck ist zu Beginn der einzelnen Verdichtungsschritte verfahrensbedingt konstant (vgl. Abschnitt 5.3), bereits bei kontraktantem Verhalten ist ein leichter Anstieg in seinem zeitlichen Verlauf mit zunehmender Rütteltiefe zu erkennen. Auf Basis der Analogie zwischen dem Eindringvorgang einer Sonderspitze und der Rüttlerspitze ist die Annahme eines Zusammenhangs zwischen dem Widerstand des Bodens gegen das Eindringen der Rüttlerspitze in Form des Rüttleranpressdrucks und der im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte mit zunehmender Rütteltiefe steigenden Steifigkeit des Bodens zulässig (siehe Abschnitt 6.6.3).

Bei dilatantem Verhalten ist eine praktisch gleichbleibende Rütteltiefe trotz des rasch ansteigenden Rüttleranpressdrucks zu erkennen. In diesem Zustand zeigt der Boden einen erhöhten Widerstand gegen das Eindringen der Rüttlerspitze, ein weiteres Absenken ist selbst bei Aktivierung des Eigengewichts der Tragraupe kaum mehr möglich. Dieser Umstand deutet darauf hin, dass eine weitere Verringerung des Porenvolumens im zu verdichtenden

Boden im Bereich unterhalb der Rüttlerspitze mit dem angewendeten Tiefenrüttler praktisch nicht mehr möglich ist.

Der Rüttleranpressdruck – insbesondere gemeinsam mit der Rütteltiefe – zeichnet sich somit als eine geeignete zusätzliche Interpretationshilfe bei der Bestimmung des Übergangs zwischen kontraktantem und dilatantem Verhalten.

Es ist allerdings zu beachten, dass im zeitlichen Verlauf der Rütteltiefe, bei hohem Anpressdruck vor Beendigung des jeweiligen Verdichtungsschrittes oft eine leicht zunehmende Eindringgeschwindigkeit erkennen ist. Dieses Verhalten ist auf das eingesetzte Messsystem zurückzuführen (vgl. Abschnitt 5.3.3).

10.2.3 Stromaufnahme des Rüttlermotors

Die Auswertungsergebnisse zeigen einen eindeutigen Zusammenhang zwischen der Stromaufnahme des Rüttlermotors und der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit (vgl. Abschnitt 8.4). Bei Kontraktanz steigen sowohl die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit als auch die Stromaufnahme mit zunehmender Rütteltiefe an. Demgegenüber ist bei Dilatanz eine sinkende Stromaufnahme bei zunehmender zustandsabhängiger Reaktionssteifigkeit zu erkennen. Bei dilatantem Verhalten ist ein Abfall der Stromaufnahme zu erkennen. Hierbei ist zu beobachten, dass die lokalen Maxima in der Stromaufnahme sich etwa beim Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz ausbilden. Dieser Zusammenhang ist in Abbildung 10.1 erkennbar.

Durch die Darstellung der Stromaufnahme in Abhängigkeit von der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit ist der enge Zusammenhang zwischen den beiden Parametern eindeutig zu sehen (siehe Abbildung 8.12 und 8.13). Dies bedeutet, dass ein bestimmtes Werteniveau der Stromaufnahme einer bestimmten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit entspricht. Anhand der gegenständlichen Untersuchungsergebnisse zeigt sich somit die Möglichkeit für die Anwendung der Stromaufnahme des Rüttlermotors als indirekter Indikator für die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit und dadurch für den Verdichtungszustand des Bodens.

10.2.4 Wellenfeld an der Geländeoberfläche

Zufolge der Rüttlerschwingung treten auch außerhalb des Kornumlagerugs- und Verdrängungsbereichs (vgl. Abschnitt 5.5.3) zyklische Verformungen im Boden auf. Die im Zuge des Verdichtungsvorgangs induzierten seismischen Wellen breiten sich in Form von Raum- und Oberflächenwellen aus. Im Zuge der Messdatenauswertung wurde eine Übertragungsfunktion ermittelt, welche jeweils das Verhältnis der zeitlichen Verläufe der resultierenden Schwingschnelle für Messaufnehmer in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt und der Schwinggeschwindigkeitsamplitude des Tiefenrüttlers darstellt (siehe Abschnitt 5.4.1). Der zeitliche Verlauf der Übertragungsfunktion in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt ist in Abbildung 10.1 ebenfalls gezeigt.

Wie in Abschnitt 5.4.2 diskutiert, steigt die Übertragungsfunktion bei erhöhter Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden bei sämtlichen Messaufnehmern deutlich an.

Dieser markante Anstieg ist bei dilatantem Verhalten des Bodens zu erkennen. In diesem Zustand wird ein deutlich höherer Anteil der Rüttlerschwingung über den zu verdichtenden Bodenbereich auf die Geländeoberfläche übertragen. Die Übertragungsfunktion zeigt somit Potenzial als Indikator für das dilatante Verhalten des Bodens im Bereich unterhalb der Rüttlerspitze und daraus resultierend für ihre Anwendung zur Kontrolle des Verdichtungsvorgangs.

10.3 Beurteilung des in-situ Zustandes im Untergrund und Rasteroptimierung

In der Arbeitsphase Einvibrieren wird der Tiefenrüttler bis zur geplanten Verdichtungstiefe abgesenkt. Dabei tritt der Rüttler mit dem zu verdichtenden Boden zum ersten Mal in Interaktion. Die eingehende Diskussion der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit in der Arbeitsphase Einvibrieren erfolgte in Kapitel 7. Durch die Untersuchung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit während des Absenkvorgangs ist es möglich, den in-situ Zustand im Untergrund zu beurteilen sowie durch eine Beurteilung des Zustandes an den Stellen der Rüttleransatzpunkte des Sekundärrasters den Wirkungsradius der Verdichtung indirekt zu bestimmen. Auf diese Weise kann im Sinne einer flächendeckenden Verdichtungskontrolle die Überprüfung und Optimierung des Abstands der Rüttleransatzpunkte erfolgen.

Aufgrund der qualitativen Übereinstimmung der während der Arbeitsphase Einvibrieren ermittelten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit mit Ergebnissen von Rammsondierungen ist diese zur Beurteilung des in-situ Zustandes im Untergrund als geeignet anzusehen. Durch die Betrachtung des Einvibrierens bei Verdichtungsstrecken im Sekundärraster ist die Auswirkung der Rütteldruckverdichtung von benachbarten Verdichtungsstrecken auf den Verdichtungszustand an diesen Stellen, bei unterschiedlichen Abständen der Rüttleransatzpunkte, erkennbar. Kapitel 7 beschäftigt sich mit diesen Aspekten.

In Abbildung 10.2 (links) ist der Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit bei drei Verdichtungsversuchen im Sekundärraster, in den Testfeldern A, B und C über die Tiefe dargestellt. Zusätzlich sind jene mit schwarzer Farbe aufgetragen, welche den Zustand des ungestörten Untergrundes widerspiegeln. In dieser Abbildung (rechts) sind die Verläufe der auf Basis von Rammsondierungen ermittelten Verbesserungsfaktoren über die Tiefe angeführt.

Dabei sind maßgebliche Unterschiede zwischen den drei Testfeldern erkennbar. Beim Testfeld A entspricht der Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit über die Tiefe jenen im unverdichteten Boden. Aus diesem Grund ist dieser Raster nicht als geeignet anzusehen. Beim Testfeld B ist das zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörige Werteniveau der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit an der betrachteten Stelle im Sekundärraster bereits großteils erreicht. Eine Homogenisierung des Untergrundes in den Verdichtungsstrecken im Sekundärraster kann hier das Ziel einer Rütteldruckverdichtung, das Erzeugen eines zusammenhängenden quasi-homogenen verdichteten Bodenbereichs, gewährleisten.

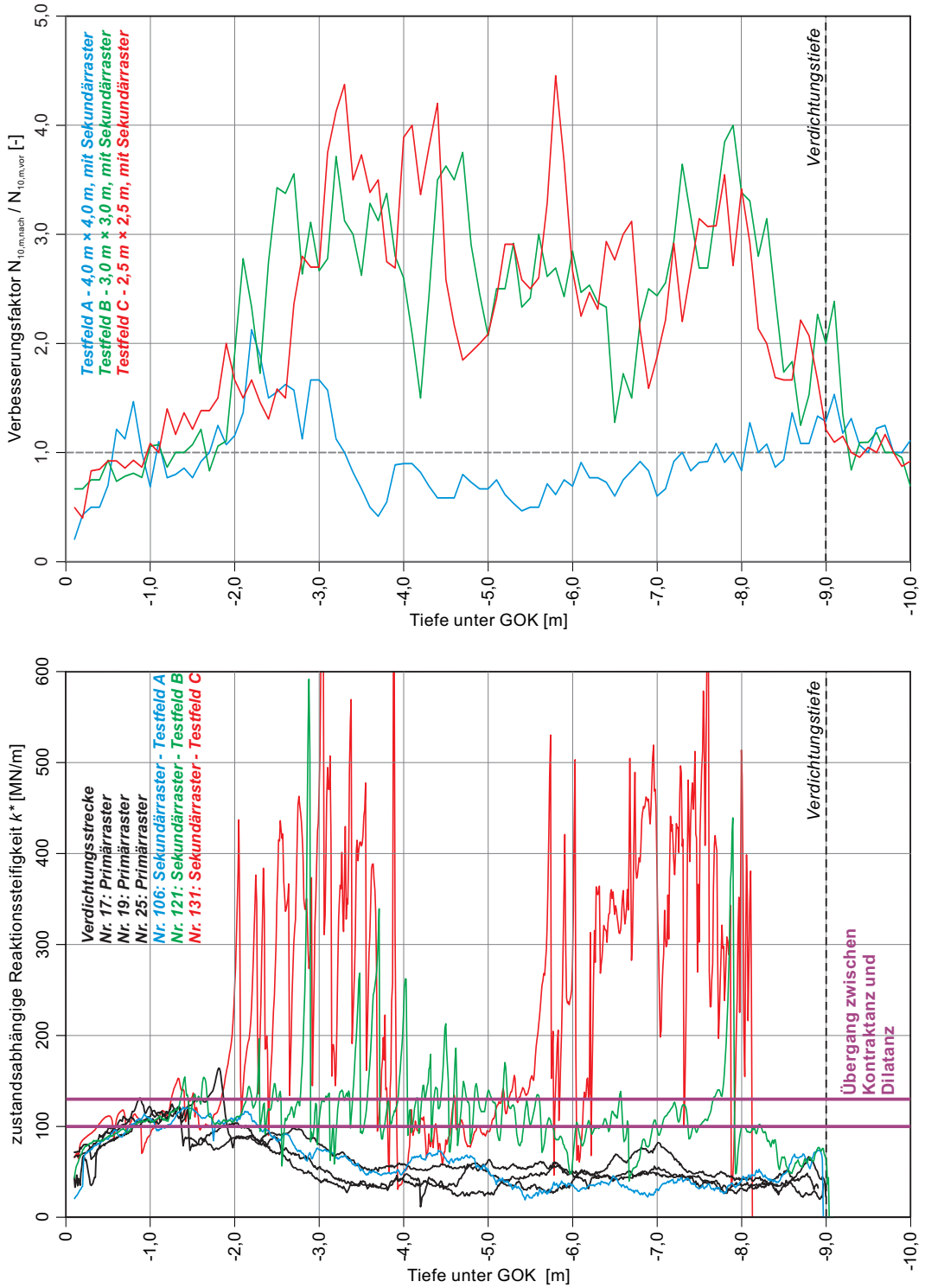


Abbildung 10.2: Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens bei Verdichtungsversuchen im Sekundärraster in den Testfeldern *A*, *B* und *C* sowie bei den Verdichtungsversuchen im ungestörten Boden (links), auf Basis von Rammsondierungen ermittelte Verbesserungsfaktoren über die Tiefe für die Testfelder *A*, *B* und *C* [77] (rechts).

Die Ergebnisse der Auswertung zeigen beim Testfeld *C* noch höhere Werte der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit als beim Testfeld *B*. Diese überschreiten deutlich das zum Übergang zwischen kontraktantem und dilatantem Verhalten zugehörige Werteniveau. Diese sind auf hohe Spannungen an der Kontaktfläche Rüttlerspitze und Boden bzw. auf eine hohe mittlere effektive Hauptnormalspannung im Boden unterhalb der Rüttlerspitze zufolge seines dilatanten Verhaltens zurückzuführen, woraus vorübergehend eine hohe Steifigkeit resultiert. Dieser Raster ist zwar als geeignet anzusehen, er stellt eine unwirtschaftliche Alternative dar. Für die gegenständlichen Untergrundverhältnisse ist unter Anwendung dieses Rüttlertyps die Austeilung der Rüttleransatzpunkte auf Testfeld *B* als das Optimum unter den drei betrachteten Verdichtungsrastern anzusehen.

Die Ergebnisse von Rammsondierungen bestätigen diese Aussage. Beim Testfeld *A* sind äußerst niedrige Verbesserungsfaktoren zu erkennen. Testfeld *B* zeigt deutlich höhere Verbesserungsfaktoren, Testfeld *C* weist trotz des geringeren Abstands der Rüttleransatzpunkte praktisch keinen zusätzlichen Verdichtungserfolg auf.

10.4 Praktische Anwendbarkeit der Erkenntnisse

Die gesamtheitliche Betrachtung der oben diskutierten Erkenntnisse ermöglicht eine Lösung für die raumfüllende Kontrolle der Rütteldruckverdichtung. Zu einer tiefenabhängigen Verdichtungskontrolle stellen die in Abschnitt 10.2 diskutierten Parameter die wesentlichen Instrumente dar. Eine flächendeckende Verdichtungskontrolle ist durch die Kontrolle und Optimierung des Abstands der Rüttleransatzpunkte, basierend auf den in Abschnitt 10.3 gezeigten Erkenntnissen möglich. Die Wahl eines geeigneten Verdichtungsrasters in Kombination mit dem Erreichen der maximal möglichen Verdichtungswirkung entlang jeder einzelnen Verdichtungsstrecke gewährleistet eine optimale, gleichmäßige Qualität der Verdichtungsarbeiten. Die gesamtheitliche Betrachtung der Erkenntnisse ermöglicht somit eine raumfüllende Kontrolle der Rütteldruckverdichtung für die praktische Anwendung, welche im Folgenden diskutiert wird.

10.4.1 Verdichtungskontrolle in den einzelnen Verdichtungsstrecken

Die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit kann für die arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle, für einen nachträglich Nachweis des Verdichtungserfolgs und darüber hinaus auch als Regelkriterium für die Regelung des Verdichtungsprozesses herangezogen werden. Für deren Ermittlung ist eine on-line Erfassung der Rüttlerbewegung und basierend erforderlich. Über diesen Parameter hinaus empfiehlt es sich weitere Verfahrensparameter und die Übertragungsfunktion einzubeziehen. Die messtechnische Erfassung und visuelle Darstellung dieser Verfahrensparameter erfolgt bereits zur Zeit von den ausführenden Firmen. Die Ermittlung der Übertragungsfunktion erfordert die messtechnische Erfassung des Wellenfeldes an der Geländeoberfläche in der Umgebung der bearbeiteten Verdichtungsstrecke. Diese kann künftig beispielsweise auf einer ähnlichen Art und Weise erfolgen wie dies bei der Resonanzverdichtung üblich ist (siehe Abschnitt 3.3.2).

Im Zuge der Verdichtung im Pilgerschrittverfahren ist der jeweilige Verdichtungsschritt solange weiterzuführen, bis das zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörige Werteniveau der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit erreicht ist. Den Übergang vom kontraktanten zum dilatanten Verhalten indiziert über die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit hinaus noch zusätzlich der rasch ansteigende Rüttleranpressdruck bei geringfügig zunehmender Rütteltiefe und die rasch ansteigende Übertragungsfunktion. Diese können noch zusätzlich durch die Beobachtung der Stromaufnahme ergänzt werden. Somit kann bei den einzelnen Verdichtungsschritten die mit dem angewendeten Tiefenrüttler maximal mögliche Verdichtungswirkung gezielt erreicht und nachgewiesen werden.

Es sei angemerkt, dass das zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörige Werteniveau der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit auf Messergebnissen aus den im Rahmen der gegenständlichen Forschungsarbeit durchgeführten experimentellen Untersuchungen beruht. Daher ist dieses gegenwärtig betrachtet ausschließlich für die untersuchte Bodenart in Kombination mit dem angewendeten Tiefenrüttler als gültig anzusehen. Bei der Anwendung von unterschiedlichen Rüttlertypen sowie bei abweichenden Untergrundverhältnissen ist aus heutiger Sicht ein abweichendes Werteniveau dieses Parameters beim Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zu erwarten. Aus diesem Grund empfiehlt es sich für die praktische Anwendung, den Übergangsbereich im Zuge einer Kalibrierung auf einem Probefeld zu definieren. Der Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz wird nicht erkennbar, solange das zugehörige Werteniveau der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit nicht überschritten ist. Das Überschreiten dieses Werteniveaus erfordert jedoch eine hohe Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden. Den Tiefenrüttler dauerhaft bei derartig hoher Kontaktspannung zu betreiben ist nicht sinnvoll. Es ist allerdings möglich, im Zuge einer Kalibrierung auf einem Probefeld die Verdichtungsschritte bis zu einer erhöhten Kontaktspannung fortzusetzen. Eine anschließende Interpretation des zeitlichen Verlaufes der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit, diverser Verfahrensparameter und der Übertragungsfunktion ermöglicht ein Werteniveau der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit als Abbruchkriterium festzulegen. Während der Verdichtungsarbeiten sind die einzelnen Verdichtungsschritte bis zu diesem Werteniveau fortzusetzen. Insbesondere bei inhomogenen Untergrundverhältnissen empfiehlt es sich, das festgelegte Werteniveau im Zuge der Verdichtungsarbeiten laufend zu überprüfen. Diese kann vergleichsweise einfach erfolgen, wobei bei bestimmten Verdichtungsstrecken die einzelnen Verdichtungsschritte solange fortgesetzt werden, bis eine erhöhte Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden aufgebaut wird und das zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörige Werteniveau der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit ersichtlich wird.

Durch die Gegenüberstellung der während der Arbeitsphase Einvibrieren ermittelten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit, welche den in-situ Zustand im Untergrund widerspiegelt, mit der im Zuge des Verdichtungsprozesses erreichten Verdichtungswirkung, ist eine arbeitsintegrierte Bestimmung des Verbesserungsfaktors über die Tiefe für die einzelnen Verdichtungsstrecken möglich.

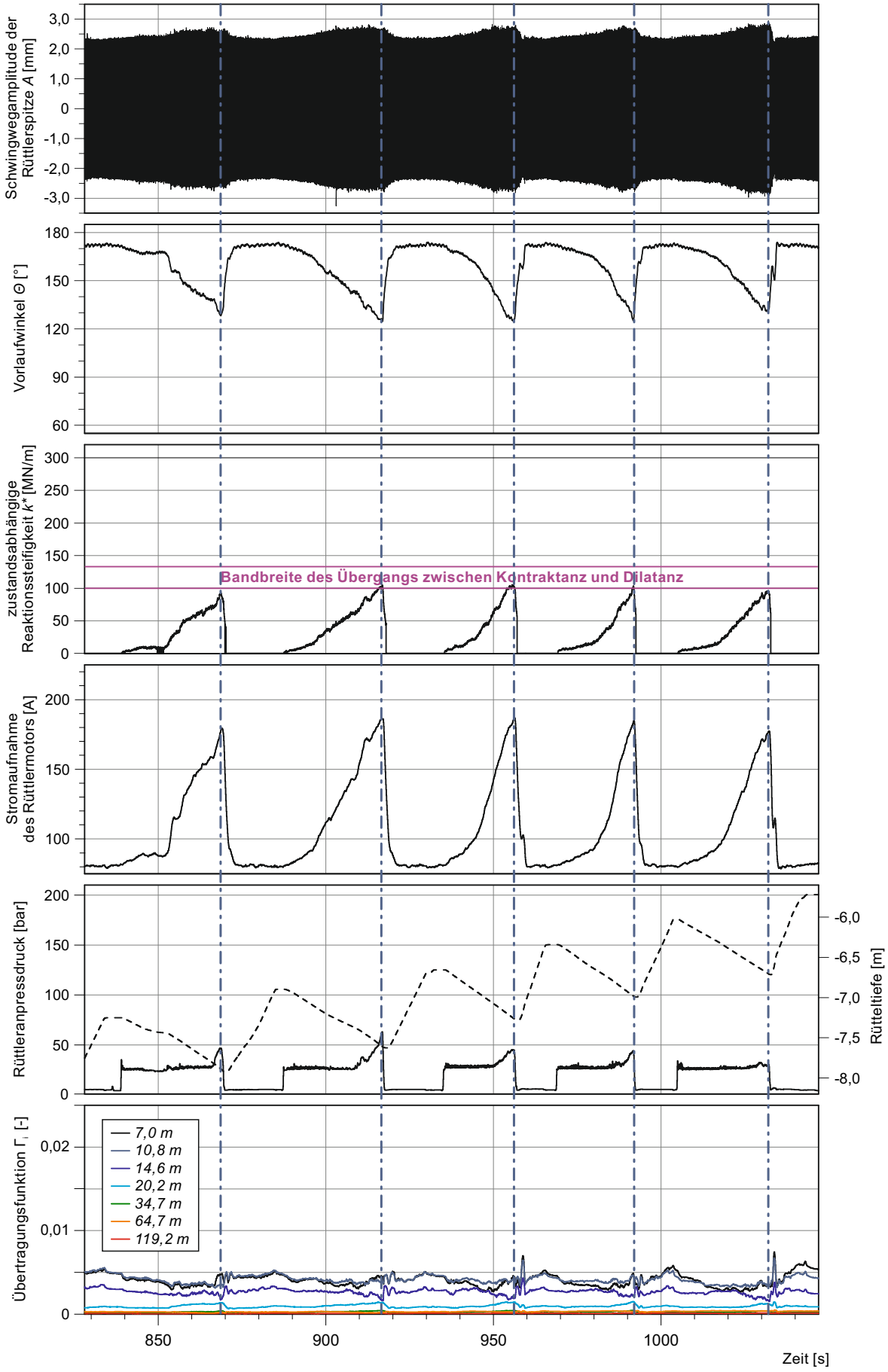


Abbildung 10.3: Optimale Verdichtung im standardmäßigen Rüttlerbetrieb.

10.4.1.1 Beispiel für einen optimierten Verdichtungsprozess

In Abbildung 10.3 ist ein Ausschnitt aus einer Verdichtungsstrecke ersichtlich, wobei die Rütteldruckverdichtung im Standardbetrieb erfolgte. Dabei sind analog zu Abbildung 10.1 jene Parameter dargestellt, die auf Basis der Erkenntnisse dieser Arbeit über die Ausschöpfung des Verdichtungspotenzials Auskunft erteilen. Diese Verdichtungsstrecke hat ein erfahrener Gerätefahrer der Firma *Keller*, ohne jegliche Vorgabe für die Verfahrensparameter, nach eigenem Ermessen hergestellt. Er hat dabei eine übermäßig hohe Spannung an der Kontaktfläche zwischen Rüttlerspitze und Boden[1] absichtlich vermieden. Der gegenständliche Verdichtungsversuch wurde in den Abschnitten 5.3.2, 5.4.1, 6.6.1 und 8.3.1 bereits eingehend diskutiert. Am Beispiel dieser Verdichtungsstrecke zeigt sich vorbildlich, wie die Verdichtung idealerweise erfolgen soll und wie diese mit den oben diskutierten Parametern überprüft werden kann.

Das zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörige Werteniveau der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit ist hierbei mit violettem Balken gekennzeichnet. Der Gerätefahrer brachte den Absenkvorgang im Zuge der einzelnen Verdichtungsschritte bis zu einem Werteniveau der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit, welches etwa dem Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz entspricht. Diese Zeitpunkte sind in Abbildung 10.3 mit blau strichlierten Linien gekennzeichnet. Im zeitlichen Verlauf des Rüttleranpressdrucks ist vor Beendigung des jeweiligen Verdichtungsschrittes lediglich ein leichter Anstieg erkennbar. Sowohl der Rüttleranpressdruck als auch die Stromaufnahme des Rüttlermotors zeigen in diesem Zustand ihre lokalen Maxima. Die Übertragungsfunktion ist über die betrachteten Verdichtungsschritte praktisch konstant, es kommt zu keinerlei Verstärkung mit zunehmender Rütteltiefe. Dieser Zustand entspricht etwa dem unmittelbar vor dem Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz gemäß Abbildung 10.1.

Dieser Verdichtungsprozess ist auf Basis der Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit als „optimiert“für die eingesetzte Boden-Verdichtungsgerät Konstellation anzusehen. Es kann davon ausgegangen werden, dass das Verdichtungspotenzial in dieser Verdichtungsstrecke praktisch ausgeschöpft ist. Weiters zeigt sich anhand der Gegenüberstellung der Übertragungsfunktion bei diesem und beim in Abbildung 10.1 dargestellten Verdichtungsversuch – über die gleichmäßige Qualität der Verdichtung hinaus – ein weiterer wesentlicher Vorteil des kontrollierten Verdichtungsprozesses, indem die Erschütterungen an der Geländeoberfläche auf einem niedrigen Niveau gehalten werden können.

10.4.2 Kontrolle und Optimierung des Abstands der Rüttleransatzpunkte

Basierend auf der Betrachtung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit in der Arbeitsphase Einvibrieren zeigt sich, dass die Eignung von unterschiedlichen Verdichtungsrastern auf Basis des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers beurteilt werden kann (siehe Abbildung 10.2). Diese Ergebnisse waren mit der konventionellen Methode, mit Ergebnissen der zur Verdichtungskontrolle durchgeführten Rammsondierungen, verifizierbar.

[1] Dieser Zustand wird von den Gerätefahrern häufig als „Überdrücken“ bezeichnet.

Die Betrachtung der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens hat jedoch einen wesentlichen Vorteil gegenüber Sondierverfahren. Sie ermöglicht es, die Eignung des aktuell angewendeten Verdichtungsrasters bereits während der Verdichtungsarbeiten kontinuierlich zu überprüfen. Mit Sondierverfahren ist diese intermittierend und damit den Verdichtungsprozess unterbrechend oder nach dem Abschluss der Verdichtung möglich. Hierfür ist lediglich die Analyse der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit im Zuge des Einvibrierens bei Rüttleransatzpunkten erforderlich, welche von bereits fertiggestellten Verdichtungsstrecken umgegeben sind. Durch eine Gegenüberstellung dieser Ergebnisse mit Verläufen, die den Ausgangszustand widerspiegeln und der zum Übergang zwischen Kontraktanz und Dilatanz zugehörigen Bandbreite, ist die Beurteilung des angewendeten Verdichtungsrasters möglich.

Dadurch ist praktisch eine laufende Überprüfung und bei Bedarf die Anpassung der Austeilung der Rüttleransatzpunkte möglich. Dieser Vorteil ist besonders bei inhomogenen Untergrundverhältnissen von Bedeutung, da dadurch ungünstige Abweichungen sofort erkannt und gegebenenfalls zusätzliche Verdichtungsstrecken angeordnet werden könnten.

10.5 Bestimmung der Steifigkeit des verdichteten Bodens

Allgemein gilt, dass sich die Bodensteifigkeit zufolge der Verdichtung erhöht. Die Steifigkeitserhöhung im Zuge der Rütteldruckverdichtung zeigt sich im zeitlichen Verlauf der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit. Diese ist von der aktuellen Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens abhängig. Die Ableitung der Bodensteifigkeit aus dieser Größe – beispielsweise in Form eines Schubmoduls – wurde im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht behandelt. Die Steifigkeit des verdichteten und des unbehandelten Untergrundes wurde mit der seismischen Drucksondierung bestimmt.

Wie in Kapitel 9.4 eingehend diskutiert, ist die Steifigkeit eines grobkörnigen Bodens – über die Porenzahl und die effektive mittlere Spannung – maßgeblich von der Größe der Dehnungsamplitude abhängig. Bei der Bestimmung der Bodensteifigkeit ist daher diese zu berücksichtigen. Während des Verdichtungsvorgangs treten im Zuge der Rüttlerschwingung unmittelbar beim Tiefenrüttler größere Dehnungen auf, die Dehnungsamplitude wird mit zunehmendem Abstand vom Rüttler niedriger (siehe Abbildung 10.4). Es ist auf Basis der Ergebnisse der gegenständlichen Untersuchungen kaum möglich, die Größe der Dehnungen in Abhängigkeit des Abstands vom Tiefenrüttler genau zu bestimmen, weshalb auch die arbeitsbegleitende Bestimmung der aktuellen Bodensteifigkeit während der Verdichtungsarbeiten auf Basis des Bewegungsverhaltens äußerst ungewiss wäre. Die Untersuchung dieser Problemstellung wäre beispielsweise mit gezielten numerischen Simulationen des Rüttler-Boden Interaktionssystems möglich. Weitere Aspekte dieser Fragestellung sind in Kapitel 11 diskutiert.

Demgegenüber, treten im Zuge der seismischen Wellenausbreitung im Untergrund bei geophysikalischen Untersuchungen, wie beispielsweise auch bei einer seismischen Drucksondierung, Verformungen im Bereich der sehr kleinen Dehnungen auf [61], [134]. Die Größenordnung der Scherverformung bewegt sich innerhalb eines klar definierbaren Bereichs.

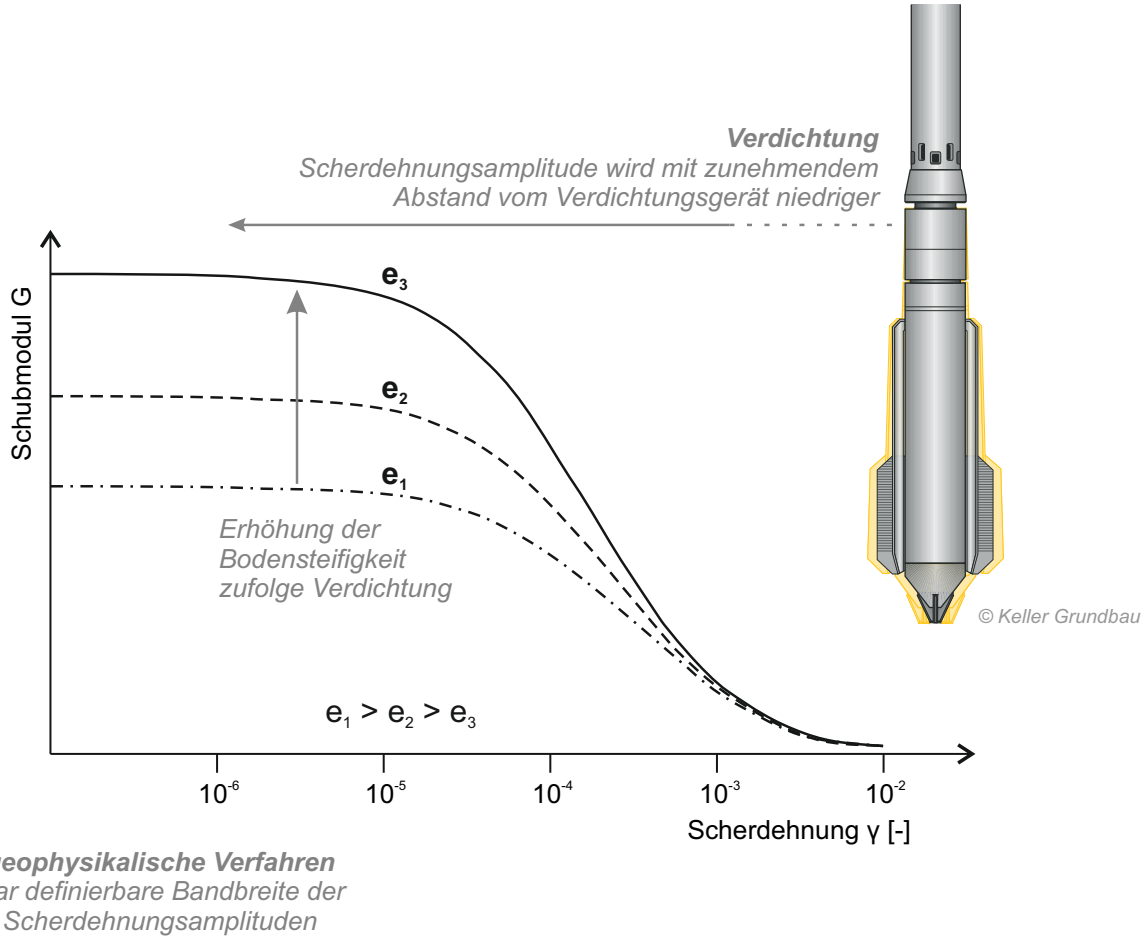


Abbildung 10.4: Schmatische Darstellung der Größenordnung der Scherverformungen während des Verdichtungsvorganges und während der seismischen Wellenausbreitung bei einer geophysikalischen Untersuchung [104].

Dies ermöglicht die Ermittlung der Bodensteifigkeit bei jeder Messung unter den gleichen Randbedingungen und gewährleistet dadurch eine Vergleichbarkeit der Messergebnisse. Die ermittelte Bodensteifigkeit ist in weiterer Folge beispielsweise bei seismischen Analysen oder – unter Berücksichtigung der Dehnungsabhängigkeit der Steifigkeit – bei der Bestimmung der Zusammendruckbarkeit des verdichteten Schichtpaketes anwendbar.

Kapitel 11

Zusammenfassung und Ausblick

In der vorliegenden Dissertation wurde das Rütteldruckverfahren durch Analyse des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers, die Wirkung der Verdichtung auf den Boden und auf das Rüttler-Boden Interaktionssystem eingehend untersucht. Diese Arbeit setzte sich die Schaffung eines grundlegenden Verständnisses der wesentlichen physikalischen Prozesse im Rüttler-Boden Interaktionssystem bzw. darauf aufbauend die Entwicklung der wissenschaftlichen Grundlagen eines Systems zur arbeitsintegrierten Qualitätskontrolle im Zuge der Rütteldruckverdichtung auf Basis der dreidimensionalen Rüttlerbewegung zum übergeordneten Ziel.

Die Beobachtung und messtechnische Erfassung des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers während des Verdichtungsprozesses erfolgte in großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen. Im Zuge dieser Experimente wurde ein geeignetes Mess- und Datenübertragungssystem entwickelt und auf einem Tiefenrüttler installiert. Die Verdichtungsversuche fanden auf einem Versuchsfeld bei Fisching, in der Obersteiermark statt.

Durch die anschließende Auswertung und Interpretation der aufgezeichneten Messergebnisse war es möglich, bisher unbekannte bzw. in der Literatur nur zum Teil beschriebe Vorgänge, die während der Verdichtung auf dem Tiefenrüttler und im Rüttler-Boden Interaktionssystem auftreten, in entsprechender Tiefe zu erforschen. Insbesondere ist der grundlegende Einfluss der Spannung an der Kontaktfläche zwischen Rüttlerspitze und Boden auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers hervorzuheben. Auf Basis dessen charakteristischen Bewegungsverhaltens erfolgte eine Unterteilung der einzelnen Verdichtungsschritte in vier gut abgrenzbare Phasen, welche als Betriebsphasen bezeichnet und folgendermaßen benannt wurden: Einfahren, Post-Resonanz, Überdrücken und Heben.

Das grundlegende Verständnis des Verdichtungsprozesses und die Abgrenzung der Vorgänge, die bei der Veränderung des Verdichtungszustandes des anstehenden Bodens eine wesentliche Rolle spielen, sind für die Entwicklung der Grundlagen eines Systems zur arbeitsintegrierten Qualitätskontrolle im Zuge der Rütteldruckverdichtung unerlässlich. Die Ergebnisse der experimentellen Untersuchungen ermöglichten es, die maßgeblichen Einwirkungen des Tiefenrüttlers auf das Korngerüst zu definieren und in weiterer Folge eine Arbeitshypothese zur Erklärung der zentralen physikalischen Vorgänge während der Verdichtung zu erarbeiten. Es sei an dieser Stelle dezidiert darauf hingewiesen, dass die in

der vorliegenden Arbeit gezeigte Rüttlerbewegung und die Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem ausschließlich für die untersuchten Untergrundverhältnisse und Systemkomponenten als gültig anzusehen sind.

Aufbauend auf den Erkenntnissen der Messdatenauswertung wurde ein analytisches Modell für das Rüttler-Boden Interaktionssystem entwickelt. Das übergeordnete Ziel der analytischen Modellierung war eine grundlegende Untersuchung des Zusammenhanges zwischen der aktuellen Steifigkeit des Bodens und dem Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers und in weiterer Folge eine Quantifizierung des Verdichtungserfolgs in Form eines unmittelbar aus den messtechnisch erfassten Daten ableitbaren Indikators. Das hochkomplexe Rüttler-Boden Interaktionssystem wurde in vereinfachter Form als quadratisch angeregter Einmassenschwinger dargestellt. Dieses war aufgrund der prinzipiellen Übereinstimmung der Rüttlerbewegung und der allgemeinen theoretischen Zusammenhänge für quadratisch angeregte Einmassenschwinger möglich. Trotz seiner verhältnismäßig einfachen Gestaltung hat sich dieser Modellierungsansatz als geeignet erwiesen, die wesentlichen Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem theoretisch realitätsnah abbilden zu können. Dieses Modell berücksichtigt eine mitschwingende Bodenmasse. Die Interaktion zwischen dem Rüttlerkörper und dem zu verdichtenden Boden wird durch zwei zueinander orthogonale Kelvin-Voigt Körper abgebildet, die aus je einer linear elastischen Feder der Steifigkeit und einem viskosen Dämpfer bestehen. Daraus erfolgte die Ermittlung der Steifigkeit der elastischen Feder auf Basis der messtechnisch erfassten Rüttlerbewegung. Die zu identifizierende Federsteifigkeit entspricht zwar nicht unmittelbar der Bodensteifigkeit, sie stellt jedoch im gegenständigen Modellierungsansatz eine vom aktuellen Verdichtungszustand des Bodens abhängige Größe dar. Demzufolge erhielt die Federsteifigkeit die Bezeichnung „zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit“. Für die vorliegende Parameteridentifizierung sind die Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze und der Vorlaufwinkel der Unwuchtmasse die wesentlichen Eingangsparameter, welche das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers vollständig charakterisieren.

Eine Interpretation des errechneten Indikators ließ aus bodenmechanischer Sicht die Erarbeitung einer Arbeitshypothese zur Abgrenzung von kontraktantem und dilatantem Verhalten des zu verdichtenden Bodens zu. Bei Kontraktanz hat die Reduktion des Porenvolumens – neben der Änderung des Spannungszustands – einen maßgeblichen Einfluss auf die Erhöhung der Bodensteifigkeit. Demgegenüber dominiert während des dilatanten Verhaltens die ansteigende mittlere effektive Spannung zufolge der behinderten Seitendehnung im Korngerüst, welche in weiterer Folge zu einem deutlich ausgeprägten Anstieg der Bodensteifigkeit führt. Durch die Gegenüberstellung des Bewegungsverhaltens des Rüttler-Boden Interaktionssystems und der maßgeblichen Prozesse im zu verdichtenden Boden konnte aufgezeigt werden, dass die effektivste Verdichtung nicht notwendigerweise bei einem charakteristischen Punkt des Bewegungsverhaltens, beispielsweise beim Resonanzpunkt, stattfindet, sondern unabhängig davon.

Die Abgrenzung von kontraktantem und dilatantem Verhalten aus den gemessenen Daten ermöglicht eine Beurteilung des Verdichtungszustandes sowie die Optimierung des Verdichtungsvorgangs. Über das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers hinaus sind hierfür

Verfahrensparameter, wie der Rüttleranpressdruck, die Rütteltiefe und die Stromaufnahme des Rüttlermotors sowie die Übertragungsfunktion zwischen der Schwinggeschwindigkeitsamplitude des Rüttlers und der resultierenden Schwingschnelle an der Geländeoberfläche anwendbar. Somit kann der Verdichtungserfolg im Zuge der Herstellung der einzelnen Verdichtungsstrecken überprüft und nachgewiesen werden.

Darüber hinaus ist es möglich, durch die Beurteilung der Eignung von unterschiedlichen Verdichtungsrastern auf Basis der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit zu prüfen, ob die einzelnen vertikalen Verdichtungsstrecken einen zusammenhängenden quasihomogenen Bodenbereich bilden. Die gesamtheitliche Betrachtung dieser Erkenntnisse lässt eine systematische Überprüfung des verdichteten Bodenbereichs im Sinne einer tiefenabhängigen und gleichzeitig flächendeckenden, d. h. quasi raumfüllenden, Verdichtungskontrolle zu.

Die zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit ist zwar von der aktuellen Steifigkeit des zu verdichtenden Bodens abhängig, die Ableitung der Bodensteifigkeit auf Basis dieser Größe ist aus heutiger Sicht noch nicht möglich. Hierfür sind geophysikalische Untersuchungen, wie beispielsweise die seismische Drucksondierung, in idealer Weise verwendbar.

Die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit werfen allerdings erwartungsgemäß zahlreiche weitere Fragen auf. Das im Zuge der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen in Fisching abgedeckte umfangreiche Untersuchungsprogramm war bestens geeignet, das Systemverhalten unter den gegebenen Randbedingungen zu erkunden. Es sind jedoch in der Ausführungspraxis unter abweichenden Randbedingungen unterschiedliche Arten des Systemverhaltens bekannt. Daher sind weitere experimentelle Untersuchungen mit anderen Bodenarten unter Anwendung von anderen Rüttlertypen notwendig. Als Fernziel der gegenständlichen Entwicklungsarbeiten ist die Formulierung allgemeingültiger Zusammenhänge zwischen der Rüttlerbewegung und dem Verdichtungszustand des Bodens. Diese sollen für unterschiedliche Bodenarten und Tiefenrüttler anwendbar sein. Dazu sind weitere gezielte, tiefreichende Einblicke in das Systemverhalten sowie eine ausführlichere Betrachtung der maßgeblichen Prozesse im Interaktionssystem Rüttler-Boden notwendig. D. h. die Erweiterung der Bandbreite der gegenständlichen Forschungsarbeit ist erforderlich, welche vor allem durch großmaßstäbliche experimentelle Untersuchungen bei abweichenden Rahmenbedingungen möglich ist. Weitere Verdichtungsversuche sind bei unterschiedlichen Untergrundverhältnissen wohl unerlässlich. Der Einsatz von verschiedenen Rüttlertypen ist dabei ebenfalls von besonderer Bedeutung. Bei den gegenständlichen Untersuchungen kam ein elektrisch angetriebener Tiefenrüttler mit Mäklerführung zur Anwendung. Bei diesem Gerätetyp kann durch das Aktivieren des Eigengewichts der Tragraupe eine erhöhte Kontaktspannung über die Rüttlerspitze auf den zu verdichtenden Boden übertragen werden. Von speziellem Interesse sind Experimente mit am Seil hängenden Rüttlern, bei denen lediglich das Rüttlereigengewicht als Eindringhilfe zur Verfügung steht. Dieser verfahrensbedingte Umstand kann den Verdichtungsprozess grundsätzlich beeinflussen.

Die Erkenntnisse dieser Arbeit lassen darauf schließen, dass die Wasserspülung das Be-

wegungsverhalten beeinflusst. Eine systematische Erkundung des Einflusses der Wasserspülung konnte jedoch auf Basis der durchgeführten Verdichtungsversuche nicht erfolgen. Bei diesen Untersuchungen sind insbesondere die Durchflussmenge und die Strömungsgeschwindigkeit des Wassers bzw. darüber hinaus die Anzahl und die Anordnung der Wasseraustritte entlang des Rüttlerkörpers und gegebenenfalls entlang der Verlängerungsrohre zu berücksichtigen.

Ein analytisches oder numerisches Modell des Rüttler-Boden Interaktionssystems ist für das grundlegende Verständnis der physikalischen Prozesse im Rüttler-Boden Interaktionssystem unerlässlich und stellt einen wesentlichen Schritt auf dem Weg zur Quantifizierung des Verdichtungserfolgs in Form eines Indikators dar. Das zugrundegelegte analytische Modell zeigt ebenfalls Potenzial für eine Weiterentwicklung auf. Die mitschwingende Bodenmasse wurde in der vorliegenden Forschungsarbeit während der einzelnen Verdichtungsschritte als konstant angenommen. Bestimmte Vorgänge, vor allem die Veränderung des Wellenfeldes an der Geländeoberfläche lassen jedoch eine vom Verdichtungszustand des Bodens abhängige, veränderliche mitschwingende Bodenmasse vermuten. Die Untersuchung dieser Problematik kann beispielsweise durch eine Gegenüberstellung von gezielten numerischen Simulationen mit Messergebnissen durchgeführt werden. Die Darstellung der Bodenreaktion erfolgt in der vorliegenden Arbeit mit einem vergleichsweise einfachen Ansatz, durch Kelvin-Voigt Körper. Die Berücksichtigung von Plastizität im Materialverhalten könnte theoretisch den Brückenschlag zwischen Rüttlerbewegung und bleibenden Verformungen im Untergrund darstellen. Ein numerisches Simulationsmodell, welches die Prozesse im zu verdichtenden Boden nicht nur qualitativ, sondern auch quantitativ abbilden kann, sowie das dreidimensionale Bewegungsverhalten realitätsnah widerspiegelt, steht allerdings bis dato nicht zur Verfügung. Komplexe Simulationsmodelle und die Anwendung hochwertiger Stoffmodelle sind wesentliche Werkzeuge für ein besseres Verständnis der Vorgänge im Rüttler-Boden Interaktionssystem. Parameterstudien sind unerlässlich für eine Optimierung von Verfahrensparametern. Des Weiteren können derartige Simulationen die Betrachtung des Zusammenhanges zwischen der aktuellen Steifigkeit des Bodens und der Rüttlerbewegung ermöglichen. Es ist jedoch für die praktische Anwendung zu beachten, dass die Qualitätskontrolle der Verdichtung vergleichsweise einfach und robust gestaltet werden soll.

Es hat sich im Zuge dieser Arbeit gezeigt, dass die Spannung an der Kontaktfläche Rüttlerspitze und Boden im Bereich unterhalb der Rüttlerspitze von besonderer Bedeutung ist. Diese steuert die Bodensteifigkeit maßgeblich, welche sich auch im Bewegungsverhalten zeigt. Daher ist eine tiefreichende versuchstechnische oder theoretische Untersuchung der Spannungsausbreitung im Bereich unterhalb der Rüttlerspitze von besonders großem Interesse. Beispielsweise können Modellversuche, numerische Simulationsmodelle sowie analytische Lösungen dafür zur Anwendung kommen.

Vergleichsweise einfache Erklärungsversuche ermöglichen die Simulation bestimmter Prozesse im zu verdichtenden Boden unter Laborbedingungen. Derartige Versuche können zu einem besseren Verständnis der maßgeblichen physikalischen Prozesse führen und stellen eine hervorragende Ergänzung und Interpretationshilfe zu numerischen oder theoreti-

schen Untersuchungen dar. Hierfür ist beispielsweise der zyklische Triaxialversuch besonders gut geeignet. Dieser Versuch ermöglicht es, das Verhalten des Bodens bei zyklischer Belastung unter drainierten und undrainierten Verhältnissen zu untersuchen und darüber hinaus die Bodensteifigkeit bei kontrollierten Dehnungsamplituden zu ermitteln.

Das Wellenfeld an der Geländeoberfläche kann ein äußerst wertvolles Werkzeug für die Kontrolle der Verdichtungsarbeiten darstellen. Es ist daher sinnvoll, im Zuge von künftigen großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen bei abweichenden Randbedingungen das Wellenfeld an der Geländeoberfläche messtechnisch zu erfassen und diese tiefreichend zu analysieren. Die Analyse soll auch eine systematische theoretische Untersuchung der Übertragungsfunktion zwischen Rüttler und Geländeoberfläche beinhalten, welche sich im Zuge der gegenständlichen Untersuchungen als wesentlicher Parameter abgezeichnet hat. Darüber hinaus empfiehlt es sich, beispielsweise das Bewegungsverhalten an der Geländeoberfläche an bestimmten Stellen im Detail zu betrachten und dieses der Rüttlerbewegung gegenüberzustellen.

Die gegenständlichen Untersuchungen zeigen einen Zusammenhang zwischen der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und der Stromaufnahme des Rüttlermotors und dadurch eine prinzipielle Anwendbarkeit dieses Parameters zur Kontrolle der Verdichtungsarbeiten. Eine systematische Untersuchung der Mechanismen im Rüttlermotor, die zur Erhöhung der Stromaufnahme in Folge der fortschreitenden Verdichtung führen, ist für eine verlässliche Anwendung dieses Parameters zur Verdichtungskontrolle jedoch zwingend erforderlich. Es empfiehlt sich, im Zuge derartiger Untersuchungen spezielle Leistungsanalysatoren zu verwenden, welche eine Untersuchung des genauen zeitlichen Verlaufs der Leistungsaufnahme und dadurch tiefere Einblicke in das Verhalten des Rüttlermotors während der Verdichtung erlauben. Dabei soll der Zusammenhang zwischen der mechanischen Leistung des Tiefenrüttlers und der Leistung des Elektromotors untersucht werden.

Eine arbeitsintegrierte Verdichtungskontrolle ist nicht nur bei der Rütteldruckverdichtung, sondern auch bei anderen Bodenverbesserungsverfahren von besonderer Bedeutung. In diesem Zusammenhang ist das Rüttelstopfverfahren hervorzuheben. Die Erkenntnisse dieser Forschungsarbeit zeigen Potenzial für eine Erweiterung auf das Rüttelstopfverfahren, insbesondere bei der Berücksichtigung von Installationseffekten auf das Tragverhalten des Boden-Stopfsäule Systems, welche bei diesem Verfahren eine entscheidende Rolle spielen. Hierfür ist eine systematische experimentelle und theoretische Untersuchung des hochkomplexen Rüttler-Boden-Stopfsäule Interaktionssystems erforderlich.

Die gesamtheitliche Betrachtung der Ergebnisse dieser Forschungsarbeit und die zu erwartenden Ergebnisse zukünftiger Forschungsarbeiten sollen die Identifikation eines allgemeingültigen Indikators für den Verdichtungserfolg und damit die Definition eines Messwertes für eine Rüttlerintegrierte Dynamische Verdichtungskontrolle (RDVK) ermöglichen.

Literaturverzeichnis

[1] C. Adam, D. Adam, F.J. Falkner, I. Paulmichl und J. Fürpaß. „Der Impulsverdichter zur mitteltiefen Verdichtung und Verbesserung von Böden“. In: *1. Symposium - Baugrundverbesserung in der Geotechnik*. Hrsg. von Universität Siegen, 2011, S. 111–134.

[2] D. Adam. „Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen“. Dissertation. Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, 1996.

[3] D. Adam. *OES220 GDK Mellach, Errichtung eines Gas- und Dampfturbinen- Kombinationskraftwerks. Baubegleitende geotechnische Überwachung*. Technischer Bericht (unveröffentlicht). GEOTECHNIK ADAM ZT GmbH, 2009.

[4] D. Adam. *Studienblätter zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik*. Institut für Geotechnik der Technischen Universität Wien, 2018.

[5] D. Adam, I. Paulmichl, F. Kopf und P. Erdmann. „Integrierte Verdichtungskontrolle bei dynamischen Verdichtungsverfahren“. In: *1. Symposium - Baugrundverbesserung in der Geotechnik*. Universiät Siegen, 2011, S. 135–159.

[6] D. Adam und J. Pistrol. „Dynamic roller compaction for earthworks and roller- integrated continuous compaction control: State of the art overview and recent developments“. In: *Conferenze di Geotecnica di Torino, XXIV Ciclio*. M. Manassero, A. Dominijanni, S. Foti, G. Musso, 2016, S. 1–41.

[7] D. Adam, J. Pistrol, P. Nagy, O. Barbir, M. Hager und Kopf F. „25 Jahre Geotechnik-Kolloquien an der TU Darmstadt und 25 Jahre Bodendynamik an der TU Wien - Zwei besondere Geotechnik-Jubiläen“. In: *Vorträge zum 25. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium am 08. März 2018 - Festkolloquium*. Hrsg. von R. Katzenbach. Bd. 104. Eigenverlag, 8. März 2018, S. 3–15.

[8] D. Adam, J. Pistrol, P. Nagy, C. Capraru und F. Kopf. „Aktuelle Entwicklungen zur oberflächennahen und tiefen Baugrundverbesserung mittels dynamischer Verfahren“. In: *Beiträge zum 31. Christian Veder Kolloquium*. Mitteilungshefte Gruppe Geotechnik Graz, 56, 2016.

[9] S.S. Afifi und R.D. Woods. „Long-term pressure effects on shear modulus of soils“. *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.* 97 (1971), S. 1445–1460.

[10] M. Arnold und I. Herle. „Comparison of vibrocompaction methods by numerical simulations“. *International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics* 33.16 (2009), S. 1823–1838.

[11] J.H. Atkinson. „Non-linear soil stiffness in routine design“. *Géotechnique* 50.5 (2000), S. 487–508.

[12] J.I. Baez und G.R. Martin. „Liquefaction observations during installation of stone columns using the vibro-replacement technique“. *Geotechnical News* 10.3 (1992), S. 41–44.

[13] L. Balachowski und N. Kurek. „Vibroflotation control of sandy soils using DMT and CPTU“. In: *The 3rd International Conference on the Flat Dilatometer*. DMT'15 3rd International Conference on the Flat Dilatometer. (Rome). Juni 2016, S. 185–190.

[14] G. Baldi, R. Bellotti, V.N. Ghionna, M. Jamiolkowski und D.C. Lo Presti. „Modulus of sands from CPTs and DMTs“. In: *12th International Conference SMFE*. Bd. 1. Rio de Janeiro, 1989, S. 165–170.

[15] O. Barbir. *Research project - Developement of the condition dependent tamping process*. Internal project status report (unpublished). Vienna University of Technology, Institute of Geotechnics, 2018.

[16] BAUER Spezialtiefbau GmbH. *Broschüren und Prospekte*. 2018.

[17] T. Benz. „Small-strain stiffness of soils and its numerical consequences“. Dissertation. Fakultät für Bau- und Umweltingenieurwissenschaften der Universität Stuttgart, 2007.

[18] T. Benz, R. Schwab und P. Vermeer. „Zur Berücksichtigung des Bereichs kleiner Dehnungen in geotechnischen Berechnungen“. *Bautechnik* 84.11 (2007), S. 749–761.

[19] B. Böhle, K. Maihold und W. Möbius. „Weiterentwicklung der geotextilummantelten Stopfsäulen als Gründungssystem“. In: *Mitteilung des Fachgebietes Grundbau und Bodenmechanik, Heft Nr. 70*. 12. Hans Lorenz Symposium. TU Berlin, 2016.

[20] B. Biedermann. *Vergleichende Untersuchungen mit Sonden in Schluff. Forschungsberichte aus Bodenmechanik und Grundbau*. 9. 1984.

[21] A. Bitri, K. Samyn, S. Brulé und E.H. Javelaud. „Assessment of ground compaction using multi-channel analysis of surface wave data and cone penetration tests“. *Near Surface Geophysics* 11.6 (2013), S. 683–690.

[22] M.W. Bo, J. Chu und V. Choa. „The Changi East Reclamation Project in Singapore“. In: *Elsevier Geo-Engineering Book Series*. Bd. 3. Elsevier, 2005. Kap. 9, S. 247–276.

[23] H. Brandl, D. Adam, F. Kopf und R. Niederbrucker. „Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewichtsgerät. Grundlagenforschung und praktische Anwendung“. *Straßenforschung* Heft 533 (2003).

[24] R.E. Brown. „Vibroflotation compaction of cohesionsless soil“. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* (1977).

[25] H.O. Buja. *Handbuch des Spezialtiefbaus: Geräte und Verfahren*. Werner, 2001.

[26] J.B. Burland. „Ninth Laurits Bjerrum Memorial Lecture: „Small is beautiful“ – the stiffness of soils at small strains“. *Canadian Geotechnical Journal* 26.4 (1989), S. 499–516.

[27] A.P. Butcher, R.G. Campanella, A.M. Kaynia und K.R. Massarsch. „Seismic cone downhole procedure to measure shear wave velocity – A guideline prepared by ISSMGE TC10: Geophysical Testing in Geotechnical Engineering“. In: *Proceedings of the XVIth Inter. Conf. on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. (Osaka, Japan). 2005.

[28] R.G. Campanella und P.K. Robertson. „A Seismic Cone Penetrometer to measure engineering properties of soil“. In: *SEG Technical Program Expanded Abstracts*. 1984 SEG Annual Meeting. Atlanta, Georgia: Society of Exploration Geophysicists, 1984, S. 138–141.

[29] R.G. Campanella und W.P. Stewart. „Seismic cone analysis using digital signal processing for dynamic site characterization“. *Canadian Geotechnical Journal* 29.3 (1992), S. 477–486.

[30] L. Chaigneau, R. Gourves und D. Boissier. „Compaction control with a dynamic cone penetrometer“. In: *Proceedings of International Workshop on Compaction of Soils, Granulates and Powders, Innsbruck*. A.A. Balkema, Rotterdam, 2000, S. 103–109.

[31] S. Chrisopoulos. „Contributions to the Numerical Modelling of Vibratory Pile Driving in Saturated Sand“. Dissertation. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2018.

[32] C.S. Covil, M.C.W. Luk und A.R. Pickles. „Case history: ground treatment of the sandfill at the new airport at Chek Lap Kok, Hong Kong“. In: *Ground Improvement Geosystems: Densification and Reinforcement: Proceedings of the Third International Conference on Ground Improvement Geosystems, London,* Thomas Telford. London, 1997.

[33] R. Cudmani, T. Meier und V. Osinov. „Development of a numerical model for the prediction of densification of cohesionless soils during deep vibratory compaction“. In: *TRANSVIB 2006, international symposium on vibratory pile driving and deep soil vibratory compaction. Editions du LCPC, Paris*. 2006, S. 131–140.

[34] H. Daniel. *Physik: Optik, Thermodynamik, Quanten*. Bd. 3. Walter de Gruyter, Berlin - New York, 1997.

[35] E. D'Appolonia. „Loose Sands - Their Compaction by Vibroflotation“. In: *Symposium on Dynamic Testing of Soils*. ASTM International. 1954.

[36] B.M. Das. *Principles of Soil Dynamics*. Cengage Learning, 2016.

[37] U. Dayal und J.H. Allen. „The effect of penetration rate on the strength of remolded clay and sand samples“. *Canadian Geotechnical Journal* 12.3 (1975), S. 336–348.

[38] N. Denies, J. Canou, J.-N. Roux und A. Holeyman. „Vibrocompaction properties of dry sand“. *Canadian Geotechnical Journal* 51.4 (2013), S. 409–419.

[39] *Empfehlungen für die Ausschreibung von Tiefenrüttelverfahren (Rüttelstopf - /Rütteldruckverdichtung)*. Österreichische Gesellschaft für Geomechanik Fachsektion Bodenmechanik und Grundbau, 2013.

[40] E. Falk, A. Zöhrer und G. Strauch. „Entwicklung der Tiefenverdichtung - Von der händischen Datenaufzeichnung zur automatischen Visualisierung". In: *Tagungsband 8. Österreichische Geotechniktagung*. ÖIAV, 2011, S. 309–320.

[41] Fanki Foundations Belgium. *Broschüren und Prospekte*. 2017.

[42] B.H. Fellenius. *Basics of Foundation Design*. Richmond, BC: BiTech Publishers Limited, 1999.

[43] W. Fellin. „On-line Verdichtungskontrolle bei der Rütteldruckverdichtung". *Bauingenieur* 75.9 (2000), S. 607–612.

[44] W. Fellin. „Quality control in deep vibrocompaction". In: *Proceedings of International Workshop on Compaction of Soils, Granulates and Powders*. (Innsbruck). A.A. Balkema, Rotterdam, 2000, S. 133–144.

[45] W. Fellin. *Rutteldruckverdichtung als Plastodynamisches Problem*. Dissertation an der Universität Innsbruck. A.A. Balkema, Rotterdam, 2000.

[46] W. Fellin, G. Hochenwarter und A. Geiß. „On-line Verdichtungskontrolle bei der Rütteldruckverdichtung". In: *Mitteilungen des Institutes für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig*. Messen in der Geotechnik 2002. Bd. Heft 68. 2002, S. 87–106.

[47] S. Foti, C.G. Lai, G.J. Rix und C. Strobbia. *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*. CRC Press, 2014.

[48] Fugro N.V. *Broschüren und Prospekte*. 2018.

[49] G. Gazetas. „Shear modulus of rockfill from lateral pile load test". In: *XII International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Rio de Janeiro, Brazil, 1989, S. 833–836.

[50] D.C. von Grünigen. *Digitale Signalverarbeitung: Bausteine, Systeme, Anwendungen*. Fotorotar Print und Media AG, 2008.

[51] B.O. Hardin und V.P. Drnevich. „Shear modulus and damping in soils: measurement and parameter effects". *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div.* 98.6 (1972).

[52] B.O. Hardin und F.E. Richart Jr. „Elastic wave velocities in granular soils". *Journal of Soil Mechanics & Foundations Div* 89 (1963).

[53] B.O. Hardin und Black W.L. „Vibration modulus of normally consolidated clay". *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* Vol. 94 (Issue 2 1968), S. 353–370.

[54] G. Heibrock, S. KeBler und Th. Triantafyllidis. „On modelling vibro-compaction of dry sands“. In: *Proceedings of the International Conference on Numerical Simulation of Construction Processes in Geotechnical Engineering for Urban Environment, Bochum, Germany*. CRC Press. 2006, S. 125–132.

[55] E. Heins, T. Hamann und J. Grabe. „Numerische Simulation einer Bodenverbesserungsmaßnahme infolge Rütteldruckverdichtung.“ *Numerische Methoden in der Geotechnik*. BAW Mitteilungen Nr. 98 (2015). Hrsg. von Bundesanstalt für Wasserbau, S. 59–68.

[56] J.S. Heisey, K.H. Stokoe und A.H. Meyer. „Moduli of pavement systems from spectral analysis of surface waves“. *Transportation Research Record* 852 (1982).

[57] S. Henke, T. Hamann und J. Grabe. „Numerische Untersuchungen zur Bodenverdichtung mittels Rütteldruckverfahren“. In: *Tagungsband des 2. Symposiums Baugrundverbesserung in der Geotechnik*. (Wien). Hrsg. von D. Adam und R.A. Herrmann. 2012, S. 209–228.

[58] I.M. Idriss und R.W. Boulanger. *Soil Liquefaction During Earthquakes*. 2008.

[59] O.G. Ingles und K. Grant. „The Effect of Compaction on Various Properties of Coarse-Grained Sediments“. In: *Developments in Sedimentology*. Hrsg. von G.V. Chilingarian und K.H. Wolf. Bd. 18. Elsevier, 1975. Kap. 6, S. 293–348.

[60] K. Ishihara. *Soil Behaviour in Earthquake Geotechnics*. Clarendon Press; Oxford University Press, 1996.

[61] M. Jamiolkowski, D.C.F. LoPresti und O. Pallara. „Role of in-situ testing in geotechnical earthquake engineering“. In: *International Conferences on Recent Advances in Geotechnical Earthquake Engineering and Soil Dynamics*. University of Missouri-Rolla, 1995.

[62] Johann Keller GmbH. *Der Rütteldruck. Die Neue Technik des Erd- und Betonbaus.* Hrsg. von Firmenveröffentlichung. 1935.

[63] M. Karray, G. Lefebvre, Y. Ethier und A. Bigras. „Assessment of deep compaction of the Péribonka dam foundation using “modal analysis of surface waves”(MASW)“. *Canadian Geotechnical Journal* 47.3 (2010), S. 312–326.

[64] P. Kearey, M. Brooks und I. Hill. *An Introduction to Geophysical Exploration*. Third Edition. Blackwell Science, Oxford, 2013. 262 S.

[65] Keller Grundbau GmbH. *Compaction for Breakwater Construction, Seabird project Karwar, India*. site report. 2002.

[66] Keller Holding GmbH. *Broschüren und Prospekte*. 2017.

[67] D.-S. Kim, E.-S. Bang und W.-C. Kim. „Evaluation of various downhole data reduction methods for obtaining reliable v_s profiles“. *Geotechnical Testing Journal* 27.6 (2004).

[68] D.S. Kim und H.C. Park. „Evaluation of ground densification using spectral analysis of surface waves (SASW) and resonant column (RC) tests“. *Canadian Geotechnical Journal* 36.2 (1999), S. 291–299.

[69] Kinemetrics, Inc. *Datenblatt EpiSensor ES-T Beschleunigungssensor*. 2018.

[70] K. Kirsch und F. Kirsch. *Ground Improvement by Deep Vibratory Methods*. CRC Press, 2010.

[71] Kistler Holding AG. *Datenblatt K-Beam® Beschleunigungssensor*. 2015.

[72] D. Kolymbas. *Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau*. Springer-Verlag, 2007.

[73] F. Kopf. „Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) bei der Verdichtung von Böden durch dynamische Walzen mit unterschiedlichen Anregungsarten“. Dissertation. Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, 1999.

[74] F. Kopf. *Tiefenrüttler Verdichtungskontrolle und Regelung*. Interner Bericht (unveröffentlicht). FCP Fritsch, Chiari & Partner ZT GmbH, 30. Okt. 2016.

[75] S. Kramer. *Geotechnical Earthquake Engineering*. Pearson Education India, 1996.

[76] S. Kramer und A. Kaynia. *Geodynamics - Lecture Notes Part 2 & 3*. Geotechnical Group, NTNU Trondheim, 2017.

[77] G. Kvasina. „Ermittlung des Verdichtungserfolges im Rahmen des Forschungsprojektes Dynamische Verdichtung mit Tiefenrüttlern“. Projektarbeit. TU Wien, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik, 2016. 50 S.

[78] E. Lackner. „Schwierige Gründungen in Verbindung mit Bodenverbesserungen“. *Der Bauingenieur* 41.9 (1966).

[79] Lennartz Electronic GmbH. *Datenblatt LE-3D Seismometer*. 2018.

[80] T. Lunne, P.K. Robertson und J.J.M. Powell. *Cone Penetration Testing in Geotechnical Practice*. 1997.

[81] N. Makris und G. Gazetas. „Displacement phase differences in a harmonically oscillating pile“. *Géotechnique* 43.1 (1993), S. 135–150.

[82] E. Maranini, G. Mase, G. Andrighetti, A. Zecchi und V. Fioravante. „Dynamic testing methods for the stiffness of compacted pavements“. In: *Proceedings of International Workshop on Compaction of Soils, Granulates and Powders*. Innsbruck: A.A. Balkema, Rotterdam, 2000, S. 77–90.

[83] S. Marchetti. „In situ tests by flat dilatometer“. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 106.ASCE 15290 (1980).

[84] S. Marchetti. „The flat dilatometer: design applications“. In: *Proceedings of Third International Geotechnical Engineering Conference*. (Cairo University, 5. Jän. 1997). 1997, S. 421–448.

[85] K.R. Massarsch. „Deep compaction of granular soils – an overview“. In: *Proceedings, 5th International Conference on Deep Foundation Practice*. (Singapore). 2001, S. 13–30.

[86] K.R. Massarsch. „Deformation properties of stabilized soil columns“. In: *International Conference on Deep Mixing Best Practice and Recent Advances*. (Stockholm, Sweden). 2005, S. 129–144.

[87] K.R. Massarsch. „Design aspects of deep vibratory compaction“. In: *Seminar on Ground Improvement Methods*. Seminar on Ground Improvement Methods. Geotechnical Division, Hong Kong Institution of Engineers, 1994, S. 61–74.

[88] K.R. Massarsch. „Grundlagen der Rüttelverdichtung“. In: *Beiträge zum 31. Christian Veder Kolloquium*. (Graz). Mitteilungshefte Gruppe Geotechnik Graz, 56, 2016, S. 109–126.

[89] K.R. Massarsch und B.B. Broms. „Soil compaction by VibroWing method“. In: *Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Bd. 1. Helsinki, 1983, S. 275–278.

[90] K.R. Massarsch und B.H. Fellenius. „Use of CPT for design, monitoring, and performance verification of compaction projects“. In: *Proceedings of the 3rd International Symposium on Cone Penetration Testing*. 2014, S. 1187–1200.

[91] L. Menard. „La consolidation dynamique des remblais récents et sols compressibles“. *Travaux* 452 (1972).

[92] L. Menard und Y. Broise. „Theoretical and practical aspect of dynamic consolidation“. *Geotechnique* 25.1 (1975), S. 3–18.

[93] Menard Group. *Broschüren und Prospekte*. 2017.

[94] J. K. Mitchell. „Soil improvement – state of the art report“. In: *Proceedings, 11th International Confonference on SMFE*. Bd. 4. 1981, S. 509–565.

[95] J.K. Mitchell und Z.V. Solymar. „Time-dependent dtrength gain in freshly deposited or densified sand“. *Journal of Geotechnical Engineering* 110.11 (1984), S. 1559–1576.

[96] T. Mogami und K. Kubo. „The behavior of soil during vibration“. In: *Procedings of the 3rd International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Bd. 1. 1953, S. 152–155.

[97] J.G.D. Morgan und G.H. Thomson. „Instrumentation methods for control of ground density in deep vibrocompaction“. In: *Proceedings of the 8th European Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Bd. 1. 1983, S. 59–72.

[98] M.P. Moseley und H.J. Priebe. „Vibro techniques“. In: *Ground improvement*. Hrsg. von M.P. Moseley. Blackie Academic und Professional, London: Spon Press, 1993, S. 1–19.

[99] S. Nagula und J. Grabe. „2-Phase dynamic simulation of deep sand compaction to reduce liquefaction“. *Procedia Engineering* 199 (2017), S. 2396–2401.

[100] P. Nagy. *Entwicklung von Kies-Schotterstrukturen zur Tragfähigkeitserhöhung unter Beibehaltung der hydraulischen Durchlässigkeit auf Basis von Reaktionsharz*. Endbericht. Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (FFG), 19. Feb. 2018. 28 S.

[101] P. Nagy. „Investigation of soil-machine interaction during deep vibro compaction“. In: *Proceedings of the 6th International Young Geotechnical Engineers' Conference*. 2017, S. 109–110.

[102] P. Nagy, D. Adam, F. Kopf und P. Freitag. „Experimental and theoretical investigation of deep vibro compaction“. In: *Proceedings of the 16th Danube - European Conference on Geotechnical Engineering*. Hrsg. von M. Jovanovski, N. Jankulovski, D. Moslavac und J. Br. Papic. Bd. 2. WILEY Ernst & Sohn, 2018, S. 725–730.

[103] P. Nagy, D. Adam, F. Kopf und Freitag P. „Work-integrated indication of compaction state from deep vibro compaction based on the vibrator movement“. In: *Proceedings of the 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*. 19th International Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering. Lee, L. u. a., 2017, S. 2603–2606.

[104] P. Nagy, D. Adam und F. Scheuring. „Bodenverbesserung mittels Rütteldruckverdichtung - Bestimmung der dynamischen Bodeneigenschaften mit der seismischen Drucksonde“. In: *Tagungsbeiträge der 11. Österreichischen Geotechniktagung*. ÖIAV, 3. Feb. 2017, S. 227–238.

[105] P. Nagy, D. Yanulova und D. Adam. „Impulsverdichtung – Auswertung und Interpretation von Verfahrensparametern zur Beurteilung des Verdichtungserfolgs“. *ÖIAZ - Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift* (2016).

[106] M. Nendza. „Untersuchungen zu den Mechanismen der dynamischen Bodenverdichtung bei Anwendung des Rütteldruckverfahrens“. Dissertation. Technische Universität Braunschweig, 2006.

[107] M. Nendza, J. Stahlmann und W. Wehr. „Untersuchungen zur Optimierung der dynamischen Bodenverdichtung bei Anwendung des Rütteldruckverfahrens“. *Bautechnik* 85.8 (2008): *30. Baugrundtagung 2008 mit Fachausstellung Geotechnik in Dortmund*, S. 559–561.

[108] *ÖNORM EN 14731. Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau) - Baugrundverbesserung durch Tiefenrüttelverfahren*. 2006.

[109] ÖNORM EN ISO 22476-2. *Norm: Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchungen - Teil 2: Rammsondierungen (ISO 22476-2:2005 + Amd 1:2011) (konsolidierte Fassung)*. 15. Juni 2012.

[110] ÖNORM EN 1997-2. *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik. Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds*. 15. Aug. 2010.

[111] ÖNORM S 9020. *Erschütterungsschutz für ober- und unterirdische Anlagen*. 2015.

[112] C.B. Park, R.D. Miller und J. Xia. „Multichannel analysis of surface waves“. *Geophysics* 64.3 (1999), S. 800–808.

[113] J. Pistrol. „Verdichtung mit Oszillationswalzen - Bewegungsverhalten, walzenintegrierte Verdichtungskontrolle und Verschleißbeurteilung“. Dissertation. Technische Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen, 2016.

[114] S. Prakash und M.K. Gupta. „Compaction of sand under vertical and horizontal vibrations“. In: *Proceedings of the Southeast Asian Regional Conference on Soil Engineering*. (Bangkok, Thailand). 1966, S. 201–210.

[115] O. Pregl. *Handbuch der Geotechnik*. Geologische Grundlagen, Erdbeben, Untergrunderkundungen, Feld- und Bauwerksmessungen. Bd. 2. Wien: Institut für Geotechnik an der Universität für Bodenkultur, 2000.

[116] M. Raithel. „Zum Trag-und Verformungsverhalten von geokunststoffummantelten Sandsäulen“. Dissertation. 1999.

[117] P.K. Robertson. „Suggested QC criteria for deep compaction using the CPT“. In: *Proceedings of the 5th International Conference on Geotechnical and Geophysical Site Characterisation*. (Sydney, Australia). Australian Geomechanics Society, 2016.

[118] P.K. Robertson und K.L. Cabal. *Guide to Cone Penetration Testing for Geotechnical Engineering*. 6. Aufl. Gregg Drilling & Testing, Inc., 2014.

[119] P.K. Robertson und R.G. Campanella. „Interpretation of cone penetration tests. Part I: Sand“. *Canadian Geotechnical Journal* 20.4 (1983), S. 718–733.

[120] P.K. Robertson und R.G. Campanella. „Interpretation of cone penetration tests. Part II: Clay“. *Canadian Geotechnical Journal* 20.4 (1983), S. 734–745.

[121] P.K. Robertson, R.G. Campanella, D. Gillespie und J. Greig. „Use of piezometer cone data“. In: *Use of in situ tests in geotechnical engineering*. ASCE. 1986, S. 1263–1280.

[122] A. A. Rodger und G. S. Littlejohn. „A study of vibratory driving in granular soils“. *Géotechnique* 30.3 (1980), S. 269–293.

[123] A.A. Rodger. *Vibrompaction of cohesionsless soils*. Internal Report (unpublished) R.7/79. Cementation Research Limited, 1979.

[124] G. Sanglerat. *The Penetrometer and Soil Exploration*. Bd. 1. Elsevier, 2012.

[125] F. Scheuring. *Reserch Project GeoGlueStrengthening - SCPT Data Report*. Factual Report. Fugro Consult Kft. (Member of the Fugro group), 28. Okt. 2015.

[126] M. Schmitter. „Numerische und (semi-)analytische Modellierung der Rütteldruckverdichtung“. Dissertation. Universität Innsbruck,Institut für Grundlagen der Technischen Wissenschaften, 2018.

[127] H.B. Seed und I.M. Idriss. „Analysis of soil liquefaction: Niigata earthquake“. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division* 93.3 (1967), S. 83–108.

[128] H.B. Seed und I.M. Idriss. *Soil moduli and damping factors for dynamic response analyses*. Forschungsber. No. EERC 70-10. Earthquake Engineering und Research Centre, 1970.

[129] Simpro Geotechnical Consulting. *Broschüren und Prospekte*. 2017.

[130] B.C. Slocombe, A.L. Bell und J.I. Baez. „The densification of granular soils using vibro methods“. *Géotechnique* 50.6 (2000), S. 715–725.

[131] W. Sondermann und K. Kirsch. *Baugrundverbesserung*. In: *Grundbau-Taschenbuch: Teil 2: Geotechnische Verfahren*. Hrsg. von K.J. Witt. John Wiley & Sons, 2009.

[132] G. Stenzel und K.J. Melzer. „Bodenuntersuchungen mit Sonden entsprechend DIN 4094“. *Tiefbau* 20 (1978), S. 155–160.

[133] S. Steuerman. „A new soil compaction device“. *Engineering News Record* 1 (1939), S. 56–58.

[134] J.A. Studer, J. Laune und M.G. Koller. *Bodendynamik. Grundlagen, Kennziffern, Probleme und Lösungsansätze*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York, 2007.

[135] Zs. Szilvágyi. „Dynamic soil properties of Danube sands“. Dissertation. Department of Structural und Geotechnical Engineering, Széchenyi István University, Györ, 2018.

[136] K. Terzaghi. *Theoretische Bodenmechanik*. Springer-Verlag, 2013.

[137] S. Thorburn. „Building structures supported by stabilized ground“. *Géotechnique* 25.1 (1975), S. 83–94.

[138] H. Thurner und Å. Sandström. „A new device for instant compaction control“. In: *Proceedings of International Conference of Compaction*. Bd. II. 1980, S. 611–614.

[139] ThyssenKrupp GfT Bautechnik GmbH. *Müller-vibrators – Broschüren und Prospekte*. 2017.

[140] V. F. Van Impe, F. De Cock, K.R. Massarsch und P. Menge. „Recent experiences and developments of the resonant vibrocompaction technique“. In: *Proceedings of the International Conference on Soil Mechanics and Foundation Engineering*. International conference on soil mechanics and foundation engineering. (New Delhi). Bd. 3. Society for Soil Mechanics und Foundation Engineering, 1994, S. 1151–1156.

[141] J. Vogelsang. „Untersuchungen zu den Mechanismen der Pfahlrammung“. Dissertation. Veröffentlichungen des Institutes für Bodenmechanik und Felsmechanik am Karlsruher Institut für Technologie (KIT), 2017.

[142] C. Vrettos. *Bodendynamik*. In: *Grundbau-Taschenbuch: Teil 1: Geotechnische Grundlagen, Siebte Auflage*. Wiley Online Library, 2008, S. 451–500.

[143] W.J. Wehr. „Variation der Frequenz von Tiefenrüttlern zur Optimierung der Rütteldruckverdichtung“. In: *Mitteilung des Fachgebietes Grundbau und Bodenmechanik, Heft Nr. 38*. 1. Hans Lorenz Symposium. Technische Universität Berlin, 2005, S. 67–77.

[144] W.J. Wehr und J. Berg. „Compaction control of a soil improvement with powder columns“. In: *Proceedings of International Workshop on Compaction of Soils, Granulates and Powders, Innsbruck*. A.A. Balkema, Rotterdam, 2000, S. 91–102.

[145] C. Wersäll. „Frequency optimization of vibratory rollers and plates for compaction of granular soil“. Dissertation. Department of Civil, Architectural Engineering, Division of Soil und Rock Mechanics, KTH Royal Institute of Technology, 2016.

[146] D.J. White und M.D. Bolton. „Displacement and strain paths during plane-strain model pile installation in sand“. *Géotechnique* 54.6 (2004), S. 375–397.

[147] T. Wichtmann und T. Triantafyllidis. „Dynamische Steifigkeit und Dämpfung von Sand bei kleinen Dehnungen“. *Bautechnik* 82.4 (2005), S. 236–246.

[148] V. Winter. „Geschichte, Normung, Verfahren von Tiefenverdichtungen“. In: Tiefenverdichtung - Theorie, Bemessung, Normung, Ausführung. (2. Okt. 2015). 2015.

[149] K.J. Witt. „Suffosion nichtbindiger Böden–Phänomen und Nachweismethode“ (2014), S. 23–35.

[150] J.P. Wolf. *Foundation Vibration Analysis Using Simple Physical Models*. Pearson Education, 1994.

[151] P.-A. von Wolffersdorff. „A hypoplastic relation for granular materials with a predefined limit state surface“. *Mechanics of Cohesive-frictional Materials* 1.3 (1996), S. 251–271.

[152] R. Wormuth. *Baulexikon: Erläuterung wichtiger Begriffe des Bauwesens*. Bauwerk, 2009.

[153] F. Wuttke, B. Kafle, B. Leydolph, T. Hagedorn, S. Schiecke, G. Tintelnot und G. Strauch. „Harzstabilisierte hydropermeable Rüttelstopfsäulen“. In: *Tagungsbeiträge der 11. Österreichischen Geotechniktagung*. ÖIAV, 3. Feb. 2017, S. 213–226.

[154] Yanulova. „Impulsverdichtung - Auswertung und Interpretation von Messdaten zur Erfassung des Verdichtungserfolgs“. Diplomarbeit. TU Wien, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik, 2015.

[155] T.L. Youd und S.N. Hoose. „Liquefaction during 1906 San Francisco earthquake“. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering* 102 (1976), S. 425–439.

[156] A. Zöhrer und J. Wondre. „Neue Entwicklungen und Anwendungen von VibroScan“. In: *2. Symposium - Baugrundverbesserung in der Geotechnik*. D. Adam und R. A. Herrmann, 2012.

Tabellenverzeichnis

2.1 Überblick von ausgewählten, auf dem Markt erhältlichen Tiefenrüttler [16], [70]. 8
2.2 Verchtbarkeit grobkörniger Böden mit dem Rütteldruckverfahren (adaptiert nach [70]). 18

4.1 Abstand der Rüttleransatzpunkte auf den vier Testfeldern. 58
4.2 Kornverteilung der entnommenen Bodenproben. 63
4.3 Ungelichförmigkeitszahl, Krümmungszahl und Eignungsfaktor nach *Brown* [24] der entnommenen Bodenproben. 63

5.1 Durchflussmenge des Wassers für die Wasserspülung in den einzelnen Tiefenintervallen während des Sonderversuchs zur Untersuchung des Einflusses der Wassermenge auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers. 95
5.2 Voraussetzungen für die Verflüssigung des Bodens nach *Kramer* [75] und Randbedingungen während der Rütteldruckverdichtung im Zuge der gegenständlichen Verdichtungsversuche. 114

6.1 Einflussfaktoren auf die Steifigkeit von Böden nach [17] (Auszug). 150

9.1 Scherwellengeschwindigkeit vor und nach Bodenverbesserung mittels Rüttelstopfverfahren (RSV) [144] (Auszug). 199

Abbildungsverzeichnis

2.1 Lockere und dichte Lagerung von Körnern – schematische Darstellung [72]. . 5
2.2 Verdichtungsgerät aus den 1950er Jahren (links), Moderne Verdichtungsgeräte (rechts) [66]. 7
2.3 Schematische Darstellung eines Tiefenrüttlers [66]. 8
2.4 Vereinfachte Darstellung des Verfahrensablaufs bei der Rütteldruckverdichtung [66]. 10
2.5 Dreieckförmige Rasteranordnung für großflächige Verdichtung, rechteckige (quadratische) Raster für Einzelfundamente (adaptiert nach [70]). 11
2.6 Ablauf der Rüttledruckverdichtung [66]. 11
2.7 Schematische Darstellung der Tiefenverdichtung mittels Verdichtungsbohle und Aufsatzrüttler (links) und einer Vierflügelbohle (rechts) [41]. 13
2.8 Verfahrensablauf beim Rüttelstopfverfahren [66]. 14
2.9 Dynamische Intensivverdichtung (DYNIV). 16
2.10 Aufbau des Impulsverdichters. 17
2.11 Anwendungsgrenzen des Rütteldruck- und Rüttelstopfverfahrens [66]. 18
2.12 Bandbreite der Korngrößenverteilung mittels Rütteldruckverdichtung effektiv verdichtbarer Böden nach [94] und [137]. 19
2.13 Beurteilung der Verdichtbarkeit von Böden anhand von Drucksondierungen nach *Massarsch* [88] (links), mit Abgrenzung der unterschiedlichen Bodenarten gemäß dem Klassifizierungssystem nach *Robertson* [121] (rechts). 20
2.14 Gegenüberstellung der messtechnisch erfassten Schwingwegamplitude (rechts) und die Ergebnisse von Rammsondierungen (DPL) (links) bei unterschiedlichen Verdichtungsstrecken [97]. 22
2.15 Ersatzsystem für das Rüttler-Boden Interaktionssystem aus Analogie zur Fundamentschwingung [44]. 23
2.16 Ersatzsystem für das Rüttler-Boden Interaktionssystem aus Analogie zur Pfahlschwingung [44]. 23
2.17 Aufbau und Geometrie des angewendeten Modellrüttlers [106]. 24
2.18 Aufbau des Versuchssachtes mit dem eingesetzten Messsystem [106]. 25
2.19 Numerisches Modell zur dreidimensionale Simulation des Verdichtungsvorgangs [57]. 26

2.20 Porenzahlverteilung nach einer Verdichtungsdauer von 3 s als Kontourplot (links) bzw. für fünf Schnitte in unterschiedlichen Tiefen (rechts) [57]. 26
2.21 Geschwindigkeitsfeld der Bodenpartikel zu einem bestimmten Zeitpunkt während der Simulation [57]. 27
2.22 Vorgänge in der Kornstruktur abhängig von der Größe der Beschleunigungsamplitude der Einzelkörner (oben) und schematische Darstellung der Abstandsabhängigkeit der Verdichtungswirkung (unten) [70] (adaptiert nach [123]). 28
2.23 Lagerungsdichte des Versuchsbodens nach Beendigung des Versuchs, abhängig vom Werteniveau der dimensionslosen Beschleunigungsamplitude Γ_v [38]. 30

3.1 Schwachstelle mit theoretisch geringster Verdichtungswirkung beim Dreieck- und Rechteckraster (adaptiert nach [70]). 35
3.2 CPTu Drucksondierung, Spitzenwiderstand und Mantelreibung vor nach den Verdichtungsarbeiten [90]. 36
3.3 Kontrolle des Verdichtungserfolges mit dem Flchdilatometer (DMT). Verlauf des Horizontalen Spannungsindex K_D und des Constrained Modulus M_{DMT} über die Tiefe vor und nach der Rütteldruckverdichtung einer 8 m mächtigen Sandschicht [13]. 37
3.4 Verteilung der Scherwellengeschwindigkeit v_s in vertikalen Ebenen anhand von Schwerellengeschwindigkeitsprofilen unterhalb der Dammaufstandsfläche des Péribonka-Staudamms vor (oben) und nach (unten) den Verdichtungsarbeiten [63]. 39
3.5 Das Metra–Watt–Schreiber System für die Datenaufzeichnung in der Rütteltechnik [40] (links), Tiefenschreiberprotokoll heutzutage (rechts). 41
3.6 Visualisierung von Verfahrensparametern mit dem VibroScan System [156]. . 42
3.7 Messtechnische Beobachtung des Oberflächenwellenfeldes während der Resonanzverdichtung zur arbeitsintegrierten Qualitätskontrolle und Regelung [88]. 43

4.1 Schematische Darstellung des Versuchskonzeptes während der großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen (adaptiert nach [103]). 47
4.2 Das im Großversuch in Fisching angewendete Trägergerät mit dem instrumentierten Tiefenrüttler. 49
4.3 Prinzipielle Darstellung des Tiefenrüttlers und des Messsystems zur Erfassung der dreidimensionalen Rüttlerbewegung. 50
4.4 Messtechnische Erfassung der dreidimensionalen Rüttlerbewegung mit triaxialen Beschleunigungsaufnehmern des Typs 8395A auf dem Rüttlerkörper. Anordnung, Sensitivitäten und positive Messrichtungen. 51
4.5 Montage der triaxialen Beschleunigungsaufnehmer auf den Rüttlerkörper [102]. 52
4.6 Anordnung des Hall-Sensors und des Magneten im Rüttlerkörper und auf der Welle der rotierenden Unwucht. 53

4.7 Montage des Hall-Sensors in den Rüttlerkörper und des Magneten auf die Welle der Unwucht. 54
4.8 Führung der Signalkabel in dickwandigen Stahlrohren. 55
4.9 Triaxiale Beschleunigungsaufnehmer in unmittelbarer Nähe des Rüttleransatzpunktes (Nahfeld) mit den *Brimos Wireless* Einheiten für eine zeitlich synchrone Messdatenerfassung. 56
4.10 Instrumentierung zur Erfassung des Wellenfeldes an der Geländeoberfläche bei einem ausgewählten Verdichtungsversuch (Zeichnung nicht maßstäblich). 57
4.11 Versuchsfeld in der Kiesgrube der Firma *Cemex* in Fisching, unterteilt in vier Testfelder [101]. 59
4.12 Schematische Darstellung der Austeilung der Rüttleransatzpunkte und Ansatzpunkte der Kernbohrungen sowie Ramm- und Drucksondierungen auf dem Versuchsfeld in Fisching. 60
4.13 Bohrprofile der Kernbohrungen auf dem Versuchsfeld in Fisching. 61
4.14 Kernkisten der Kernbohrung Nr. *KB2*. 62
4.15 Korngrößenverteilung der entnommenen Bodenproben. 62
4.16 Diagramm einer Schweren Rammsondierung (DPH) jeweils vor (links) und nach (rechts) den Verdichtungsarbeiten. 64
4.17 Schwere Rammsondierungen (DPH) – Einhüllende und Mittelwert der Schlagzahlen vor (links) und nach (rechts) den Verdichtungsarbeiten. 65
4.18 Spitzendruck q_c, die lokale Mantelreibung f_s, der lokale Porenwasserdruck u, das Reibungsverhältnis R_f und die Scherwellengeschwindigkeit v_s bei einer seismischen Drucksondierung zur Erkundung des Untergrundes. Bodenklassifizierung nach *Robertson* [121], mit Beurteilung der Verdichtbarkeit nach *Massarsch* [88]. 66

5.1 Prinzipielle Darstellung eines Tiefenrüttlers und dessen Bewegungsverhaltens im Boden (adaptiert nach [66]). 72
5.2 Definition des Vorlaufwinkels als Phasenunterschied zwischen der Unwuchtposition und der Auslenkrichtung des Rüttlerkörpers. 74
5.3 Bewegung der oberen und der unteren Messebene bzw. der Rüttlerspitze in der horizontalen Ebene (links), schematische Darstellung des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers mit deutlich überhöhter Darstellung der Schwingwegamplituden (rechts) während der unbehinderten Rüttlerschwingung in der Luft. 75
5.4 Schematische Darstellung des Vorlaufwinkels während der unbehinderten Schwingung in der Luft. 76
5.5 Rütteltiefe, Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel und Rüttleranpressdruck während der Rüttlerschwingung in der Luft und während des Verdichtugnsvorgangs im Zuge eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb [103]. 78

5.6 Rütteltiefe, Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel und Rüttleranpressdruck während eines Verdichtungsschrittes des in Abbildung 5.5 dargestellten Verdichtungsprozesses, mit Darstellung der Schwingwegamplitude zu den Zeitpunkten $t_1 = 887\,\text{s}$ und $t_2 = 916\,\text{s}$ für Zeitfenster von jeweils $0,2\,\text{s}$. 80
5.7 Bewegung des Rüttlers in der oberen und unteren Messebene bzw. der Rüttlerspitze in der horizontalen Projektion (links), schematische Darstellung des Bewegungsverhaltens des Tiefenrüttlers (rechts) während der Rüttlerschwingung im Boden, zum Zeitpunkt $t_1 = 887\,\text{s}$. 81
5.8 Bewegung der Rüttlerspitze in der horizontalen Ebene zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten: a) Zeitpunkt $t_1 = 887\,\text{s}$ unmittelbar vor Beginn des Absenkvorgangs (links) und b) Zeitpunkt $t_2 = 916\,\text{s}$ unmittelbar vor Abbruch des Verdichtungsschrittes (rechts) im standardmäßigen Rüttlerbetrieb [8]. . . 82
5.9 Schematische Darstellung des Vorlaufwinkels zu zwei unterschiedlichen Zeitpunkten: a) Zeitpunkt $t_1 = 887\,\text{s}$ unmittelbar vor Beginn des Absenkvorgangs (links) und b) Zeitpunkt $t_2 = 916\,\text{s}$ unmittelbar vor Abbruch des Verdichtungsschrittes (rechts) beim betrachteten Verdichtungsschritt. 83
5.10 Rütteltiefe, Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel und Rüttleranpressdruck bei einer etwa $2,5\,\text{m}$ langen Verdichtungsstrecke des in Abbildung 5.5 dargestellten Verdichtungsversuchs, die blauen Pfeile kennzeichnen den Zusammenhang zwischen maximalem Rüttleranpressdruck sowie dem geringsten Vorlaufwinkel und der größten Schwingwegamplitude. . . . 84
5.11 Rütteltiefe, Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel und Rüttleranpressdruck während eines Versuchs zur Untersuchung des Einflusses des erhöhten Rüttleranpressdrucks auf die Rüttlerbewegung. 87
5.12 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe während eines Verdichtungsschrittes des in Abbildung 5.11 dargestellten Verdichtungsversuchs. 89
5.13 Bewegung der Rüttlerspitze in der horizontalen Ebene zu vier unterschiedlichen Zeitpunkten: a) unmittelbar vor Beginn des Absenkvorgangs ($t_1 = 632\,\text{s}$), b) beim lokalen Maximum der Schwingwegamplitude ($t_2 = 657\,\text{s}$), c) beim lokalen Minimum der Schwingwegamplitude ($t_3 = 660,7\,\text{s}$) und am Ende des Hebevorgangs ($t_4 = 670,5\,\text{s}$), während eines Verdichtungsversuchs zur Untersuchung des Einflusses vom erhöhten Rüttleranpressdruck auf das Bewegungsverhalten. 90
5.14 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe bei einer etwa $2,5\,\text{m}$ langen Verdichtungsstrecke des in Abbildung 5.11 dargestellten Verdichtungsversuchs, die blauen Pfeile kennzeichnen den Zusammenhang zwischen maximalem Rüttleranpressdruck sowie dem geringsten Vorlaufwinkel und der größten Schwingwegamplitude, der rote Balken hebt das Werteniveau des Vorlaufwinkels beim Abbruch der Verdichtungsschritte im Standardbetrieb hervor. 91

5.15 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Rüttleranpressdruck, Rüttlerfrequenz und Rütteltiefe während eines Sonderversuchs zur Untersuchung des Einflusses der erhöhten Kontaktspannung auf das Bewegungsverhalten; die vertikalen, blau strichlierten Linien kennzeichnen die Zeitpunkte, zu denen der Vorlaufwinkel 90° beträgt. 93
5.16 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Durchflussmenge des Wassers und Rütteltiefe während eines Sonderversuchs zur Untersuchung des Einflusses der Wassermenge auf das Bewegungsverhalten des Tiefenrüttlers, bei einem konstanten Rüttleranpressdruck von 50 bar. Die rot strichlierten Linien kennzeichnen die jeweils konstante Eindringgeschwindigkeit. . . . 96
5.17 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe sowie die Übertragungsfunktion Γ_i in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke im standardmäßigen Rüttlerbetrieb. 99
5.18 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe sowie die Übertragungsfunktion Γ_i in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke bei erhöhter Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden. . . 101
5.19 Kraterförmiger Bereich um den Tiefenrüttler während der Arbeitsphase Einvibrieren, gefüllt mit einem Gemisch aus erodiertem Boden und Wasser . . . 103
5.20 Erodieren des Korngefüges während der Arbeitsphase Einvibrieren mit blauen Pfeilen zur Kennzeichnung eines möglichen Strömungswegs des Wassers - schematische Darstellung. 104
5.21 Wasserspülung während der Arbeitsphase Einvibrieren. 105
5.22 Beginn des Verdichtungsprozesses nach dem Erreichen der geplanten Verdichtungstiefe, mit grünen und blauen Pfeilen zur Kennzeichnung der maßgeblichen Bewegungsrichtung des Bodens sowie des Strömungswegs des Wassers bzw. mit grauen Linien zur Veranschaulichung von bleibenden Verformungen ohne nennenswerte Restrukturierung im Korngefüge. 107
5.23 Vergleich von inkrementellen Verschiebungen in mitteldichten wassergesättigten Sand zufolge monotoner Pfahleindringung horizontale (a) und vertikale (b) Verschiebungen mit „60°-Spitze“ und horizontale (c) und vertikale (d) Verschiebungen mit flachem Pfahlfuß [141]. 108
5.24 Verdichtung von unten nach oben im Pilgerschrittverfahren, mit grünen und blauen Pfeilen zur Kennzeichnung der maßgeblichen Bewegungsrichtung des Bodens sowie des Strömungswegs des Wassers bzw. mit grauen Linien zur Veranschaulichung von bleibenden Verformungen ohne nennenswerte Restrukturierung im Korngefüge. 109
5.25 Verfüllen des Hohlraumes um den Tiefenrüttler. 110
5.26 Schematische Darstellung der Unterteilung der fertiggestellten Verdichtungsstrecke mit qualitativer Darstellung der Bodensteifigkeit im Vergleich zum Ausgangszustand. 112

6.1 Prinzipskizze des zugrunde gelegten analytischen Modells für das Rüttler-Boden Interaktionssystem. 117
6.2 Prinzipielle Gegenüberstellung der Rüttlerbewegung (links) und der allgemeinen theoretischen Zusammenhänge für quadratisch angeregte Einmassenschwinger (adaptiert nach [134]) (rechts). 119
6.3 Gegenüberstellung der Rüttlerbewegung und die theoretischen Zusammenhänge für quadratisch angeregte Einmassenschwinger mit Darstellung der vier Betriebsphasen. 122
6.4 Betriebsphasen Einfahren (gelb), Post-Resonanz (orange) und Heben (blau) bei einer etwa 2, 5 m langen Verdichtungsstrecke während des standardmäßigen Rüttlerbetriebs. 126
6.5 Betriebsphasen Einfahren (gelb), Post-Resonanz (orange), Überdrücken (rot) und Heben (blau) bei einer etwa 2, 5 m langen Verdichtungsstrecke während eines Verdichtungsversuchs im nicht-standardmäßigen Rüttlerbetrieb (erhöhter Rüttleranpressdruck). 127
6.6 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Abstand des Bewegungspols bzw. des lokalen Minimums der um die Vertikale rotierende Hyperbel von der Grundfläche des Rotationshyperboloides, Rüttlerfrequenz und Rütteltiefe während der unbehinderten Rüttlerschwingung in der Luft (links) und während des Verdichtungsvorgangs bei einer etwa 2, 0 m langen Verdichtungsstrecke (rechts). 129
6.7 Gegenüberstellung der Rüttlerschwingung im Boden und in der Luft, mit deutlich überhöhter Darstellung der Schwingwegamplituden. 130
6.8 Resonanzkurven und Vorlaufwinkel für den in der Luft schwingenden Tiefenrüttler und für das Rüttler-Boden Interaktionssystem. 132
6.9 Mechanisches Modell des Rüttler-Boden Interaktionssystems unter Berücksichtigung einer mit der Rüttlermasse M_R gekoppelten mitschwingenden Bodenmasse M_B. 133
6.10 Allgemeiner Zusammenhang zwischen dem Frequenzverhältnis β und dem Vorlaufwinkel Θ für unterschiedliche Dämpfungsverhältnisse $D > 0$ mit den drei zu betrachtenden Bereichen bei der Fallunterscheidung von $0 \leq \beta < 1$, $\beta = 1, 1 < \beta$. 135
6.11 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit und Rütteltiefe während eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb. 138
6.12 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit, zustandsabhängiges Dämpfungsverhältnis und Rütteltiefe bei einer etwa 2, 5 m langen Verdichtungsstrecke des in Abbildung 6.11 dargestellten Verdichtungsversuchs. 140

6.13 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit und Rütteltiefe während eines Sonderversuchs zur Untersuchung des Einflusses des erhöhten Rüttleranpressdrucks auf die Rüttlerbewegung [7]. 142
6.14 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit, zustandsabhängiges Dämpfungsverhältnis, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke des in Abbildung 6.13 dargestellten Verdichtungsversuchs. 144
6.15 Qualitative Darstellung der Abhängigkeit des Schubmoduls G für von der Scherdehnungsamplitude γ (adaptiert nach [18]) 147
6.16 Einfluss verschiedener Parameter auf das Schubmodul bei Sanden [134] (nach [128]). 148
6.17 Abhängigkeit des Schubmoduls G für von der Scherdehnungsamplitude γ für unterschiedliche Kies-Sande [134] (nach [128]). 149
6.18 Abhängigkeit des Schubmoduls G_0 von der Porenzahl e bei unterschiedlichen Böden, bei einer effektiven Hauptspannung von 100 kPa und 400 kPa [17]. . . 149
6.19 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe mit Abgrenzung der maßgeblichen Prozesse im zu verdichtenden Boden im Zuge eines ausgewählten Verdichtungsschrittes. 151
6.20 Darstellung des hypothetischen Spannungszustandes an der Kontaktfläche zwischen Rüttler und Boden sowie der Spannung im Korngerüst in drei unterschiedlichen Zuständen während eines Verdichtungsschrittes. 152
6.21 Reduktion des Porenraumes unter Beibehaltung des Bodenvolumens im zu verdichtenden Boden zufolge Verdichtung und Nachfüllen. 153
6.22 Triaxialer Spannungszustand im Bodenbereich unterhalb der Rüttlerspitze zufolge der behinderten Seitendehnung. 154
6.23 Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit und Übertragungsfunktion Γ_i in unterschiedlichen Abständen vom Rüttleransatzpunkt bei einer etwa 2,5 m langen Verdichtungsstrecke bei erhöhter Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden. 156
6.24 Gegenüberstellung des Bewegungsverhaltens vom Rüttler-Boden Interaktionssystem (Betriebsphasen) und der maßgeblichen Prozesse im zu verdichtenden Boden [100]. 159

7.1 Überblick der Anordnung der betrachteten Verdichtungsversuche und Rammsondierungen. 162
7.2 Gegenüberstellung der während des Einvibrierens bei den Verdichtungsversuchen *Nr. 17*, *19* und *25* ermittelten zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit (schwarz) mit Rammsondierungen *RS4vv* bzw. *RS5vv* (orange) [100]. 164

7.3 Während der Arbeitsphase Einvibrieren ermittelte zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit bei den Verdichtungsversuchen Nr. 17, 19 und 25 (schwarz), Rammsondierungen *RS4vv* bzw. *RS5vv* (orange) mit der in Abschnitt 6.7.2.4 definierten Bandbreite des Verdichtungspotenzials (violett). 166
7.4 Gegenüberstellung des Eindringwiderstands der Drucksonde bei drei unterschiedlichen Rasteranordnungen auf einem Testfeld [98]. 167
7.5 Ansatzpunkte der Rammsondierungen vor und nach Verdichtung auf dem Testfeld *A*, gekennzeichnet mit *RSXXvv* und mit *RSXXnv*. 169
7.6 Auf Basis von Rammsondierungen ermittelte Verbesserungsfaktoren über die Tiefe für die Testfelder *A*, *B* und *C* [77]. 170
7.7 Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit und Rütteltiefe während der Arbeitsphase Einvibrieren bei den Verdichtungspunkten des Sekundärrasters Nr. 106 (hellblau), 121 (grün) und 131 (rot) jeweils auf dem Testfeld A, B und C 172
7.8 Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens bei den Verdichtungsversuchen im Sekundärraster *Nr. 106* (hellblau), *121* (grün) und *131* (rot) sowie bei den Verdichtungsversuchen *Nr. 17*, *19* und *25* (schwarz) im ungestörten Boden, mit der Bandbreite des Verdichtungspotenzials (links), auf Basis von Rammsondierungen ermittelte Verbesserungsfaktoren über die Tiefe für die Testfelder *A*, *B* und *C* [77] (rechts). 174

8.1 Tragraupe mit Stromaggregat auf der Rückseite. 178
8.2 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Stromaufnahme des Rüttlermotors, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe während eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb. 180
8.3 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Stromaufnahme des Rüttlermotors, Rüttlerfrequenz und Rütteltiefe während der unbehinderten Rüttlerschwingung in der Luft (links) und während des Verdichtungsvorgangs bei einer etwa 2,0 m langen Verdichtungsstrecke (rechts). 181
8.4 Stromaufnahme in Abhängigkeit vom Vorlaufwinkel während eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb. 182
8.5 Stromaufnahme in Abhängigkeit vom Vorlaufwinkel während eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb mit den Betriebsphasen Einfahren und Heben. 183
8.6 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Stromaufnahme des Rüttlermotors, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe während eines Verdichtungsversuchs bei erhöhter Kontaktspannung zwischen Rüttlerspitze und Boden. 184
8.7 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, Stromaufnahme des Rüttlermotors, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe während eines Verdichtungsversuchs des in Abbildung 8.6 dargestellten Verdichtungsversuchs mit den Betriebsphasen Einfahren, Heben, Post-Resonanz und Überdrücken. . . . 186

8.8 Stromaufnahme in Abhängigkeit vom Vorlaufwinkel während eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb mit den Betriebsphasen Einfahren, Heben, Post-Resonanz und Überdrücken. Im Vergleich dazu ist die mechanische Leistung des schwingenden Rüttlerkörpers mit grüner Farbe eingetragen. 188
8.9 Stromaufnahme in Abhängigkeit vom Vorlaufwinkel während eines Verdichtungsversuchs im nicht-standardmäßigen Rüttlerbetrieb [100]. 189
8.10 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit, Stromaufnahme des Rüttlermotors, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe während eines Verdichtungsversuchs des in Abbildung 8.6 dargestellten Verdichtungsversuchs mit den maßgeblichen Prozessen im zu verdichtenden Boden. 190
8.11 Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze, Vorlaufwinkel, zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit, Stromaufnahme des Rüttlermotors, Rüttleranpressdruck und Rütteltiefe während einer etwa 2,0 m langen Verdichtungsstrecke des in Abbildung 8.6 dargestellten Verdichtungsversuchs. Die violetten Pfeile kennzeichnen den Zusammenhang zwischen der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit und der Stromaufnahme des Rüttlermotors. 192
8.12 Stromaufnahme in Abhängigkeit von der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit während eines Verdichtungsversuchs im nicht-standardmäßigen Rüttlerbetrieb mit den maßgeblichen Prozessen im zu verdichtenden Boden; Kontraktanz und Dilatanz. 194
8.13 Stromaufnahme in Abhängigkeit von der zustandsabhängigen Reaktionssteifigkeit während eines Verdichtungsversuchs im standardmäßigen Rüttlerbetrieb mit den maßgeblichen Prozessen im zu verdichtenden Boden. 195

9.1 Erhöhung der Scherwellengeschwindigkeit zufolge von Resonanzverdichtung im Sand [89]. 198
9.2 Ermittlung der Steifigkeitsentwicklung von bindemittelstabilisierten weichen bindigen Böden mittels Downhole-Verfahren und Bender Elementen [86]. . . 199
9.3 Qualitative Darstellung der Messergebnisse einer seismischen Drucksondierung SCPTu; Spitzendruck q_c, Mantelreibung f_s, Reibungsverhältnis R_f, lokaler Porenwasserdruck u und Scherwellengeschwindigkeit v_s (adaptiert nach [48]). 200
9.4 Anordnung der Rüttler- und Sondieransatzpunkte auf dem Testfeld *SCPT*. Die Ansatzpunkte der seismischen Drucksonde sowie die Position der Erschütterungsquellen und die projizierte Richtung der Wellenausbreitung sind mit violetter Farbe gekennzeichnet. 202
9.5 Durchführung der Untersuchungen mit der seismischen Drucksonde. 203
9.6 Versuchsprinzip bei der seismischen Drucksondierung auf dem Versuchsfeld zur Überprüfung einzelner Verdichtungspunkte (adaptiert nach [104]). 204

9.7 Grundprinzip der Intervallmethode zur Bestimmung der Wellenlaufgeschwindigkeit in einer bestimmten Messtiefe (adaptiert nach [67]). 206
9.8 Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, bei den Rüttleransatzpunkten Nr. *208* (oben) und Nr. *217* (unten). 208
9.9 Qualitative Darstellung der Scherdehnungsabhängigkeit der Schubsteifigkeit mit qualitativer Darstellung von messtechnisch erfassbaren Grenzen von konventionellen Laboruntersuchungen (adaptiert nach [18]). 209
9.10 Einfluss verschiedener Parameter auf das Schubmodul bei Sanden [134] (nach [128]). 211
9.11 Verringerung des Porenraumes unter Beibehaltung des Bodenvolumens im zu verdichtenden Boden zufolge Verdichtung und Nachfüllen. 212
9.12 Schubmodul G_0 über die Tiefe im Boden vor und nach der Verdichtung mittels Rütteldruckverfahren. 212

10.1 Verdichtungskontrolle anhand von unterschiedlichen Parametern. 218
10.2 Zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit während des Einvibrierens bei Verdichtungsversuchen im Sekundärraster in den Testfeldern *A*, *B* und *C* sowie bei den Verdichtungsversuchen im ungestörten Boden (links), auf Basis von Rammsondierungen ermittelte Verbesserungsfaktoren über die Tiefe für die Testfelder *A*, *B* und *C* [77] (rechts). 222
10.3 Optimale Verdichtung im standardmäßigen Rüttlerbetrieb. 225
10.4 Schmatische Darstellung der Größenordnung der Scherverformungen während des Verdichtungsvorganges und während der seismischen Wellenausbreitung bei einer geophysikalischen Untersuchung [104]. 228

A.1 Schematische Darstellung einer Maschine mit rotierender Unwucht (adaptiert nach [134]) 265
A.2 Darstellung der zwei rotirenden Vektoren nach Gleichung A.9 und der resultiernden Amplitude nach Gleichung A.10 [134] 267
A.3 Resonanzkurven und Phasenwinkel bei einem gedämpften, quadratisch angeregten Einmassenschwinger. 268

B.1 Datenblatt des Beschleunigungssensors des Typs 8395A der Firma *Kistler* [71]. 270
B.2 Datenblatt des Beschleunigungssensors des Typs *EpiSensor FBA ES-T* der Firma *Kinemetrics* [69]. 271
B.3 Datenblatt des Seismometers (Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer) des Typs *LE-3D/5s* der Firma *Lennartz Electronic GmbH* [79]. 272

C.1 Kernkisten der Kernbohrung *KB1* 273
C.2 Kernkisten der Kernbohrung *KB2*. 274
C.3 Kernkisten der Kernbohrung *KB3*. 275

C.4 Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. *1*. 276
C.5 Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. *2*. 277
C.6 Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. *3*. 278
C.7 Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. *4*. 279
C.8 Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. *5*. 280
C.9 Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. *6*. 281
C.10 Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. *7*. 282
C.11 Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. *8*. 283
C.12 Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. *9*. 284

D.1 Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *203*. 285
D.2 Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *206*. 286
D.3 Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *210*. 286
D.4 Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *212*. 287
D.5 Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *214*. 287
D.6 Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *215*. 288
D.7 Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *216*. 288

Liste der verwendeten Symbole

Abkürzungen und weitere Symbole

$CPTu$	Cone Penetration Test with pore pressure u (Drucksonde mit Porenwasserdruckmessung)
DMT	Flat Dilatometer (Flachdilatometer)
K_D	Horizontaler Spannungsindex (dimensionslos)
M_{DMT}	Constrained Modulus MPa
$MASW$	Multichannel Analysis of Surface Waves
$SASW$	Spectral Analysis of Surface Waves
$SCPTu$	Seismic Cone Penetration Test with pore pressure u
$SDMT$	Seismic Dilatometer (seismischer Flachdilatometer)
DPH	Schwere Rammsonde
DPL	Leichte Rammsonde
SN	Eignungsfaktor (suitability number) (dimensionslos)

Griechische Buchstaben

$\beta_{q,res}$	zum Resonanzpunkt zugehöriges Frequenzverhältnis beim quadratisch angeregten Einmassenschwinger (dimensionslos)
γ	Scherdehnungsamplitude (dimensionslos)
Γ_v	dimensionslose Beschleunigungsamplitude – Verhältnis der vertikalen Beschleunigungsamplitude a_v zur Erdbeschleunigung (dimensionslos)
Γ_i	Übertragungsfunktion: das Verhältnis der zeitlichen Verläufe der resultierenden Schwingschnelle für Messaufnehmer in unterschiedlichen Abständen vom Rütt-

leransatzpunkt und der Schwinggeschwindigkeitsamplitude des Tiefenrüttlers (dimensionslos)

ν Poissonzahl (dimensionslos)

ρ Dichte des feuchten Bodens in kg/m^3

ρ_{sat} Dichte des wassergesättigten Bodens in kg/m^3

σ'_m mittlere effektive Hauptspannung in kN/m^2

Lateinische Kleinbuchstaben

c Dämpfungskoeffizient in kg/s

d_{xx} Korndurchmesser bei einem Siebdurchgang von xx% in mm

e Porenzahl (dimensionslos)

f_s lokale Mantelreibung (Drucksondierung) in MPa

k Federkonstante der elastischen Feder in N/m

k_f hydraulische Durchlässigkeit des Bodens in m/s

q_c Spitzendruck (Drucksondierung) in MPa

q_t Spitzenwiderstand der Drucksonde, korrigiert um die Einflüsse des Porenwasserdruckes in MPa

u lokaler Porenwasserdruck (Drucksondierung) in kPa

v_p Kompressionswellengeschwindigkeit in m/s

v_R resultierende Schwingschnelle in m/s

v_s Scherwellengeschwindigkeit in m/s

Lateinische Großbuchstaben

C_c Krümmungszahl (dimensionslos)

C_u Ungleichförmigkeitszahl (dimensionslos)

D Dämpfungsverhältnis (dimensionslos)

E Elastizitätsmodul in MPa

E_S Steifemodul in MPa

F_T Anteil der Erregerkraft in Richtung Schwinggeschwindigkeit in N

G Schubmodul in MPa

G_0 Schubmodul bei sehr kleinen Scherdehnungen in MPa

N_{10} Anzahl notwendigen der Schläge für eine Sondeneindringtiefe von 10 cm bei der Rammsondierung (dimensionslos)

P Mechanische Rüttlerleistung in W

R Strahlweg in m

R_f Reibungsverhältnis (Drucksondierung) (dimensionslos)

T Wellenlaufzeit in s

V Verstärkungsfaktor bei einem gedämpften Einmassenschwinger mit kraftkonstanter Anregung (dimensionslos)

$V_{q,res}$ Größe des Verstärkungsfaktors beim Resonanzpunkt beim quadratisch angeregten Einmassenschwinger (dimensionslos)

V_q Verstärkungsfaktor bei einem gedämpften Einmassenschwinger mit quadratischer Anregung (dimensionslos)

Symbole des mechanischen Modells (Kapitel 6)

β Frequenzverhältnis (Verhältnis der Winkelgeschwindigkeit der rotierenden Unwuchtmasse zur Eigenkreisfrequenz des Rüttler-Boden Interaktionssystems) (dimensionslos)

ω Winkelgeschwindigkeit der rotierenden Unwuchtmasse in rad/s

ω_0 Eigenkreisfrequenz des Rüttler-Boden Interaktionssystems in rad/s

A Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze in mm

$A_{\beta=\infty,Boden}$ Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze bei theoretisch unendlich großem Frequenzverhältnis während der quasi-stationären Schwingung im Boden in mm

$A_{\beta=\infty,Luft}$ Schwingwegamplitude der Rüttlerspitze bei theoretisch unendlich großem Frequenzverhältnis während der stationären Schwingung in der Luft in mm

c^* veränderliches Dämpfungskoeffizient in kg/s

D^* veränderliches Dämpfungsverhältnis (dimensionslos)

F Erregerkraft in N

f Umdrehungsfrequenz des Rüttlermotors, Schwingungsfrequenz des Rüttlerkörpers in Hz

k^*	zustandsabhängige Reaktionssteifigkeit in N/m
M	Masse des Rüttlerkörpers inklusive Unwuchtmasse in kg
M_B	mitschwingende Bodenmasse in kg
M_R	Rüttlermasse in kg
m_u	Unwuchtmasse in kg

Anhang A

Gedämpfter Einmassenschwinger mit quadratischer Anregung

Die allgemeine Bewegungsgleichung

Bei einem Einmassenschwinger mit quadratischer Anregung handelt es sich um eine Anregung, bei der die Zentrifugalkraft mit dem Quadrat der Anregungsfrequenz zunimmt, wie beispielsweise bei einer Anregung mit rotierender Unwuchtmasse.

Auf Abbildung A.1 die ist Unwucht als eine exzentrische rotierende Masse m_u dargestellt, dessen Schwerpunkt mit einer Winkelgeschwindigkeit ω, in einem Abstand e um den Rotationsmittelpunkt rotiert. M ist die dynamisch aktivierte Masse des schwingenden Körpers, die die Masse m_u inkludiert, $x(t)$ steht für die Verschiebung des dynamisch aktiven Masse M aus der Gleichgewichtslage.

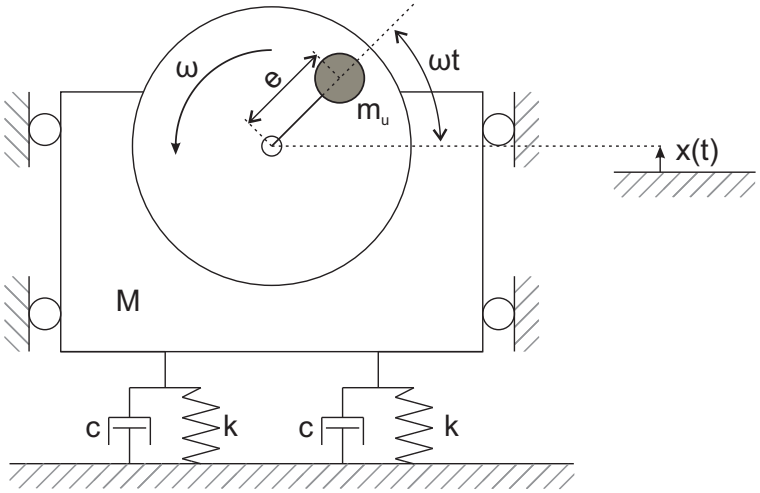


Abbildung A.1: Schematische Darstellung einer Maschine mit rotierender Unwucht (adaptiert nach [134])

Für den gedämpften, quadratisch angeregten Einmassenschwinger gilt die folgende Bewegungsdifferenzialgleichung:

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_u e\ \omega^2\ \sin(\omega t) \tag{A.1}$$

wobei c der Dämpfungskoeffizient für geschwindigkeitsproportionale Dämpfung, k die Federkonstante des elastischen Feders sind.

Lösung der Bewegungsgleichung

Gelichung A.1 lautet in komplexer Schreibweise:

$$M\ddot{x} + c\dot{x} + kx = m_u e\omega^2\ e^{i\omega t} \tag{A.2}$$

Der Lösungsansatz, in dem A die Wegamplitude darstellt:

$$x(t) = A\ e^{i\omega t} \tag{A.3a}$$
$$\dot{x}(t) = i\omega\ A\ e^{i\omega t} \tag{A.3b}$$
$$\ddot{x}(t) = -\omega^2\ A\ e^{i\omega t} \tag{A.3c}$$

A.3 eingesetzt in A.2 ergibt:

$$A = \frac{m_u e\ \omega^2}{-M\ \omega^2 + c\ i\omega + k} \tag{A.4}$$

A.4 eingesetzt in A.3a ergibt die Bewegungsgleichung:

$$x(t) = \frac{m_u e\ \omega^2}{-M\ \omega^2 + c\ i\omega + k}\ e^{i\omega t} \tag{A.5}$$

mit der Eigenkreisfrequenz ω_0,

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{M}} \tag{A.6}$$

mit dem Frequenzverhältnis β,

$$\beta = \frac{\omega}{\omega_0} \tag{A.7}$$

und mit dem Dämpfungsverhältnis D,

$$D = \frac{c}{c_c} = \frac{c}{2M\ \omega_0} \tag{A.8}$$

welches die Dämpfung im Anteil der kritischen Dämpfung c_c angibt, ergibt sich die Bewegugnsgleichung A.5 in folgender Form:

$$x(t) = \frac{m_u e\ \omega^2}{k}\ e^{i\omega t} \frac{1 - \beta^2 - i\ 2D\beta}{(1-\beta^2)^2 + (2D\beta)^2} \tag{A.9}$$

In Abbildung A.3 ist die Bewegung zum Zeitpunkt $x(t)$ zum Zeitpunkt $t = 0$ durch die zwei rotierenden Vektoren

$$\frac{m_u e\ \omega^2}{k}\ e^{i\omega t} \frac{1-\beta^2}{(1-\beta^2)^2+(2D\beta)^2}$$

$$\frac{m_u e\ \omega^2}{k}\ e^{i\omega t} \frac{-i\ 2D\beta}{(1-\beta^2)^2+(2D\beta)^2}$$

gekennzeichnet.

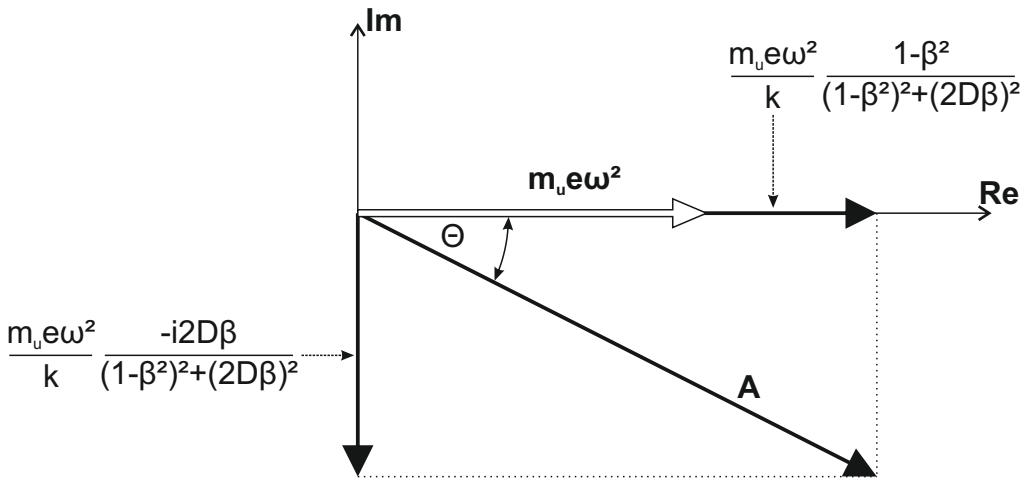


Abbildung A.2: Darstellung der zwei rotirenden Vektoren nach Gleichung A.9 und der resultiernden Amplitude nach Gleichung A.10 [134]

Der Resultierende Vektor, die Wegamplitude A beträgt:

$$A = \frac{m_u e\ \omega^2}{k} \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2+(2D\beta)^2}} = \frac{m_u e\ \omega^2}{k}\ V \tag{A.10}$$

wobei

$$V = \frac{1}{\sqrt{(1-\beta^2)^2+(2D\beta)^2}} \tag{A.11}$$

dem Verstärkungsfaktor bei einem gedämpften Einmassenschwinger mit kraftkonstanter Anregung entspricht.

Die Wegamplitude ist um den Phasenwinkel Θ gegenüber der Richtung der Belastung phasenverschoben.

$$\Theta = arctan\left(\frac{2D\beta}{1-\beta^2}\right) \tag{A.12}$$

Mit den Zusammenhängen

$$\beta^2 = \frac{\omega^2 M}{k} \tag{A.13}$$

$$A_{\beta=\infty} = \frac{m_u e}{M} \tag{A.14}$$

ergibt sich für das Verhältnis der Amplitde A zur Amplitude bei theoretisch unendlich

großem Frequenzverhältnis $A_{\beta=\infty}$ der folgende Zusammenhang:

$$\frac{A}{A_{\beta=\infty}} = \frac{A}{\frac{m_u e}{M}} = \frac{\beta^2}{\sqrt{(1-\beta^2)^2 + (2D\beta)^2}} = \beta^2 V = V_q \tag{A.15}$$

wobei V_q den Verstärkungsfaktor beim gedämpften Einmassenschwinger mit quadratischer Anregung darstellt.

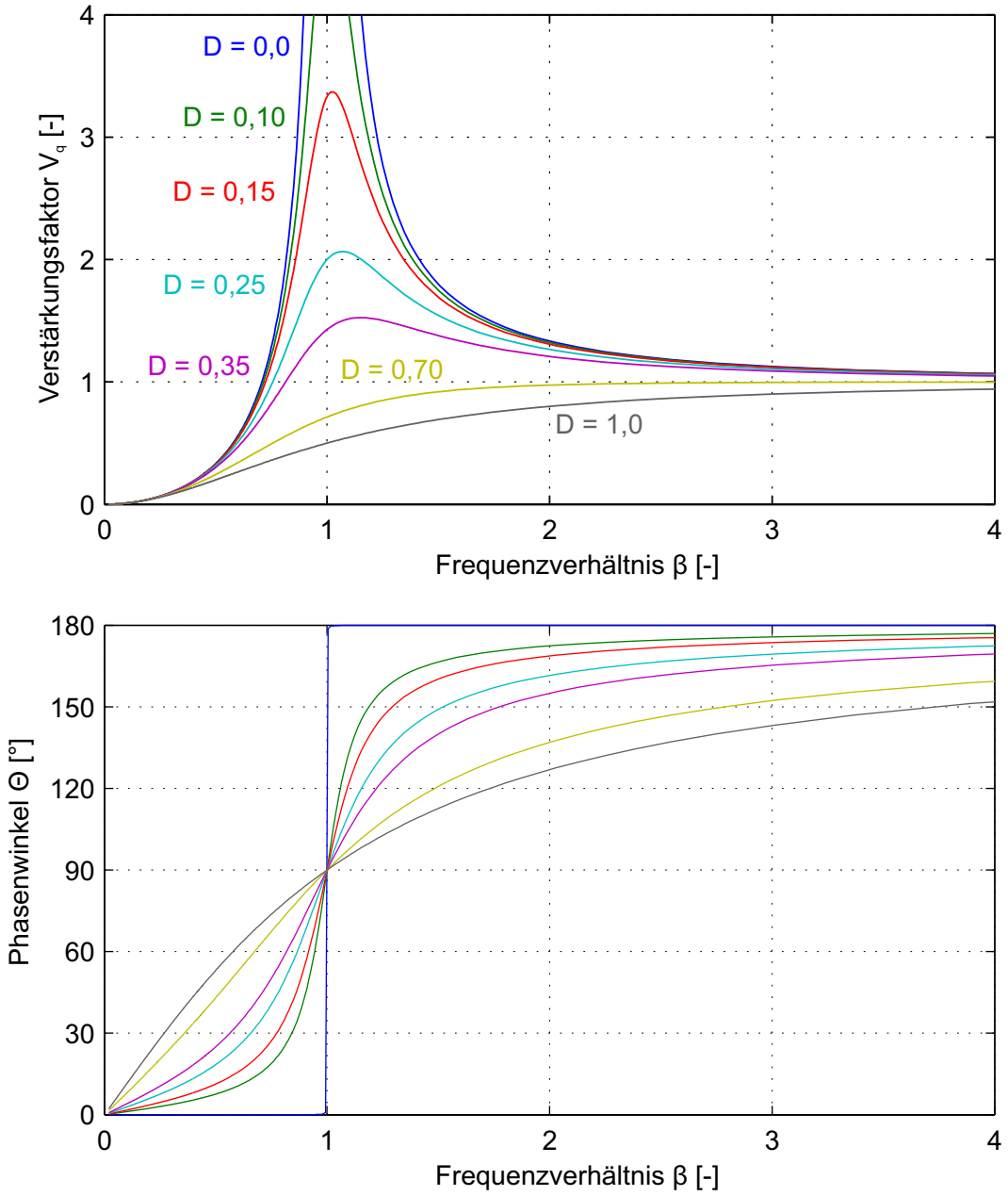


Abbildung A.3: Resonanzkurven und Phasenwinkel bei einem gedämpften, quadratisch angeregten Einmassenschwinger.

Anhang B

Datenblätter der angewendeten Sensoren

Beschleunigung

KISTLER
measure. analyze. innovate.

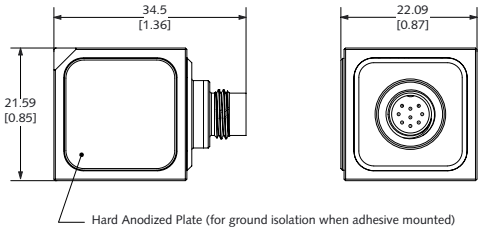
K-Beam Beschleunigungssensor

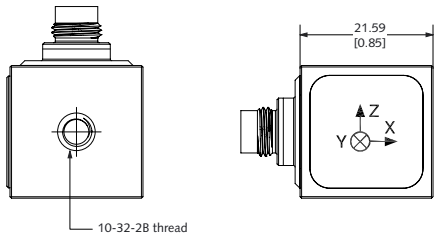
Dreiachsiger kapazitiver MEMS-Beschleunigungssensor

Type 8396A...

Der Typ 8396A... ist ein hochempfindlicher, rauscharmer, dreiachsiger Beschleunigungssensor, der gleichzeitig die Beschleunigung und / oder niederfrequente Schwingungen auf drei zueinander senkrechten Achsen (x, y, z) misst. Die Funktionen des Beschleunigungssensors sind:

- Messbereiche: ± 2 g, ± 10 g, ± 30 g, ± 50 g, ± 100 g, ± 200 g
- Frequenzbereich: 0 ... 2 000 Hz (5 %) (außer ± 2 g)
- Ausgangsoptionen: 0 ± 4 V oder 2,5 ± 2 V (einpolig geerdet), 0 ± 4 V oder 0 ± 8 V (differenzial)
- Betriebstemperatur: –55 ... 125 °C
- Geringer Rauschpegel
- Ausgezeichnete Temperaturbeständigkeit
- Kleiner Würfel, Gewicht 30 Gramm
- Großer Spannungsversorgungsbereich, 6 … 50 VDC
- Schockfestigkeit 6 000 g_{pk}
- CE-konform





Beschreibung

Die Produktreihe der kapazitiven 3-Achs-Beschleunigungssensoren des Typs 8396A... verwendet ein kapazitives Sensorelement in Form eines mikro-elektromechanischen Systems (MEMS) aus Silizium. Das Sensorelement jeder Achse besteht aus einer sehr kleinen seismischen Masse und einem zwischen zwei Platten befindlichen Biegebalken. Mit der Biegung der seismischen Masse unter der Beschleunigung ändert sich die elektrische Kapazität zwischen diesen beiden Platten. Die AC-Ansteuerung und die synchrone Amplituden-Demodulationsschaltung im internen Signalrichter des Beschleunigungssensors liefern ein analoges Ausgangssignal, das proportional zur angewendeten Beschleunigung ist. Das Ausgangssignal wird spannungsabhängig skaliert und verhält sich proportional zur Beschleunigung.

Das Format des Ausgangssignals ist verfügbar als bipolar 0 ± 4 V und unipolar 2,5 V ± 2 V unsymmetrisch sowie differenzial, bipolar 0 ± 4 V oder 0 ± 8 V konditioniert. Der Beschleunigungssensor wird von einer einzelnen Spannungsversorgung mit 6 bis 50 VDC versorgt. Der Temperaturausgang ist erforderlich, wenn ein externer Ausgleich des Bias-Ausgangssignals gewünscht wird. Das Sensorelement und die Elektronik befinden sich in einem leichten verschweißten Titan-Gehäuse mit einem runden 9-poligen Steckverbinder oder einem integrierten Kabel* und abschließenden Anschlussleitern oder einem 9-poligen D-Sub-Steckverbinder.

Die Masseisolierung wird dadurch erreicht, dass der Sensor mittels eines der masseisolierten Zubehörelemente montiert oder auf der Sensorseite mit der hart-eloxierten Aluminiumplatte mit dem Prüfgegenstand verklebt wird.

* Eine Variante mit Schirmgeflecht ist auf Anfrage erhältlich

8396A_003-325d-07.18

Diese Informationen entsprechen dem aktuellen Wissensstand. Kistler behält sich das Recht zu technischen Änderungen vor. Die Haftung für Folgeschäden aus der Verwendung von Kistler-Produkten ist ausgeschlossen.

© 2007 ... 2018 Kistler Gruppe, Eulachstrasse 22, 8408 Winterthur, Schweiz
Tel. +41 52 224 11 11, info@kistler.com, www.kistler.com
Die Produkte der Kistler Gruppe sind durch verschiedene gewerbliche Schutzrechte geschützt. Mehr dazu unter www.kistler.com

Abbildung B.1: Datenblatt des Beschleunigungssensors des Typs 8395A der Firma *Kistler* [71].

KINEMETRICS

EpiSensor ES-T

Force Balance Accelerometer

The EpiSensor ES-T: A Flexible, Versatile Value

Kinemetrics announces its latest line of earthquake sensors – EpiSensor force balance accelerometers. Model FBA ES-T is a triaxial surface package useful for many types of earthquake recording applications. The unit consists of three EpiSensor force balance accelerometer modules mounted orthogonally in one small convenient package. With fullscale recording ranges of ± 0.25 to ± 4g (user selectable) the EpiSensor provides on-scale recording of earthquake motions even at nearfault locations and in a wide variety of structure types.

The significantly improved bandwidth of DC to 200 Hz allows engineers and scientists to study motions at higher frequencies while maintaining the very important DC response that allows simple field calibration and reduces post-processing confusion.

Output circuitry is also significantly enhanced. Several types of outputs can be field-selected by the user: ± 2.5V single-ended output for use with traditional Kinemetrics earthquake recording instruments: ± 10V single-ended or ± 20V differential output for use with Kinemetrics digital recorders and other 24-bit digital recorders currently on the market.

EpiSensor force balance accelerometers are also available in uniaxial (the FBA ES-U) and borehole (the FBA ES-SB shallow and FBA ES-DH deep) packages.

FEATURES

- Low noise
- Extended bandwidth - DC to 200Hz
- User-selectable full-scale range
- Calibration coil (standard)
- Single-end or differential output (user selectable)
- Double-stage transient protection

SPECIFICATIONS

Dynamic range:	155 dB+
Bandwidth:	DC to 200Hz
Calibration coil:	Standard
Full-scale range:	User selectable at ± 0.25g, ± 0.5g, ± 1g, ± 2g or ± 4g
Outputs:	User selectable at: ± 2.5V single-ended ± 10V single-ended ± 5V differential ± 20V differential
Zero adjust:	Three user-friendly access holes for simple, safe, efficient adjustment

Linearity:	< 1000 µg/g2
Hysteresis:	< 0.1% of full scale
Cross-axis sensitivity:	< 1% (including misalignment)
Zero point thermal drift:	< 500 µg/°C (1g sensor)
ESD, RF, EMI protection:	Double stage transient protection with gas arrester elements
Power consumption:	12mA from +/- 12V (Standard Amp) 35mA from +/- 12V (Low Noise Amp) Single supply option available
Physical size:	13.3 cm diameter (cylinder), 6.2 cm high
Mounting:	Single bolt mounting, three adjustable leveling feet and bubble level
Connection:	Single military-style metal connector
Operating Temperature:	-20° to 70°C (0° to 160°F)
Housing:	Watertight enclosure

USA - 222 Vista Ave., Pasadena, CA 91107
Tel (626)795-2220 I Fax (626)795-0868

Switzerland - Z.I. Le Tresi 6B, 1028 Preverenges
Tel +41 (21) 803-2829 I www.kinemetrics.com

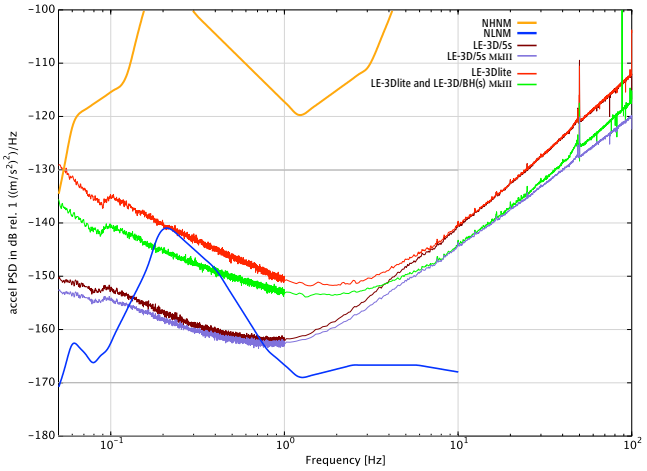
10-23-13

Abbildung B.2: Datenblatt des Beschleunigungssensors des Typs *EpiSensor FBA ES-T* der Firma *Kinemetrics* [69].

Lennartz seismometers have a 30+ years track record all over the world, and it was the **LE-3D** »classic« that started it all. A few years later, applying the same patented technique, Lennartz succeeded in creating an intermediate-period version, extending the flat part of the transfer function down to 0.2 Hz (5 seconds). Ever since, **LE-3D/5s** has been the sensor of choice in particular for microzonation (H/V, Nakamura method) applications. Mechanical robustness, fieldworthiness and unparalleled ease of use have made **LE-3D/5s** the »go-to« sensor for many rapid deployment tasks. Following the success of **LE-3Dlite MkIII**, its larger sibling **LE-3D/5s** was also promoted to **MkIII** (although there never was an **MkII** version for 5s). The result: noise performance and power consumption have been further improved.

Each sensor is individually adjusted and calibrated to less than 1% deviation from the theoretical transfer function and transduction factor, so sensors are perfectly interchangeable without the need to keep track of which sensor was connected to which station at which time. Mechanical sensors have much greater parameter variance, both between individual instruments and over time.

Lennartz sensors are extremely stable in the long term. An affordable recalibration service is offered for those needing written proof of the fact.



Noise graphic courtesy of Dr. Rudolf Widmer-Schnidrig, BFO (Black Forest Observatory)

Also, contrary to most mechanical and broad-band sensors, Lennartz sensors do not require any kind of transportation locking, nor do they require excessive settling time. A useful signal is present just a few seconds after power-up.

Poles and zeroes of the transfer function are supplied with the instrument, making deconvolution easy. Given a reasonable signal-to-noise ratio, **LE-3D/5s MkIII** data can be deconvolved down to 20 seconds and beyond.

Technical data LE-3D/5s MkIII

Power supply:	10…16 V DC unstabilized
Typical power consumption @ 12 V DC:	7 mA
Transduction factor:	±800 V/m/s differential, precisely adjusted
Damping:	.707 critical, precisely adjusted
Dimensions*:	195 mm diameter, 129 mm height
Weight:	6 kg
Temperature range:	-15…+60 °C
RMS noise @ 1 Hz:	< 1 nm/s
Dynamic range:	> 140 dB

**cylindrical part only, not including adjustable feet, connector, and handle*

lennartz electronic

Lennartz electronic GmbH
Bismarckstraße 136 • D-72072 Tübingen
Phone: +49-(0)7071-93550 • Fax: -935530
WWW: www.lennartz-electronic.de
Email: info@lennartz-electronic.de

2017-03 Subject to change without notice

Abbildung B.3: Datenblatt des Seismometers (Schwinggeschwindigkeitsaufnehmer) des Typs *LE-3D/5s* der Firma *Lennartz Electronic GmbH* [79].

Anhang C

Ergebnisse der Untergrunderkundung

(a) Tiefenbereich:
$0,0 - 4,0$ m unter Geländeoberkante.

(b) Tiefenbereich:
$4,0 - 8,0$ m unter Geländeoberkante.

(c) Tiefenbereich:
$8,0 - 12,0$ m unter Geländeoberkante.

(d) Tiefenbereich:
$12,0 - 15,0$ m unter Geländeoberkante.

Abbildung C.1: Kernkisten der Kernbohrung *KB1*

(a) Tiefenbereich:
$0,0 - 4,0$ m unter Geländeoberkante.

(b) Tiefenbereich:
$4,0 - 8,0$ m unter Geländeoberkante.

(c) Tiefenbereich:
$8,0 - 12,0$ m unter Geländeoberkante.

(d) Tiefenbereich:
$12,0 - 15,0$ m unter Geländeoberkante.

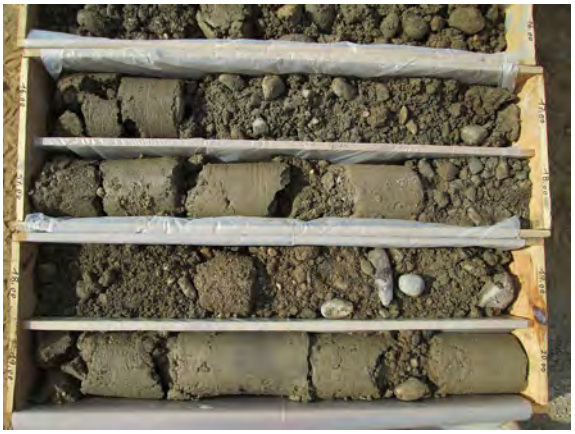
Abbildung C.2: Kernkisten der Kernbohrung *KB2*.

(a) Tiefenbereich:
$0,0 - 4,0$ m unter GOK.

(b) Tiefenbereich:
$4,0 - 8,0$ m unter GOK.

(c) Tiefenbereich:
$8,0 - 12,0$ m unter GOK.

(d) Tiefenbereich:
$12,0 - 16,0$ m unter GOK.



(e) Tiefenbereich:
$16,0 - 20,0$ m unter GOK.

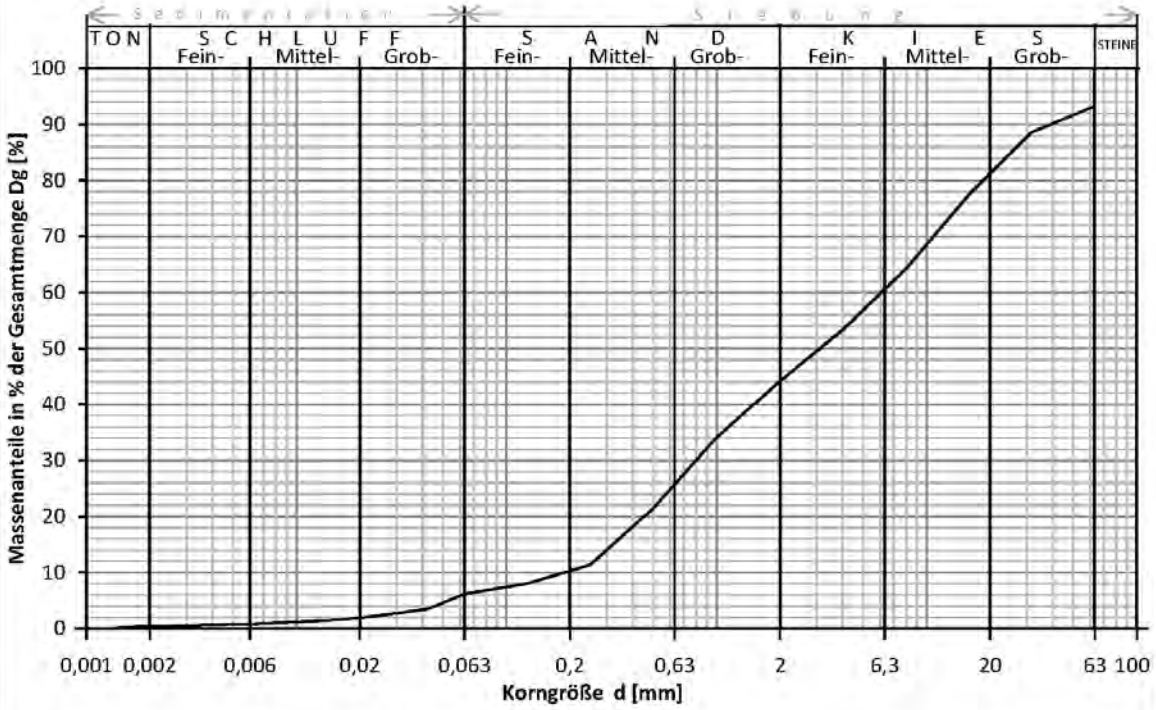
Abbildung C.3: Kernkisten der Kernbohrung *KB3*.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
ERDBAULABORATORIUM
Karlsplatz 13/220-2
1040 Wien

Abbildung und Versuchsbericht	Abb.Nr.	1
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:	778 ERG_20180809	

KORNVERTEILUNGSLINIE

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	778	Probennummer	1
Projekttext 1		Entnahmestelle	KB1
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	4,5 - 4,7
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)			Durchgang (bei Durchmesser)			Kennzahlen			
d_{max} =	63,000	mm	Dg_{63} =	93,3	%	C_U =	32,2	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
d_{90} =	38,711	mm	$Dg_{31,5}$ =	88,6	%	C_C =	0,553	[-]	Krümmungszahl
d_{85} =	25,209	mm	Dg_{20} =	81,2	%	G =	164,27	cm²	Grobfaktor
d_{80} =	18,525	mm	Dg_{16} =	77,6	%	*Kornfraktionen*			
d_{70} =	10,750	mm	$Dg_{6,3}$ =	60,6	%	Co =	6,7	%	Steine
d_{60} =	6,076	mm	Dg_2 =	44,1	%	Gr =	49,1	%	Kies
d_{50} =	3,099	mm	$Dg_{0,63}$ =	25,7	%	Sa =	38,0	%	Sand
d_{40} =	1,500	mm	$Dg_{0,2}$ =	10,3	%	Si =	5,8	%	Schluff
d_{30} =	0,796	mm	$Dg_{0,063}$ =	6,2	%	Cl =	0,4	%	Ton
d_{20} =	0,451	mm	$Dg_{0,02}$ =	1,9	%	*Kornanteile*			
d_{15} =	0,321	mm	$Dg_{0,006}$ =	0,8	%	$A_{>63}$ =	6,7	%	Anteil mit d > 63 mm
d_{10} =	0,189	mm	$Dg_{0,002}$ =	0,4	%	$A_{>2,0}$ =	55,9	%	Anteil mit d > 2,0 mm
d_{min} =	0,000	mm	$Dg_{0,001}$ =	-	%	$A_{<0,063}$ =	6,2	%	Anteil mit d < 0,063 mm

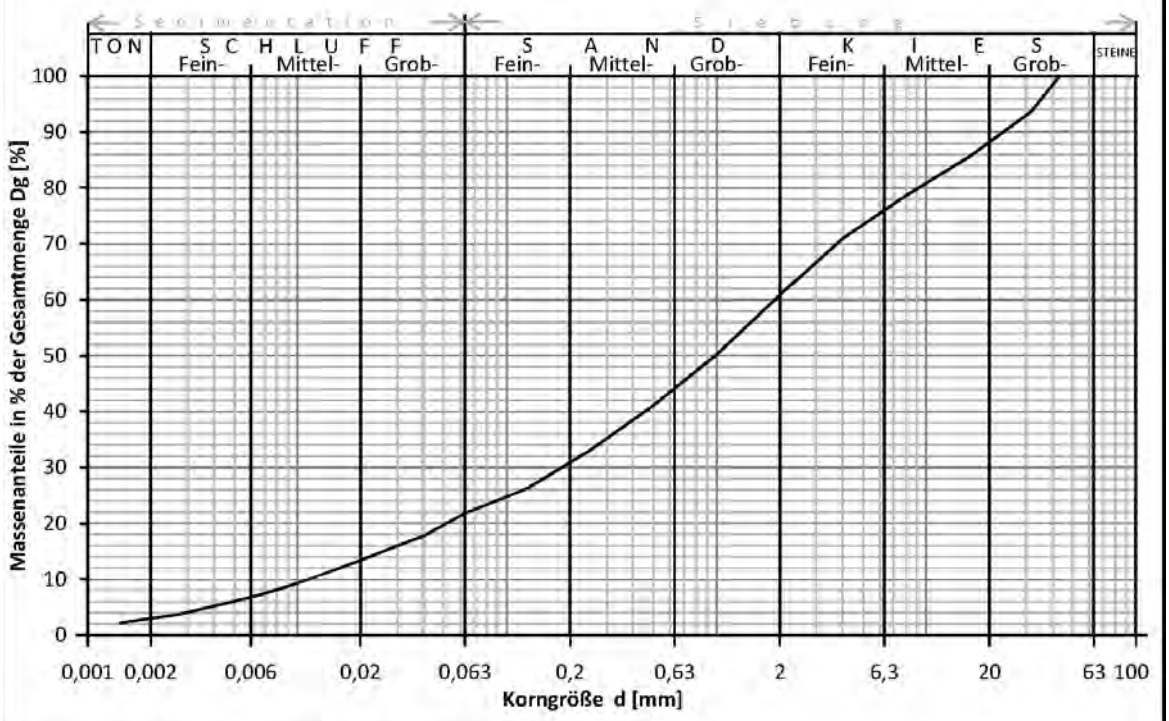
Abbildung C.4: Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. *1*.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
ERDBAULABORATORIUM
Karlsplatz 13/220-2
1040 Wien

Abbildung und Versuchsbericht	Abb.Nr.	2
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:	778 ERG_20180809	

KORNVERTEILUNGSLINIE

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	778	Probennummer	2
Projekttext 1		Entnahmestelle	KB1
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	13,5 - 13,7
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)			Durchgang (bei Durchmesser)			Kennzahlen		
d_{max} =	43,200	mm	Dg_{63} =	100,0	%	C_U = 167,6	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
d_{90} =	23,283	mm	$Dg_{31,5}$ =	93,6	%	C_C = 1,565	[-]	Krümmungszahl
d_{85} =	15,127	mm	Dg_{20} =	88,2	%	G = 119,20 cm²		Grobfaktor
d_{80} =	9,158	mm	Dg_{16} =	85,6	%	*Kornfraktionen*		
d_{70} =	3,742	mm	$Dg_{6,3}$ =	76,0	%	Co = 0,0	%	Steine
d_{60} =	1,892	mm	Dg_{2} =	60,9	%	Gr = 39,1	%	Kies
d_{50} =	0,987	mm	$Dg_{0,63}$ =	44,2	%	Sa = 39,1	%	Sand
d_{40} =	0,453	mm	$Dg_{0,2}$ =	30,9	%	Si = 18,8	%	Schluff
d_{30} =	0,183	mm	$Dg_{0,063}$ =	21,8	%	Cl = 3,0	%	Ton
d_{20} =	0,052	mm	$Dg_{0,02}$ =	13,4	%	*Kornanteile*		
d_{15} =	0,026	mm	$Dg_{0,006}$ =	6,8	%	$A_{>63}$ = 0,0	%	Anteil mit d > 63 mm
d_{10} =	0,011	mm	$Dg_{0,002}$ =	3,0	%	$A_{>2,0}$ = 39,1	%	Anteil mit d > 2,0 mm
d_{min} =	0,000	mm	$Dg_{0,001}$ =	-	%	$A_{<0,063}$ = 21,8	%	Anteil mit d < 0,063 mm

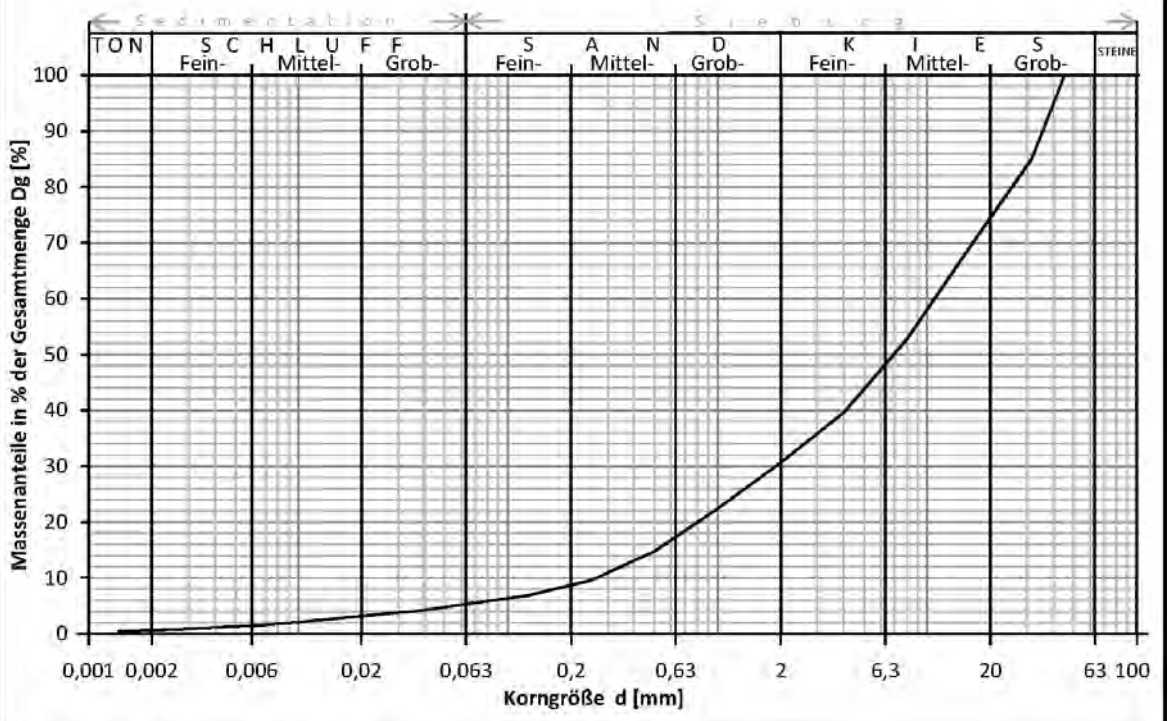
Abbildung C.5: Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. 2.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
ERDBAULABORATORIUM
Karlsplatz 13/220-2
1040 Wien

Abbildung und Versuchsbericht	Abb.Nr.	3
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:	778 ERG_20180809	

KORNVERTEILUNGSLINIE

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	778	Probennummer	3
Projekttext 1		Entnahmestelle	KB2
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	5,5 - 5,7
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)				Durchgang (bei Durchmesser)				Kennzahlen			
d_{max}	= 45,200	mm		Dg_{63}	= 100,0	%		C_U	= 41,0	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
d_{90}	= 35,522	mm		$Dg_{31,5}$	= 85,0	%		C_C	= 1,251	[-]	Krümmungszahl
d_{85}	= 31,484	mm		Dg_{20}	= 74,5	%		G	= 183,98 cm²		Grobfaktor
d_{80}	= 25,384	mm		Dg_{16}	= 69,3	%		*Kornfraktionen*			
d_{70}	= 16,500	mm		$Dg_{6,3}$	= 48,2	%		Co	= 0,0	%	Steine
d_{60}	= 10,841	mm		Dg_2	= 30,7	%		Gr	= 69,4	%	Kies
d_{50}	= 6,919	mm		$Dg_{0,63}$	= 17,3	%		Sa	= 25,3	%	Sand
d_{40}	= 4,083	mm		$Dg_{0,2}$	= 8,7	%		Si	= 4,7	%	Schluff
d_{30}	= 1,893	mm		$Dg_{0,063}$	= 5,3	%		Cl	= 0,6	%	Ton
d_{20}	= 0,803	mm		$Dg_{0,02}$	= 3,2	%		*Kornanteile*			
d_{15}	= 0,510	mm		$Dg_{0,006}$	= 1,4	%		$A_{>63}$	= 0,0	%	Anteil mit d > 63 mm
d_{10}	= 0,264	mm		$Dg_{0,002}$	= 0,6	%		$A_{>2,0}$	= 69,3	%	Anteil mit d > 2,0 mm
d_{min}	= 0,000	mm		$Dg_{0,001}$	= -	%		$A_{<0,063}$	= 5,3	%	Anteil mit d < 0,063 mm

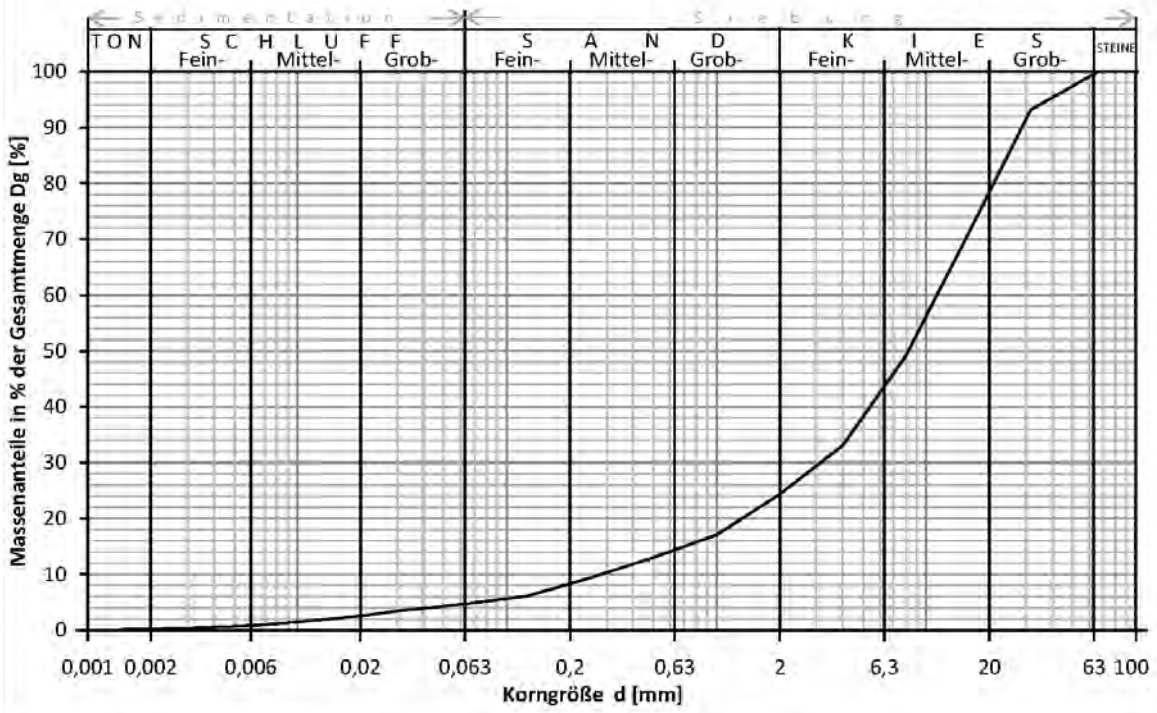
Abbildung C.6: Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. 3.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
ERDBAULABORATORIUM

Abbildung und Versuchsbericht	Abb.Nr.	4
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:	778 ERG_20180809	

KORNVERTEILUNGSLINIE

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	778	Probennummer	4
Projekttext 1		Entnahmestelle	Nachfüllmaterial
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)			Durchgang (bei Durchmesser)			Kennzahlen		
d_{max} = 66,000	mm		Dg_{63} = 99,6	%		C_U = 39,9	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
d_{90} = 28,568	mm		$Dg_{31.5}$ = 93,2	%		C_C = 3,093	[-]	Krümmungszahl
d_{85} = 24,480	mm		Dg_{20} = 78,5	%		G = 189,61 cm²		Grobfaktor
d_{80} = 20,976	mm		Dg_{16} = 71,2	%		*Kornfraktionen*		
d_{70} = 15,392	mm		$Dg_{6,3}$ = 43,6	%		Co = 0,4	%	Steine
d_{60} = 11,245	mm		Dg_{2} = 24,3	%		Gr = 75,3	%	Kies
d_{50} = 8,215	mm		$Dg_{0,63}$ = 14,4	%		Sa = 19,6	%	Sand
d_{40} = 5,389	mm		$Dg_{0,2}$ = 8,3	%		Si = 4,4	%	Schluff
d_{30} = 3,132	mm		$Dg_{0,063}$ = 4,7	%		Cl = 0,3	%	Ton
d_{20} = 1,322	mm		$Dg_{0,02}$ = 2,6	%		*Kornanteile*		
d_{15} = 0,702	mm		$Dg_{0,006}$ = 0,9	%		$A_{>63}$ = 0,4	%	Anteil mit d > 63 mm
d_{10} = 0,282	mm		$Dg_{0,002}$ = 0,3	%		$A_{>2,0}$ = 75,7	%	Anteil mit d > 2,0 mm
d_{min} = 0,000	mm		$Dg_{0,001}$ = -	%		$A_{<0,063}$ = 4,7	%	Anteil mit d < 0,063 mm

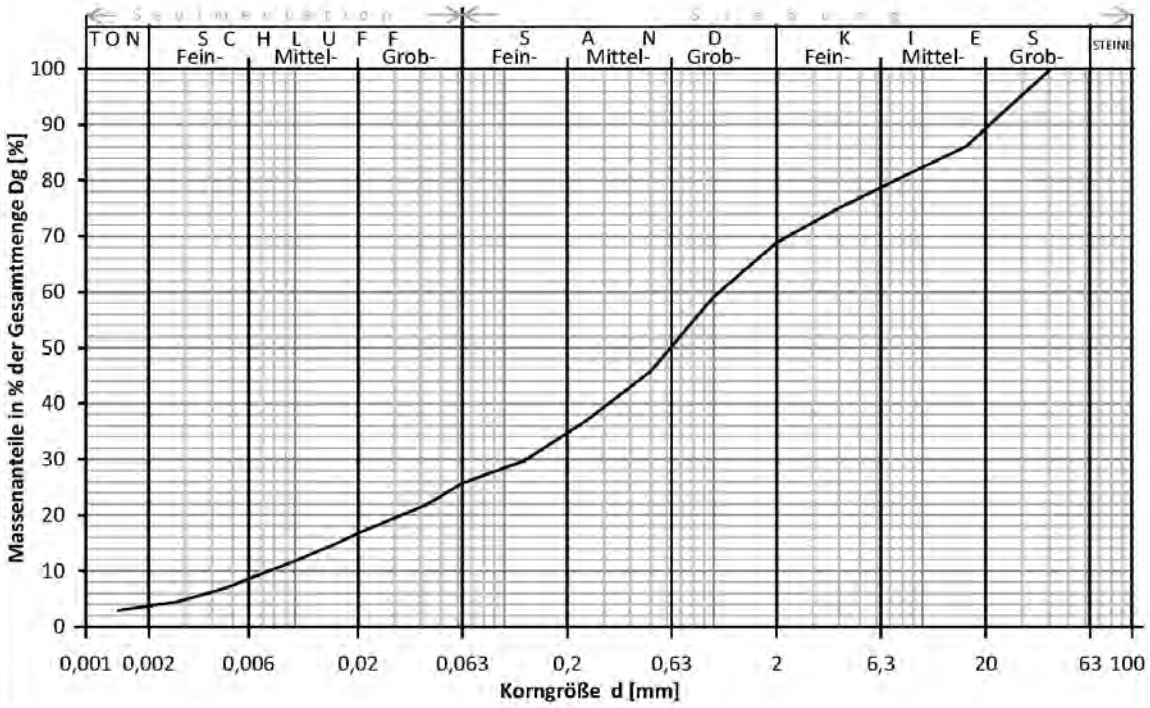
Abbildung C.7: Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. *4*.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
ERDBAULABORATORIUM
Karlsplatz 13/220-2
1040 Wien

Abbildung und Versuchsbericht	Abb.Nr.	5
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:	778 ERG_20180809	

KORNVERTEILUNGSLINIE

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	778	Probennummer	5
Projekttext 1		Entnahmestelle	Spielberg KB1
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	5,0 - 5,2
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)			Durchgang (bei Durchmesser)			Kennzahlen			
d_{max} =	41,000	mm	Dg_{63} =	100,0	%	C_U =	141,8	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
d_{90} =	20,903	mm	$Dg_{31.5}$ =	96,1	%	C_C =	2,037	[-]	Krümmungszahl
d_{85} =	14,013	mm	Dg_{20} =	89,3	%	G =	107,29	cm²	Grobfaktor
d_{80} =	7,388	mm	Dg_{16} =	86,0	%	*Komfraktionen*			
d_{70} =	2,273	mm	$Dg_{6.3}$ =	78,7	%	Co =	0,0	%	Steine
d_{60} =	1,065	mm	Dg_{2} =	68,8	%	Gr =	31,2	%	Kies
d_{50} =	0,623	mm	$Dg_{0,63}$ =	50,2	%	Sa =	43,1	%	Sand
d_{40} =	0,315	mm	$Dg_{0,2}$ =	34,7	%	Si =	22,0	%	Schluff
d_{30} =	0,128	mm	$Dg_{0,063}$ =	25,7	%	Cl =	3,7	%	Ton
d_{20} =	0,032	mm	$Dg_{0,02}$ =	16,8	%	*Komanteile*			
d_{15} =	0,016	mm	$Dg_{0,006}$ =	8,6	%	$A_{>63}$ =	0,0	%	Anteil mit d > 63 mm
d_{10} =	0,008	mm	$Dg_{0,002}$ =	3,7	%	$A_{>2,0}$ =	31,2	%	Anteil mit d > 2,0 mm
d_{min} =	0,000	mm	$Dg_{0,001}$ =	-	%	$A_{<0,063}$ =	25,7	%	Anteil mit d < 0,063 mm

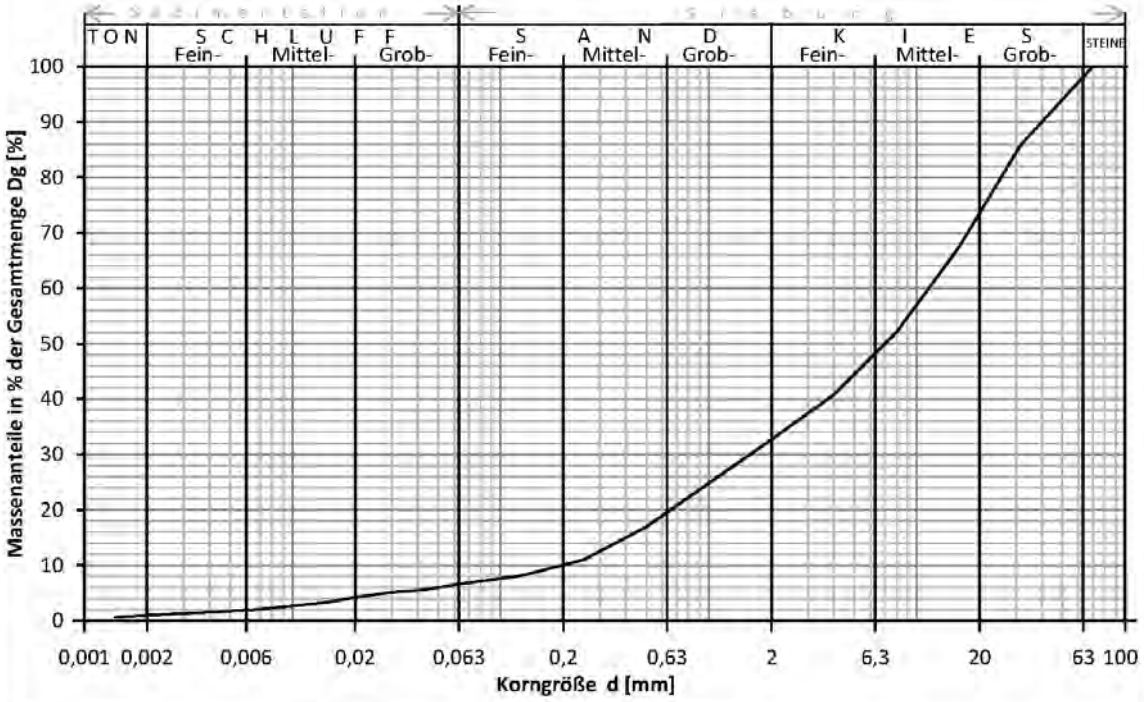
Abbildung C.8: Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. 5.

Technische Universität Wien
Erdbaulaboratorium
Karlsplatz 13/220-2
1040 Wien

Abbildung und Versuchsbericht	Abb.Nr.	6
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:	778 ERG_20180809	

KORNVERTEILUNGSLINIE

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	778	Probennummer	6
Projekttext 1		Entnahmestelle	KB1
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	5,5 - 5,7
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)			Durchgang (bei Durchmesser)			Kennzahlen		
d_{max} =	70,000	mm	Dg_{63} =	98,1	%	C_U = 57,9	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
d_{90} =	39,881	mm	$Dg_{31,5}$ =	85,8	%	C_C = 1,108	[-]	Krümmungszahl
d_{85} =	30,574	mm	Dg_{20} =	73,5	%	G = 182,56 cm²		Grobfaktor
d_{80} =	25,411	mm	Dg_{16} =	67,5	%	*Kornfraktionen*		
d_{70} =	17,555	mm	$Dg_{6,3}$ =	48,2	%	Co = 1,9 %		Steine
d_{60} =	11,414	mm	Dg_{2} =	32,7	%	Gr = 65,4 %		Kies
d_{50} =	7,026	mm	$Dg_{0,63}$ =	19,6	%	Sa = 26,1 %		Sand
d_{40} =	3,732	mm	$Dg_{0,2}$ =	10,1	%	Si = 5,7 %		Schluff
d_{30} =	1,580	mm	$Dg_{0,063}$ =	6,6	%	Cl = 0,9 %		Ton
d_{20} =	0,655	mm	$Dg_{0,02}$ =	4,2	%	*Komanteile*		
d_{15} =	0,399	mm	$Dg_{0,006}$ =	1,9	%	$A_{>63}$ = 1,9 %		Anteil mit d > 63 mm
d_{10} =	0,197	mm	$Dg_{0,002}$ =	0,9	%	$A_{>2,0}$ = 67,3 %		Anteil mit d > 2,0 mm
d_{min} =	0,000	mm	$Dg_{0,001}$ =	-	%	$A_{<0,063}$ = 6,6 %		Anteil mit d < 0,063 mm

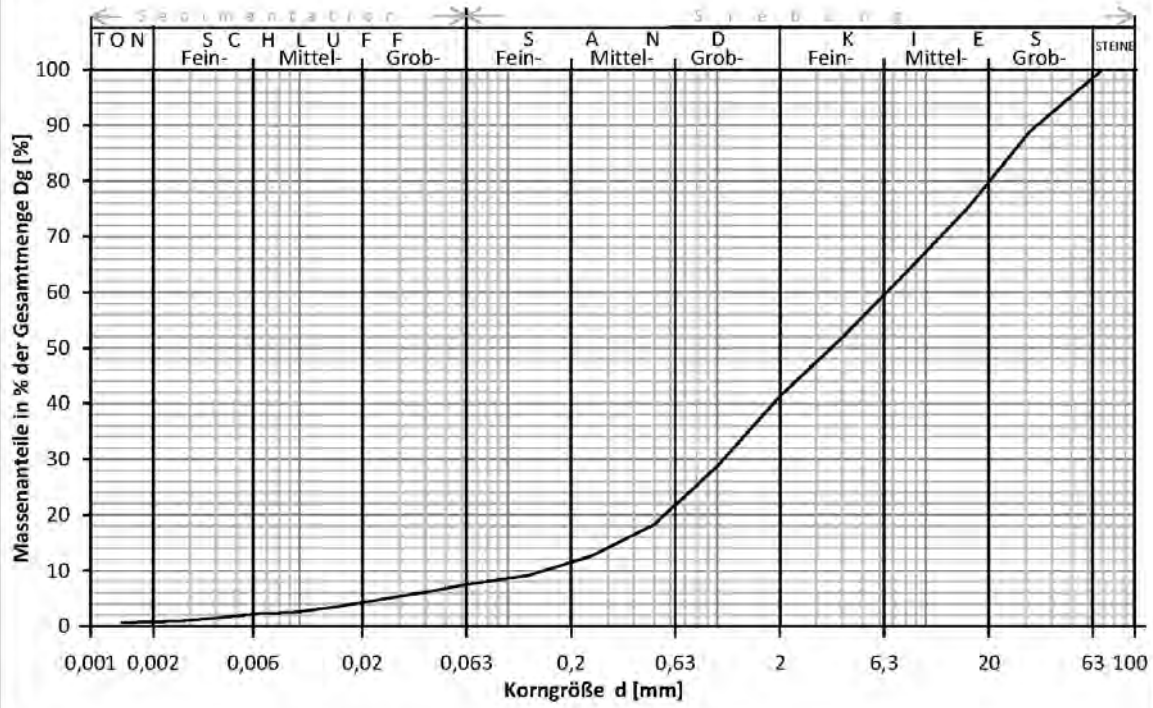
Abbildung C.9: Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. *6*.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
ERDBAULABORATORIUM
Karlsplatz 13/220-2
1040 Wien

Abbildung und Versuchsbericht	Abb.Nr.	7
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:	778 ERG_20180809	

KORNVERTEILUNGSLINIE

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	778	Probennummer	7
Projekttext 1		Entnahmestelle	KB1
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	2,00 - 2,30
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)				Durchgang (bei Durchmesser)				Kennzahlen			
d_{max}	= 70,000	mm		Dg_{63}	= 98,5	%		C_U	= 43,6	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
d_{90}	= 34,061	mm		$Dg_{31,5}$	= 88,9	%		C_C	= 1,194	[-]	Krümmungszahl
d_{85}	= 25,925	mm		Dg_{20}	= 79,8	%		G	= 167,39 cm²		Grobfaktor
d_{80}	= 20,215	mm		Dg_{16}	= 75,3	%		*Kornfraktionen*			
d_{70}	= 11,735	mm		$Dg_{6,3}$	= 59,5	%		Co	= 1,5	%	Steine
d_{60}	= 6,499	mm		Dg_{2}	= 41,3	%		Gr	= 57,2	%	Kies
d_{50}	= 3,526	mm		$Dg_{0,63}$	= 21,7	%		Sa	= 33,8	%	Sand
d_{40}	= 1,862	mm		$Dg_{0,2}$	= 11,5	%		Si	= 6,7	%	Schluff
d_{30}	= 1,076	mm		$Dg_{0,063}$	= 7,5	%		Cl	= 0,8	%	Ton
d_{20}	= 0,561	mm		$Dg_{0,02}$	= 4,2	%		*Kornanteile*			
d_{15}	= 0,335	mm		$Dg_{0,006}$	= 2,1	%		$A_{>63}$	= 1,5	%	Anteil mit d > 63 mm
d_{10}	= 0,149	mm		$Dg_{0,002}$	= 0,8	%		$A_{>2,0}$	= 58,7	%	Anteil mit d > 2,0 mm
d_{min}	= 0,000	mm		$Dg_{0,001}$	= -	%		$A_{<0,063}$	= 7,5	%	Anteil mit d < 0,063 mm

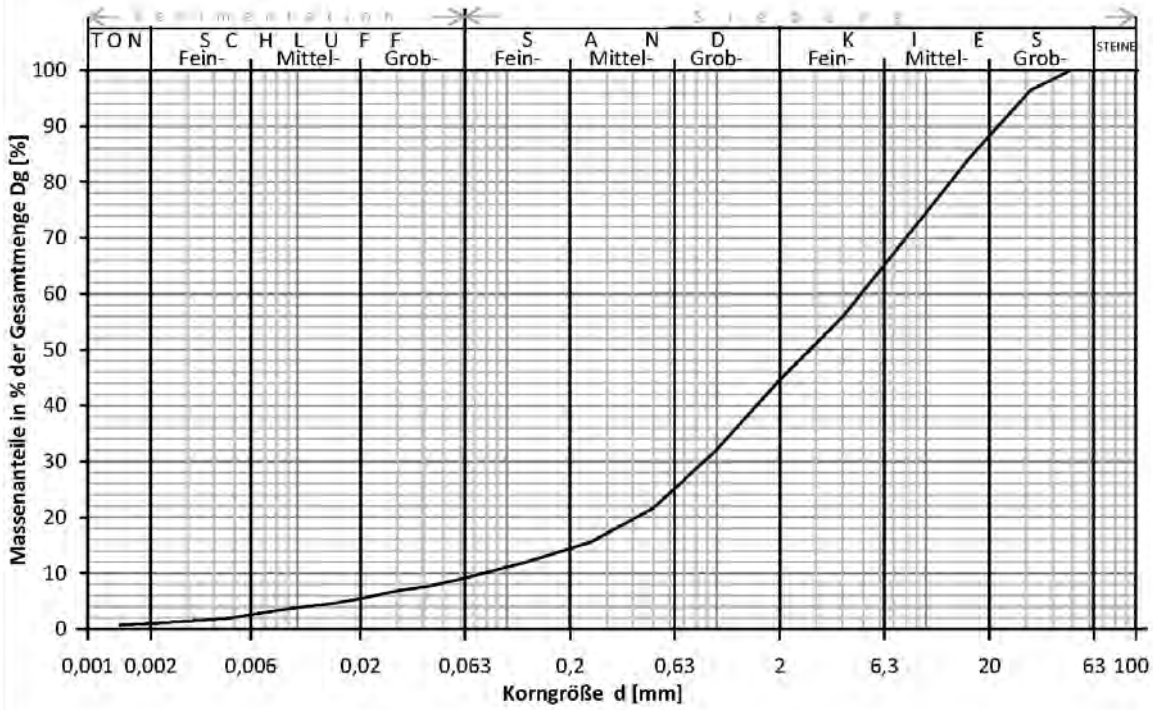
Abbildung C.10: Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. 7.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
ERDBAULABORATORIUM
Karlsplatz 13/220-2
1040 Wien

Abbildung und Versuchsbericht	Abb.Nr.	8
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:	778 ERG_20180809	

KORNVERTEILUNGSLINIE

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	778	Probennummer	8
Projekttext 1		Entnahmestelle	KB1
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	6,00 - 6,30
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)			Durchgang (bei Durchmesser)			Kennzahlen		
d_{max} =	49,000	mm	Dg_{63} =	100,0	%	C_U = 63,0	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
d_{90} =	22,018	mm	$Dg_{31.5}$ =	96,5	%	C_C = 2,000	[-]	Krümmungszahl
d_{85} =	16,695	mm	Dg_{20} =	88,3	%	G = 153,84 cm²		Grobfaktor
d_{80} =	13,019	mm	Dg_{16} =	84,2	%	*Kornfraktionen*		
d_{70} =	7,997	mm	$Dg_{6,3}$ =	65,2	%	Co = 0,0	%	Steine
d_{60} =	4,889	mm	Dg_{2} =	44,6	%	Gr = 55,4	%	Kies
d_{50} =	2,785	mm	$Dg_{0,63}$ =	25,1	%	Sa = 35,5	%	Sand
d_{40} =	1,552	mm	$Dg_{0,2}$ =	14,4	%	Si = 8,1	%	Schluff
d_{30} =	0,871	mm	$Dg_{0,063}$ =	9,1	%	Cl = 1,0	%	Ton
d_{20} =	0,415	mm	$Dg_{0,02}$ =	5,4	%	*Kornanteile*		
d_{15} =	0,224	mm	$Dg_{0,006}$ =	2,5	%	$A_{>63}$ = 0,0	%	Anteil mit d > 63 mm
d_{10} =	0,078	mm	$Dg_{0,002}$ =	1,0	%	$A_{>2,0}$ = 55,4	%	Anteil mit d > 2,0 mm
d_{min} =	0,000	mm	$Dg_{0,001}$ =	-	%	$A_{<0,063}$ = 9,1	%	Anteil mit d < 0,063 mm

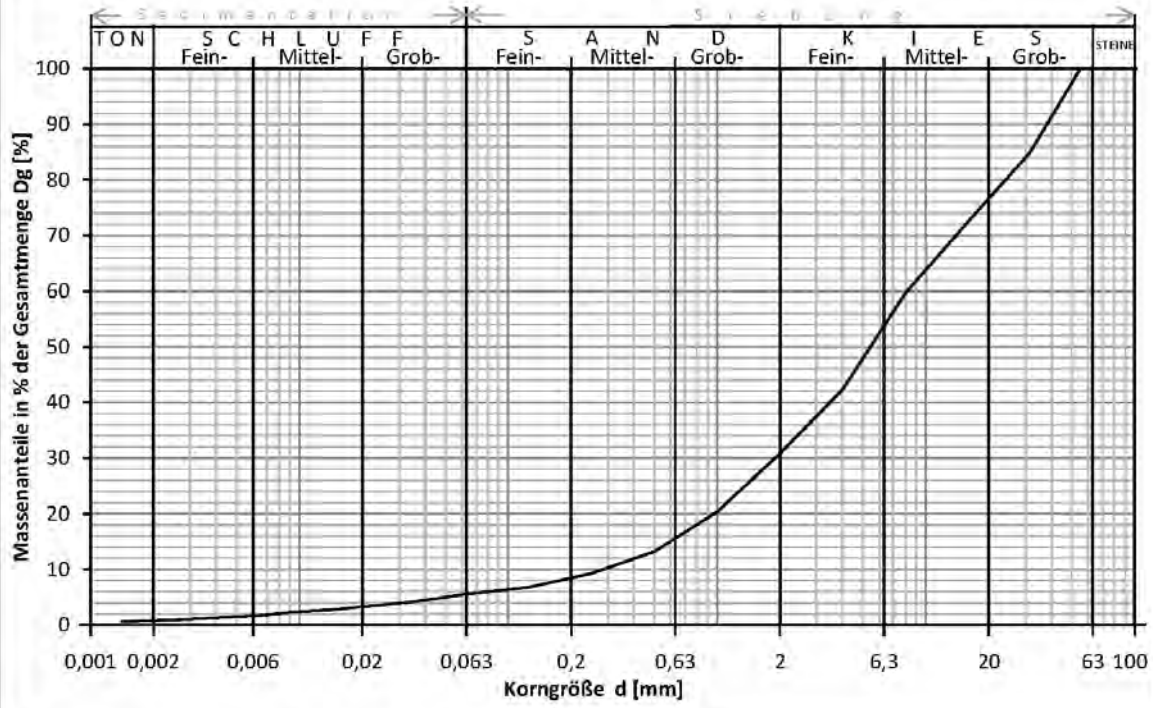
Abbildung C.11: Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. *8*.

TECHNISCHE UNIVERSITÄT WIEN
ERDBAULABORATORIUM
Karlsplatz 13/220-2
1040 Wien

Abbildung und Versuchsbericht	Abb.Nr.	9
Anhang zu Ergebnisblatt Nr.:	778 ERG_20180809	

KORNVERTEILUNGSLINIE

PROJEKT		PROBE	
Projektnummer	778	Probennummer	9
Projekttext 1		Entnahmestelle	KB1
Projekttext 2		Entnahmetiefe [m]	7,70 - 8,00
Projekttext 3		Zusatz	



Durchmesser (bei Durchgang)			Durchgang (bei Durchmesser)			Kennzahlen			
d_{max} =	55,000	mm	Dg_{63} =	100,0	%	C_U =	28,4	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
d_{90} =	38,027	mm	$Dg_{31,5}$ =	84,9	%	C_C =	1,547	[-]	Krümmungszahl
d_{85} =	31,619	mm	Dg_{20} =	76,6	%	G =	181,89	cm²	Grobfaktor
d_{80} =	24,074	mm	Dg_{16} =	72,6	%	*Kornfraktionen*			
d_{70} =	13,934	mm	$Dg_{6,3}$ =	53,7	%	Co =	0,0	%	Steine
d_{60} =	8,116	mm	Dg_2 =	30,8	%	Gr =	69,1	%	Kies
d_{50} =	5,424	mm	$Dg_{0,63}$ =	15,6	%	Sa =	25,3	%	Sand
d_{40} =	3,469	mm	$Dg_{0,2}$ =	8,5	%	Si =	4,8	%	Schluff
d_{30} =	1,893	mm	$Dg_{0,063}$ =	5,6	%	Cl =	0,8	%	Ton
d_{20} =	0,967	mm	$Dg_{0,02}$ =	3,3	%	*Kornanteile*			
d_{15} =	0,596	mm	$Dg_{0,006}$ =	1,7	%	$A_{>63}$ =	0,0	%	Anteil mit d > 63 mm
d_{10} =	0,286	mm	$Dg_{0,002}$ =	0,8	%	$A_{>2,0}$ =	69,2	%	Anteil mit d > 2,0 mm
d_{min} =	0,000	mm	$Dg_{0,001}$ =	-	%	$A_{<0,063}$ =	5,6	%	Anteil mit d < 0,063 mm

Abbildung C.12: Korngrößenverteilung der Bodenprobe Nr. 9.

Anhang D

Ergebnisse der seismischen Drucksondierung

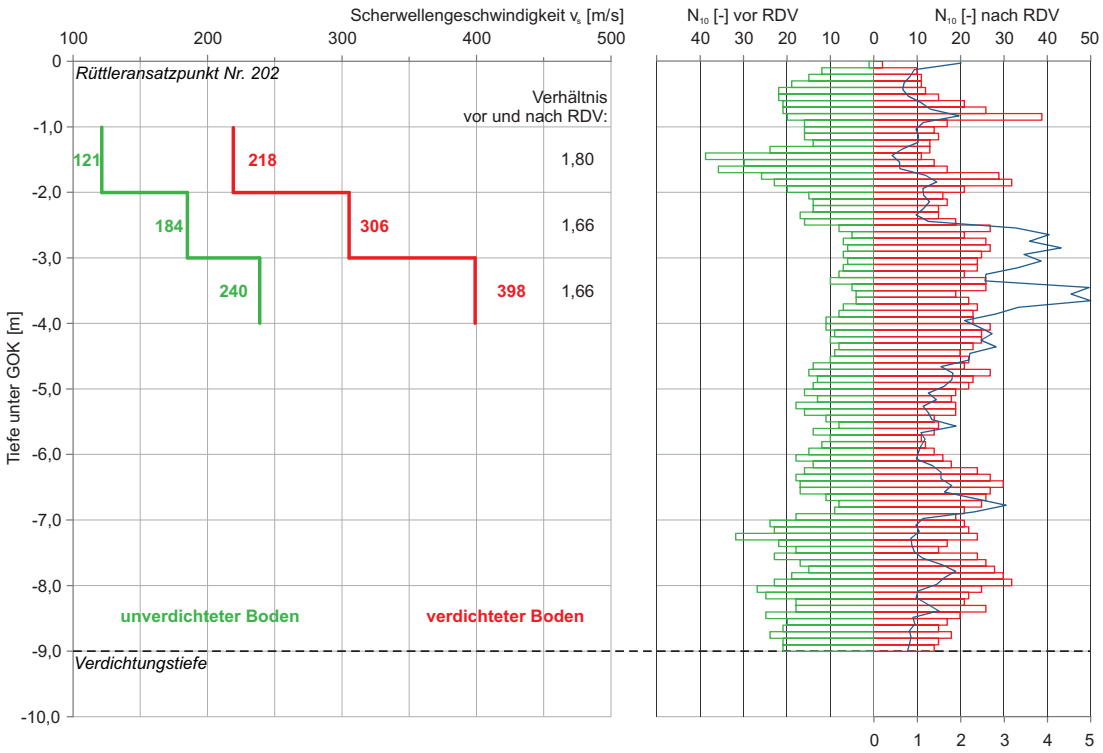


Abbildung D.1: Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *203*.

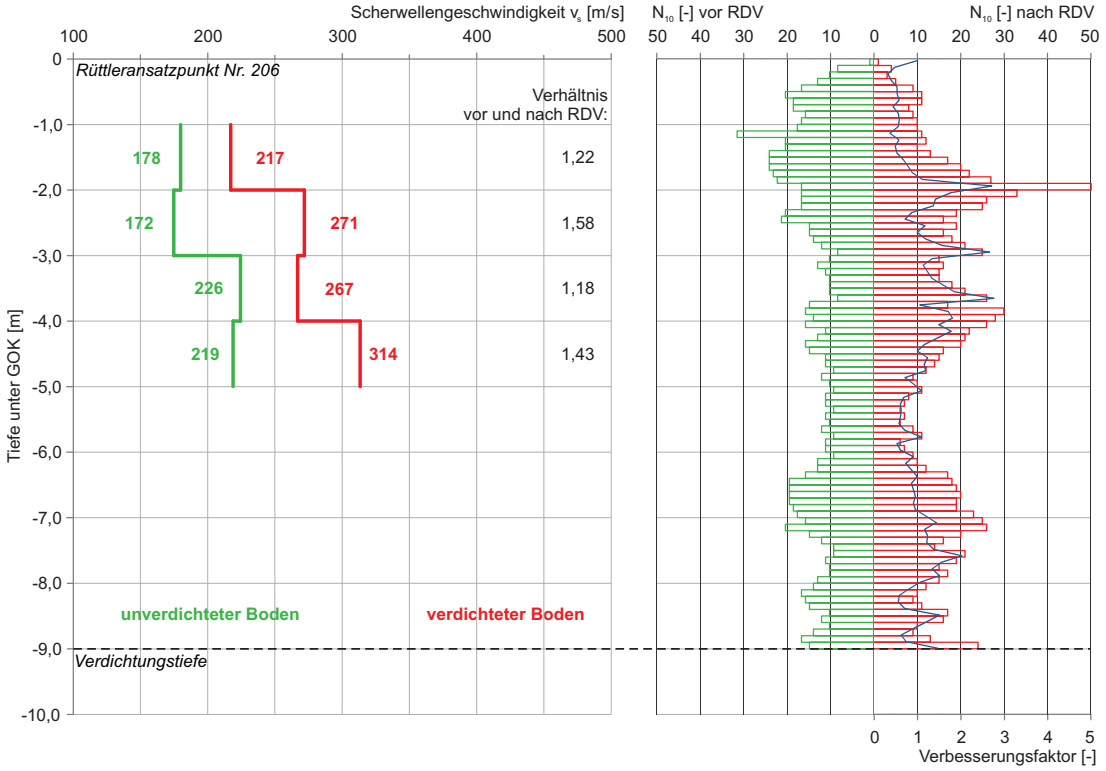


Abbildung D.2: Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *206*.

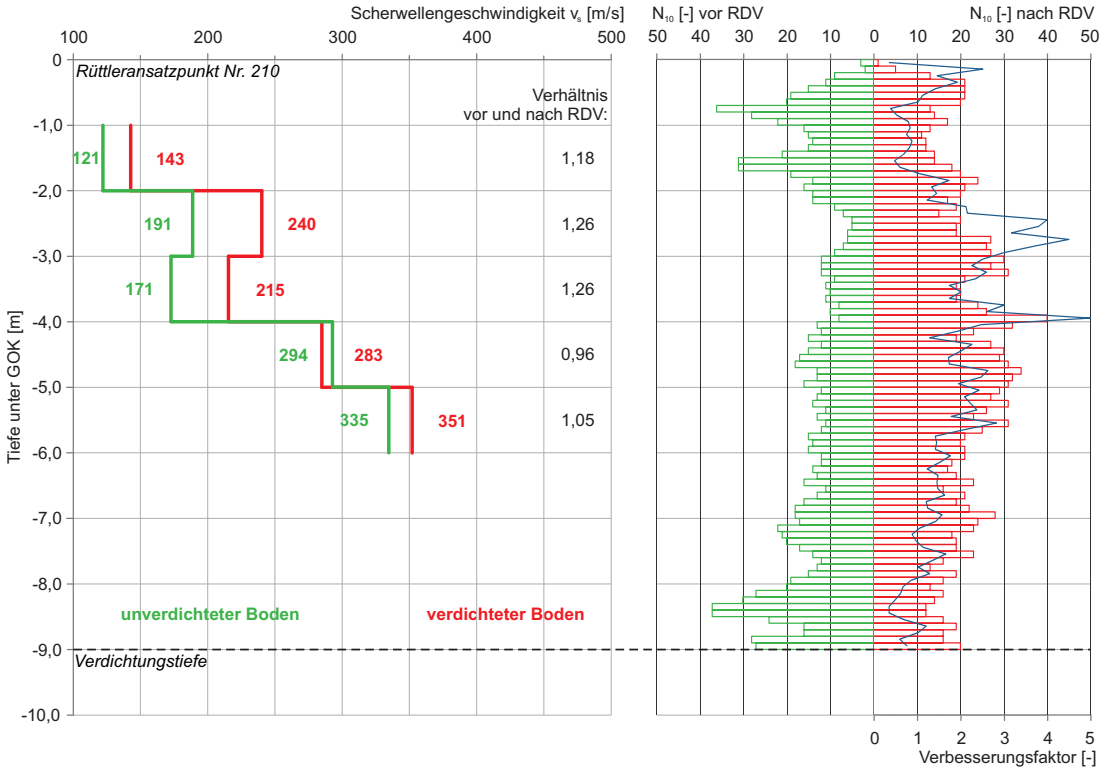


Abbildung D.3: Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *210*.

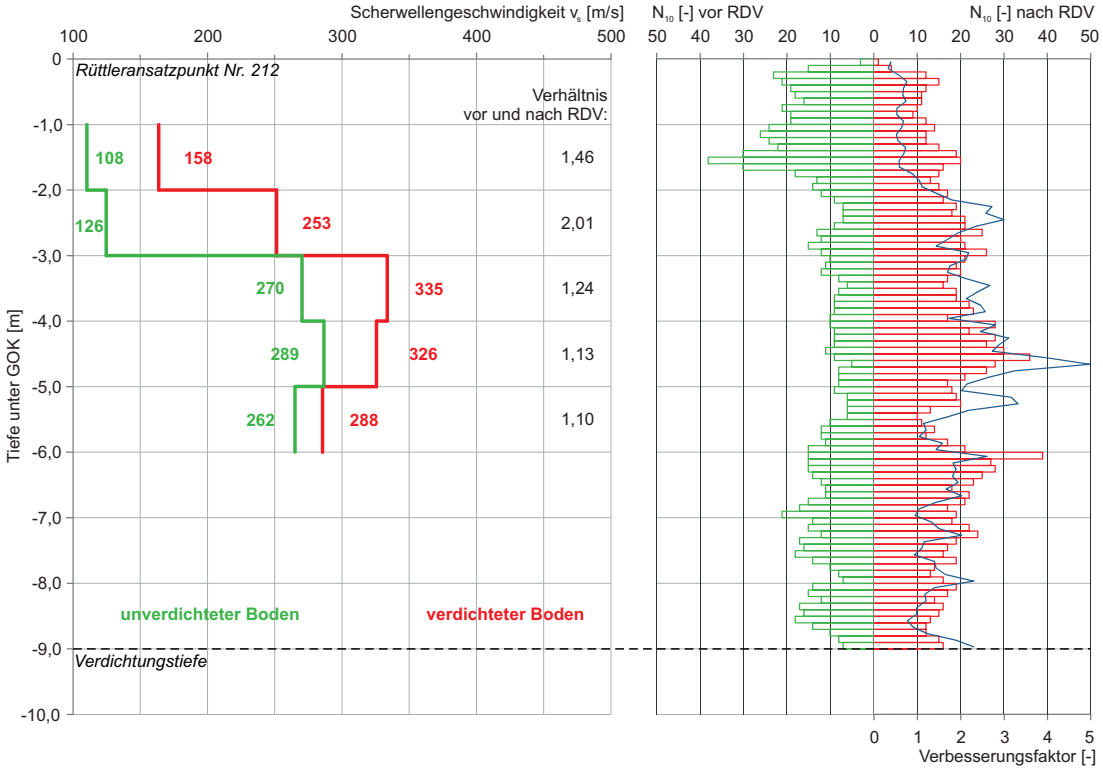


Abbildung D.4: Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *212*.

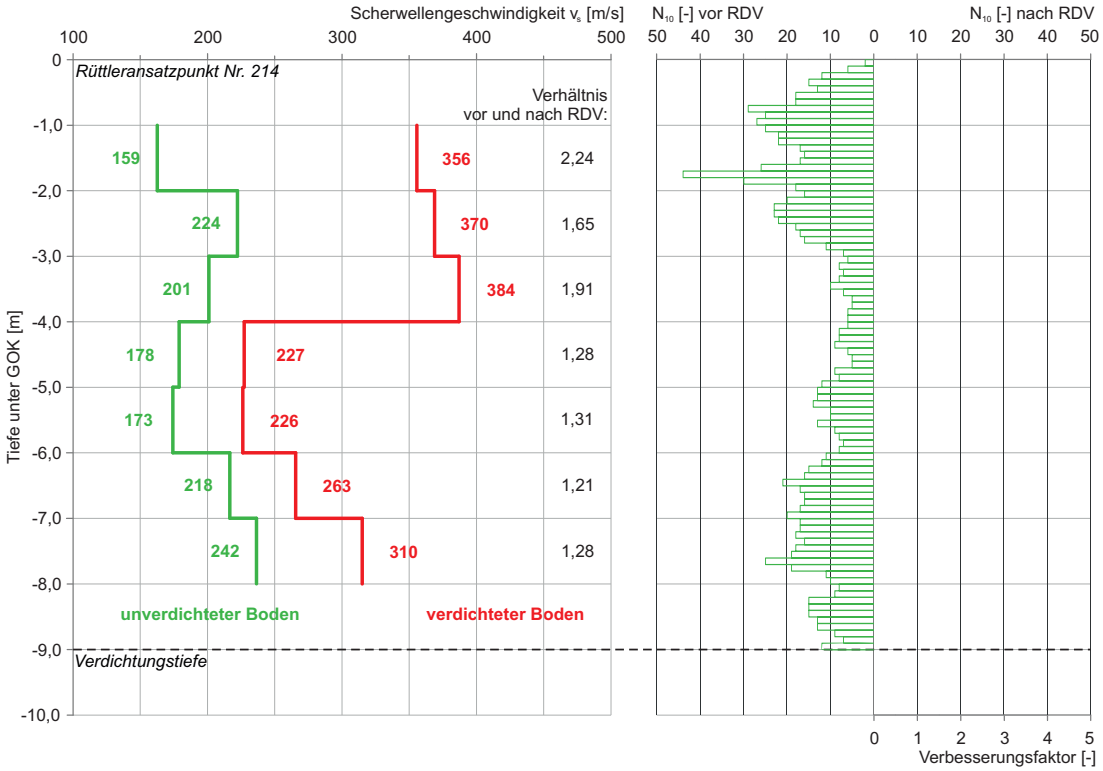


Abbildung D.5: Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *214*.

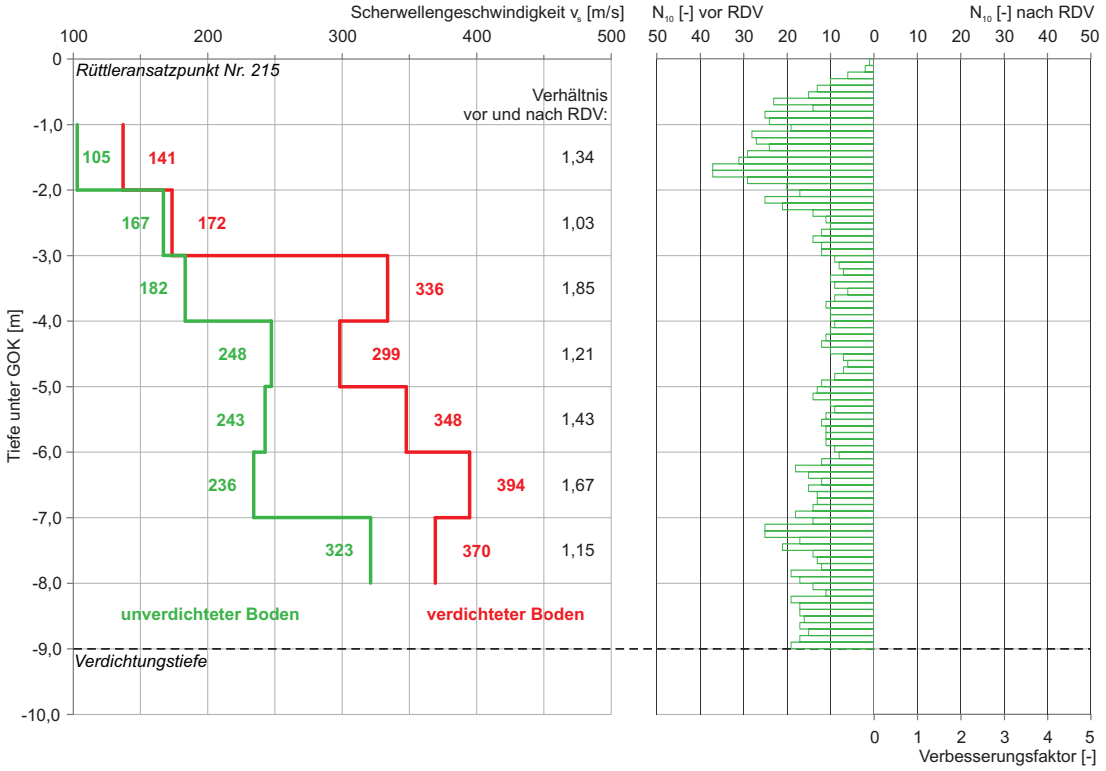


Abbildung D.6: Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *215*.

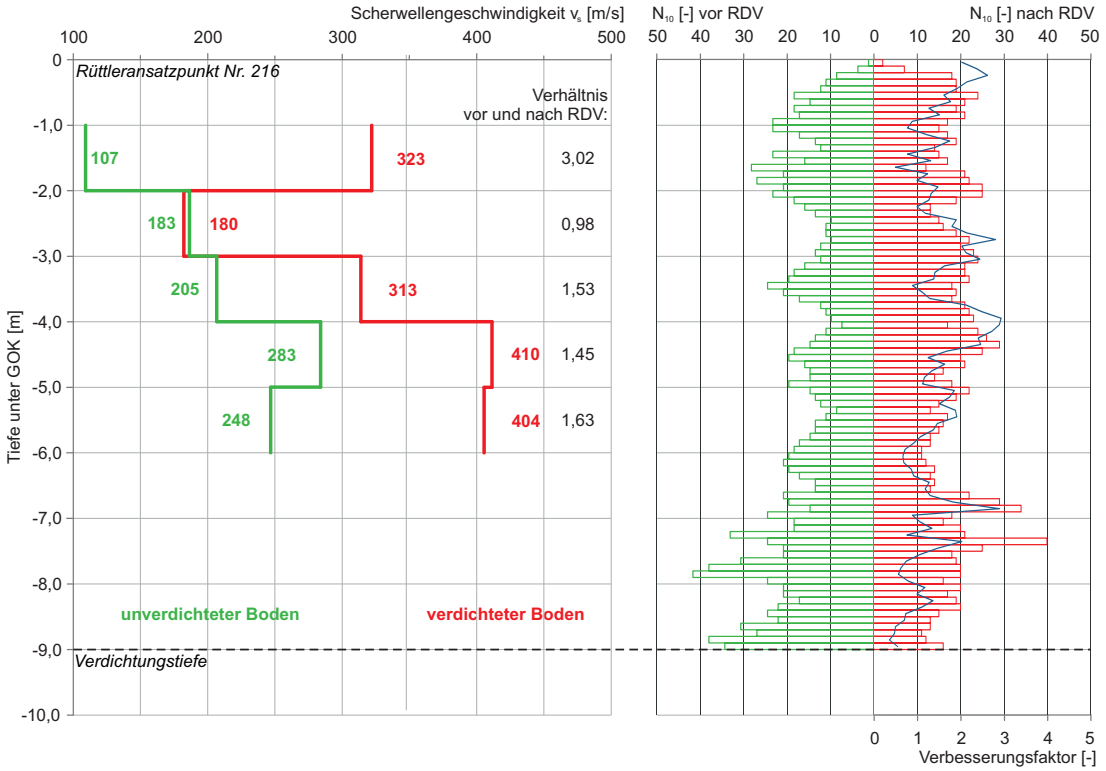


Abbildung D.7: Scherwellengeschwindigkeiten im unverdichteten (grün) und im verdichteten Boden (rot) sowie Rammsondierungen vor (grün) und nach (rot) den Verdichtungsarbeiten, beim Rüttleransatzpunkt Nr. *216*.