UNIVERSITÄT FÜR BODENKULTUR

INSTITUT FÜR GEOTECHNIK



2017

BETREUER: Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam MITBETREUER: Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Pistrol, Bsc.

DIPLOMARBEIT NR. 373

Danksagung

Die vorliegende Diplomarbeit ist Teil meines individuellen Masterstudienganges mit der Bezeichnung "Bodenmechanik naturräumlicher Prozesse / Angewandte Geotechnik" an der Universität für Bodenkultur in Wien.

Mein besonderer Dank gilt Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam, welcher es mir ermöglicht hat, die Diplomarbeit am Institut für Geotechnik an der Technischen Universität Wien zu schreiben. Danke für die konstruktiven Gespräche im Zuge der Betreuung der Arbeit!

Begleitet wurde ich – quasi von der ersten Walzenfahrt bis zur Auswertung der Ergebnisse – von Univ.Ass. Dipl.-Ing. Dr.techn. Johannes Pistrol BSc. Ich bedanke mich für das Teilhaben-Lassen an deinem großen Fachwissen sowie für die freundschaftlich-kollegiale Betreuung der Arbeit - großes Danke!

Bei Univ.Ass. Dipl.-Ing. Mario Hager BSc. möchte ich mich insbesondere für die fachliche Expertise im Zuge der Feldarbeiten bedanken, bei MSc. Christian Ebner – eigentlich schon in gewohnter Art und Weise – für die Unterstützung bei den planlichen Darstellungen.

Meine Familie ist mein Fundament. Stellvertretend für alle bedanke ich mich bei meinem Vater Meinhard Leitich, welcher mich insbesondere mit hoher Flexibilität bei der Kinderbetreuung unterstützte.

Wer sich mit Oszillationswalzen beschäftigt, ... spielt weniger Lego. Ich hoffe, dass dir, mein lieber Matthias, nicht die langen Zug- oder Autofahrten nach Wien, sondern die Spielplätze auf der Donauinsel, die diversen Kindertheateraufführungen, der Böhmische Prater sowie die gemeinsam – oft aber doch mit Lego-Bauen – verbrachte Zeit in meiner kleinen, aber feinen Studentengarconniere in Erinnerung bleiben.

Ohne die vielen immer wiederkehrenden Aufmunterungen sowie die moralische Unterstützung von meiner Lebensgefährtin Olga Levtcheva wäre der Arbeitsfortschritt ein anderer gewesen. Die Arbeit hat mir zumeist sogar Freude bereitet, das Leben mit Dir jedoch weit mehr! Danke für die vielen Farben ...

Kurzfassung

Die Verfahren zur Oberflächenverdichtung wurden in den letzten Jahrzenten stetig weiterentwickelt und verbessert. Neben der klassischen Verdichtung mittels Vibrationswalzen haben sich Oszillationswalzen aufgrund der signifikant geringeren Erschütterungen beim Verdichtungsvorgang insbesondere im innerstädtischen Bereich etabliert.

Während für die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) bei Vibrationswalzen bereits Ende der 70er Jahre des vorangegangenen Jahrhunderts ein FDVK-System auf den Markt gebracht wurde, ist bei den Oszillationswalzen nach wie vor kein funktionierendes FDVK-System in Serie gegangen. Seit 2011 läuft ein von der *Hamm AG* in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Wien (Institut für Geotechnik) groß angelegtes Forschungsprojekt, bei welchem erstmals ein System zur Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle für Oszillationswalzen entwickelt wurde. Die Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen sowie die Ergebnisse der durchgeführten semi-analytischen Modellierungen sind in der Dissertation von PISTROL [57] ausführlich beschrieben worden, auch ist der Algorithmus zur Berechnung des FDVK-Wertes zum Patent angemeldet worden.

Im Oktober und November 2015 wurden in der Kiesgrube der HABAU Hoch- u. Tiefbaugesellschaft m.b.H. in Fischamend groß angelegte Feldversuche mit drei unterschiedlichen Testwalzen mit Oszillationsbandagen durchgeführt. Mit dem neu entwickelten und erstmals in den Walzen eingebauten FDVK-System konnten somit FDVK-Werte erstmalig online und arbeitsintegriert generiert werden. Parallel zu der FDVK-Wertaufzeichnung wurden vergleichend Versuche mit der dynamischen Lastplatte durchgeführt.

In der vorliegenden Arbeit werden die Ergebnisse der bei den Feldversuchen im Herbst 2015 durchgeführten Testfahrten systematisch aufgearbeitet, dargestellt und interpretiert. Folgende Punkte wurden im Zuge der Auswertung beurteilt:

- Generierung von Verdichtungszuwächsen
- Detektion von Schwachstellen
- Einfluss der vom Walzenfahrer einstellbaren Prozessparameter (Erregerfrequenz, Fahrgeschwindigkeit)
- Einfluss der durch die Walze vorgegebenen Walzenparameter
- Beurteilung der Reproduzierbarkeit des FDVK-Wertes
- Vergleich der generierten FDVK-Werte mit den Ergebnissen der dyn. Lastplattenversuche

Nach einer kurzen Einführung in die Thematik in Kapitel 1 folgen in Kapitel 2 die theoretischen Grundlagen der Bodenverdichtung. Es wird dabei insbesondere auf den Einfluss des Bodens auf den Verdichtungserfolg, auf alle gängigen Walzen- und Bandagentypen, auf deren

Betriebszustände und Bewegungsverhalten sowie auf gängige Verfahren der Verdichtungskontrolle eingegangen.

In Kapitel 3 werden das Funktionsprinzip, die Komponenten, die Einflussgrößen sowie die FDVK-Systeme für Vibrations- und Oszillationswalzen beschrieben. Ausführlich eingegangen wird auf die Methodik bzw. den Algorithmus zur Berechnung des FDVK-Wertes für Oszillationswalzen, welcher im Zuge der Feldarbeiten getestet wurde.

Der Versuchsaufbau sowie die Durchführung der experimentellen Feldversuche werden in Kapitel 4 beschrieben. Die Auswertung der Messergebnisse aus den Messfahrten sowie aus den parallel durchgeführten dyn. Lastplattenversuchen ist in Kapitel 5 dargestellt. Dabei werden die aufgezeichneten Messdaten ausgewertet, analysiert, graphisch aufbereitet, dargestellt, vergleichend gegenübergestellt und diskutiert.

Abschließend werden in Kapitel 6 die Erkenntnisse aus den Versuchen zusammengefasst und Anregungen auf mögliche weitere Forschungsaktivitäten angegeben.

Abstract

The methods of near-surface compaction were improved continuously over the last decades. In addition to the classic compaction using vibratory rollers, oscillatory rollers were established because of their significantly lower ambient vibration during the compaction process, which is important especially in urban areas.

While a *Continuous Compaction Control* system (CCC) for vibratory rollers was introduced already in the late 1970s such a system has not yet been developed for oscillatory rollers.

In 2011 a joint venture research project was launched by the *Hamm AG* and the Vienna University of Technology (Institute of Geotechnics) with the aim of developing the first functioning CCC-system for oscillatory rollers.

The findings of the experimental tests and the results of the conducted semi-analytic modelling are described in detail in the Phd thesis of PISTROL [57]. The algorithm used to calculate the CCC value was filed for a patent.

In October and November 2015 comprehensive field tests with three different test rollers with oscillatory drums were conducted in a gravel pit of the HABAU Hoch- u. Tiebaugesellschaft m.b.H.

For the first time the newly developed CCC measuring system was installed on the rollers. This way CCC values were calculated work-integrated online. While the CCC-values were recorded, comparative tests with a dynamic load plate were carried out.

In this thesis the results of the field tests performed in autumn 2015 are discussed, depicted and interpreted systematically. The following issues have been evaluated:

- Detection of artificially installed weak spots in the test field
- The impact of adjustable process parameters controlled by the roller operator (excitation frequency, driving speed)
- The impact of the roller parameters, determined by the roller itself
- Evaluation of the reproducibility of CCC values
- Comparison of CCC values with results of the dynamic load plate tests

After a short introduction in chapter 1 the theoretical principle of soil compaction is described in chapter 2. The influence of the soil on the compaction success, the common roller and drum types, their modes of operation including the roller-soil behaviour and the common methods of compaction control are discussed.

In chapter 3 functional principle, components, influencing parameters and CCC systems for vibratory and oscillatory rollers are described. The method and algorithm used for the calculation of the CCC value for oscillation rollers examined in the field tests is described in detail.

The experimental set-up and the performance of the experimental field tests are described in chapter 4. The analysis of the measurement results of the test runs and the dynamic load-plate tests are depicted in chapter 5. The recorded data were evaluated, analysed, graphically depicted, comparatively confronted to each other and discussed.

In conclusion the findings of the tests are summarized and possible further research fields are suggested in chapter 6.

Inhaltsverzeichnis

| 1 EINLEITUNG UND ZIEL DER ARBEIT | 11 |
|--|----|
| 2 GRUNDLAGEN DER BODENVERDICHTUNG | 13 |
| 2.1 7IELLIND ZWECK DER BODENVERBESSERLINGSMASSNAHMEN | 13 |
| 2.2 METHODEN DER MECHANISCHEN BODENVERDICHTUNG | 14 |
| 2.3 EINFLUSS DES BODENS AUF DEN VERDICHTUNGSERFOLG | 16 |
| 2.3.1 KORNGRÖSSENVERTEILUNG / FEINKORNANTEIL | 16 |
| 2.3.2 LITHOLOGIE / VERWITTERUNGSBESTÄNDIGKEIT | 17 |
| 2.3.3 KORNFORM / RUNDUNGSGRAD / KORNRAUIGKEIT | 18 |
| 2.3.4 LAGERUNGSDICHTE / KONSISTENZ | 19 |
| 2.3.5 WASSERGEHALT | 21 |
| 2.4 EINBAUBEDINGUNGEN | 21 |
| 2.5 ARTEN VON WALZEN UND BANDAGEN | 23 |
| 2.5.1 WALZEN | 23 |
| 2.5.1.1 Walzenzüge | 23 |
| 2.5.1.2 Tandemwalzen | 24 |
| 2.5.1.3 Kombiwalzen | 24 |
| 2.5.1.4 Anhängewalzen / Kleingeräte | 24 |
| 2.5.2 BANDAGENTYPEN | 24 |
| 2.5.2.1 Glattmantelbandagen | 25 |
| 2.5.2.2 Schaffußbandagen | 25 |
| 2.5.2.3 Polygonbandagen | 25 |
| 2.6 WALZENTYPEN UND AUFBAU | 26 |
| 2.6.1 STATISCHE WALZEN | 26 |
| 2.6.2 DYNAMISCHE WALZEN | 27 |
| 2.6.2.1 Vibrationswalzen | 27 |
| 2.6.2.2 Oszillationswalzen | 28 |
| 2.6.2.3 Walzen mit Richtschwinger | 30 |
| 2.6.2.4 SelbstregeInde Walzen | 31 |
| 2.7 WALZENPARAMETER | 32 |
| 2.7.1 BEEINFLUSSBARE WALZENPARAMETER | 32 |
| 2.7.2 NICHT BEEINFLUSSBARE WALZENPARAMETER | 33 |
| 2.8 PROZESSPARAMETER | 36 |
| 2.9 BETRIEBSZUSTÄNDE UND BEWEGUNGSVERHALTEN | 37 |
| 2.9.1 BETRIEBSZUSTÄNDE DER VIBRATIONSWALZE | 37 |
| 2.9.1.1 Kontakt | 38 |
| 2.9.1.2 Abheben | 38 |
| 2.9.1.3 Springen | 38 |

| 2.9.1.4 Taumeln | 39 |
|---|----------|
| 2.9.1.5 Chaos | 39 |
| 2.9.2 BETRIEBSZUSTÄNDE DER OSZILLATIONSWALZE | 39 |
| 2.9.2.1 Haften | 40 |
| 2.9.2.2 Einseitiges Gleiten | 40 |
| 2.9.2.3 Asymmetrisches Gleiten | 40 |
| 2.9.2.4 Symmetrisches Gleiten | 40 |
| 2.10 VERDICHTUNGSKONTROLLE | 41 |
| 2.10.1 Allgemeines | 41 |
| 2.10.2 VERDICHTUNGSANFORDERUNGEN | 41 |
| 2.10.3 Prüfverfahren | 43 |
| 2.10.3.1 Proctorversuch | 44 |
| 2.10.3.2 Feldverfahren zur Bestimmung der Dichte des Bodens | 46 |
| 2.10.3.3 Statischer Lastplattenversuch | 47 |
| 2.10.3.4 Dynamischer Lastplattenversuch | 49 |
| 2.10.3.5 Weitere punktuelle Verdichtungskontrollen | 53 |
| 2.10.3.6 Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) | 54 |
| | |
| <u>3</u> FLÄCHENDECKENDE DYNAMISCHE VERDICHTUNGSKONTROLLE (FDVK) | 55 |
| | |
| 3.1 FUNKTIONSPRINZIP | 55 |
| 3.2 KOMPONENTEN | 55 |
| 3.3 VORTEILE DER FDVK | 56 |
| 3.4 NACHTEILE DER FDVK | 57 |
| 3.5 EINFLUSSFAKTOREN AUF DEN FDVK-WERT | 57 |
| 3.6 PRIMÄRE EINFLUSSFAKTOREN | 58 |
| 3.7 SEKUNDÄRE EINFLUSSFAKTOREN | 59 |
| 3.8 FLÄCHENDECKENDE DYNAMISCHE VERDICHTUNGSKONTROLLE (FDVK) MIT VIBRATIONSWALZEN | 60 |
| 3.8.1 HISTORISCHE ENTWICKLUNG | 60 |
| 3.8.2 FDVK-Systeme für Vibrationswalzen | 60 |
| 3.8.3 Messtiefe | 66 |
| 3.9 FLÄCHENDECKENDE DYNAMISCHE VERDICHTUNGSKONTROLLE (FDVK) MIT OSZILLATIONSWALZEN | 66 |
| 3.9.1 HISTORISCHE ENTWICKLUNG | 66 |
| 3.9.2 FDVK-Systeme für Oszillationswalzen | 67 |
| 3.9.2.1 Oszillometer-System – OMV-Wert | 67 |
| 3.9.2.2 Neu entwickelter FDVK-Wert für Oszillationswalzen – FDVK _{OSZI} | 67 |
| | |
| 4 FELDVERSUCHE IN DER KIESGRUBE FISCHAMEND | 73 |
| | 70 |
| | /3 |
| 4.1.1 OKI DER FELDVERSUCHE / AREAL | /4 75 |
| 4.1.2 GEOLOGISCHE UNTERGRUNDSITUATION | /5 |
| 4.1.3 IVIE FEOROLOGISCHE BEDINGUNGEN | 11 |

| 4.2 | TESTFELDER | 78 |
|-------------------|--|-----|
| 4.2.1 | HAUPTTESTFELD – SPUREN 1-8 | 78 |
| 4.2.2 | NEBENTESTFELD TERRASSENSCHOTTER – SPUREN 9-10 | 82 |
| 4.2.3 | NEBENTESTFELD LÖSSLEHM – SPUREN 11-13 | 83 |
| 4.3 | Messausrüstung und Ausstattung | 84 |
| 4.3.1 | Messwalzen – FDVK-Oszillationswalzen | 84 |
| 4.4 | Messwerterfassung / Dokumentation | 88 |
| 4.4.1 | Messfahrtenprotokoll | 88 |
| 4.4.2 | Begleitende Untersuchungen mittels dynamischen Lastplattenversuchen | 89 |
| 4.4.3 | FDVK-Werterfassung in der Walze | 90 |
| 4.4.4 | TAGESPROTOKOLL | 91 |
| 4.5 | Versuchsdurchführung | 91 |
| 4.5.1 | Regelmessablauf | 91 |
| 4.5.2 | GEPLANTES MESSPROGRAMM | 92 |
| 4.5.3 | Aufgetretene Schwierigkeiten / Begleitumstände | 92 |
| 4.5.4 | Durchgeführte Massnahmen | 94 |
| 4.5.4 | .1 Austausch des Schüttmaterials | 94 |
| 4.5.4 | .2 Adaptierung des Messprogrammes | 94 |
| | | |
| <u>5</u> <u>V</u> | ERSUCHSAUSWERTUNG UND ERGEBNISSE | 97 |
| | | |
| 5.1 | Allgemeines | 97 |
| 5.2 | BEGLEITENDE UNTERSUCHUNGEN | 97 |
| 5.2.1 | Zeitlich Entwicklung des E_{vd} -werteniveaus | 98 |
| 5.2.2 | Räumliche Verteilung der E_{vd} -werte | 98 |
| 5.2.3 | E_{vd} -Werteniveau des anstehenden Terrassenschotters | 100 |
| 5.2.4 | E _{VD} -Werte Nebentestfelder | 102 |
| 5.2.5 | Verdichtungszuwächse | 102 |
| 5.3 | FDVK-ERGEBNISSE | 104 |
| 5.3.1 | Verwendete Rohdaten / Datenaufbereitung | 104 |
| 5.3.2 | Ergebnisse der Verdichtungszuwachsversuche | 108 |
| 5.3.3 | EINFLUSS DER PROZESSPARAMETER | 114 |
| 5.3.4 | EINFLUSS DER WALZENPARAMETER | 117 |
| 5.3.5 | Reproduzierbarkeit der Messdaten | 120 |
| 5.3.6 | VERGLEICH DES FDVK-WERTES MIT ERGEBNISSEN DES DYNAMISCHEN LASTPLATTENVERSUCHES | 123 |
| 5.3.7 | Faktorisierung des FDVK-Wertes | 126 |
| | | |
| <u>6</u> <u>Z</u> | USAMMENFASSUNG UND AUSBLICK | 129 |
| | | |
| 6.1 | ZUSAMMENFASSUNG | 129 |
| 6.1.1 | ZUSAMMENFASSUNG DER FELDVERSUCHE | 129 |
| 6.1.2 | ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE | 130 |
| 6.2 | AUSBLICK | 133 |
| | | |

| <u>7</u> | ANHANG | 148 |
|----------|-------------------------------|-----|
| 7.1 | Messfahrtprotokolle | 148 |
| 7.2 | PROTOKOLL LASTPLATTENVERSUCHE | 155 |

1 EINLEITUNG UND ZIEL DER ARBEIT

Bei der Verwendung von Oszillationswalzen zur Verdichtung im Erdbau stehen dem Nachteil einer geringeren Verdichtungstiefe im Vergleich zu Vibrationswalzen folgende maßgebliche Vorteile gegenüber:

- Der Betrieb von Oszillationswalzen generiert deutlich geringere Erschütterungen im Umfeld der Verdichtungsmaßnahme [58]. Aufgrund der geringeren Erschütterungen ist die Oszillationswalze besonders für den innerstädtischen Bereich bzw. für den Einsatz in der Nähe sensibler Bauwerke geeignet.
- Durch die hervorgerufenen Schubverzerrungen wird das Material eher "geknetet", was für sehr glatte Oberflächen sorgt. Dementsprechend eignen sich Oszillationswalzen insbesondere zur Versieglung von Oberflächen z.B. im Asphalt- und Deponiebau [42].
- Ergonomie am Arbeitsplatz: Erkrankungen hervorgerufen durch Erschütterungen gehören zu den in Österreich anerkannten Berufskrankheiten. Da die Oszillationswalze nicht durch vertikale Schläge der Bandage sondern durch eine überwiegend oszillierende Bewegung der Bandage in tangentialer Richtung verdichtet, sind die im Betrieb ständig wirkenden Erschütterungen auf den Walzenfahrer deutlich geringer. Durch Verwendung von Oszillationswalzen kann die gesundheitliche Belastung für den Walzenfahrer reduziert werden.

Anhand der obig aufgelisteten Punkte ist das Potential der Oszillationswalzen zu erkennen. Das gemeinsame Forschungsprojekt der Firma Hamm AG mit dem Institut für Geotechnik der Technischen Universität Wien hat das Ziel das Verdichtungsverfahren mittels Oszillationswalzen gesamtheitlich zu erforschen. Dabei wurde bei mehreren Feldversuchskampagnen das Bewegungsverhalten der Oszillationsbandage sowie dessen Wirkung auf den zu verdichtenden Boden mit einer Vielzahl von Versuchsaufbauten und Messinstrumentierungen untersucht. Auf Grundlage der experimentellen Untersuchungen sowie einer semi-analytische Modellierung des Walze-Boden-Interaktionssystems konnte erstmals ein funktionsfähiges Messsystem zur Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Oszillationswalzen im Erdbau entwickelt werden. Aus dem Ergebnis der Untersuchungen - welche systematisch über mehrere Diplomarbeiten insbesondere aber in der Dissertation von PISTROL [57] beschrieben, ausgewertet, analysiert, aufbereitet, dargestellt und interpretiert wurden - konnten maßgebliche Erkenntnisse zur Optimierung der Oszillationsverdichtung, zur Reduktion des Verschleißes des Walzmantels sowie zur Überwachung der Bodenverdichtung mittels eines neu entwickeltem FDVK-Systems gezogen werden [57], [65], [66].

Mit dem Ziel das neue FDVK-System in Serienproduktion zu bringen wurden im Oktober und November 2015 in einer Kiesgrube in Fischamend nochmalig groß angelegte Feldversuche mit drei unterschiedlichen Testwalzen mit Oszillationsbandagen durchgeführt. Mit dem erstmals in den Walzen eingebauten FDVK-System konnten somit FDVK-Werte erstmalig online und arbeitsintegriert generiert werden. In der vorliegenden Arbeit – welche am Institut für Geotechnik der Technischen Universität Wien, im Zuge des Forschungsprojektes "Verdichtung mit Oszillation" entstand – werden die Ergebnisse der bei den Feldversuchen im Herbst 2015 durchgeführten Testfahrten systematisch aufgearbeitet, dargestellt und interpretiert.

2 GRUNDLAGEN DER BODENVERDICHTUNG

2.1 ZIEL UND ZWECK DER BODENVERBESSERUNGSMASSNAHMEN

Durch die steigende Bebauungsdichte müssen Bauwerke mit zunehmender Häufigkeit auf nur bedingt tragfähigen Böden errichtet werden. Des Weiteren ist der Untergrund oft den wachsenden Anforderungen durch hohe und teilweise differentielle Bauwerkslasten ohne ergänzende Bodenverbesserungsmaßnehmen nicht mehr gewachsen. Eine Überanspruchung des Untergrundes kann ein Versagen der Tragfähigkeit (z.B. Grundbruch) oder ein Versagen der Gebrauchstauglichkeit (unzulässige Verformungen) zur Folge haben.

Ziel und Zweck von Bodenverbesserungsmaßnahmen bestehen darin, den Untergrund soweit zu verbessern, dass Schäden oder ungewollte übermäßige Verformungen des Bauwerkes und/oder des Bodens über den gesamten Lebenszyklus des Bauwerkes vermieden werden können. Neben den Tiefgründungsmaßnahmen, bei welchen die Bauwerkslasten durch die setzungsempfindlichen und nicht tragfähigen Bodenschichten in tieferliegende, tragfähige Schichten abgeleitet werden, können Maßnahmen gesetzt werden, die die Tragfähigkeit und das Setzungsverhalten des im Bereich der Gründungssohle anstehenden Untergrundes verbessern.

Die durchzuführenden Maßnahmen sollen zu folgendem Ergebnis führen [2]:

- Erhöhung der Tragfähigkeit
- Erhöhung der Gebrauchstauglichkeit
 - Verringerung der Setzungen
 - Vorwegnahme der Setzungen
 - Homogenisierung und Vergleichmäßigung des Setzungsverhaltens
 - Beschleunigung der Konsolidation
- Erhöhung der Dichte
- Verringerung der Durchlässigkeit
- Erhöhung der Erdbebenstandsicherheit durch Verringerung des Verflüssigungspotentiales

Entsprechend den tatsächlich auf dem Projektgrundstück anzutreffenden Untergrundverhältnissen, den Baukörpergeometrien, Bauwerkslasten und sonstigen Rahmenbedingungen Bandbreite der ist aus der großen möglichen Bodenverbesserungsverfahren unter Einhaltung wirtschaftlicher Grundsätze die geeignetste auszuwählen. In der nachfolgenden Tabelle 2.1 sind die wesentlichsten Bodenverbesserungsverfahren aufgelistet [10].

Tabelle 2.1: Übersicht über die Bodenverbesserungsmaßnahmen [10]

| PRINZIP | VERFAHREN |
|------------------------------------|---|
| Boden-Ersatz | Bodenaustausch, -aushub |
| Boden-Verdichtung (mechanisch) | Oberflächenverdichtung, Tiefenverdichtung (Rütteldruck-, Rüttelstopfverdichtung), Dynamische Intensivverdichtung, Impulsverdichtung |
| Boden-Veränderung (hydraulisch) | Bodenstabilisierung mit Bindemitteln, Injektionen, Düsenstrahlverfahren, Bodenvereisung |
| Boden-Entwässerung | Flächendrainage, Vakuumkonsolidation, Vorbelastung, Vertikal- bzw. Sanddrains |
| Boden-Bewehrung | Geokunststoffe, Bewehrungslagen, Zellkonstruktionen |

Nachfolgend wird nur auf das im Bezug zum Diplomarbeitsthema relevante mechanische Bodenverdichtungsverfahren (siehe Tabelle 2.1, grau hinterlegt) weiter eingegangen. Es ist jedoch anzumerken, dass alle obig genannten Verfahren ihre Einsatzberechtigung haben bzw. im Zuge von Bauwerksgründungen auch zur Anwendung gelangen.

2.2 METHODEN DER MECHANISCHEN BODENVERDICHTUNG

Das Prinzip der mechanischen Bodenverdichtung ist ein sehr weitverbreitetes und häufig eingesetztes Verfahren zur Verbesserung der Tragfähigkeit des Untergrundes. Durch eine statische oder dynamische von außen eingebrachte Belastung kommt es im Boden zu einer elasto-plastischen Verformung. In dem Drei-Phasensystem des Bodens – bestehend aus Luft, Wasser und der festen Substanz – bewirkt der verbleibende, plastische Anteil eine Verringerung des Porenanteiles und eine damit einhergehende Erhöhung des Raumgewichtes (Dichte). Je nach Lithologie, Kornverteilung, Kornform, Korngröße und Sättigungsgrad lassen sich Böden und Korngemische unterschiedlich gut verdichten.

Bei nichtbindigen, korngestützten Böden erfolgt die Verdichtung in erster Linie durch Überwindung der Kornreibung, sodass diese durch Einregelung eine dichtere Lagerung einnehmen. Bindige, matrixgestützte Böden sind aufgrund der geringen Durchlässigkeit stark vom Wassergehalt des Bodens beeinflusst. Eine zielgerichtete Verdichtung von Feinkorndominiertem Material hat demzufolge vorwiegend durch statische Belastungen zu erfolgen. Durch Kneten sowie Aufbrechen der Kornstruktur können durch die Verdichtung aufgebaute Porenwasserdrücke schneller wieder reduziert werden.

Bei den mechanischen Bodenverdichtungsverfahren wird entsprechend der Tiefenwirkung in oberflächennahe und tiefreichende sowie in Abhängigkeit von der Anregungsart in periodische bzw. harmonische oder in impulsförmig bzw. transiente Verfahren unterschieden. In Abbildung 2.1 sind die gängigsten Verdichtungsverfahren graphisch dargestellt. Tabelle 2.1: Übersicht über die Bodenverbesserungsmaßnahmen [10]

| PRINZIP | VERFAHREN |
|------------------------------------|---|
| Boden-Ersatz | Bodenaustausch, -aushub |
| Boden-Verdichtung (mechanisch) | Oberflächenverdichtung, Tiefenverdichtung (Rütteldruck-, Rüttelstopfverdichtung), Dynamische Intensivverdichtung, Impulsverdichtung |
| Boden-Veränderung (hydraulisch) | Bodenstabilisierung mit Bindemitteln, Injektionen, Düsenstrahlverfahren, Bodenvereisung |
| Boden-Entwässerung | Flächendrainage, Vakuumkonsolidation, Vorbelastung, Vertikal- bzw. Sanddrains |
| Boden-Bewehrung | Geokunststoffe, Bewehrungslagen, Zellkonstruktionen |

Nachfolgend wird nur auf das im Bezug zum Diplomarbeitsthema relevante mechanische Bodenverdichtungsverfahren (siehe Tabelle 2.1, grau hinterlegt) weiter eingegangen. Es ist jedoch anzumerken, dass alle obig genannten Verfahren ihre Einsatzberechtigung haben bzw. im Zuge von Bauwerksgründungen auch zur Anwendung gelangen.

2.2 METHODEN DER MECHANISCHEN BODENVERDICHTUNG

Das Prinzip der mechanischen Bodenverdichtung ist ein sehr weitverbreitetes und häufig eingesetztes Verfahren zur Verbesserung der Tragfähigkeit des Untergrundes. Durch eine statische oder dynamische von außen eingebrachte Belastung kommt es im Boden zu einer elasto-plastischen Verformung. In dem Drei-Phasensystem des Bodens – bestehend aus Luft, Wasser und der festen Substanz – bewirkt der verbleibende, plastische Anteil eine Verringerung des Porenanteiles und eine damit einhergehende Erhöhung des Raumgewichtes (Dichte). Je nach Lithologie, Kornverteilung, Kornform, Korngröße und Sättigungsgrad lassen sich Böden und Korngemische unterschiedlich gut verdichten.

Bei nichtbindigen, korngestützten Böden erfolgt die Verdichtung in erster Linie durch Überwindung der Kornreibung, sodass diese durch Einregelung eine dichtere Lagerung einnehmen. Bindige, matrixgestützte Böden sind aufgrund der geringen Durchlässigkeit stark vom Wassergehalt des Bodens beeinflusst. Eine zielgerichtete Verdichtung von Feinkorndominiertem Material hat demzufolge vorwiegend durch statische Belastungen zu erfolgen. Durch Kneten sowie Aufbrechen der Kornstruktur können durch die Verdichtung aufgebaute Porenwasserdrücke schneller wieder reduziert werden.

Bei den mechanischen Bodenverdichtungsverfahren wird entsprechend der Tiefenwirkung in oberflächennahe und tiefreichende sowie in Abhängigkeit von der Anregungsart in periodische bzw. harmonische oder in impulsförmig bzw. transiente Verfahren unterschieden. In Abbildung 2.1 sind die gängigsten Verdichtungsverfahren graphisch dargestellt.

VERDICHTUNG



Abbildung: 2.1 Methoden der mechanischen Bodenverdichtung [10]

Nachfolgend werden die in Abbildung 2.1 dargestellten Verdichtungsmethoden, bezugnehmend auf die üblichen Anwendungsgebiete und deren grundsätzliche Funktionsweise, kurz beschrieben:

TIEFENVERDICHTUNGEN kommen in geologisch-geotechnisch sensiblen Bereichen mit oft mächtigen als nicht tragfähig zu bezeichnenden Untergrundverhältnissen zum Einsatz. Die Erhöhung der Lagerungsdichte des anstehenden Untergrundes erfolgt über einen größeren Tiefenbereich. Je nach angewendetem Verfahren wird die Verdichtungsleistung überwiegend durch Rütteln (Rütteldruckverdichtung) oder durch Verdrängen und Einbringen von tragfähigem Material (Rüttelstopfverfahren, Drehbohrverfahren mit Verdrängerkonus und Schneckenwendeln) erzielt. Alternativ zu den ungebundenen Kiessäulen hergestellte vermörtelte Stopfsäulen, Fertigmörtelsäulen oder Betonrüttelsäulen kombinieren die Prinzipien der mechanischen Tiefenverdichtung mit dem Prinzip der Bodenveränderung sowie der klassischen Tiefgründung.

Die Verdichtung bei der DYNAMISCHEN INTENSIVVERDICHTUNG geschieht durch massive Fallgewichte (10 – 40 to, max. 200 to), welche mit speziellen Hubgeräten aus Höhen von 5 – 40 m auf den Untergrund fallen gelassen werden. Die Einschlaglöcher werden mit verdichtbarem Material wiederverfüllt. Die erzielbare Verdichtungstiefe liegt im Bereich von 10 – 12 m und kann je nach vorherrschenden Untergrundverhältnissen insbesondere über die Fallhöhe, das Fallgewicht, die Anzahl der Schläge sowie der Anordnung der Verdichtungspunkte abgestimmt werden.

Bei der IMPULSVERDICHTUNG wird die Verdichtungsleistung durch ein Fallgewicht mit einer hohen Schlagfrequenz, welches aus einer relativ geringen Fallhöhe auf den sogenannten Verdichterfuß fallengelassen wird, erzielt. Im Vergleich zur Dynamischen Intensivverdichtung besitzt die Impulsverdichtung Vorteile bezugnehmend auf die höhere Verdichtungsleistung, die geringere Erschütterungswirkung sowie die flexibleren Einsatzmöglichkeiten. Die gewöhnliche Verdichtungstiefe ist jedoch auf 4,5 – 7 m begrenzt.

Die klassische OBERFLÄCHENVERDICHTUNG kann durch statische oder dynamische Walzen erfolgen. Entsprechend den vorherrschenden Untergrundverhältnissen sowie in Abhängigkeit von dem eingesetzten Verfahren ist eine Verdichtungstiefe von max. 2,5 m zu erzielen. Im Rahmen der vorliegenden Arbeit wird auf die gebräuchlichsten Walzentypen (Vibrations- und Oszillationswalzen, Walzen mit Richtschwingern sowie selbstregelnde Walzen) unter Punkt 2.6 näher eingegangen [10].

2.3 EINFLUSS DES BODENS AUF DEN VERDICHTUNGSERFOLG

Wie schon im vorangegangenen Punkt kurz erwähnt, lassen sich Böden und Korngemische unterschiedlich gut verdichten. Das zu verdichtende Material hat einen entscheidenden Einfluss auf den Verdichtungserfolg hinsichtlich Festigkeit, Steifigkeit, Dauerhaftigkeit und Durchlässigkeit. Folgende Faktoren haben einen Einfluss auf den Verdichtungserfolg:

- Korngrößenverteilung / Feinkornanteil
- Lithologie / Kornbruchfestigkeit / Verwitterungsbeständigkeit
- Kornform / Rundungsgrad/ Kornrauigkeit
- Lagerungsdichte / Konsistenz
- Wassergehalt / Durchlässigkeit
- Gehalt an organischen Bestandteilen
- Empfindlichkeit gegen chemische Einwirkungen / Umwelteinflüsse / Lösbarkeit
- Anfälligkeit für Volumenänderungen (schwellende Tone und strukturempfindliche Materialien)

Nachfolgend werden die maßgeblichsten Einflussfaktoren auf den Verdichtungserfolg kurz beschrieben und dargestellt [2].

2.3.1 KORNGRÖSSENVERTEILUNG / FEINKORNANTEIL

Die Korngrößenverteilung ist das Ergebnis einer Korngrößenanalyse und gibt Auskunft über die Masseanteile in % der verschiedenen Korngrößenbereiche bezogen auf die Gesamttrockenmasse. Sie ist demnach eine Häufigkeitsverteilung, welche in der Regel in Form eines Körnungsliniendiagrammes (oder Siebliniendiagramm) unter Auftrag des klassierten Äquivalentkorndurchmessers (logarithmisch auf der Abszisse) über den prozentualen Gewichtsanteil (linear auf der Ordinate) dargestellt wird.

Die Bestimmung der Kornverteilung erfolgt im Labor mittels Siebanalyse für Körner mit einem Durchmesser von d > 0,063 mm sowie mittels Schlämmanalyse für Körner mit einem Durchmesser von d < 0,063 mm.

Folgende Faktoren beeinflussen den Verdichtungserfolg maßgeblich:

- Je feinkörniger, bindiger der Boden ist, desto weniger lässt sich der Boden verdichten und desto größer ist die Rolle des Wassergehaltes (siehe auch Punkt 2.10.3.1 Proctorversuch).
- Je weitgestufter der zu verdichtende Boden ist, desto besser sind die kleineren Körner in der Lage, im Zuge des Verdichtungsvorganges in die Zwickelräume zwischen den größeren Körnern einzudringen.

Zur Beschreibung eines Körnungsliniendiagrammes werden üblicherweise folgende Kenngrößen herangezogen:

$$\begin{array}{lll} \text{Ungleichförmigkeitszahl } C_{\text{U}} & C_{\text{U}} & = \frac{d_{60}}{d_{10}} \\ \\ \text{Krümmungszahl } C_{\text{C}} & C_{\text{C}} & = \frac{d_{30}^{2}}{d_{10} \cdot d_{60}} \end{array}$$

Legende: $d_{x0} = Korngröße$ (Durchmesser) bei x % des Massendurchgangs der Sieblinie

Die Ungleichförmigkeitszahl C_U gibt Auskunft über die Steilheit der Körnungslinie im Bereich von d_{10} bis d_{60} , während die Krümmungszahl C_C die Krümmung der Körnungslinie in diesem Bereich beschreibt.

Die Klassifizierung von Böden erfolgt in weitgestufte, gut gestufte, enggestufte und intermittierend gestufte oder stufenförmig verlaufende Korngrößenverteilungen. Ein für die Verdichtung gut geeignetes Material sollte gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2004, Tabelle 2, eine weitgestufte, flach verlaufende Körnungs- bzw. Sieblinie mit einer Ungleichförmigkeitszahl $C_U > 15$ und einer Krümmungszahl 1 < $C_C < 3$ besitzen [54].

2.3.2 LITHOLOGIE / VERWITTERUNGSBESTÄNDIGKEIT

Im Zuge eines mechanischen Verdichtungsvorganges ist das zu verdichtende Material statischen bzw. je nach gewählter Methode auch dynamischen Belastungen ausgesetzt. Dementsprechend muss das Verdichtungsmaterial entsprechende Materialeigenschaften besitzen, um ein inneres Versagen der Körner (= Kornbruch) oder eine Wiederauflockerung des Korngemisches zu vermeiden. Bei der Auswahl des Schüttmaterials sind folgende Punkte zu beachten:

- Inhomogene, anisotrope Gesteine mit vordefinierten Schwächezonen (z.B. geschieferte Gesteine) sind zur Verdichtung nicht bzw. nur bedingt geeignet.
- Das Material muss eine Verwitterungsbeständigkeit besitzen. Dementsprechend sind Bestandteile, die quellen, schwellen, zerfallen, sich lösen, sich verflüssigen oder sich chemisch umsetzen können, nicht geeignet, da sich sonst die Tragfähigkeit der Schüttung im Zuge der Lebensdauer verändern kann. Als nicht geeignete Beispiele werden quellfähige Tone bzw. Tonsteine, Gips und Anhydrit, stark pyritführende Gesteine sowie andere veränderlich feste Gesteine genannt. Diese Eigenschaft wird auch als Raumbeständigkeit bezeichnet.
- Feinkörnige Böden sind frostempfindlich, da die Poren sehr klein und meist mit Wasser gefüllt sind. Je höher der Feinkornanteil in einem Boden, desto größer ist der Anteil des adsorptiv gebundenen Wassers. Eis- bzw. Eislinsenbildung führt zu Frosthebungen und dementsprechend zu einer Abminderung der Tragfähigkeit.
- Weitgestuftes Material mit hoher Lagerungsdichte neigt weniger zu Kornbruch. Zwickelräume zwischen den größeren Körnern sind mit kleineren Körnern verfüllt [2].

2.3.3 KORNFORM / RUNDUNGSGRAD / KORNRAUIGKEIT

Gemäß ÖNORM EN ISO 14688-1:2003, Abschnitt 5.2, gibt es folgende Begriffe zur Beschreibung eines Gesteinskorns:

| Begriffe | Beschreibung |
|---------------------------|--|
| Kornform | kubisch flach (plattig) länglich (stängelig) |
| Rundungsgrad | scharfkantig kantig kantengerundet angerundet gerundet gut gerundet |
| Oberflächenbeschaffenheit | rau glatt |

Tabelle 2.2: Begriffe für die Beschreibung eines Gesteinskorns gemäß ÖNORM EN ISO 14688-1, Tabelle 4 [53]

Die Verdichtung eines Bodens erfolgt in erster Linie durch Überwindung der Kornreibung, sodass sich das Material in einen Zustand höherer Lagerungsdichte umlagern kann. Dementsprechend lässt sich ein Boden leichter verdichten, je kugeliger (kubisch und gut gerundet) und glatter die Gesteinskörner sind. Allerdings besitzt ein Material mit kugeligen, glatten Gesteinskörnern (z.B. Flussschotter) aufgrund der kleineren Kornreibung und der geringeren mechanischen Verzahnung im Vergleich zu kantigem Material (z.B. Felsbruch) reduzierte Scherfestigkeiten [2], [53].

2.3.4 LAGERUNGSDICHTE / KONSISTENZ

Bei der Bestimmung des Verdichtungsgrades ist zwischen nichtbindigen und bindigen Böden zu unterscheiden.

Bei NICHTBINDIGEN BÖDEN erfolgt – wie bereits erwähnt – die Verdichtung in erster Linie durch Überwindung der Kornreibung, sodass die Einregelung der Körner in einen dichteren Lagerungszustand möglich wird. Der Verdichtungsgrad eines nichtbindigen Bodens ist mit der

Lagerungsdichte D $D = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}}$

bzw. mit der

bezogenen Lagerungsdichte I_D $I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$

Legende:

n

n_{max} = Porenanteil in lockerster Lagerung

n_{min} = Porenanteil in dichtester Lagerung

e = Porenzahl, Porenvolumen des Bodens bezogen auf das Feststoffvolumen

= Porenanteil, Porenvolumen des Bodens bezogen auf das Gesamtvolumen

- e_{max} = Porenzahl in lockerster Lagerung
- emin = Porenzahl in dichtester Lagerung

als ein linearer Verhältniswert zwischen lockerster Lagerung und dichtester Lagerung definiert. Die lockerste Lagerung eines Materials wird mit dem Zylinderversuch, die dichtest mögliche Lagerung über den Schlaggabel- und den Rütteltischversuch versuchstechnisch im Laboratorium ermittelt. Gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2004, Abschnitt 5.2, wird die Lagerungsdichte grobkörniger Böden über die bezogene Lagerungsdichte in folgende fünf Bereiche gegliedert:

Tabelle 2.3: Bezeichnungen für die bezogene Lagerungsdichte gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2004, Abschnitt 5.2 [54]

| Bozoichnungon | Bezogene Lagerungsdichte I _D |
|---------------|---|
| Bezeichnungen | % |
| sehr locker | 0 bis 15 |
| locker | 15 bis 35 |
| mitteldicht | 35 bis 65 |
| dicht | 65 bis 85 |
| sehr dicht | 85 bis 100 |

Bei BINDIGEN BÖDEN ist die Verdichtungsfähigkeit weniger von der Korngrößenverteilung als vom Wassergehalt des Bodens abhängig. Die Festigkeit des Feinkorn-dominierten Bodens

lässt sich am besten über die – je nach Wassergehalt angenommene – Zustandsform des Materials beschreiben. Mit steigendem Wassergehalt geht bindiger fester Boden in den halbfesten, dann in den plastischen und schließlich in den flüssigen Zustand über. Über die labormäßig zu ermittelnden Zustands- bzw. Konsistenzgrenzen nach Atterberg (Fließ-, Ausroll- und Schrumpfgrenze) kann die Plastizität bzw. die Empfindlichkeit des Bodens gegenüber Änderungen des Wassergehaltes beschrieben werden. Über die Zustandsformen in Verbindung mit dem jeweiligen Wassergehalt eines Materials kann eine Aussage über die Festigkeit getroffen werden.

Zur Beschreibung eines bindigen Bodens werden u.a. folgende Kennzahlen verwendet:

Plastizitätszahl I_P $I_P = w_L - w_P$

Konsistenzzahl I_C $I_{C} = \frac{W_{L} - W}{I_{P}}$

w = natürlicher Wassergehalt

Legende:

w_L = Wassergehalt bei Fließgrenze des Bodens

 W_P = Wassergehalt bei Ausrollgrenze des Bodens

Gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2004 können über die Konsistenzzahl sowie den Wassergehalt folgende Konsistenzformen definiert werden:

Tabelle 2.4: Konsistenzformen über die Konsistenzzahl sowie den Wassergehalt gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2004 [54]

| Wassergehalt | Konsistenzzahl I _c | Konsistenz |
|--------------------|--|---|
| W > WL | 0 bis 15 | flüssig |
| $W = W_L$ | Ic = 0 | Fließgrenze |
| W < WL | 0 < lc < 1 0 - 0,25 0,25 - 0,5 0,5 - 0,75 0,75 - 1,0 | bildsam breiig sehr weich weich steif |
| W = WP | Ic = 1,0 | Ausrollgrenze |
| W < W _P | l _C > 1,0 | halbfest |
| w = ws | | Schrumpfgrenze |
| W < W _S | l _C >> 1,0 | fest |

Es ist jedoch anzumerken, dass diese Untergliederung insbesondere für Böden mit geringer Plastizität nur eine grobe Klassifizierung darstellt, da das bodenmechanische Verhalten von Tonen von deutlich mehr Parametern, wie z.B. Tonaktivität, Tonmineralbestand, Sulfid- bzw. Sulfatbestandteilen, abhängig ist [2], [20].

2.3.5 WASSERGEHALT

Der Wassergehalt w ist als Quotient der Masse m_w des in einer Bodenprobe enthaltenen Porenwassers zur Masse m_d des trockenen Bodens nach dem Glühen definiert. Der Sättigungsgrad S_r ist der Quotient des Wasservolumens V_w bezogen auf das Porenvolumen V_n des Bodens.

Wassergehalt w
$$w = \frac{m_w}{m_d}$$

Porenvolumen S_r

 $S_r = \frac{V_w}{V_n}$

Legende:

m_w = Masse des Porenwassers des Bodens

m_d = Trockenmasse des Bodens nach dem Glühen

V_w = Wasservolumen

w = natürlicher Wassergehalt

 V_n = Porenvolumen des Bodens

Der auf einen Boden aufgebrachten statischen oder dynamischen Verdichtung wirkt, da sich die Bodenteilchen in eine dichtere Lage umordnen müssen, eine innere Reibung entgegen.

Durch Erhöhung des Wassergehaltes werden die Kornreibungskräfte reduziert, sodass sich die aufgebrachte, gleichbleibende Verdichtungsenergie bei höheren Wassergehalten in Form einer höheren Verdichtungsleistung positiv auswirkt. Dieser Effekt hat bei nicht bindigen, aber insbesondere bei bindigen Feinkorn-dominierten Böden einen zentralen Einfluss auf das Verdichtungsverhalten. Allerdings nimmt ab einem bestimmten Wassergehalt die Verdichtungswilligkeit mit steigender Sättigung wieder ab. Ab diesem, dem "optimalen Wassergehalt" genannten Feststoff-Wasser-Verhältnis, sinkt die Verdichtungswilligkeit des Bodens wieder, da das in den Poren zwischen den Feststoffteilchen "eingesperrte" Wasser Porenwasserdrücke aufbaut, welche dem Verdichtungsvorgang entgegenwirken [2], [20].

Der optimale Wassergehalt für die Verdichtung kann mittels Proctorversuch ermittelt werden (siehe Punkt 2.10.3.1 Proctorversuch).

2.4 EINBAUBEDINGUNGEN

Bei jedem Bauvorhaben mit dem Einsatz von mechanischen Bodenverdichtungsverfahren ist es das Ziel, das Arbeitsvorhaben qualitativ und quantitativ unter dem Aspekt der Wirtschaftlichkeit in angemessener Zeit optimal auszuführen. Oft sind es jedoch nicht nur die bodenmechanisch relevanten Faktoren, wie die Wahl des richtigen Schüttmaterials oder die Auswahl eines entsprechenden Verdichtungsverfahrens, sondern die "äußeren Umstände", welche über die Wirtschaftlichkeit eines Projektes entscheiden. Da diese Aspekte in der Baupraxis einen nicht unwesentlichen Einfluss auf den Verdichtungserfolg sowie die Verdichtungsleistung haben, sind ohne Anspruch auf Vollständigkeit nachfolgend die maßgeblichsten Faktoren zusammengefasst:

- Verwendetes Schüttmaterial (homogene, gleichbleibende Qualität)
- Logistik (Schüttmaterial zur richtigen Zeit am richtigen Ort in entsprechender Menge verfügbar)
- Verdichtungsgeräte (Verfügbarkeit, Ausnutzungsgrad, Verschleiß)
- Schütthöhe bzw. Schichtdicke (gleichmäßig oder wechselnd)
- Baustellengröße
- Baustellenexposition
- Baustellentopographie
- Baustellenplanung und Baustellenabwicklung
- Vorerkundungsvolumen und Information zum geplanten Bauvorhaben (Kampfmittelerkundung, archäologische Vorerkundung)
- Geologische Untergrundverhältnisse
- Hydrogeologische Untergrundverhältnisse
- Qualifikation, Erfahrung und Zusammenspiel der Baumannschaft
- Zusammenspiel und Koordination der am Gewerk beteiligten Firmen
- Verdichtungsanforderungen der Schüttlagen
- Witterungsbedingungen (Niederschläge, Trockenheit, Frost, Schnee)
- Bescheidauflagen, die die Verdichtungsleistung reduzieren (Lärm, Staub)
- Komplexe Eigentums- und Nachbarschaftsverhältnisse
- Unklare Auftragsvolumen bzw. Vertragsbedingungen
- Unfälle, Schäden, ...

2.5 ARTEN VON WALZEN UND BANDAGEN

Um das erforderliche Verdichtungsergebnis sowie die gewünschte Oberflächenbeschaffenheit des zu verdichtenden Bodens zu erzielen, wurden verschiedene Walzen- und Bandagenarten entwickelt. Wesentlich für die Auswahl des richtigen Verdichtungsgerätes sind neben der zu verdichtenden Bodenart (Lithologie, Kornform, Korngrößenverteilung und Lagerungsdichte bzw. Konsistenz), dem Wassergehalt und den Einbaubedingungen auch die wirtschaftlichen Rahmenbedingungen, die technische Ausrüstung der ausführenden Firma, die vorhandenen Platzverhältnisse und Einsatzbedingungen sowie nicht zuletzt die Qualifikation des Walzenfahrers [35].

2.5.1 WALZEN

Nachfolgend werden die gängigsten im schweren Erdbau verwendeten Walzenarten mit eigenem Antrieb, welche bei der dynamischen Oberflächenverdichtung weltweit im Einsatz sind, beschrieben.

2.5.1.1 Walzenzüge

Walzenzüge sind die im Erdbau am meisten eingesetzten und damit am weitesten verbreiteten Verdichtungsgeräte. Sie bestehen aus einer Walzenbandage an der Vorderachse und einer Luftbereifung (2 Gummiräder) an der Hinterachse, welche entweder starr oder mittels einer Knicklenkung miteinander verbunden sind. Der Walzenrahmen ist von der Bandage an der Lagerschale durch Gummipuffer dynamisch entkoppelt. Angetrieben werden Walzenzüge über die Hinterräder oder auch über die Bandage üblicherweise durch einen Dieselmotor, welcher sich hinter der Fahrerkabine über der Hinterachse befindet. Die Vibrationseinheit befindet sich in der Bandage. Um zu verhindern, dass bindiger Boden an der Bandage haften bleibt, sind Abstreifer knapp oberhalb der Bandage befestigt.



Abbildung 2.2: Walzenzüge mit unterschiedlichen Bandagenformen [19], [36]

2.5.1.2 Tandemwalzen

Tandemwalzen besitzen sowohl an der Vorder- als auch an der Hinterachse eine Bandage. Üblicherweise sind beide Bandagen, welche starr oder mittels Knickgelenk miteinander verbunden sind, mit einer Vibrationseinheit ausgestattet. Um ein Verkleben der Bandage zu vermeiden, sind die Walzen mit zusätzlichen Wassertanks zur Reinigung der Bandage versehen. Tandemwalzen werden vorwiegend im Bereich des Straßen- und Asphaltbaues verwendet.



Abbildung 2.3: Tandemwalzen unterschiedlicher Walzenhersteller [13], [19], [36]

2.5.1.3 Kombiwalzen

Kombiwalzen besitzen auf der Vorderachse eine (Stahl-)Bandage sowie an der Hinterachse Gummiräder und vereinen somit die Verdichtungswirkung einer Tandemwalze und einer Gummiradwalze in einem Gerät. Die Bandage verdichtet durch entsprechende dynamische Anregung in die Tiefe, die Gummiräder besitzen eine knetende Verdichtungswirkung. Kombiwalzen kommen im Bereich des Straßen- und Asphaltbaues zum Einsatz.

2.5.1.4 Anhängewalzen / Kleingeräte

Der Vollständigkeit halber seien auch die Anhängewalzen sowie diverse Kleingeräte, wie Rüttler, Stampfer und Platten, erwähnt. Selbige kommen eher bei Sonderanwendungen oder beengten Platzverhältnissen zur Anwendung und spielen eine untergeordnete Rolle.

2.5.2 BANDAGENTYPEN

Um einen entsprechenden Verdichtungserfolg erzielen zu können, ist je nach Bodenart die Verwendung des richtigen Bandagentyps maßgeblich. Durch Änderung der Form, Geometrie und Oberflächenbeschaffenheit kann die Verdichtungsart, die Verdichtungsrichtung und die Verdichtungstiefe verändert werden. Neben der herkömmlich eingesetzten Glattmantelbandage kommen auch Schaffußbandagen und untergeordnet Polygonbandagen zum Einsatz.



Abbildung 2.4: Arten der Bandagen: a) Glattmantelbandage, b) Schaffußbandage, c) Polygonbandage [65]

2.5.2.1 Glattmantelbandagen

Die Glattmantelbandage – in der klassischen Zylinderform – eignet sich insbesondere für die Verdichtung nicht bindiger grobkörniger Sande und Kiese sowie Asphalt. Die Kraftwirkungsrichtung des Krafteintrages ändert sich während des Verdichtungsvorganges nicht.

2.5.2.2 Schaffußbandagen

Die Schaffußbandage, auch als Stampffußbandage bezeichnet, wird vorwiegend für ausgeprägt bindige, kohäsive Böden wie Schluffe und Tone verwendet. Die Bandage besitzt auf ihrer Oberfläche Stollen (Füße), welche im Zuge der Verdichtungsfahrten bindige Böden zusätzlich knetet, dabei die Kornstruktur aufreißt, entwässert und somit die Verdichtungsfähigkeit erhöht.

2.5.2.3 Polygonbandagen

Die Polygonbandage besitzt drei bis fünf in Axialrichtung nebeneinanderliegende, achteckige Plattensegmente welche jeweils versetzt zum benachbarten Element angeordnet sind. Dementsprechend erfolgt die Kraftübertragung von der Walze in den Boden abwechselnd über die Platten- und Keilsegmente. Bei flächiger Auflage der Plattensegmente am Boden werden nur Normalkräfte, aber keine Scherkräfte übertragen. Entsprechend der Drehbewegung der Bandage wird durch die Keilsegmente, welche in der Kontaktfläche zwischen Bandage und Untergrund Spannungsspitzen generieren, der Boden beim weiteren Eindringen der Keilsegmente durch Scherkräfte "aufgerissen" und geknetet. Dadurch kann bei feinkörnigen Böden durch die Knetwirkung das Porenwasser besser entweichen, was den Verdichtungsvorgang begünstigt. Die abwechselnde Krafteinwirkung durch Keil- und Plattensegmente verhindert eine nur oberflächennahe Kornverzahnung. Dadurch wird eine höhere Tiefenwirkung erzielt. Durch die deutlich größere Tiefenwirkung sind bei der Polygonbandage bei nichtbindigen, korngestützten Böden größere Schüttmächtigkeiten möglich. Dementsprechend kann mit der Polygonbandage einerseits Felsbruch optimal eingebaut werden und kann andererseits bindiger Boden besser verdichtet werden als mit Glattmantelbandagen [4], [45].



Abbildung 2.5: Verdichtungswirkung der Polygonbandage in vorrangig feinkörnigen Böden im Vergleich zur Glattmantelbandage [4]

2.6 WALZENTYPEN UND AUFBAU

2.6.1 STATISCHE WALZEN

Bei statischen Walzen erfolgt die Verdichtung nur durch die Wirkung des Eigengewichtes der Walze durch Zusammendrückung des Verdichtungsmaterials. Über die Kontaktfläche zwischen Bandage und Boden wird die Gewichtskraft in Form einer statischen Linienlast (kg/cm) in den Untergrund übertragen (siehe Abbildung 2.6). Durch Änderung des Bandagengewichtes bzw. durch Änderung der Bandagenform kann die Verdichtungsarbeit sowie die Wirkungstiefe moderat erhöht werden.

Aufgrund der begrenzten Verdichtungswirkung spielen statische Walzen in Europa nur noch eine untergeordnete Rolle. Lediglich zur Verdichtung von bindigen oder gemischtkörnigen wassergesättigten Böden, bei denen eine dynamische Anregung eine Verschlechterung der Bodeneigenschaften herbeiführen würde, werden statische Walzen nach wie vor angewendet.



Abbildung 2.6: Prinzip der statischen Walze [11]

2.6.2 DYNAMISCHE WALZEN

Aufgrund der wesentlich effizienteren Verdichtung sowie der größeren Tiefenwirkung liegt der Anteil der Walzen mit dynamischer Verdichtung heute weltweit bei rund 90%. Bei der dynamischen Verdichtung werden die Bandage der Walze und somit die Körner des zu verdichtenden Untergrundes zusätzlich zur statischen Auflast in Schwingungen versetzt. Dadurch kommt es zu einer Herabsetzung des Korn-zu-Korn-Reibungswiderstandes, was eine Umlagerung – d.h. eine Verdichtung – entsprechend begünstigt. Dieser Vorgang bewirkt eine Verringerung des Porenvolumens und ein Ansteigen der Dichte. Die Anregung der Walzenbandage kann durch eine bzw. mehrere rotierende Unwuchtmassen erfolgen, die je nach Anordnung die erzeugten Kräfte jeweils in einer vorrangigen Richtung in das Material eintragen, wobei entweder vibrierende oder oszillierende Systeme verwendet werden.

Bei der weiter verbreiteten Vibrationsverdichtung wird der zu verdichtende Untergrund durch das Einleiten von schnellen, aufeinanderfolgenden, vertikalen Druckkräften in Schwingung versetzt, sodass eine Kornumlagerung in eine dichtere Raumstellung erfolgen kann.

Bei der Oszillationsverdichtung erzeugen zwei exzentrisch und punktsymmetrisch um den Bandagenmittelpunkt angeordnete gleichsinnig drehende Erregermassen ein Moment um die Bandagenachse. Dabei bleibt die Bandage im ständigen Kontakt mit dem Boden und es werden tangentiale Schubkräfte in den Boden eingeleitet.

Nachfolgend werden die zwei Verdichtungssysteme sowie die maßgeblichen in den letzten ca. 20 Jahren weiterentwickelten und im Gebrauch befindlichen Mischformen kurz beschrieben [2], [4], [7], [35].

2.6.2.1 Vibrationswalzen

Bei einer Bandage mit vibrierendem Bewegungsverhalten befindet sich die zentrisch gelagerte Erregerunwucht in der Achse der Bandage (siehe Abbildung 2.7).



Abbildung 2.7: Prinzip der Vibrationswalze [11]

Durch die schnelle Rotation der Unwucht um die eigene Achse entsteht eine kreisförmig translatorische Schwingung deren Resultierende zu jedem Zeitpunkt – aufgrund der kreisförmigen Bewegung – in eine andere Richtung weist (siehe Abbildung 2.8). Die Erregerbeschleunigung ist in jeder Richtung gleich groß [1].



Abbildung 2.8: Anregung der Bandage einer Vibrationswalze. Die rotierende Unwucht erzeugt eine kreisförmig translatorische Schwingung [1]

Die Bandage ist durch Gummipuffer vom Walzenrahmen entkoppelt, sodass die erzeugten Schwingungen fast vollständig in den Boden abgetragen werden können. Zur Regelung der Verdichtungsamplitude wird oft eine zweigeteilte Unwucht verwendet, durch welche der Gesamtschwerpunkt der Erregermassen meist zweistufig variiert werden kann.

2.6.2.2 Oszillationswalzen

Bei Bandagen mit oszillierender Bandagenbewegung sind zwei Exzentermassen ausmittig, allerdings punktsymmetrisch um die Bandagenachse angeordnet (siehe Abbildung 2.9).



Abbildung 2.9: Prinzip der Oszillationswalze [11]

Durch die gleichsinnige Rotation der Unwuchten heben sich die Horizontal- und Vertikalkomponenten der Zentrifugalkräfte auf, sodass nur ein periodisches Moment um die Bandagenachse übrigbleibt. Dieses Torsionsmoment wirkt auf Basis der Rotationsbewegung der Unwuchten somit vorwärts bzw. rückwärts als oszillierende Bewegung der Bandage. Die resultierende Beschleunigung wirkt in tangentialer Richtung (siehe Abbildung 2.10).



Abbildung 2.10: Anregung der Bandage einer Oszillationswalze. Zwei axialsymmetrisch angeordnete Unwuchtmassen bewirken eine rotatorische Schwingung der Walzentrommel [1]

Entsprechend der Kontaktflächenform zwischen Bandage und Boden werden somit – neben der statischen vertikal gerichteten Last der Walze – überwiegend dynamische Horizontalkräfte infolge des Torsionsmomentes in den Untergrund übertragen. Die durch Reibung übertragenen Schubkräfte bewirken eine gute Verdichtung des Bodens.

Da sich die verdichtenden Kräfte hauptsächlich horizontal sowie in Fahrtrichtung ausbreiten, besitzt die Oszillationswalze im Vergleich zur Vibrationswalze eine geringere Tiefenwirkung, was geringmächtigere Schütthöhen erforderlich macht.

Aufgrund der geringeren Erschütterungen ist die Oszillationswalze besonders für den innerstädtischen Bereich bzw. für den Einsatz in der Nähe sensibler Bauwerke geeignet. Durch die Vermeidung einer schlagenden Bewegung spielt die Kornzertrümmerung einzelner Körner bzw. die Auflockerung des Bodens in Folge mehrerer Überfahrten nur eine untergeordnete Rolle. Das Material wird durch die hervorgerufenen Schubverzerrungen eher "geknetet" was für sehr glatte Oberflächen sorgt. Dementsprechend eignen sich Oszillationswalzen insbesondere zur Versieglung von Oberflächen z.B. im Asphalt- und Deponiebau [45].

2.6.2.3 Walzen mit Richtschwinger

Bei einer Bandage mit Richtschwinger befinden sich zwei zentrisch gelagerte Erregerunwuchten in der Achse der Bandage (siehe Abbildung 2.11). Die Rotation der Erregerunwuchten erfolgt gegensinnig.



Abbildung 2.11: Prinzip der Richtschwingerwalze [11]

Bei dem auch als VARIO-Walze (entwickelt von der Fa. Bomag [19]) bekannten Walzentyp kann durch Verdrehen der Stellung der gesamten Erregereinheit die Richtung der translatorischen Schwingung stufenlos und variabel von horizontal bis vertikal geregelt werden. Somit können je nach Anwendungsnotwendigkeit reine Vertikalkräfte oder überwiegend Horizontalkräfte in den Boden übertragen werden (siehe Abbildung 2.12). Die Änderung der Stellung der Erregereinheit kann während der Fahrt durch den Walzenfahrer vorgenommen werden.



Abbildung 2.12: Richtschwingeranregung der Bandage. Zwei gegenlaufende Unwuchtmassen erzeugen eine gerichtete Schwingung, wobei hier die beiden Extremzustände reine Vertikal- und reine Horizontalschwingung dargestellt sind [1]

2.6.2.4 SelbstregeInde Walzen

Selbstregelnde Walzen können als Weiterentwicklung der im Punkt 2.6.2.3 beschriebenen Richtschwingerwalzen betrachtet werden. Während herkömmliche Walzentypen durch starre Parametervorgaben nicht in der Lage sind, sich auf ändernde Untergrundverhältnisse bzw. geänderte Einbaukriterien selbst einzustellen, besitzt dieser Walzentyp eben diese Fähigkeit, nach bestimmten Kriterien die Prozessparameter anzupassen. Je nach Steifigkeit des Bodens verändert sich das Interaktionsverhalten zwischen Bandage und Material. Diese Änderung im Interaktionsverhalten wird – über Beschleunigungssensoren an der Bandagenachse aufgenommen – zur automatischen Regelung der Walze herangezogen.

Mit den VARIOMATIC-Tandemwalzen und den VARIOCONTROL-Walzenzügen der Firma *Bomag GmbH* sowie den ACE-Walzen der Firma *Ammann* AG sind bereits zwei selbstregelnde Systeme am Markt, welche nach unterschiedlichen Kriterien die Walzenerregung auf den behandelten Boden einstellen.

Bei den VARIOMATIC-Tandemwalzen und den VARIOCONTROL-Walzenzügen der Firma *Bomag GmbH* erfolgt die Regelung über zwei Kriterien [21], [22]:

- Sprungkriterium: Dieses besagt, dass die Walze nie in den Betriebszustand "Springen" kommen darf. Bevor es dazu kommt, ist die Stellung der Erregereinheit zu verändern (flacher zu stellen).
- Kraftkriterium: Die maximale vertikale Bodenkontaktkraft kann vom Walzenfahrer vorab festgelegt und begrenzt werden.

Die Walzen beginnen den Verdichtungsvorgang mit einer Erregereinheitsstellung, mit welcher ausschließlich Horizontalkräfte in den Boden übertragen werden. Die Neigung der Erregereinheit wird sukzessive solange erhöht bis entweder die vertikale Stellung erreicht wird und somit nur mehr Vertikalkräfte in den Boden übertragen werden oder eines der oben beschriebenen Regelkriterien erreicht wird. So wird vermieden, dass der Boden durch nicht erforderliche Überfahrten überverdichtet wird (Kraftkriterium) oder ein unerwünschtes Springen der Walze auftritt (Sprungkriterium). Die selbstregelnden Walzen erreichen dadurch eine gesteigerte Verdichtungsleistung (m³/h), eine optimale Tiefenwirkung, eine gleichmäßige Verdichtung sowie eine glattere Oberfläche [35].

Die Walzen besitzen neben der automatischen Selbstregelung auch eine manuelle Funktion, bei welcher der Walzenfahrer eine feste Erregerstellung vorgeben kann. Sechs Stufen von 0 bis Maximum stehen zur Auswahl. In der Manuell-Funktion kann die Amplitude konstant auf dem gewählten Wert gehalten werden, eine Regelung nach gemessenem E_{VIB} -Wert (Definition siehe Punkt 3.8.2) findet nicht statt. Diese Betriebsart wird z.B. bei Arbeiten im innerstädtischen Bereich gewählt, wenn die Schwingungsbelastung der Umgebung begrenzt werden soll.

Bei den ACE-Walzen der Firma *Ammann AG* kann die Wirkamplitude der vertikal eingeleiteten Verdichtungsenergie ebenso stufenlos von 0 bis auf 100 % manuell oder automatisch verändert werden. Als Regelkriterium wird die Bodenreaktionskraft verwendet, welche zur Vermeidung von unerwünschten chaotischen Betriebszuständen begrenzt wird. Das ACE-System macht sich zusätzlich den Umstand zunutze, dass bei der Resonanzfrequenz zwischen Bandage und Boden die größte Verdichtungsenergie übertragen werden kann. Böden mit geringer Steifigkeit werden mit großer Vertikalkraft und tiefen Frequenzen (f = 23 - 25 Hz) verdichtet, Böden mit zunehmender Steifigkeit werden mit sukzessive abnehmender Vertikalkraftamplitude und höheren Frequenzen (bis f = 35 Hz) verdichtet [13], [15], [16].

Bei allen selbstregelnden Walzenarten ist zu beachten, dass sich diese nicht bzw. nur im manuellen Betrieb für den Einsatz eines FDVK-Systems eignen. Um Änderungen der Bodenreaktionskraft eindeutig der Steifigkeit des Bodens zuordnen zu können, müssen alle Maschinenparameter, wie Walzenmasse, Erregermasse, Erregerfrequenz und Fahrtgeschwindigkeit, konstant gehalten werden.

2.7 WALZENPARAMETER

2.7.1 BEEINFLUSSBARE WALZENPARAMETER

Wie schon einführend beschrieben, beruht die Funktionsweise der FDVK darauf, dass bei konstant gehaltenen Maschinenparametern die Änderung des Schwingungsverhaltens ausschließlich auf die Änderung der Bodensteifigkeit zurückzuführen ist. Alle Maschinenparameter, welche von dem verwendeten Walzentyp vorgegeben und nicht verändert werden können werden als vordefinierte sog. Walzenparameter bezeichnet. Nachfolgend werden die maßgeblichen Walzenparameter aufgelistet und kurz beschrieben:

- BANDAGENFORM BZW. -GEOMETRIE: Die Bandage ist der Mantel des zylindrisch geformten Walzenkörpers und ist definiert über den Bandagendurchmesser [mm oder cm] und die Bandagenbreite [mm oder cm].
- BANDAGENOBERFLÄCHE: Die Bandagenoberfläche hat Einfluss auf die Verdichtungsart, Verdichtungsrichtung und die Verdichtungstiefe (siehe auch Punkt 2.5.2).
- ACHSLAST DER WALZE: Die Achslast [kg oder t] ist der Anteil der Gesamtmasse, welche auf die Bandagenachse wirkt und ist im Datenblatt der Walze angegeben.
- STATISCHE LINIENLAST: Die statische Linienlast [kg/cm] ist der Quotient der Achslast [kg] durch die Bandagenbreite [cm].
- STATISCHES MOMENT: Das statische Moment [kgm] ist das Produkt von Erregermasse [kg] und Ausmittigkeit der Unwucht [m] von der Bandagenachse.

 AMPLITUDE DER BANDAGENSCHWINGUNG: Die Bandagenschwingung wird durch die Rotation der Erregerunwucht und den damit generierten Fliehkräften erzeugt. Die Größe der Amplitudenschwingung ist abhängig von der Exzentrizität und Masse der Unwucht sowie von der Erregerfrequenz. Dementsprechend kann die Amplitude entweder über Änderung des statischen Moments [kgm] oder durch Variation der Erregerfrequenz [Hz] verändert werden. In der Regel besitzen bei freier Schwingung (keine Interaktion mit dem Boden) die Vibrationswalzen eine Amplitude von 0,5 – 2,5 mm und die Oszillationswalzen eine Amplitude von 0,5 – 2 mm.

2.7.2 NICHT BEEINFLUSSBARE WALZENPARAMETER

Neben diesen maßgeblichen und überwiegend beeinflussbaren Walzenparametern gibt es jedoch auch Einflüsse, die ungewollt sind, die sich auf das Ergebnis einer FDVK-Messung nachteilig auswirken. Im Zuge des Herstellungsprozesses einer Walze können konstruktive Abweichungen vom Idealzustand reduziert, jedoch nie vollkommen ausgeschlossen werden. Statisch und dynamisch nicht ausgewogene Bandagen generieren auch mit geringen Asymmetrien in der Massenverteilung generieren ein vom Idealfall abweichendes Bewegungsverhalten. In Bezug auf das Thema der Arbeit sind bei Oszillationswalzen nach KOPF [42] folgende Faktoren für die Entstehung von Störsignalen maßgeblich:

 STATISCHE UNAUSGEWOGENHEIT DER BANDAGE: Bei der Herstellung einer Bandage wird im Wesentlichen eine Stahlplatte zu einem Zylinder gebogen, zusammengeschweißt und anschließend außen zu einer rotationssymmetrischen Zylinderform abgedreht. Die dadurch entstehenden Unterschiede in der Materialstärke des Bandagenmantels generieren eine Ausmittigkeit des Schwerpunktes S bezogen auf die Bandagenachse (siehe Abbildung 2.13). Der ausmittige Schwerpunkt generiert bei Rotation der Bandage ein mit der Bandagenumdrehung sich wiederholendes Störsignal.



Abbildung 2.13: Statisch unausgewogene Bandage [42]

 DYNAMISCHE UNAUSGEWOGENHEIT DER BANDAGE: Wenn der Gesamtschwerpunkt S der Bandage zwar auf der Achse liegt, die Schwerpunkte der Bandagenteile (S₁, S₂) links und rechts jedoch ausmittig angeordnet sind, spricht man von einer dynamischen Unausgewogenheit der Bandage (siehe Abbildung 2.14). Die der Rotationsbewegung um die Achse überlagerte Nutationsbewegung generiert ebenfalls ein sich mit der Bandagenumdrehung wiederholendes Störsignal.



Abbildung 2.14: Dynamisch unausgewogene Bandage [42]

 UNTERSCHIEDLICHE EXZENTER: Die zwei Exzentermassen sind bei Oszillationswalzen ausmittig, allerdings punktsymmetrisch zur Bandagenachse angeordnet. Ist das Produkt aus Erregermasse und Ausmittigkeit der Exzentermassen jedoch ungleich, bewirkt dies eine überlagernde, kreisförmig translatorische Beschleunigung der Bandage sowie eine Torsionsbeschleunigung um eine nicht mit der Bandagenachse zusammenfallende Achse (siehe Abbildung 2.15).



Abbildung 2.15: Erregung durch unterschiedliche Exzenter = Oszillationsanteil + Störanteil der Erregung [42]

 VERDREHTE UNWUCHTEN: Bei einer Verdrehung der Unwuchten wird die Oszillationsbewegung durch eine Vibrationsbewegung der Bandage überlagert (siehe Abbildung 2.16). Durch diese Vibrationsbewegung sind die Reibungsverhältnisse zwischen Walze und Boden nicht mehr konstant und es entsteht ein periodisches Störsignal bei den FDVK-Messungen.



Abbildung 2.16: Erregung durch verdrehte Unwuchten [42]

 PERIODIZITÄT IM BANDAGENANTRIEB: Im Gegensatz zur Vibrationswalze bleibt die Bandage der Oszillationswalze immer mit dem Boden im Kontakt. Wird durch die rotatorische Schwingung der Walzentrommel an der Kontaktfläche zum Boden die Haftreibung in eine Richtung überschritten, kommt es zum Betriebszustand "Einseitiges Gleiten" (siehe auch Punkt 2.9.2.2). Als Grund für die einseitige Gleitbewegung werden die Überlagerung von Fahr- und Oszillationsbewegung, aber auch die unterschiedlich starken Antriebswirkungen zwischen Antriebsrädern und Bandage angesehen. Dies bewirkt ein periodisch wiederkehrendes Störsignal bei FDVK-Messungen.
2.8 **PROZESSPARAMETER**

Während die unter Punkt 2.7 beschriebenen Walzenparameter vom Verdichtungsgerät vorgegeben sind können die Prozessparameter durch den Walzenfahrer auf die Untergrundverhältnisse abgestimmt und voreingestellt werden. Im Regelfall können folgende Prozessparameter verändert werden:

- FREQUENZ DER BANDAGENSCHWINGUNG (ERREGERFREQUENZ): Über die Rotationsgeschwindigkeit der Unwuchtmassen [Hz] lässt sich die Frequenz der Bandagenschwingung [Hz] regeln. Sowohl bei Vibrations- als auch bei Oszillationswalzen werden Frequenzen zwischen f = 30 – 50 Hz verwendet.
- FAHRGESCHWINDIGKEIT DER WALZE: Je geringer die Fahrgeschwindigkeit, desto größer ist die in den Boden eingebrachte Verdichtungsenergie. Für Verdichtungsfahrten werden Vorschubgeschwindigkeiten zwischen 2-6 km/h verwendet. Insbesondere bei Oszillationswalzen ist für die Qualität der FDVK-Messung eine gleichmäßige Antriebsverteilung zwischen Antriebsrädern und Bandage maßgeblich (siehe auch Punkt 2.9.2.2).

Es ist auch bei den Prozessparametereinstellungen – um Änderungen der Bodenreaktionskraft eindeutig der Steifigkeit des Bodens zuordnen zu können – darauf zu achten, dass während den Messfahrten die Erregerfrequenz und die Fahrgeschwindigkeit konstant gehalten werden müssen.

2.9 BETRIEBSZUSTÄNDE UND BEWEGUNGSVERHALTEN

2.9.1 BETRIEBSZUSTÄNDE DER VIBRATIONSWALZE

In Abhängigkeit von der Bodensteifigkeit, den gegebenen Massen bzw. Massenverhältnissen der Walze und der Unwucht, der Erregerfrequenz, Amplitude und der Fahrgeschwindigkeit bildet die Vibrationswalze mit dem zu verdichtenden Boden ein interagierendes, schwingendes System. Über den an der Lagerschale der Bandage mittels Schwingungssensoren aufgenommenen Verlauf der Bodenkontaktkraft können fünf Betriebszustände (siehe Tabelle 2.5) unterschieden werden. Würde im Zuge einer Verdichtungsfahrt die Walze am Rahmen angehoben, sodass die Bandage den Boden nicht berührt, so würde die Bandage ein sinusförmiges Bewegungsverhalten zeigen. Beim Kontakt der Walze mit dem zu verdichtenden Boden verändert sich, je nach Bodensteifigkeit, bzw. den Walzen- und Prozessparametern, das Schwingungsverhalten der Bandage und somit auch der Verlauf der Bodenkontaktkraft. Durch das Abheben der Bandage vom Boden verändert sich das aufgenommene Schwingungssignal bzw. verändert sich – bei höheren Bodensteifigkeiten – auch die Periodendauer [1].

Bei konstanten – durch den Walzentyp vorgegebenen Walzenparametern – sowie konstant gehaltenen Prozessparametern (Erregerfrequenz, Fahrgeschwindigkeit), ist die Änderung des Schwingungsverhaltens ausschließlich auf eine Änderung der Bodensteifigkeit zurückzuführen. Da die Funktionsweise der FDVK auf diesem Grundprinzip beruht, werden nachfolgend die fünf Betriebszustände genauer erläutert bzw. beschrieben [1].

| Bewegung der Bandage | Interaktion Bandage-Boden | Betriebs- zustand | Verlauf der Bodenkontaktkraft | Anwendung der FDVK | Boden- steifigkeit | Fahr- geschwindig- keit | Erreger- Amplitude | |
|--|---------------------------------|----------------------|----------------------------------|-----------------------|-----------------------|-------------------------------|-----------------------|--|
| beriodisch koutakt periodischer Kontaktverlust | ständiger Kontakt | KONTAKT | | ja | gering | hoch | gering | |
| | ktverlust | ABHEBEN | | ja | | | | |
| | her Kontal | her Kontal | SPRINGEN | ΑΛΛΛ | ja | | | |
| | periodisc | TAUMELN | | nein | | | | |
| chaotisch | aperiodischer Kontaktverlust | CHAOS | | nein | hoch | niedrig | hoch | |

Tabelle 2.5: Betriebszustände einer Vibrationswalze [2]

2.9.1.1 Kontakt

In diesem Betriebszustand verliert die Bandage nie den Kontakt zum Untergrund. Ständiger Kontakt kommt nur bei sehr geringen Bodensteifigkeiten (z.B. bei sehr weichen bindigen Böden oder bei noch unverdichteten, rolligen Schüttlagen) bzw. bei hohen Fahrgeschwindigkeiten und/oder bei kleinen Erregeramplituden vor.

2.9.1.2 Abheben

Der Betriebszustand "Abheben" ist der Regelbetriebszustand einer Vibrationswalze, in welcher ein Optimum im Vergleich von Abnutzung bzw. Verschleiß der Maschine und der erbrachten Verdichtungsleistung besteht. In diesem Betriebszustand, welcher bereits bei mittleren Bodensteifigkeiten auftritt, verliert die Bandage periodisch wiederholend innerhalb jeder Erregerunwuchtrotation kurz den Kontakt zum Boden. Sie schlägt allerdings innerhalb einer Rotationsumdrehung der Erregerunwucht wieder auf den Boden auf. Die maximale Bodenkontaktkraft ist bei jeder Periode annähernd bzw. theoretisch gleich groß.

2.9.1.3 Springen

Bei noch höheren Bodensteifigkeiten kann es zum Springen der Bandage kommen, wobei sich das Bewegungsverhalten der Bandage nur mehr jede zweite Erregerunwuchtumdrehung gleicht. Die Bodenkontaktkraft zweier aufeinanderfolgender Aufschläge der Walze auf den Boden besitzt eine unterschiedliche Größe. Starke und schwache maximale Bodenkontaktkraft wechseln einander periodisch ab. Bei noch steiferen Bodenverhältnissen kann der niedrigere Wert vollkommen verschwinden. Bandage da die nur mehr iede zweite Erregerunwuchtumdrehung am Boden aufschlägt.

Im Betriebszustand "Springen" sind ebenfalls gute Verdichtungsleistungen möglich. Im Kontaktbereich kann es jedoch vermehrt zu Auflockerungen bzw. zu Kornzertrümmerungen kommen. Weiters treten durch die höheren Belastungen auf die Vibrationswalze vermehrt Verschleißerscheinungen auf, welche sich negativ auf die Lebensdauer auswirken.

Für den Walzenfahrer ist der kontinuierlich, jedoch sehr rasch auftretende Übergang zwischen dem Betriebszustand "Abheben" und dem Betriebszustand "Springen" durch die größeren Erschütterungswirkungen bzw. aufgrund der niederfrequenten Vibrationsgeräusche deutlich unterscheidbar. Der Übergang zwischen dem Betriebszustand "Abheben" und dem Betriebszustand "Abheben" und dem Betriebszustand "Springen" und den daraus resultierenden Änderungen des periodisch aufgezeichneten Schwingungssignales ist ein maßgeblicher Indikator für die FDVK-Wert-Berechnung bei Vibrationswalzen (siehe 3.8.2).

2.9.1.4 Taumeln

Bei einem Untergrund mit noch größerer Bodensteifigkeit kann es zu Rotationsbewegungen der Bandage um die Längsachse kommen. Bei diesen sogenannten Wiegeschwingungen schlägt die Bandage abwechselnd mit der rechten Bandagenseite und anschließend mit der linken Bandagenseite am Boden auf. Die Bandage taumelt und ist durch den Walzenfahrer nicht mehr kontrollierbar. In diesem Betriebszustand ist eine gleichmäßige Verdichtung nicht mehr möglich. Des Weiteren kommt es zu einer hohen Belastung der Vibrationswalze.

2.9.1.5 Chaos

Bei sehr hohen Bodensteifigkeiten und/oder niedrigen Fahrtgeschwindigkeiten und/oder großen Erregeramplituden kommt es zum Betriebszustand "Chaos". In diesem Zustand ist kein periodisches Bewegungsverhalten mehr erkennbar. Der Verdichtungsvorgang läuft chaotisch und unkontrolliert ab und ist sofort durch Adaptierung der Prozessparameter in einen kontrollierten Zustand zu bringen. In den Betriebszuständen "Taumeln" und "Chaos" ist die Verwendung eines FDVK-Systems nicht möglich.

2.9.2 BETRIEBSZUSTÄNDE DER OSZILLATIONSWALZE

Wie schon genauer unter Punkt 2.6.2.2 beschrieben, bringen zwei exzentrisch und punktsymmetrisch zur Bandagenachse angeordnete, gleich große und gleichsinnig rotierende Unwuchten die Walzentrommel in eine rotatorische Schwingung um die Bandagenachse. Im Gegensatz zur Vibrationswalze bleibt die Bandage immer mit dem Boden in Kontakt. Allerdings kann auch bei der Oszillationswalze je nach Bodensteifigkeit, vorgegebenen Walzenparametern sowie voreingestellten Prozessparametern (Erregerfrequenz, Fahrgeschwindigkeit) ein unterschiedliches Schwingungsverhalten der Bandage beobachtet werden. Maßgebliches Unterscheidungsmerkmal ist, ob durch die rotatorische Schwingung der Walzentrommel an der Kontaktfläche zum Boden die Haftreibung überschritten wird oder nicht [42], [57].

| Interaktion Bandage- Boden | Betriebszustand | Verlauf der horizontalen Lagerbeschleunigung | Anw. d. FDVK | Fahr- geschw. | Boden- steifigkeit | Erreger- amplitude | Erreger- frequenz |
|----------------------------------|---------------------------|---|-----------------|------------------|-----------------------|-----------------------|----------------------|
| ständiger Kontakt | Haften | | ja | niedrig | gering (Haften) | klein (Haften) | gering (Haften) |
| er lust | Einseitiges Gleiten | | ja | | | | |
| riodisch itaktver | Asymmetrisches Gleiten | | ja | | hoch (Gleiten) | groß (Gleiten) | hoch (Gleiten) |
| pe Kor | Symmetrisches Gleiten | | ja | hoch | | | |

Tabelle 2.6: Betriebszustände einer Oszillationswalze [57]

2.9.2.1 Haften

Im Betriebszustand "Haften" wird die Haftreibung zwischen Bandage und Boden zu keinem Zeitpunkt überschritten. Dementsprechend kommt es zu keiner dynamischen Relativverschiebungsgeschwindigkeiten bzw. zu keinem dynamischen Schlupf zwischen der Bandage und dem Boden. Dieser Zustand ist zu beobachten bei sehr weichen Böden, hoher Haftreibung und/oder bei geringen Erregeramplituden (siehe Tabelle 2.6).

2.9.2.2 Einseitiges Gleiten

Im Betriebszustand "Einseitiges Gleiten" wird innerhalb einer rotatorisch aufgebrachten Schwingungsdauer nur in einer Richtung die Haftreibung überschritten. In die andere Richtung wird die Haftreibung nie erreicht, sodass es beim Betriebszustand "Haften" bleibt.

Als Gründe für die einseitige Gleitbewegung werden die Überlagerung von Fahr- und Oszillationsbewegung, aber auch die unterschiedlich starken Antriebswirkungen zwischen Antriebsrädern und Bandage angesehen [42].

2.9.2.3 Asymmetrisches Gleiten

Wird die Haftreibung zwischen Bandage und Boden in beiden Richtungen überschritten, kommt es in der Regel zum Betriebszustand "Asymmetrisches Gleiten". In diesem Zustand besitzt die Bandage an der Kontaktfläche eine andere (höhere) Geschwindigkeit als der Boden, was als dynamischer Schlupf bezeichnet wird. Entsprechend der aufgebrachten rotatorischen Schwingung wird die Relativverschiebung während des Gleitvorganges immer kleiner, bis schließlich die Haftreibung wieder unterschritten wird und sich der Betriebszustand "Haften" wieder einstellt. Derselbe Vorgang wiederholt sich anschließend in die entgegengesetzte Richtung, sodass es periodisch zu einem Schlupf in und gegen die Fahrtrichtung kommt. Bei unterschiedlich langen Schlupfphasen in und gegen die Fahrtrichtung spricht man vom Betriebszustand "Asymmetrisches Gleiten". Durch die Relativverschiebung zwischen Walzentrommel und Boden kommt es zu erhöhten Verschleißerscheinungen an der Bandagenoberfläche sowie zu einer unerwünschten Feinteilbildung an der Oberfläche des Bodens. Stark ausgeprägte Gleitphasen sind demnach unerwünschte Betriebszustände und sollten vermieden werden [42].

2.9.2.4 Symmetrisches Gleiten

Als Sonderfall zu sehen ist der Betriebszustand "Symmetrisches Gleiten", da dieser Betriebszustand in der Regel nur bei stehenden Walzen mit dynamischer Anregung auftritt.

Der Wechsel zwischen Haften und Gleiten erfolgt zwei Mal pro Unwuchtdrehung, wobei die Gleitphasen in beide Richtungen gleich lang sind [57].

2.10 VERDICHTUNGSKONTROLLE

2.10.1 ALLGEMEINES

Durch die maschinelle Entwicklung Anwendung verbesserter der neuer bzw. Verdichtungsverfahren sowie durch den zunehmenden Gebrauch von Recyclingbaustoffen als Schüttmaterial kam es in den letzten Jahrzehnten auf dem Gebiet der Erdarbeiten zu Neuerungen, die sich in höheren qualitativen und quantitativen maßgeblichen Verdichtungsleistungen manifestierten. Dementsprechend höher sind die Anforderungen an die methodischen Verfahren der Qualitätssicherung geworden, welche im Erd- und Grundbau zum Einsatz kommen [4].

Beim erforderlichen Prüfumfang wird unterschieden zwischen der Erst-, Konformitäts-, und der Identitätsprüfung. Während bei den ersteren beiden keine Regelung vorliegt, ist der Prüfumfang von Identitätsprüfungen (Abnahmeprüfungen) in der RVS 08.03.01 je nach Tiefenbereich, bezogen auf die Verdichtungsfläche bzw. das Schüttvolumen, geregelt.

2.10.2 VERDICHTUNGSANFORDERUNGEN

Da nicht immer projektspezifische Eignungsuntersuchungen in vollem Umfang vorliegen werden, können oder müssen der Planung oft gesicherte Erfahrungswerte für die Verdichtungsanforderungen zugrunde gelegt werden.

Solche Verdichtungsanforderungen und auch die Auswahl des richtigen Prüfverfahrens sind in Österreich für erdbauliche Maßnahmen bei Straßen und Eisenbahnen in der RVS 08.03.01 [61] sowie für ungebundene Tragschichten in der RVS 08.15.01 [64] geregelt (siehe Tabelle 2.7 und Tabelle 2.8).

| Tiefenbereich | E _{vd} [MN/m²] | E _{v1} [MN/m²] | D _{Pr} [%] | Δ _{FDVK} [%] | SD _{FDVK} [%] |
|---|-------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| Unterbauplanum | 38 | 35 | 100 | ≤ 5 (0) | ≤ 20 |
| ab 1 m unter Unterbauplanum (einschl. Bodenauswechslung) | 24 (26) | 20 | 99 | ≤ 5 (0) | ≤ 20 |
| ab Dammaufstandsfläche | 18 (16) | 15 (7,5) | 97 (95) | ≤ 5 (0) | ≤ 20 |
| Hinterfüllung | 38 | 35 | 100 | | |

Tabelle 2.7: Mindestanforderungen an die Verdichtung gemäß RVS 08.03.01 (Klammerwerte gelten für bindige Böden) für Dammaufstandsfläche bis Unterbauplanum [61]

| | | U | ngebunde | ndene obere Tragschicht Ungebundene untere Tragschicht | | | untere nt | Ungebundene Tragschichten | | | |
|----------------------------------|-------------------|---|--------------|---|---------------|---------------|--------------|------------------------------|----|--------------------|-----------------------------|
| | | Für alle LK ¹ LK II bis LK V | | K VI | VI Für alle I | | _K | gebundene Überbauun | | | |
| Kennwert | Klasse | U12 | U2 | U3 | U4 | U5 | U6 | U7 | U8 | U9 | U10 |
| E _{v1} | ÖNORM B 4417 | ≥ 120 MN/m² | ≥ 90 MN/m² | | ≥ 75 MN/m² | ≥ 72 MN/m² | | ≥ 60 MN/m² | | | |
| E _{v1} /E _{v2} | ÖNORM B 4417 | | ≤ 2,2 | | | | | | | K Anfor | eine derung, |
| D _{Pr} | ÖNORM B 4414-2 | | ≥ 103% | | | | ≥ 101% | | | bz Bau festz | w. im vertrag sulegen |
| Sollhöhe | | ± 2 cm | | | | ± 3 cm | | | | | |
| Ebenheit | ÖNORM EN13036- | | ≤ 15 mm/ 4 m | | | | | | | | |

Tabelle 2.8: Mindestanforderungen an die Verdichtung gemäß RVS 08.15.01 für ungebundene Tragschichten [64]

Gemäß Dienstanweisung des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie sind diese Verdichtungsanforderungen im Bereich von Bundesstraßen verbindlich anzuwenden. Da diese den Stand der Technik widerspiegeln, wird in den Richtlinien angeregt, selbige auch außerhalb des Bundesstraßenbereiches anzuwenden.

Für andere erdbauliche Maßnahmen, wie z.B. Bauwerksgründungen, Hochwasser- oder Lärmschutzdämme, sind die Verdichtungsanforderungen üblicherweise in

- Leitfäden und Normen
- geotechnischen Gutachten
- Bescheidauflagen
- Vertragsbedingungen
- sonstigen Regelungen

festgelegt. Diese Qualitätsanforderungen an den Verdichtungsgrad sind je nach verwendetem Regelwerk bzw. den projektspezifisch durchgeführten Erkundungsmaßnahmen mehr oder weniger detailliert.

Insbesondere bei kleinen bis mittelgroßen Projekten ohne vollem Vorerkundungsumfang werden die Verdichtungsanforderungen oft nur über die bezogene Lagerungsdichte (z.B.: *"…es sind mindestens mitteldichte Lagerungsverhältnisse erforderlich…"*) vorgegeben. Die bezogene Lagerungsdichte kann aus den Ergebnissen von Feldversuchen abgeleitet werden. In Tabelle 2.9 sind für Druck- und Rammsondierungen die empirisch abgeleiteten Lagerungsdichten, bezogen auf die Versuchsergebnisse, dargestellt.

¹ Lastklassenbezeichnung gemäß der RVS 03.08.63 [60]

² In den U-Klassen sind gemäß RVS 08.15.01 die Anforderungen an die Eigenschaften von Gesteinskörnungsgemischen geregelt.

| Bezeichnung | bei C _u > 3 D (-) | Verdichtungs- grad D _{Pr} | Spitzenwiderstand Drucksonde q _s [MN/m²] | Rammson Schla DPH N ₁₀ | dierungen Igzahl SPT N ₃₀ |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|---|--|
| sehr locker | < 0,2 | | | < 5 | < 4 |
| locker | 0,2 - 0,45 | | | 5 – 15 | 4 – 15 |
| mitteldicht | 0,45 – 0,65 | ≥ 98% | ≥ 7,5 | 16 – 30 | 16 – 40 |
| dicht | > 0,65 | ≥ 100% | ≥ 15 | 30 - > 40 | > 40 |
| Bezeichnung | bei C _u ≤ 3 D (-) | Verdichtungs- grad D _{Pr} | Spitzenwiderstand Drucksonde q₅ [MN/m²] | Rammsondierungen Schlagzahl DPH N ₁₀ DPL-5 N ₁₀ | |
| sehr locker | < 0,15 | | < 2,0 | 0 – 1 | 0 – 3 |
| locker | 0,15 – 0,30 | | 2,0 - 5,0 | 1 – 4 | 3 – 7 |
| mitteldicht | 0,30 – 0,50 | ≥ 95% | 5,0 – 12,0 | 4 – 13 | 7 – 20 |
| dicht | 0,50 – 0,75 | ≥ 98% | 12,0 – 20,0 | 13 – 24 | > 20 |
| sehr dicht | 0,75 - 1 | | | | |

Tabelle 2.9: Mindestanforderungen an die Verdichtung - empirisch abgeleitete Lagerungsdichten aus Feldversuchen [2]

Da außerhalb des Straßenbau- und Eisenbahnwesens die Verdichtungsanforderungen oft unzureichend oder zu unpräzise vorgegeben sind, ist es empfehlenswert, diese projektspezifisch auf Basis der Ergebnisse von entsprechenden geotechnischen Vorerkundungsmaßnahmen zu definieren und dem Auftragnehmer bereits in den Vertragsbedingungen bekanntzugeben.

2.10.3 PRÜFVERFAHREN

Die Prüfverfahren der Verdichtung können grundsätzlich in die klassischen, punktuellen und in die flächendeckenden, arbeitsintegrierten Methoden unterschieden werden.

| Tabelle 2.10: Prüfverfahren z | zur Verdichtungskontrolle |
|-------------------------------|---------------------------|
|-------------------------------|---------------------------|

| Prüfverfahren | Prüfnorm / Richtlinie |
|--|---|
| Proctorversuch | ÖNORM B 4418 [51] |
| Dichte im Feld | ÖNORM B 4414-2 [49] |
| Statischer Lastplattenversuch | ÖNORM B 4417 [50] |
| Dynamischer Lastplattenversuch | RVS 08.03.04 [63] |
| Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) | RVS 08.03.02 [62] |
| Weitere Prüfverfahren Isotopensonde Drucksondierungen Rammsondierungen Benkelman-Balken Nivellierung der Schüttlage | TP-BF-StB, Teil B 4.3 [67] ÖNORM EN ISO 22476-1 [55] ÖNORM EN ISO 22476-2 [56] und ÖNORM B 4419 [52] Merkblatt FGSV [28] |

Nachfolgend werden die in Tabelle 2.10 aufgelisteten gängigsten Prüfverfahren dargestellt und beschrieben.

2.10.3.1 Proctorversuch

Die versuchstechnisch genormte Durchführung und Auswertung des Proctorversuches ist in der ÖNORM B 4418 geregelt. Mit dem Proctorversuch kann die Verdichtbarkeit bzw. die Verdichtungsfähigkeit, d.h. die maximal erreichbare Trockendichte ρ_d in Abhängigkeit vom Wassergehalt w eines Bodens bestimmt werden. Für die Verdichtbarkeit eines Bodens maßgeblich ist neben der Korngrößenverteilung und dem Wassergehalt des Materials auch die eingebrachte Verdichtungsenergie.

Die im Labor ermittelte Proctordichte ist eine die Bodenart kennzeichnende Eigenschaft und dient somit als Vergleichswert bzw. Referenzwert zur Abschätzung der im Feld erreichten Verdichtung eines Bodens. Der Proctorversuch wird bei bindigem und auch bei nichtbindigem Material durchgeführt. Die Beurteilung des Verdichtungszustandes von Böden wird über den sogenannten Verdichtungsgrad D_{Pr} in % der beim Proctorversuch maximal erreichten Dichte angegeben. Der Verdichtungsgrad D_{Pr} ist somit eine relative Bezugsgröße für die Lagerungsdichte eines im Feld verdichteten Bodens im Vergleich zur standardisiert, labortechnisch ermittelten Lagerungsdichte desselben Bodens bei optimalem Wassergehalt und festgelegter, eingebrachter Verdichtungsarbeit. Anders formuliert ist der optimale Wassergehalt für die Verdichtung nicht nur von der Korngrößenverteilung, sondern auch vom Verdichtungsverfahren bzw. von der eingebrachten Verdichtungsarbeit abhängig. Um dem Rechnung zu tragen, gibt es neben dem Standard-Poctorversuch mit einer genormten Verdichtungsenergie von E_{StPr} = 0,6 MN/m³ auch den Modifizierten Proctorversuch mit einer genormten Verdichtungsenergie von E_{ModPr} = 2,75 MN/m³, welcher bei Bauvorhaben mit hohem Verdichtungsniveau (z.B. Landebahnen, Eisenbahntrassen) als Referenzwert zum Einsatz kommt. Bei entsprechend hoher Verdichtungsenergie ist auch ein Verdichtungsgrad von über 100% möglich [20].

Versuchsdurchführung beim Standard-Proctorversuch:

Das zu untersuchende Material wird je nach Größtkorn in einen genormten Versuchszylinder mit entsprechendem Durchmesser (100, 150 oder 250 mm) in drei Schichten gleicher Mächtigkeit eingebaut. Das Probematerial soll beim ersten Einzelversuch einen Wassergehalt besitzen, welcher entsprechend ausreichend weit unter dem optimalen Wassergehalt liegt. Anschließend wird das Material mit einem vorgegebenen Arbeitsverfahren durch aufeinanderfolgende Schläge eines aus entsprechender Höhe herabfallenden, genormten Fallbären verdichtet. Die gemäß ÖNORM B 4414-1 über das Volumen und die Masse ermittelte Trockendichte des Materials sowie der aus der Probe bestimmte Wassergehalt bilden das Versuchsergebnis eines Einzelversuches.

Auswertung:

Um eine Proctorkurve zu erhalten, muss der Einzelversuch mit gesteigertem Wassergehalt so oft wiederholt werden, bis der Scheitelpunkt der Ausgleichskurve eindeutig bestimmt ist (mindestens jedoch fünf Mal). Das Ergebnis wird meist in Form einer Proctorkurve (siehe Abbildung 2.17) graphisch dargestellt. An der Ordinate kann die maximal erreichbare Trockendichte ρ_d , an der Abszisse der zugehörige optimale Wassergehalt w abgelesen werden.



Abbildung 2.17: Proctorkurven des Standard-Proktorversuches und des Modifizierten Proctorversuches [3]

Mit steigendem Wassergehalt nähert sich die Proctorkurve asymptotisch an den sogenannten "Nassen Ast" der Sättigungskurve an, wobei selbige nie überschritten wird. Als Plausibilitätskontrolle kann der Verlauf der Sättigungskurven über folgenden Zusammenhang zwischen Sättigungsgrad, Trockendichte und Wassergehalt ermittelt werden:

$$\rho_{d} = \frac{\rho_{s}}{1 + \frac{w \cdot \rho_{s}}{\rho_{w} \cdot S_{r}}}$$
 [g/cm³]

| Legende: | ρ_d = Trockendichte | [g/cm ³] |
|----------|---------------------------------|----------------------|
| | ρ_w = Dichte des Wassers | [g/cm ³] |
| | $ \rho_s = Korndichte $ | [g/cm ³] |
| | w = natürlicher Wassergehalt | [] |
| | S _r = Sättigungsgrad | [] |

Die Beurteilung des Verdichtungszustandes von Böden bzw. Schüttlagen wird über den Verdichtungsgrad D_{Pr} als Quotient der vorhandenen Dichte ρ_d bezogen auf die Proctordichte ρ_{Pr} dargestellt.

$$D_{Pr} = \frac{\rho_d}{\rho_{Pr}} \cdot 100$$
 [%]

2.10.3.2 Feldverfahren zur Bestimmung der Dichte des Bodens

Die versuchstechnisch genormte Durchführung und Auswertung der Feldverfahren zur Bestimmung der Dichte des Bodens ist in der ÖNORM B 4414-2 geregelt. Die Dichte kann je nach vorhandenem Boden und Rahmenbedingungen mittels des Ausstechzylinder-, Sandersatz-, Flüssigkeitsersatz-, Messkörper-, Schürfgruben- oder Schüttkörperverfahrens ermittelt werden. Gemäß der einfachen Beziehung

| | | $\rho = \frac{m}{V}$ | [g/cm ³] |
|----------|---|---------------------------|----------------------|
| Legende: | ρ | = örtlich gegebene Dichte | [g/cm³] |
| | m | = Masse der Probe | [g] |
| | V | = Volumen der Probe | [cm ³] |

kann bei jeder Methode über die Masse sowie das Volumen der Probe punktuell die Dichte berechnet werden. In der nachfolgenden Tabelle ist die Anwendbarkeit der Verfahren in Abhängigkeit von der Bodenart dargestellt [49].

Tabelle 2.11: Anwendbarkeit der Verfahren in Abhängigkeit von der Bodenart [49]

| В | odenart | Verfahren | | |
|-----------------------|--------------------------|--|--------------------------------|--|
| | | gut geeignet | ungeeignet | |
| bindige Böden | ohne Kieskorn | Ausstechzylinder- Verfahren | keine | |
| | mit Kieskorn | alle Ersatz- und Meß- körper-Verfahren | Ausstechzylinder- Verfahren | |
| nichtbindige Böden | Fein- bis Mittelsande | Ausstechzylinder- Verfahren | Meßkörper-Verfahren | |
| | Kies-Sand- Gemische | alle Ersatz-Verfahren | Ausstechzylinder- und | |
| | sandarme Kiese | alle Ersatz-Verfahren (mit flacher Mulde) | Meßkörper-Verfahren | |
| Böden mit Steinen | und Blöcken | Schürfgruben und Schüttkörper-Verfahren | alle anderen Verfahren | |

2.10.3.3 Statischer Lastplattenversuch

Die Durchführung und Auswertung von statischen Lastplattenversuchen ist in der ÖNORM B 4417 geregelt. Bei der Durchführung des statischen Lastplattenversuches wird mit einer Druckvorrichtung über eine Messbrücke eine kreisförmige Lastplatte be- und entlastet. Aus den bei den einzelnen Laststufen erhaltenen mittleren Normalspannungen σ unter der Platte sowie den zugehörigen Setzungen s kann die Verdichtung des Bodens über das Drucksetzungsdiagramm (siehe Abbildung 2.18) ermittelt werden.



Abbildung 2.18: Beispielhaftes Drucksetzungsdiagramm aus ÖNORM B 4417 [50]

Zur Beschreibung der Verformbarkeit bzw. der Tragfähigkeit des Bodens werden folgende Kennzahlen ermittelt:

Bettungsmodul
$$k_s$$
 $k_s = \frac{\sigma}{s}$ [MN/m³]

Verformungsmodul
$$E_v = 0.75 \cdot d \cdot \frac{\Delta \sigma}{\Delta s}$$
 [MN/m²]

| Legende: | σ | = mittlere Normalspannung unter der Lastplatte | [MN/m²] |
|----------|-----------------|--|---------|
| | S | = Setzung | [m] |
| | d | = Durchmesser der Lastplatte | [m] |
| | $\Delta \sigma$ | = Änderung der mittleren Sohlpressung | [MN/m²] |
| | Δs | = Setzungsänderung bei ∆σ | [m] |

Der Bettungsmodul ist eine Kennzahl für die Setzung eines Bodens. Dabei wird vereinfachend angenommen, dass das Setzungsmaß proportional zu der an diesem Punkt wirksamen Druckspannung ist. Der Verformungsmodul, welcher sowohl für die Erstbelastung (E_{v1}) als auch für die Zweitbelastung (E_{v2}) ermittelt werden kann, ist eine Kennzahl für die Verformbarkeit des Bodens. Die Kennzahlen werden unter Heranziehung der Theorie des linear-elastischen, homogenen, isotropen Halbraums für eine lotrecht belastete, steife Platte bei Annahme einer Querdehnungszahl von v = 0,214 bestimmt [50].

der Verwendung der mit dem statischen Bei Lastplattenversuch ermittelten Verformungsmoduln ist jedoch zu beachten, dass diese Idealisierungen und vereinfachten Annahmen in der Praxis oft nicht gegeben sind. Dementsprechend kann der ermittelte Wert von dem Belastungszustand des Bodens bei der Modulbestimmung, den auftretenden plastischen Verformungen, den Materialeigenschaften der einzelnen Lagen eines geschichteten Aufbaues, der Belastungsgeschichte während der Versuchsdurchführung, dem Plattenradius und damit von der Messtiefe des Versuches und der Belastungs- und Setzungsmesseinrichtung beeinflusst sein [4]. Bei einem Vergleich der Auswertungsergebnisse statischen Lastplattenversuches mit eines anderen Verdichtungskontrollen ist einerseits die unterschiedliche Messtiefe der Methoden zu beachten, anderseits, dass dieser keine definierten Bodenkennwerte liefert, da die Durchführung und die Interpretation der Messwerte auf Regeln und Vereinbarungen beruhen.

Gemäß durchgeführter experimenteller Untersuchungen besitzt die statische Lastplatte eine Messtiefe von 0,45 bis 0,50 m [44]. Numerische Simulationen zur Ermittlung der Messtiefe mittels der Randelementmethode zeigten allerdings, dass die Messtiefe u.a. vom Plattendurchmesser bzw. von den Bedingungen auf der Baustelle bei Versuchsdurchführung (Messung von Relativverschiebungen, Kurzschlusseffekt, Einfluss von lokalen Plastizitäten etc.) abhängig ist. Ein Vergleich der Ergebnisse ist demnach nur nach einer sorgfältigen Kalibrierung sowie entsprechender Interpretation unter Berücksichtigung der gegebenenfalls unterschiedlichen Messtiefe der Methoden möglich.

2.10.3.4 Dynamischer Lastplattenversuch

Die Durchführung und Auswertung von dynamischen Lastplattenversuchen ist in der RVS 08.03.04 geregelt [63]. Die dynamische Lastplatte in Form des Leichten Fallgewichtsgerätes wird verwendet zur Ermittlung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} von Schüttungen oder Böden im Erdbau. Größter Vorteil gegenüber anderen Methoden der punktuellen Verdichtungskontrolle ist die kurze Versuchsdauer von zwei bis drei Minuten pro Messung, was die Durchführung einer großen Anzahl von Messungen mit einem vertretbaren Aufwand ermöglicht. Die Tragfähigkeit des Bodens bzw. der Schüttlage kann entsprechend statistisch abgesichert bewertet werden.

Mit dieser indirekten Verdichtungskontrolle wird die Steifigkeit des Bodens ähnlich wie beim statischen Lastplattenversuch ermittelt. Allerdings wird anstatt der statischen Last durch ein geführtes Fallgewicht eine stoßförmige Belastung über die Lastplatte auf den Untergrund übertragen (siehe Abbildung 2.19 und Foto 2.1). In der Mitte der Lastplatte befindet sich ein Beschleunigungssensor, dessen Signal durch zweifache Integration in eine vertikale Plattenverschiebung umgerechnet wird.



Abbildung 2.19: Komponenten des Leichten Fallgewichtgerätes [8]

Foto 2.1: Verwendung der dynamischen Lastplatte im Zuge der Feldversuche in der Schottergrube Fischamend durch Univ.Ass. DI Dr. Johannes Pistrol (A. Leitich, am 13.10.2015)

Versuchsdurchführung:

Im Zuge der Versuchsdurchführung ist die Platte mit einem Durchmesser von 30 cm eben und kraftschlüssig auf das zu prüfende Material aufzulegen. Falls erforderlich ist eine dünne Ausgleichsschichte aus Sand unter der Platte aufzubringen. Zur Herstellung eines vollkommenen Kontaktes sind vor Beginn der eigentlichen Messung drei Vorbelastungsstöße durchzuführen. Bei der Versuchsdurchführung wird das über die lotrecht stehende Führungsstange zentrierte Fallgewicht mit einer Masse von 10 kg durch Betätigen der Ausklinkvorrichtung auf das Feder-Dämpfer-Element fallen gelassen. Aus der über den Beschleunigungssensor in der Lastplatte aufgezeichneten Beschleunigung lässt sich durch zweimalige Integration die maximale Plattenverschiebung (= Setzung) berechnen.

Auswertung:

Der Versuchsvorgang wird dreimal wiederholt und aus dem Mittelwert der drei gemessenen Maximalwerte der Setzung z_{max} der dynamische Verformungsmodul E_{vd} unter Anwendung der Formel des statischen Lastplattenversuches:

| Dynamischer | Verform | nungsm | $bodul \; E_{vd} \qquad E_{vd} = 0,75 \cdot d \cdot \frac{\Delta \sigma}{\Delta s}$ | [MN/m²] |
|-------------|---------|--------|---|---------|
| Legende: | d | = | Durchmesser der Lastplatte | [m] |
| | Δσ | = | Änderung der mittleren Sohlpressung | [MN/m²] |
| | ∆s | = | Setzungsänderung bei $\Delta\sigma$ | [m] |

Es werden jedoch die folgenden, vereinfachenden Annahmen getroffen [8]:

- Diese auch beim statischen Lastplattenversuch verwendete Formel beruht auf der Theorie des linear-elastischen, homogenen, isotropen Halbraumes. Es ist zu beachten, dass diese Idealisierungen und vereinfachten Annahmen in der Praxis oft nicht gegeben sind (siehe auch Punkt 2.10.3.3).
- Geschwindigkeitsabhängige Terme und Massenträgheitskräfte werden bei dieser Versuchsauswertung nicht berücksichtigt.
- Die maximal auftretende mittlere Bodenpressung $\Delta \sigma$ wird aufgrund des genormten Versuchsaufbaus vereinfachend als Konstante mit $\Delta \sigma = 0,1$ MN/m² angenommen.

Dadurch kann die Gleichung auch vereinfacht als

$$E_{vd} = \frac{22,5}{z_{max}} \qquad [MN/m^2]$$

geschrieben werden.

In Abbildung 2.20 ist die der Verlauf der Bodenpressung über die Zeit (rote Kennlinie), die Setzung der Lastplatte über die Zeit (grüne Kennlinie) und das Arbeitsdiagramm (Bodenpressung über Setzung, schwarze Kennlinie) grafisch dargestellt.



Abbildung 2.20: Bodenpressung sowie Verschiebung und Arbeitsdiagramm der Dynamischen Lastplatte [8]

Messtiefe:

Anhand von numerischen Simulationen [8] sowie durch experimentelle Untersuchungen [71] wurde die Messtiefe der dynamischen Lastplatte untersucht. Als Messtiefe ist jene Tiefe definiert, ab welcher die Steifigkeit des darunterliegenden Materials keinen Einfluss mehr auf das Ergebnis der Prüfung hat.

Die Messtiefe einer dynamischen Lastplatte mit einem Plattendurchmesser von D = 30 cm liegt bei rd. 60 cm und ist somit sogar noch etwas größer als die des statischen Lastplattenversuches [71]. Es ist allerdings zu beachten, dass die Messtiefe vom Lastplattendurchmesser abhängig ist. Die Messtiefe beträgt ca. 2,0 x Plattendurchmesser.

Kalibrierung:

Maßgeblich für eine ordnungsgemäße Versuchsdurchführung und auch für eine Vergleichbarkeit der gemessenen dynamischen Verformungsmoduln ist die Kalibrierung des Gerätes. Um ein einheitliches Bewertungsniveau der im Einsatz befindlichen dynamischen Lastplatten gewährleisten zu können, sind selbige bei Beschädigungen oder, wenn Komponenten ausgetauscht werden, zumindest jedoch einmal jährlich, durch eine akkreditierte Kalibrierstelle zu überprüfen. Jedes Gerät hat somit eine beim Gerät mitzuführende Kalibriertabelle, aus welcher der Mindestanforderung E_{vd} entsprechende am Display abzulesende Messwert $E_{vd m}$ zu entnehmen und nachzuweisen ist [63].

Umrechnung von Mindestanforderungen zwischen statischer- und dynamischer Lastplatte:

Oft werden in Ausschreibungsunterlagen die Mindestanforderungen für die Verdichtung nur auf Basis des Erstbelastungsmoduls E_{v1} definiert. Die Überprüfung des Tragfähigkeitskriteriums der statischen Lastplatte kann mithilfe des dynamischen Lastplattenversuches auf Basis folgender Formeln durchgeführt werden [45], [63]: Für $E_{v1} \ge 25 \text{ MN/m}^2$ bei bindigen als auch nichtbindigen Böden gilt:

$$E_{v1} = \frac{5}{4} \cdot E_{vd} - 12,5$$
 [MN/m²]

und bei $E_{v1} < 25 \text{ MN/m}^2$ bei nicht bindigen Böden gilt:

$$\mathsf{E}_{v1} = \frac{5}{6} \cdot \mathsf{E}_{vd} \qquad [\mathsf{MN}/\mathsf{m}^2]$$

Dass bei E_{v1} -Werten ≥ 25 MN/m² zwischen bindigen und rolligen Böden differenziert werden muss, liegt in erster Linie daran, dass bei Feinkorn-dominierten Böden aufgrund der dynamischen Belastungen das im Boden gebundene Wasser nicht entweichen kann und somit Porenwasserüberdrücke entstehen, sodass der Boden bei impulsförmiger Belastung eine scheinbar höhere Festigkeit besitzt. Dass bei größeren Steifigkeitswerten der statische Lastplattenversuch höhere Werte liefert, ist durch Verzahnungen unterhalb der kreisrunden Lastplatte zu erklären, die im Zuge der Versuchsdurchführung speziell bei sehr steifen Böden und hohen Bodenpressungen entstehen. Aufgrund der impulsförmigen Lasteintragung beim dynamischen Lastplattenversuch treten diese Verspannungen zwischen den Körnern dort nicht auf.

In 2.21 Abbildung ist der Zusammenhang zwischen dem Erstbelastungsmodul E_{v1} dem aus statischen Lastplattenversuch und dem dynamischen Verformungsmodul E_{vd} dem dynamischen aus Lastplattenversuch graphisch beschrieben. Neben dem klassischen bilinearen Zusammenhang (blaue Kennlinien) ist auch die in der Praxis ebenfalls verwendete logarithmische Beziehung Kennlinie) (violette dargestellt.



Abbildung 2.21: Zusammenhang zwischen dem Erstbelastungsmodul E_{v1} und dem dynamischen Verformunsgmodul E_{vd} [45]

Es ist anzumerken, dass mit diesen Formeln Grenzwerte (Anforderungen) umgerechnet werden können, sie dienen jedoch nicht der Umrechnung von Ergebnissen eines jeden Versuches [4][63].

2.10.3.5 Weitere punktuelle Verdichtungskontrollen

Der Vollständigkeit halber werden nachfolgend noch weitere Methoden zur punktuellen Verdichtungskontrolle aufgezählt, welche noch mehr oder weniger bei Erdarbeiten Verwendung finden:

ISOTOPENSONDE

Bei der Isotopensonde – oder auch Troxlersonde genannt – handelt es sich um ein zerstörungsfreies Prüfverfahren, welches auf Basis von Gammastrahlung die Dichte und den Wassergehalt des Materials misst. Selbige findet jedoch eher im Asphaltbau ihre Anwendung und ist insbesondere bei inhomogenen Untergrundverhältnissen (oberflächennahe Auflockerungserscheinungen) nicht bzw. nur bedingt einsetzbar.

DRUCKSONDIERUNGEN

Beim Drucksondierungsverfahren, bei welchem eine Sonde mit konstanter Geschwindigkeit über ein Gestänge in den Boden gedrückt wird, werden Mantelreibung, Spitzendruck und manchmal auch der Porenwasserdruck des Bodens gemessen. Über die gewonnenen Bodenkennwerte können Rückschlüsse auf die Lagerungsdichte des Untergrundes gezogen werden. Das Hauptanwendungsgebiet des Drucksondierungsverfahrens ist die Erkundung von mittel- bis tiefgründigen Feinkorn-dominierten Böden.

RAMMSONDIERUNGEN

Bei Rammsondierungen wird eine Sonde durch einen Fallbären in den Untergrund geschlagen. Über die Anzahl der Schläge pro 10 cm Eindringtiefe können zumindest überschlagsmäßige Rückschlüsse auf die Lagerungsdichte gezogen werden.

BENKELMAN-BALKEN

Mithilfe des sogenannten Benkelman-Balkens kann die Tragfähigkeit bzw. der Verformungszustand von Straßen ermittelt werden. Bei diesem Prüfverfahren werden die durch eine genormte Radlast hervorgerufenen elastischen Einsenkungen mittels eines Traggestells und eines Tastarmes abgegriffen. Durch Messungen in unterschiedlichen Abständen zwischen Tastarm und Radlast wird die Lasteinflusslinie definiert, über welche die Setzung und in weiterer Folge der Steifigkeitsmodul berechnet werden können. Der Benkelman-Balken findet Anwendung im Straßenbau mit gebundenen Tragschichten [67].

NIVELLIEREN

Sollte kein obig beschriebenes Prüfverfahren anwendbar sein, so kann die Setzungszunahme von Schüttmaterial auch durch Nivellement des sich setzenden Verdichtungsplanums nach jedem Verdichtungsübergang gemessen werden. Dadurch kann, bezogen auf die ursprüngliche Schüttlagenmächtigkeit, der relative Verdichtungszuwachs ermittelt werden.

2.10.3.6 Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK)

Die zuvor beschriebenen klassischen Methoden der Verdichtungskontrolle haben alle gemein, dass sie nur ein punktuelles Ergebnis für den Verdichtungszustand eines Bodens bzw. einer Schüttlage liefern. Aufgrund der meist nur geringen Anzahl an Versuchen ist eine statistische Auswertung oft nicht oder nur bedingt möglich, sodass der Verdichtungsnachweis einer Fläche nie ganzheitlich möglich ist und einer fachlichen Interpretation der punktuellen Verdichtungskontrollen, bezogen auf die Fläche, bedarf.

Da die punktuellen Verdichtungskontrollen jeweils nach dem Verdichtungsvorgang durchzuführen sind, sind selbige entsprechend zeit- und kostenintensiv, da sie den Bauablauf verzögern.

Mit der Produktreife der ersten FDVK-Systeme in Zusammenhang mit Vibrationswalzen im Jahr 1978 von der Fa. *Geodynamic AB* bzw. 1982 von der Fa. *Bomag* wurden die ersten flächendeckenden Verdichtungskontrollen auf den Markt gebracht. Durch entsprechende Aufzeichnung und Dokumentation wurde somit erstmals ein integraler, flächenhafter Verdichtungsnachweis auf Basis eines Algorithmus möglich. Ein weiterer Vorteil dieser Methode liegt darin, dass die Verdichtungskontrolle kontinuierlich und arbeitsintegriert abläuft und der Bauablauf für die Verdichtungskontrollen nicht mehr unterbrochen werden muss.

3 FLÄCHENDECKENDE DYNAMISCHE VERDICHTUNGSKONTROLLE (FDVK)

Die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle (kurz: FDVK) ist eine walzen- und arbeitsintegrierte Messmethode für dynamisch erregte Bandagen, bei welcher die Walze nicht nur verdichtet, sondern auch laufend die Verdichtung des Untergrundes ermittelt, dem Walzenfahrer anzeigt und diese dokumentiert. Der Einsatzbereich, die Kalibrierung sowie die Durchführung der Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle ist in der RVS 08.03.02 geregelt [62].

Bis dato werden von den unterschiedlichen Walzenherstellern nur FDVK-Systeme für Vibrationswalzen oder Walzen mit Richtschwingern (mit vertikaler oder schräger Einstellung) angeboten. Ein FDVK-System für Oszillationswalzen, welches zuverlässige Messwerte liefert, befindet sich derzeit noch nicht auf dem Markt. Auf Basis der Forschungsarbeit an der TU Wien, unter welcher auch die vorliegende Arbeit einzuordnen ist, wird derzeit in Zusammenarbeit mit der *Hamm AG*, an der Produktreife eines funktionierenden FDVK-Systems für Oszillationswalzen gearbeitet.

3.1 FUNKTIONSPRINZIP

Das Funktionsprinzip der FDVK beruht auf der Wechselwirkung zwischen dynamisch erregter Walze und dem Boden. Die dynamische Erregung der Bandage erfolgt durch die in Punkt 2.6.2 beschriebenen Erregerunwuchten. Je nach Anregungsart wird die Bandage in eine Vibrationsoder in eine Oszillationsschwingung versetzt. Dieses periodische sinusförmige Schwingungsverhalten der Bandagentrommel ist zu beobachten, wenn die Walze am Rahmen hochgehoben wird und die Bandage den Boden nicht berührt.

Bei Betrieb einer dynamisch erregten Walze wird durch Interaktion zwischen Boden und Bandage der von den Erregerunwuchten generierte Sinusverlauf verzerrt. Werden die Walzensowie Prozessparameter konstant gehalten, so ist die Änderung im Bewegungsverhalten – gemessen an der Lagerschale der Bandage – eindeutig der Steifigkeit des Untergrundes zuzuordnen. Durch Analyse des Signales im Zeit- bzw. im Frequenzbereich kann über einen definierten Algorithmus ein dynamischer Messwert errechnet werden, über welchen schlussendlich eine Aussage über den Verdichtungsgrad getroffenen werden kann [1], [4], [42].

3.2 KOMPONENTEN

Das Bewegungsverhalten der Bandage wird über Beschleunigungssensoren an der Lagerschale der Walzentrommel gemessen (siehe Abbildung 2.22). Das Signal wird anschließend in der Prozessoreinheit entsprechend dem Algorithmus des FDVK-Systems verarbeitet. Der somit berechnete dynamische Verformungsmodul E_{vd} wird unter Verwendung

von GPS-Signalen sowie einem Wegsensor räumlich zugeordnet und über die Anzeige- und Speichereinheit dem Walzenfahrer auf einem Display dargestellt. Die Messwerte können später am PC unter Verwendung entsprechender Computersoftware verarbeitet und aufbereitet werden [4].



Abbildung 2.22: Komponenten eines FDVK-Systems (oben links), beispielhafter Verlauf von Beschleunigungssignalen (unten links), übliche Darstellung eines Flächenplots der FDVK-Messwerte von zehn Verdichtungsspuren (rechts) [4]

3.3 VORTEILE DER FDVK

Durch die Verwendung eines FDVK-Systems zur Verdichtungskontrolle können sich folgende Vorteile ergeben [13][19][32][35][36]:

- Arbeitsintegrierte Messung während der Verdichtung
- Gesteigerte Verdichtungsqualität und Qualitätssicherung
- Erhöhung der Verdichtungsleistung
- Reproduzierbare Verdichtungsmesswerte
- Nicht manipulierbare Messdaten
- Flächendeckende Verdichtungskontrolle

- Identifikation von Inhomogenitäten und Schwachstellen im Untergrund bereits während der Verdichtungsarbeiten
- Erhöhung der Wirtschaftlichkeit durch Vermeidung von Überverdichtung
- Erhöhung der Lebensdauer der Bauwerke und der Walze (Vermeidung schädlicher Betriebszustände etc.)
- Zuverlässige Messwertermittlung gegenüber punktuellen Prüfverfahren (Reproduzierbarkeit der Messwerte)

3.4 NACHTEILE DER FDVK

Es hat sich gezeigt, dass in der täglichen Baustellenpraxis unzureichendes Bewusstsein gegeben ist, dass die Anwendung eines FDVK-Systems sensibel auf Änderungen der Untergrundverhältnisse, der Schüttmaterialzusammensetzung, des Wassergehalts im Material, aber auch bezugnehmend auf eine Veränderung der Walzen- und Prozessparameter reagiert. Nachfolgend werden die maßgeblichen Nachteile, die bei der Verwendung eines FDVK-Systems auftreten können, aufgelistet [35]. [45]:

- Indirekte Messmethode Messwerte stellen keine bodenphysikalischen Eigenschaften dar – eine Kalibrierung ist erforderlich
- Mehrfache Nichtlinearität des Walze-Boden-Interaktionssysems
- Schlechte Vergleichbarkeit der verschiedenen Messwerte und Messsysteme bei geänderten Untergrundverhältnissen, Walzen- und Prozessparametern
- Wechselnde Verdichtungstiefe sowie Messtiefe des FDVK-Systems mit Änderung der Walzenparameter
- Messwerte besitzen eine ausgeprägte Abhängigkeit von den jeweiligen Betriebszuständen der Bandage
- Kleinräumige, verwinkelte Schüttflächen bzw. sich verändernde Schichtstärken, Bodenzusammensetzungen, Vorverdichtungsgrade mit etwaig oft unterbrochenen Arbeitsketten sind für eine Verwendung des FDVK-Systems nicht bzw. nur bedingt geeignet

Die beschriebenen Punkte machen eine entsprechend hohe Qualifikation beim ausführenden Personal erforderlich. Da dementsprechend auch der Aufwand für Organisation, Abwicklung und Logistik auf der Baustelle steigt, ist eine wirtschaftliche Verwendung einer Verdichtungskontrolle mittels FDVK-Systems oft erst ab einer entsprechenden Baustellengröße sinnvoll.

3.5 EINFLUSSFAKTOREN AUF DEN FDVK-WERT

Das Messwertniveau, dessen Vergleichbarkeit mit klassischen Verdichtungskontrollen, dessen Stabilität, Reproduzierbarkeit und Aussagekraft ist, wie in mehreren wissenschaftlichen Untersuchungen (insbesondere ADAM [1], KOPF [42], HAGER [35])

beschrieben, von mehreren Einflussgrößen abhängig. Es kann in primäre – der Walzen-Boden-Interaktion zuzuordnende – und sekundäre – dem Aufbereitungs- und Auswertungsprozess zuzuordnende – Einflussgrößen unterschieden werden.

3.6 PRIMÄRE EINFLUSSFAKTOREN

- Bodenart: Je höher der Feinkornanteil, desto geringer ist das Messwertniveau.
- Tiefenwirkung: Je nach eingesetzter Walze und Verdichtungsmethode kann eine Verdichtungstiefe von bis zu 1,5 m erreicht werden. Mit FDVK-Systemen kann jedoch eine Messtiefe von etwa 2,5 m erreicht werden.
- Wassergehalt: Bei zu hohem Wassergehalt können bei Feinkorn-dominierten Böden scheinbar höhere Steifigkeiten registriert werden. Aufgrund der dynamischen Belastungen kann das im Boden enthaltene Wasser nicht entweichen, sodass Porenwasserdrücke entstehen, welche eine höhere Bodensteifigkeit vermitteln, als gegeben ist.
- Ebenflächigkeit des Verdichtungsplanums: Liegt die Bandage nicht vollflächig auf dem Boden auf, ändert sich aufgrund der reduzierten Kontaktfläche die statische Linienlast der Walzentrommel. Mit der Änderung eines Walzenparameters sind die Messwerte nicht mehr aussagekräftig.
- Betriebszustände der Bandage: Die FDVK-Systeme besitzen in Abhängigkeit vom jeweiligen Betriebszustand der Walze ein unterschiedliches Verhalten. Bei zu weichen oder zu steifen Verhältnissen befindet sich die Walze in einem Betriebszustand, bei welchem mit dem verwendeten Messsystem bzw. Algorithmus kein brauchbarer, interpretierbarer Messwert generiert wird.
- Amplitude/statische Linienlast: Je größer die Parameter sind, desto größer die Verdichtungswirkung. Die Amplitude und auch die statische Linienlast haben aber auch einen Einfluss auf die Messtiefe sowie den Betriebszustand und somit auch auf das Messwertniveau.
- Erregerfrequenz: Je höher die Frequenz ist, desto geringer wird das Messwertniveau.
- Fahrgeschwindigkeit: Je langsamer die Walze fährt, desto mehr Verdichtungsarbeit wird im Boden verrichtet, desto höher ist das Messwertniveau.
- Gefälle, Neigung der Verdichtungsfläche: Bei zu großen Neigungen der Verdichtungsfläche können z.B. durch unterschiedlich großen Schlupf der Antriebsoder Walzenräder unterschiedliche Messwerte entstehen. Bei zu großem Quergefälle kann es zudem schwierig werden, die Verdichtungsspur zu halten, sodass sich die Messwerte deswegen im Vergleich zur vorherigen Verdichtungsfahrt ebenfalls ändern.
- Kurven: Bei Messfahrten mit zu engen Kurven wird durch die unterschiedlichen Geschwindigkeiten an der Innen- und Außenseite der Bandage unterschiedliche Verdichtungsarbeit verrichtet. Enge Kurvenfahrten sind dementsprechend zu vermeiden.
- Liegezeit: Die Liegezeit zwischen abgeschlossener Verdichtung und Durchführung der Messwalzung sollte möglichst kurz gehalten werden. Durch Nachsetzungen,

Witterungsverhältnisse oder Verdichtung durch etwaigen Baustellenverkehr kann das Messwertniveau beeinflusst werden [35], [57], [62].

3.7 SEKUNDÄRE EINFLUSSFAKTOREN

- Position der Beschleunigungssensoren: Die Beschleunigungssensoren, welche das Bewegungsverhalten der Bandage aufnehmen, sind an zumindest einer Seite der Walze an der Lagerschale angebracht. Bei einer Verdichtungsfahrt am Schüttungsrand können somit, je nachdem ob die Aufnehmereinheit am Schüttungsrand oder auf der anderen Seite liegt, unterschiedliche Messwerte aufgezeichnet werden. Dies ist bei der Beurteilung entsprechend zu berücksichtigen.
- Zugrundeliegender Algorithmus des FDVK-Systems: Aus den an der Lagerschale gemessenen Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen werden anhand verschiedener Charakteristika des Signales durch einen festgelegten Algorithmus Rückschlüsse auf die Steifigkeit des Bodens gezogen. So werden beispielsweise Messwerte über eine Frequenzanalyse, über die eingebrachte Verdichtungsenergie oder die Steigung der Arbeitslinie in der Belastungsphase ermittelt (siehe auch Punkt 3.8.2). Untersuchungen haben gezeigt, dass die unterschiedlichen Messsysteme bei Veränderung von primären Einflussgrößen unterschiedlich große Auswirkungen besitzen [35].
- Nachgeschaltete Signalfilter: Um Störsignale herauszufiltern bzw. um den Messwert zu stabilisieren, wird das an den Beschleunigungssensoren aufgenommene Rohsignal auf seinem Weg bis zur Anzeigeeinheit entsprechend aufbereitet. Diese Filterung ist herstellerspezifisch unterschiedlich und beeinflusst dementsprechend den Messwertverlauf.
- Personelle Einflussgrößen: Für die Verwendung eines FDVK-Systems zur Verdichtungskontrolle ist eine entsprechend hohe Qualifikation beim ausführenden Personal erforderlich. Da die obig beschriebenen Einflussgrößen nicht nur vom Walzenfahrer kontrolliert werden können, müssen alle mit der FDVK befassten Personen (Walzenfahrer, Polier, Bauleiter, geotechnische Baubegleitung,...) entsprechend ihrem Aufgabenbereich mit der FDVK vertraut sein [35], [57], [62].

3.8 FLÄCHENDECKENDE DYNAMISCHE VERDICHTUNGSKONTROLLE (FDVK) MIT VIBRATIONSWALZEN

Die ersten Messsysteme, mit welchen eine Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle möglich wurde, sind für Vibrationswalzen entwickelt worden. Derzeit sind im Wesentlichen drei Messsysteme bzw. vier Messwerte mit entsprechender Verbreitung im Einsatz. Nachfolgend werden die Messsysteme bezugnehmend auf die FDVK-Wert Ermittlung näher beschrieben.

3.8.1 HISTORISCHE ENTWICKLUNG

Die ersten Feldstudien zur Entwicklung eines FDVK-Systems wurden im Jahre 1974 durch *Dr. Heinz Thurner* von der *Schwedischen Highway Administration* durchgeführt. Gemeinsam mit seinem Partner *Dr. Åke Sandstroem* (Fa. *Geodynamik AB*) wurde 1978, in Zusammenarbeit mit *Dr. Lars Forssblad* vom Walzenhersteller *Dynapac*, mit dem COMPACTOMETER und dem zugehörigen CMV-Messwert das erste FDVK-System entwickelt und auf den Markt gebracht.

Der Walzenhersteller *Bomag* entwickelte eigenständig im Jahr 1982 das TERRAMETER-System mit dem OMEGA-Wert bzw. ab dem Jahr 1990 mit dem E_{vib}-Wert.

Mit der Einführung des FDVK-SYSTEMS ACE (Ammann Compaction Expert) durch die Firma *Ammann* mit zugehörigem Bodensteifigkeitsparameter k_b im Jahr 1999 wurde ein drittes eigenständiges Messsystem entwickelt.

Alle anderen etablierten Walzenhersteller verwenden im Wesentlichen das Compactometersystem mit dem zugehörigen CMV-Wert (*Caterpillar* (CMVc), *Dynapac* (CMVd, MDP), *Hamm* (HMV), *Sakai* (CCV) und *Volvo* (CMVv)) [35].

3.8.2 FDVK-SYSTEME FÜR VIBRATIONSWALZEN

Nachfolgend werden die einzelnen Messsysteme mit den zugehörigen Messwerten kurz beschrieben [1], [4], [42]:

• Compactometer-System – CMV-Wert:

Das Compactometer-System der Fa. *Geodynamik AB* basiert auf der Analyse des in vertikaler Richtung gemessenen Beschleunigungssignales an der Lagerschale der Bandage. Das Signal der Aufnehmereinheit wird durch eine in der Prozessoreinheit durchgeführte Fourier-Analyse vom Zeit- in den Frequenzbereich transformiert (siehe Abbildung 2.23 links oben). Das durch die Interaktion mit dem Boden verzerrte Signal besteht aus der Grundschwingung sowie mehreren harmonischen als auch subharmonischen Oberschwingungen. Untersuchungen zeigten, dass im Betriebszustand "Abheben" die Steifigkeit des Bodens proportional zur Größe der ersten Oberwelle ansteigt. Der dimensionslose CMV-Wert (Compaction-Meter-Value) ist definiert als der Quotient der Amplitude der ersten Oberwelle a $(2 \cdot \omega_0)$ bezogen auf die Amplitude bei der Grundanregungs(kreis)frequenz a (ω_0) .

$$CMV=300\cdot\frac{a\left(2\cdot\omega_{0}\right)}{a\left(\omega_{0}\right)}$$

Der zweite Messwert beim Compactometer-System ist der dimensionslose sogenannte RMV-Wert (Resonance Meter Value). Beim Wechsel vom Betriebszustand "Abheben" zum Betriebszustand "Springen" entsteht ein Spekrtalanteil bei der halben Erreger(kreis)frequenz a $(0,5 \cdot \omega_0)$.

$$RMV = 100 \cdot \frac{a\left(0,5 \cdot \omega_{0}\right)}{a\left(\omega_{0}\right)}$$

Um ein vernünftiges Messwerteniveau zu erhalten, wurde festgelegt, die Verhältniswerte noch mit den Faktoren 300 bzw. 100 zu multiplizieren.

• Terrameter-System – OMEGA-Wert:

Das Terrameter-System der Fa. Bomag wertet die Beschleunigungssignale nicht im Frequenz-, sondern im Zeitbereich aus. Während das Compactometer nur die Vertikalbeschleunigungen verwendet. werden beim Terrameter die Beschleunigungssignale von zwei in einem Winkel von ± 45° stehenden Sensoren zur Berechnung herangezogen, wobei daraus die Vertikalbeschleunigung berechnet wird. Das Grundprinzip des OMEGA-Wertes beruht darauf, dass mit zunehmender Steifigkeit des Bodens immer weniger Energie in selbigen eingetragen werden kann. Der OMEGA-Wert ist definiert als die elastisch in den Boden eingebrachte Verdichtungsenergie W_{eff} und errechnet sich über das Integral der Bodenkontaktkraft F_b mal dem Schwingweg z über zwei Perioden. Bei Auftrag der Bodenkontaktkraft über den Schwingweg entspricht die eingehüllte Fläche der eingebrachten Verdichtungsenergie (siehe Abbildung 2.23 rechts oben).

OMEGA = Faktor
$$\cdot W_{eff} = Faktor \cdot \int_{z} F_{b} \cdot dz = Faktor \cdot \int_{2T} F_{b} \cdot \dot{z} dz$$

Die Bodenkontaktkraft wird in der Prozessoreinheit über die Trägheitskraft, die statische Achslast und die Erregerkraft berechnet. Durch ein- oder zweimalige Integration des Beschleunigungssignales erhält man die Schwinggeschwindigkeit Ż bzw. den Schwingweg z. Der Faktor ist geräteabhängig und bringt den OMEGA-Wert auf eine dimesionslose Größe zwischen 0 und 1000.

• Terrameter System – E_{vib}-Wert:

Beim E_{vib} -Wert werden die Beschleunigungssignale wie beim OMEGA-Wert im Zeitbereich über das Arbeitsdiagramm von Bodenkontaktkraft F und Schwingweg z ausgewertet. Der E_{vib} -Wert wird über die Steigung der Arbeitslinie in der Belastungsphase berechnet (siehe Abbildung 2.23 links unten). Die Steigung der Sekante in der Belastungsphase zwischen 40% und 90% der Bodenkontaktkraft ist durch $\Delta F/\Delta z$ definiert und ist die Grundlage für den E_{vib} -Wert, welcher sich unter Verwendung folgender Formel rekursiv errechnen lässt:

$$\begin{split} \frac{\Delta F}{\Delta z} &= \frac{E_{vib} \cdot 2 \cdot a \cdot \pi}{2 \cdot \left(1 \cdot v^2\right) \cdot \left\{2,14 + 0,5 \cdot \ln \left[\frac{\pi \cdot (2 \cdot a)^3 \cdot E_{vib}}{\left(1 - v^2\right) \cdot 16 \cdot (m_b + m_e + m_r) \cdot g \cdot \frac{d}{2}}\right]\right\} \end{split}$$
Legende:
$$E_{vib} &= \text{dynamisches Vibrationsmodul} \qquad [MN/m^2] \\ a &= \text{halbe Bandagenlänge L} \qquad [m] \\ v &= Querdehnzahl \qquad [-] \\ m_b &= Bandagenmasse \qquad [kg] \\ m_e &= Erregermasse \qquad [kg] \\ m_r &= Rahmenmasse \qquad [kg] \\ d &= Bandagendurchmesser \qquad [m] \end{split}$$

• ACE System – k_b-Wert:

Beim k_b-Wert werden die Beschleunigungssignale ebenfalls im Zeitbereich ausgewertet. Die Firma *Ammann* hat mit dem ACE ein Messsystem entwickelt, welches sich selbstregelnd dem Verdichtungszustand anpasst. Als Grundlage für die Auswertung dienen wieder die Bodenkontaktkraft und der Schwingweg im Arbeitsdiagramm. Die Bodenkontaktkraft am Umkehrpunkt wird herangezogen zur Berechnung der Bodensteifigkeit k_b, welche die Steigung der Geraden des Belastungsastes im Kraft-Weg-Diagramm beschreibt (siehe Abbildung 2.23, rechts unten). Bei der Auswertung wird unter Verwendung unterschiedlicher Formelapparate zwischen Kontaktbetrieb und periodischem Kontaktverlust unterschieden.

Messwert k_b im Kontaktbetrieb:

$$k_{b} = \omega^{2} \cdot \left\lfloor \left(m_{b} + m_{e} \right) + \frac{(m_{e} \cdot e) \cdot \cos{(\phi)}}{A_{(z)}} \right\rfloor$$

Legende:

Messwert k_b bei periodischem Kontaktverlust:

$$k_{b} = \frac{F_{b(z=0)} - (m_{b} + m_{e} + m_{r}) \cdot g}{A_{(z)}}$$

Legende: $F_{(z=0)} = Bodenkontaktkraft am Umkehrpunkt$ [N]

In der nachfolgenden Abbildung sind die obig beschriebenen FDVK-Systeme in Diagrammform dargestellt.



Abbildung 2.23: FDVK-Werte für Vibrationswalzen: CMV, OMEGA, E_{VIB} , k_B [4]

Von KOPF und ERDMANN [46] wurden 2005 numerische Simulationen einer Walzenbandage nach der Theorie des elastisch-isotropen Halbraumes durchgeführt. Nach der näherungsweisen Betrachtung als Einmassenschwinger, dessen Parameter über die Betrachtung des Halbraumes als Konus ermittelt werden, wurden die unterschiedlichen FDVK-Werte einem objektivierten Vergleich unterzogen [46].

In Abbildung 2.24 sind die Ergebnisse der FDVK-Werte aus Simulationsberechnungen von jeweils unterschiedlich stark angeregten Vibrationswalzen auf homogenem Untergrund mit unterschiedlicher Steifigkeit dargestellt. Durch Steigerung des E-Moduls des Bodens wird die zunehmende Verdichtung im Zuge des Verdichtungsfortschritts simuliert [46].



Abbildung 2.24: Verlauf der FDVK-Messgrößen aus Simulationsberechnungen von unterschiedlich stark angeregten Vibrationswalzen auf homogenem Untergrund variabler Steifigkeit [46]

Auf der Abszisse ist der für die Simulation verwendete E-Modul des Bodens mit zunehmender Steifigkeit dargestellt. Auf der Ordinate ist die relative Amplitude, bezogen auf die maximale Amplitudengröße, aufgetragen. Die Ergebnisse der FDVK-Werte (CMV, OMEGA, E_{vib} , k_b) sind farblich abgestuft dargestellt. Des Weiteren sind die Wechsel der Betriebszustände durch eine grüne Linie (Wechsel von Kontakt zu Abheben), eine gelbe Linie (von Abheben zu Springen) und durch eine rote Linie (von Springen zu Chaos) eingezeichnet.

Das "ideale Messergebnis" würde sich durch äquidistante, senkrechte Isolinien über den gesamten Bereich auszeichnen. Dies würde bedeuten, dass sich die FDVK-Messgröße unabhängig von der Größe der dynamischen Anregung (vertikalen Amplitude) über jeden Betriebszustand hinweg, direkt proportional zur Bodensteifigkeit bzw. zum E-Modul des Bodens verhält.

Die Simulationsberechnungen zeigen, dass bei Veränderung der Bodensteifigkeit die FDVK-Systeme bei gleichen Untergrundverhältnissen und gleichen Walzeneinstellungen unterschiedliche, jedoch nur bedingt vergleichbare Ergebnisse liefern.

Keine der FDVK-Werte ist völlig unabhängig von der dynamischen Anregung, wobei der E_{vib} und der k_b -Wert noch eine geringere Abhängigkeit zeigen als der CMV- und der OMEGA-Wert. Da aber bei einer Verdichtungskontrolle mittels FDVK die Amplitude der dynamischen Anregung (stabile Walzenparameter) im Regelfall nicht geändert wird, können die klassischen Messgrößen wie CMV und OMEGA ebenfalls verwendet werden.

Klar ersichtlich ist, dass der Betriebszustand der Walze einen deutlichen Einfluss auf die Messgröße besitzt. Im Betriebszustand Chaos werden keine vernünftigen Messwerte generiert, im Betriebszustand Springen werden – je nach verwendeter Messgröße – nur bedingt verwendbare FDVK-Werte erzeugt.

Die Diagramme eignen sich zur Beurteilung der Sensibilität von unterschiedlichen FDVK-Werten in unterschiedlichen Betriebszuständen bei steigendem Verdichtungszustand des Bodens [46].

In Abbildung 2.25 ist das Verhalten der unterschiedlichen FDVK-Messgrößen, bezogen auf den E-Modul des Bodens, nochmals dargestellt (unter der Voraussetzung einer konstant bleibenden Amplitude entspricht dies einem horizontalen Schnitt durch Abb. 2.24). Keiner der FDVK-Werte besitzt eine vollkommene Linearität in den am häufigsten verwendeten Betriebszuständen Kontakt und Abheben. Es ist jedoch ersichtlich, dass die FDVK-Werte E_{vib} und k_b noch annähernd lineare Ergebnisse liefern.



Abbildung 2.25: Vergleich der FDVK-Werte bei den verschiedenen Betriebszuständen [7]

3.8.3 MESSTIEFE

Die Messtiefe ist bei Verwendung von FDVK-Systemen von der Verdichtungstiefe unbedingt zu unterscheiden. In der RVS 08.03.02 werden bei lagenweisem Kieseinbau folgende Richtwerte angegeben:

- 2 t Walze: rund 0,4 0,6 m
- 10 t Walze: rund 0,6 1,0 m
- 12 t Walze: rund 0,8 1,5 m

Im Allgemeinen ist die Messtiefe größer als die Verdichtungstiefe und kann je nach Rahmenbedingungen bis zu 2,5 m unter das Verdichtungsplanum reichen. Die Messtiefe ist abhängig von der statischen Linienlast, der Amplitude, der Frequenz sowie den Untergrundverhältnissen.

3.9 FLÄCHENDECKENDE DYNAMISCHE VERDICHTUNGSKONTROLLE (FDVK) MIT OSZILLATIONSWALZEN

3.9.1 HISTORISCHE ENTWICKLUNG

Oszillationswalzen werden seit Jahrzehnten ausschließlich von der Fa. *Hamm AG* (seit ca. 1980 in Lizenz von der Fa. *Geodynamik AB*) bzw. erst seit wenigen Jahren von der Fa. *Bomag* GmbH gebaut und entwickelt.

Während für die Flächendeckende Dynamische Verdichtungskontrolle bei Vibrationswalzen bereits 1978 das Compactometer mit dem zugehörigen CMV-Wert als erstes FDVK-System auf den Markt gebracht wurde, ist bei den Oszillationswalzen nach wie vor kein funktionierendes FDVK-System in Serie gegangen. Von der Fa. *Geodynamik AB* wurde im Jahr 1997 mit dem Oszillometer und dem zugehörigen Verdichtungskennwert OMV (Oscillation Meter Value) das erste und bisher einzige FDVK-System vorgestellt. Das System hat sich allerdings in der Praxis nicht bewährt und wurde demnach nie in Serie gebaut [57].

Seit 2011 läuft ein von der *Hamm AG* in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Wien (Institut für Geotechnik) groß angelegtes Forschungsprojekt, bei welchem erstmals ein System zur Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle für Oszillationswalzen entwickelt wurde. Die Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen sowie die Ergebnisse der durchgeführten semi-analytischen Modellierungen des Walze-Boden-Interaktionssystems zur Ermittlung eines systematischen Zusammenhangs zwischen der Steifigkeit des Bodens und dem Bewegungsverhalten der Oszillationsbandage sind in der Dissertation von Pistrol [57] ausführlich beschrieben worden. In dieser Arbeit wird auf Basis des genannten Zusammenhangs ein völlig neuer FDVK-Wert für Oszillationswalzen definiert [57]. Die Methodik sowie der Algorithmus zur Berechnung des FDVK-Wertes wurden zum Patent angemeldet. Ziel ist es, mit dem neuen FDVK-System in Serienproduktion zu gehen. Nachfolgend werden die FDVK-Systeme für Oszillationswalzen detailliert beschrieben.

3.9.2 FDVK-SYSTEME FÜR OSZILLATIONSWALZEN

3.9.2.1 Oszillometer-System – OMV-Wert

Das Oszillometer besitzt im Wesentlichen dieselben Komponenten und denselben Aufbau wie das Compactometer. Der Unterschied besteht lediglich in der Verwendung einer anderen Prozessoreinheit sowie auch darin, dass der Beschleunigungssensor nicht die Vertikal-, sondern die Horizontalbeschleunigungen registriert. Selbige werden ebenfalls an der ungedämpften Lagerschale der Bandage aufgezeichnet. Die Analyse des Signals erfolgt im Frequenzbereich. Der OMV-Wert ist als das Produkt vom Betrag der zeitlichen Ableitung des horizontalen Beschleunigungssignals an dessen Nulldurchgang mit der Dauer einer Erregerperiode definiert. Bei der Ermittlung des OMV-Wertes werden die gemessenen Horizontalbeschleunigungen in Abschnitte einer halben Erregerperiode ausgewertet. Das mittels der Methode der kleinsten Fehlerquadrate generierte Signal ist eine Parabel dritter Ordnung. Von diesen Parabelstücken wird nun der OMV-Wert berechnet, wobei immer die Werte eines Parabelstücks mit negativer Ableitung und des benachbarten mit positiver Ableitung in deren Nulldurchgang gemittelt werden. Der somit gewonnene OMV-Wert wird um Unausgewogenheiten (Periodizitäten) der Bandage auszugleichen - über eine Bandagenumdrehung gemittelt [42], [57].

3.9.2.2 Neu entwickelter FDVK-Wert für Oszillationswalzen – FDVK_{OSZI}

3.9.2.2.1 Allgemeines / Grundlagenforschung

Im Zuge des Forschungsprojektes wurden bei den experimentellen Feldversuchen in den Jahren 2012 und 2014 groß angelegte Untersuchungen zum Bandagen- sowie Untergrundverhalten bei Oszillationsverdichtungen durchgeführt. Unter anderem wurden bei den Feldversuchen, welche jeweils mit einer HAMM-Tandemwalze des Typs HD⁺90 VO durchgeführt wurden, folgende Parameter gemessen bzw. beobachtet [43], [57], [65], [66]:

- Bewegungsverhalten des Bodens bei Oszillationsverdichtung durch Installation von Triax-Beschleunigungsaufnehmern, einer Druckmessdose sowie eines speziellen Verformungsmessgeräts, mit welchem die elastischen und plastischen Differenzverformungen in der zu verdichtenden Schicht gemessen werden konnten. Zusätzlich wurden orthogonal zur Fahrtrichtung die durch die Verdichtung hervorgerufenen Erschütterungen im Untergrund und deren räumliche Verteilung gemessen.
- Zusätzlich zu den standardmäßig gemessenen Beschleunigungen der Bandage an der Lagerschale wurden Beschleunigungssensoren auf der Innenseite des Walzenmantels der rotierenden Bandage installiert. Damit konnten das dynamische Rotationszentrum, die Bodenkontaktkräfte auf das dynamische System und auch Effekte, welche im Falle einer unausgewogenen Bandage entstehen, ermittelt werden.

- Um die Kontaktlänge zwischen Walze und Untergrund zu ermitteln, wurden in die Bandage Pfeifen und Mikrofonkapseln, Körperschallsensoren sowie Wegsensoren eingebaut.
- Neben den Vergleichsversuchen mit der dynamischen Lastplatte wurden viele weitere technische bzw. zur Ausarbeitung erforderliche Parameter, wie z.B. Lage der Bandage über ein Referenzrad, die Position der Walze mittels Laser oder GPS sowie die Bodenkennwerte anhand von Laborversuchen, ermittelt.

3.9.2.2.2 Bewegungsverhalten der Oszillationsbandage

Im Zuge der experimentellen Untersuchungen zeigte sich, dass die Bandage bei Oszillationsverdichtung je nach Bodensteifigkeit sowie den vorgegebenen Prozessparametern ein spezifisches Bewegungsverhalten besitzt. So zeigten die in der Lagerschale der Bandage aufgezeichneten Beschleunigungen, dass die Signale in vertikaler Richtung eine Schwingung mit der doppelten Frequenz der Anregungsfrequenz zeigen. Dies lässt sich laut PISTROL [57] dadurch erklären, dass durch die rasche Vorwärts-Rückwärts-Bewegung der Bandage, selbige durch die Begrenzungen der Bug- und Heckwelle der Setzungsmulde gezwungen wird, zwei Bewegungszyklen in vertikaler Richtung auszuführen. Daraus resultieren sekundäre Vertikalbeschleunigungen mit der doppelten Frequenz der Anregung (siehe Abbildung 2.26).



Abbildung 2.26: Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen des Bodens in einer Tiefe von 50 cm unter GOK während einer Oszillationsmessfahrt bei den Feldversuchen 2012 [57]

Werden die gemessenen Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen in einem Diagramm dargestellt, so ergibt sich eine für Oszillationsverdichtung charakteristische Form, die einer liegenden Acht ähnelt (siehe Abbildung 2.27).

Abbildung 2.27: Beschleunigungen für zwei Perioden im Lager der Oszillationsbandage [57]



Es zeigte sich auch, dass sich die beschriebene Achter-Form mit größer werdender Bodensteifigkeit ausdehnt. Somit wurde eine eindeutige und reproduzierbare Abhängigkeit des Bewegungsverhaltens der schwingenden Bandage von den Untergrundverhältnissen experimentell festgestellt. In der Dissertation von PISTROL [57] konnte die Proportionalität zwischen der Ausdehnung der Form einer liegenden Acht aus Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen und der zunehmenden Bodensteifigkeit durch eine semianalytische Modellierung des Walze-Boden-Interaktionssystems bestätigt und nachgewiesen werden (siehe Abbildung 2.28 und Abbildung 2.29).



Abbildung 2.28: Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen einer oszillierenden Bandage nach dem mechanischen Bandage-Boden-Modell für unterschiedliche dynamische Schubmoduln Gd des Bodens [57]

Abbildung 2.29: Der FDVK-Wert in Abhängigkeit von der Bodensteifigkeit in Form des dynamischen Schubmoduls Gd des Bodens [57]

3.9.2.2.3 Algorithmus zur Berechnung des FDVK_{OSZI}-Wertes

Wie aus den experimentellen Untersuchungen sowie dem semi-analytischen Berechnungsmodell bekannt, kann aus der umschriebenen Fläche der Vertikal- und Horizontalbeschleunigungen in Form einer liegenden Acht direkt proportional auf die Bodensteifigkeit geschlossen werden. Wie in Abbildung 2.27 ersichtlich, bildet sich in der Regel bei einer fahrenden Walze keine vollkommen symmetrische Achterform aus, sodass aufeinanderfolgende Achterformen nicht deckungsgleich sind und keine geschlossene Form entsteht, bei welcher die Ermittlung des Flächeninhaltes vergleichsweise einfach wäre. Der dementsprechend erforderliche Algorithmus zur Berechnung eines FDVK-Wertes, welcher von PISTROL [57] erarbeitet und detailliert beschrieben wurde, wird nachfolgend zusammenfassend dargestellt:

Zur Ermittlung des FDVK-Wertes werden die Koordinatenpaare der Vertikalund der Horizontalbeschleunigungen verwendet. Werden die Koordinatenpaarpunkte in chronologischer Reihenfolge miteinander verbunden, entsteht die bereits beschriebene Achterform (siehe Abbildung 2.30).



Abbildung 2.30: Koordinatenpaare von Vertikal- und Horizontalbeschleunigungen über die Dauer einer Anregungsperiode, verbunden in chronologischer Reihenfolge [57]

 werden die Koordinatenpaarpunkte einer Anregungsperiode nach der Größe der Horizontalbeschleunigung geordnet, entsteht eine Art Schwingung (siehe Abbildung 2.31).



Abbildung 2.31: Koordinatenpaare von Vertikal- und Horizontalbeschleunigungen über die Dauer einer Anregungsperiode, nach der Größe der Horizontalbeschleunigung geordnet und verbunden [57]

Für diese Schwingung kann eine • untere und eine obere Einhüllende ermittelt werden (siehe Abbildung 2.32). Die somit vollkommen umschlossene Fläche kann nun mittels numerischer Integration berechnet werden. Der Flächeninhalt entspricht dem FDVK-Wert.



Abbildung 2.32: Obere und untere Einhüllende der nach der Größe der Horizontalbeschleunigung geordneten und verbundenen Koordinatenpaare. Die Fläche zwischen den beiden Einhüllenden entspricht dem vorgeschlagenen FDVK-Wert [57]

3.9.2.2.4 Periodizität

Unausgewogenheiten einer Walzenbandage bewirken ein Bewegungsverhalten, welches sich mit jeder Umdrehung der Bandage wiederholt. Diese Periodizitäten können den Verlauf von Messwerten negativ beeinflussen und verzerren. Die schon in Punkt 2.7.2 beschriebenen statischen und dynamischen Unausgewogenheiten der Bandage überlagern sich und bewirken eine Periodizität der Bandage. Diese Periodizität ist nicht nur vom verwendeten Walzentyp bzw. den Walzenparametern, sondern walzenspezifisch von der Qualität der Konstruktion und Fertigung der Oszillationsbandage abhängig. Dementsprechend entscheidend ist möglichst perfekte Bandage zu es, eine fertigen, um die Unausgewogenheiten der Bandage auf ein Minimum zu reduzieren.

Zur Reduzierung der Effekte der Periodizität einer Bandage auf den unter Punkt 3.9.2.2.3 beschriebenen FDVK-Wert wurde für die Korrektur der Periodizität ein Algorithmus entwickelt. Nachfolgend wird der Korrektur-Algorithmus, welcher von PISTROL [57] erarbeitet und detailliert beschrieben wurde, zusammenfassend dargestellt:

 Die Ermittlung der Bandagenumdrehung erfolgt im Regelfall mittels Näherungsschalter am Rahmen der Bandage, welcher bei jeder Umdrehung ein Fahnenblech der Bandage detektiert (siehe Abbildung 2.33).



Abbildung 2.33: Darstellung eines zu korrigierenden Messwerteverlaufes. Fette vertikale Striche markieren vollständige Bandagenrotationen [57]

 Für die Korrektur werden nur vollständige Bandagenumdrehungen verwendet. Das Anfahren und Abbremsen wird in den Korrektur-Algorithmus nicht einbezogen. Das FDVK-Signal wird beidseitig abgeschnitten (siehe Abbildung 2.34).



Abbildung 2.34: Darstellung Messwertebereiches von ausschließlich vollen Umdrehungen [57]

 Anschließend wird das Signal nach jeder Bandagenrotation geschnitten und separat als Vektor abgespeichert (siehe Abbildung 2.35).



Abbildung 2.35: Messwertverläufe der separierten Bandagenrotationen [57]
Die einzelnen Messwerte werden nun übereinandergelegt. Bei unterschiedlichen Fahrgeschwindigkeiten sind zuerst die Vektorlängen zu harmonisieren. Nach Abzug des Mittelwertes des FDVK-Signales oszillieren die Messwertverläufe um den Wert Null.



Abbildung 2.36: Übereinanderlegen aller Bandagenrotationen von: unterschiedlicher Länge, korrigierter nun gleicher Länge und nach Abzug des Mittelwertes [57]

Durch arithmetische Mittelung der um den Nullwert oszillierenden Kurven erhält man jenes Bewegungsverhalten, welches in allen Umdrehungen wiederkehrt. Nach einer weiteren Glättung und Aufbereitung des Signales kann diese Periodizität weitgehend herausgefiltert werden. Abschließend werden die einzelnen korrigierten Messwertverläufe wieder zusammengesetzt (siehe Abbildung 2.37).



Abbildung 2.37: Ausgangssignal (mit Periodizität) und mit dem beschriebenen Algorithmus korrigiertes Signal [57]

4 FELDVERSUCHE IN DER KIESGRUBE FISCHAMEND

4.1 ALLGEMEINES

Im folgenden Abschnitt wird der Feldversuch – durchgeführt im Zeitraum vom 12.10.2015 bis 27.11.2015, in der Kiesgrube der *HABAU Hoch- u. Tiefbaugesellschaft m.b.H.* in Fischamend – näher beschrieben und dargestellt. Das Testfeld besaß eine Größe von ca. 80 m x 20 m. Diese Fläche wurde mit einem Grader – ausgestattet mit einem 3D-Positionierungssystem mit Totalstation – plan gezogen. Durch Abtrag von bis zu 30 cm im nordwestlichen Bereich konnte somit eine ebene Testfläche mit einem Gefälle von rund 3% gegen Osten (zur Ableitung von Oberflächenwässern) im in situ gewachsenen Schotter hergestellt werden (siehe Foto 2.2). Parallel zur Teststecke wurde ein Baustellencontainer samt Stromaggregat positioniert, welcher als Leitstelle diente.



Foto 2.2: Testfeld in der Kiesgrube der Fa. *Habau* (auf den in situ gewachsenen Terrassenschottern, bereits mit dem Grader plan abgezogen, noch ohne Schüttmaterial; A. Leitich, am 12.10.2015)

Neben den Feldversuchen mit korngestütztem Schüttmaterial auf dem beschriebenen Haupttestfeld wurden in weiterer Folge noch ergänzende Untersuchungen direkt auf den in situ gewachsenen Terrassenschottern und auch auf den ebenfalls in der Kiesgrube anstehenden Feinkorn-dominierten Lösslehmen durchgeführt.

Die Feldversuche wurden von der TU Wien (Univ.Ass. DI Dr. Johannes Pistrol, Bsc; Univ.Ass. Dipl.-Ing. Mario Hager, Bsc; Mag. Alexander Leitich, Bsc; Sofie Müller) in Zusammenarbeit mit Mitarbeitern der *Hamm AG* (Dipl.-Ing. (FH) Werner Völkel; Dipl.-Ing. Tobias Fehr; Dipl.-Ing. Jochen Klüher) vor Ort abgewickelt.

4.1.1 ORT DER FELDVERSUCHE / AREAL

Die Feldversuche wurden in der Kiesgrube der *HABAU Hoch- u. Tiefbaugesellschaft m.b.H.* im Gemeindegebiet von Fischamend, unweit des Flughafens Wien-Schwechat, durchgeführt (siehe Abbildung 2.38 und Abbildung 2.39).



Abbildung 2.38: Ausschnitt aus AMAP-Online – Durchführungsort der Feldversuche in Fischamend (blauer Kreis beschreibt den Projektstandort)



Abbildung 2.39: Ausschnitt aus Google Maps – Satellitenbild der Kiesgrube (blauer Kreis beschreibt den Projektstandort)

Das Testfeld besitzt folgende Koordinaten:

| Koordinatensystem | Rechtswert | Hochwert |
|-------------------|------------|----------|
| Gauß-Krüger M34 | 19305 | 331282 |

Tabelle 2.12: Koordinaten Testfeld (Messpunkt: Testfeldmitte; Genauigkeit ± 5 m)

Bei dem Kiesabbaugebiet der Firma Habau in Fischamend, auf welchem die Feldversuche durchgeführt wurden, handelt es sich um ein weitläufiges, großflächiges und flaches Areal mit ausreichendem Platzangebot ohne jeglichen Anrainer, welcher durch die Versuchsdurchführung gestört werden könnte. Allein der nordöstlichste Teil der Kiesgrube besitzt eine räumliche Ausdehnung von rund 16.000 m² Fläche, welcher zum überwiegenden Teil zum Zwecke der Versuchsdurchführung genutzt werden konnte. Im Versuchsareal sind keine Strommasten oder Einbauten (Strom-, Wasser-, Abwasserleitungen,...), die das Messergebnis beeinflussen könnten. Das Versuchsareal mit einer Geländeoberkante von rd. 180 m.ü.A. liegt vollflächig im in situ gewachsenen Boden.

4.1.2 GEOLOGISCHE UNTERGRUNDSITUATION

Das Versuchsareal befindet sich aus geologischer Sicht im Zentralbereich des Wiener Beckens, einem tektonisch aktiven Zerrungsbecken zwischen dem Alpenbogen und den Karpaten (siehe Abbildung 2.40). Dieses inneralpine Molassebecken, welches sich während des Jungtertiärs im Bereich des Projektstandortes um rd. 5.500 m abgesenkt hat, wurde anschließend mit marinen, brackischen, limnischen sowie in den oberen, jüngsten Teilen zunehmend fluviatilen Sedimenten wieder verfüllt. Im Zuge der Eiszeiten (Pleistozän) wurden im Hangenden von der Donau mächtige Grobklastika abgelagert, welche durch den mehrmaligen Wechsel von Ablagerung und Erosion in Form von Schotterterrassen das heutige Landschaftsbild prägen. Auf Basis von zwei rund 80 m südlich bzw. 190 m nördlich des Testfeldes abgeteuften Bohrungen kann für die Terrassenschotter eine Mächtigkeit von rd. 10 m (± 2 m)



Abbildung 2.40: Wiener Becken (gelb hinterlegt) [25]

angegeben werden [34]. Die am Projektstandort anstehenden sandigen Kiese (Fein-, Mittel-, Grobkiese) charakterisieren hinsichtlich der Kornzusammensetzung bzw. der Ablagerungsverhältnisse einen Schotterkörper als Produkt ehemals leicht gewundener, zum Teil auch geradlinig angeordneter Rinnensysteme mit der Größe der Komponenten entsprechend den Transportkapazitäten (siehe Foto 2.3). Die Schotter liegen in überkonsolidierter und teilweise kalzitisch verkitteter Form vor, sodass in der Kiesgrube bis zu 8 m hohe, quasi lotrechte Schotterwände zu beobachten sind. Sekundäre Auflockerungsprozesse, z.B. durch Frosteinwirkung, konnten keine bzw. nur geringmächtig – mit einer maximalen Tiefenwirkung von 10 cm – an der Geländeoberfläche beobachtet werden.



Foto 2.3: Typische Ablagerungsstrukturen der Terrassenschotter in der Kiesgrube der Fa. Habau (A. Leitich, am 12.10.2015)

Im Projektumfeld weiteren sind die Terrassenschotter großflächig von einer geringmächtigen Lösslehmdecke überzogen. Während am Haupttestfeld bzw. am Nebentestfeld "Terrassenschotter" diese Lösslehmdecke für den geplanten Kiesabbau bereits abgezogen wurde, liegt selbige auf dem Nebentestfeld "Lösslehm" mit einer Mächtigkeit von rd. 0,8 m vor (siehe Foto 2.4). Es handelt sich entsprechend einer geologischen Feldansprache um ein leicht toniges Feinsand-Schluff-Gemisch. Schichtungen, Bänderungen oder sonstige Sedimentstrukturen konnten keine beobachtet werden.

Der geschlossene Grundwasserkörper liegt in einer Tiefe von > 10 m und ist somit nicht projektrelevant [34].



Foto 2.4: Grenzfläche Terrassenschotter zu den im Hangenden befindlichen Lösslehm (A. Leitich, am 06.11.2015)

4.1.3 METEOROLOGISCHE BEDINGUNGEN

Die Niederschlagsmesswerte von der nächstgelegenen dauerregistrierenden Wetterbeobachtungsstelle (Messstelle: Schwechat-Aichhof, HZB-Nr.: 116145, rund 8,5 km westnordwestlich des Projektareales), vom Hydrographischen Dienst Niederösterreich, sind in Diagramm 2.1 dargestellt.



Diagramm 2.1: Niederschlagsdaten - Messstelle Schwechat-Aichhof

Wie auch später in Kapitel 5 *Versuchsauswertung und Ergebnisse* ersichtlich, war das Versuchsteam eher mit widrigen Wetterbedingungen konfrontiert. Die ursprünglich zur Versuchsdurchführung eingeplanten rund 10 Feldversuchstage wurden, da es immer wieder regnete, somit über einen Zeitraum von rund 2 Monaten absolviert. Da es insbesondere am Beginn der Feldversuche regnete, war das leicht schluffige Sand-Kies-Gemisch, welches als Schüttmaterial verwendet wurde, durchfeuchtet, sodass kein bzw. nur sehr geringer Verdichtungszuwachs im Zuge der Verdichtungsfahrten beobachtet werden konnte.

Wie sich herausstellte, wurde das Schüttmaterial, bedingt durch die herbstlichen Witterungsverhältnisse mit Lufttemperaturen zwischen 15°- 0°durch den Einfluss der Sonnenenergie und des Windes nicht mehr ausreichend aufgetrocknet.

4.2 TESTFELDER

4.2.1 HAUPTTESTFELD – SPUREN 1-8

Das Haupttestfeld befindet sich auf den Grundstücken GN 420/2 und 428/4, beide Katastralgemeinde 5203 Fischamend Dorf (Koordinaten Testfeldmitte: GK M34: RW: 19305 HW: 331282). Wie schon unter Punkt 4.1 beschrieben, besitzt das Haupttestfeld eine Fläche von ca. 80 m x 20 m, welche mit dem Grader plan gezogen wurde (siehe Foto 2.2), sodass insgesamt acht parallele Testspuren mit einer Gesamtlänge von rund 70 m für Testzwecke zur Verfügung standen. Bevor das Schüttmaterial aufgebracht wurde, sind bei den Spuren 1 bis 3 jeweils zwei künstliche "Schwachstellen" eingebaut worden, um deren Einfluss auf das Bewegungsverhalten der Walze bzw. auf die FDVK-Werte studieren zu können. Als Schwachstellenmaterial wurden je sechs Platten mit 1,5 x 5,0 m der Materialien *Regufoam 270 plus* und *Regufoam 510 plus* mit einer Dicke von 25 mm verwendet. Die Regufoammatten der *BSW Berleburger Schaumstoffwerk GmbH* sind gemäß Datenblatt gemischtzellige Polyurethanschaummatten, welche im Regelfall zur Schwingungsisolierung im Maschinenbau Anwendung finden.

Tabelle 2.13: Materialeigenschaften - Schwachstellenmaterial Regufoam 270 plus und Regufoam 510 plus [17]

| Schwachstellenmaterial | Regufoam 270 plus | Regufoam 510 plus |
|------------------------------|-----------------------------------|---------------------------------|
| optimaler Lastbereich | 0,028 bis 0,042 N/mm ² | 0,11 bis 0,22 N/mm ² |
| statischer Elastizitätsmodul | 0,25 bis 0,45 N/mm ² | 1,1 bis 1,7 N/mm² |

Nachdem das vom Grader vorbereitete Rohplanum, um Unebenheiten auszugleichen, mit jeweils einer dynamisch erregten Vorwärtsfahrt und einer statischen Verdichtungsfahrt retour vorplaniert wurde, wurden die Schwachstellen, wie in Foto 2.5 und in Abbildung 2.41 dargestellt, aufgelegt.



Foto 2.5: Künstlich hergestellte Schwachstellen im Haupttestfeld auf den Spuren 1 bis 3 (A. Leitich, am 13.10.2015)



Abbildung 2.41: Haupttestfeld - Lage der Schwachstellen

Als Schüttmaterial wurde der in der Kiesgrube abgebaute, unaufbereitete, sandige Kies verwendet. Um das Material nicht innerhalb weniger Walzübergänge vollkommen zu verdichten, sondern deutlich mehr Messfahrten durchführen zu können, wurde die Schüttmächtigkeit mit 45 cm absichtlich zu groß gewählt.



Fotos 2.6: Herstellung der Schüttlage (A. Leitich, am 13.10.2015)

Um auf dem Testfeld eine konstante Fahrgeschwindigkeit gewährleisten zu können, wurden am Beginn und am Ende des Testfeldes zusätzlich Rampen geschüttet, um ein Umsetzen und Hochfahren der Maschine zu ermöglichen.

Wiederaufbereitung:

Nach einer entsprechend des Versuchsprogrammes erfolgten Verdichtung des Testfeldes wurde das Schüttmaterial mit einem vom Traktor gezogenen Pflug bis in eine Tiefe von rund 20 cm wieder aufgerissen, sodass erneut Verdichtungsfahrten durchgeführt werden konnten (siehe Fotos 2.7).



Fotos 2.7: "Auflockern" des verdichteten Schüttmaterials mittels Pflug (A. Leitich, am 19.10.2015)

Bodenaustausch:

Wie schon unter Punkt 4.1.3 beschrieben, hat es insbesondere zu Beginn der Feldversuche häufig geregnet, sodass das Schüttmaterial durchfeuchtet war und somit kein bzw. nur sehr geringer Verdichtungszuwachs im Zuge der Verdichtungsfahrten beobachtet werden konnte. Es wurde dementsprechend entschieden, das durchfeuchtete Schüttmaterial am Haupttestfeld auf einer Länge von 10 m zu entfernen und gegen neues Schüttmaterial auszutauschen. Beim Entfernen des Schüttmaterials zeigte sich, dass insbesondere in tieferen Bereichen der Schüttung das Material wassergesättigt vorlag (siehe Fotos 2.8).



Fotos 2.8: Entfernen des Schüttmaterials auf einer Breite von 10 m; stark durchfeuchtetes Schüttmaterial (A. Leitich, am 04.11.2015)

Das Bodenaustauschmaterial, welches im Haupttestfeld im Bereich zw. 40 – 50 m (zwischen den beiden Schwachstellen) am 4.11.2015 ausgetauscht wurde, stammt ebenfalls vom Abbaufeld der Kiesgrube. Entsprechend den natürlichen Schwankungen in der Kornzusammensetzung wurde im Vergleich zum ursprünglichen Schüttmaterial ein etwas feinkörnigeres Schüttmaterial eingebaut. Entsprechend einer geologischen Feldansprache ist das Material als gering schluffiger, steiniger, stark kiesiger Sand anzusprechen (siehe Fotos 2.9).



Fotos 2.9: Neu aufgebrachtes Bodenaustauschmaterial auf einer Breite von 10 m; gering schluffiger, steiniger, stark kiesiger Sand (A. Leitich, am 04.11.2015)

4.2.2 NEBENTESTFELD TERRASSENSCHOTTER – SPUREN 9-10

Auf dem Nebentestfeld "Terrassenschotter" wurden 30.10.2015 auf zwei am parallel verlaufenden Spuren mit einer Länge von 20 m Vergleichsfahrten auf den in situ gewachsenen Terrassenschottern durchgeführt (siehe Abbildung 2.42 und Foto 2.10). Der an der Geländeoberfläche sandige anstehende Kies wurde dafür mit dem Pflug bis in eine Tiefe von rund 20 cm aufgelockert.

Position Retroreflektoren



Abbildung 2.42: Nebentestfeld Terrassenschotter



Foto 2.10: Nebentestfeld Terrassenschotter (A. Leitich, am 06.11.2015)

4.2.3 NEBENTESTFELD LÖSSLEHM – SPUREN 11-13

Um auch FDVK-Werte auf einem Feinkorn-dominierten Untergrund zu generieren, wurden für Vergleichszwecke

Verdichtungsfahrten auf Lösslehm durchgeführt. Dazu wurde südlich des Haupttestfeldes (in einem Bereich, wo die Terrassenschotter der überlagernde Lösslehm noch nicht abgetragen wurde) ein Testfeld mit 3 parallel verlaufenden Spuren mit je 40 m Länge angelegt (siehe Abbildung 2.43 und Foto 2.11). Die Lösslehmmächtigkeit konnte 12 m südlich des Testfeldes an einer Abbaukante gemessen werden und betrug rund 75 cm (\pm 10 cm).



Abbildung 2.43: Nebentestfeld Lösslehm



Foto 2.11: Nebentestfeld Lösslehm (A. Leitich, am 06.11.2015)

4.3 MESSAUSRÜSTUNG UND AUSSTATTUNG

4.3.1 MESSWALZEN – FDVK-OSZILLATIONSWALZEN

Für die Feldversuche wurden von der *Hamm AG* folgende Testwalzen zur Verfügung gestellt (siehe Foto 2.12):

- H7i VIO: Walzenzug mit Vibration und Oszillation
- H13i VIO: Walzenzug mit Vibration und Oszillation
- HD+140i VO: Tandemwalze mit Vibration (vordere Bandage) und Oszillation (hintere Bandage)



Foto 2.12: Testwalzen (J. Pistrol, am 12.10.2015)

Ziel der Testfahrten war es, das auf den Testwalzen installierte FDVK-System unter Verwendung von unterschiedlichsten Walzen- und Prozessparametern zu testen. Dementsprechend konnten bei den verwendeten Walzen bei Verwendung als Oszillationswalze die Erregerfrequenz (von f = 27 Hz bis f = 40 Hz) und die Geschwindigkeit von v = 2 km/h bis v = 4 km/h variiert werden.

Die Regelkenngrößen (Abmessungen, Betriebsgewicht, statische Linienlast, Amplitude...) sind den nachfolgenden Datenblättern in den Abbildungen 2.44, 2.45 und 2.46 zu entnehmen.

| | | H 7i VIO | |
|------------------------------------|----------|------------------------|--|
| Gewichte | | | |
| Betriebsgewicht mit ROPS | ka | 6105 | |
| Betriebsgewicht mit Kabine | ka | 6325 | |
| Betriebsgewicht max. | ka | 6380 | |
| Achslast, vorn/hinten | ka | 3765/2560 | |
| Badlast pro Beifen, hinten | ka | 1280 | |
| Statische Linienlast, vorn | kg/cm | 22,4 | |
| Abmessungen Maschine | | | |
| Maximale Arbeitsbreite | mm | 1680 | |
| Seitlicher Überstand, links/rechts | mm | 80/70 | |
| Bordsteinfreiheit, links/rechts | mm | 350/350 | |
| Bodenfreiheit, mitte | mm | 317 | |
| Spurkreisradius, innen | mm | 3310 | |
| Bandagenart, vorn | pacaoa!/ | glatt/ungeteilt | |
| Bandagenstärke, vorn | mm | 20 | |
| Reifengröße, hinten | | AW 14.9-24 8 TL | |
| Dieselmotor | | | |
| Hersteller | | KUBOTA | |
| Тур | | V3307-CR-T | |
| Zylinder, Anzahl | | 4 | |
| Leistung ISO 14396, kW/PS/UpM | | 54,6/74,3/2200 | |
| Leistung SAE J1349, kW/HP/UpM | | 54.6/73.2/2200 | |
| Abgasstufe EU / USA | | III B / Tier 4 | |
| Kraftstofftank, Inhalt | L | 123 | |
| Fahrantrieb | | | |
| Fahrantrieb hydrost., vorn/hinten | | Radmotor/Radmotor | |
| Geschwindigkeit, Arbeitsgang | km/h | 0-6,0 | |
| Geschwindigkeit, Transportgang | km/h | 0-12,5 | |
| Steigfähigkeit, mit/ohne Vibration | % | 55/60 | |
| Vibration | | | |
| Vibrationsfrequenz | Hz | 36 | |
| Amplitude, Vibro | mm | 1,38 | |
| Zentrifugalkraft, Vibro | kN | 123 | |
| Oszillation | | | |
| Oszillationsfrequenz | Hz | 36 | |
| Tangentialamplitude, Oszi | mm | 1,37 | |
| Oszillationskraft | kN | 123 | |
| Lenkung | | | |
| Lenkung, Art | | Knicklenkung | |
| Lenkung, Betätigung | | hydrostatisch, Lenkrad | |
| Lenkeinschlag +/- | 0 | 31 | |
| Pendelwinkel +/- | 0 | 10 | |

Ausstattung Modernes Informations- und Kontrolldisplay, 2 PVC-Abstreifer, 3-Punkt Knickgelenk, Gefederter drehbarer Fahrersitz, Hydraulik-Schutzblech, Hydrostatischer Allradantrieb, Elektronisches Maschinenmanagement Hammtronic

Sonderausstattung 2 abschließbare Türen, Arbeitsscheinwerfer, Back-up-Alarm, Beidseitiger Aufstieg, Beleuchtung nach StVZO, Fahrtenschreiber, Geschwindigkeitsmesser, Gurtkontaktschalter, HCQ-GPS-Verdichtungsdokumentation, HCQ-Verdichtungsmesser, Klimaanlage, Motor-Stop Automatik, Radio, ROPS/FOPS, Rückfahrkamera, Rundumkennleuchte, Schubschild (nur P-Version), Sitzkonsole seitlich verschiebbar, Sonnendach, Stampffußschalen, Telematik, Vibrationsautomatik

HAMM

H 7i VIO - Walzenzug mit VIO-Glattbandage

| Gesamtlänge | L | 4409 | |
|------------------------|----|------|--|
| Breite | В | 1844 | |
| Gesamthöhe | н | 2925 | |
| Achsabstand | A | 2306 | |
| Bandagenbreite | x | 1680 | |
| Bandagendurchmesser | D | 1206 | |
| Breite über Reifen | Y | 1640 | |
| Reifendurchmesser | R | 1280 | |
| Höhe Verladung, Minim. | HI | 2925 | |



HAMM AG • Hammstrasse 1 • D-95643 Tirschenreuth • Tel. +49 (0) 9631 80-0 • Fax +49 (0) 9631 80-111 • www.hamm.eu

Abbildung 2.44: Datenblatt Hamm AG H7i VIO

| | | H 13i VIO | |
|------------------------------------|--------|-----------------------|--|
| Gewichte | | | |
| Betriebsgewicht mit ROPS | kg | 12475 | |
| Betriebsgewicht mit Kabine | ka | 12735 | |
| Betriebsgewicht max. | ka | 14710 | |
| Achslast vorn/hinten | ka | 7500/5235 | |
| Badlast pro Beifen, hinten | ka | 2617.5 | |
| Statische Linienlast, vorn | ka/cm | 35.0 | |
| | ngronn | 5010 | |
| Abmessungen Maschine | | 1210 122 | |
| Maximale Arbeitsbreite | mm | 2140 | |
| Seitlicher Überstand, links/rechts | mm | 71/71 | |
| Bordsteinfreiheit, links/rechts | mm | 500/500 | |
| Bodenfreiheit, mitte | mm | 400 | |
| Spurkreisradius, innen | mm | 4190 | |
| Bandagenart, vorn | | glatt/ungeteilt | |
| Bandagenstärke, vorn | mm | 30 | |
| Reifengröße, hinten | | AW 23.1-26 12 PR | |
| Discolmotor | | | |
| Hereteller | | | |
| Ture | | | |
| Тур | | 100 4.1 L4 | |
| Zylinder, Anzani | | 4 | |
| Leistung ISO 14396, KW/PS/UpM | | 105,0/142,8/2300 | |
| Leistung SAE J1349, kW/HP/UpM | | 105,0/140,7/2300 | |
| Abgasstufe EU / USA | | III B / Tier 4i | |
| Kraftstofftank, Inhalt | L | 280 | |
| Fahrantrieb | | | |
| Fahrantrieb hydrost., vorn/hinten | | Radmotor/Achse | |
| Regelung, stufenlos | | Hammtronic | |
| Geschwindigkeit, stufenlos | km/h | 0 - 14.0 | |
| Steigfähigkeit, mit/ohne Vibration | % | 57/62 | |
| Whenting | | | |
| Vibrationafraguanz | L1-42 | 22 | |
| | nz. | 1.00 | |
| Amplitude, VIDro | mm | 1,92 | |
| centinugalkrait, vibro | KIN | 213 | |
| Oszillation | | | |
| Oszillationsfrequenz | Hz | 33 | |
| Tangentialamplitude, Oszi | mm | 1,74 | |
| Oszillationskraft | kN | 279 | |
| Lenkung | | | |
| Lenkung, Art | | Knicklenkung | |
| Lenkung Betätigung | | hydrostatisch Lenkrad | |
| Lenkeinschlag +/- | 0 | 32 | |
| Pendelwinkel +/- | 0 | 10 | |
| | | | |

Ausstattung Arbeitsscheinwerfer vorne/hinten, Beidseitiger Aufstieg, Gefederter Fahrersitz, Große Motorleistung mit Traktionskontrolle, Hammtronic - automatische Traktions- und Schlupfregelung, Kippbare GFK-Motorhaube, Modernes Informations- und Kontrolldisplay, Schwenkbare Lenk- und Armaturenkonsole, Stufenloser hydrostatischer Allradantrieb

Sonderausstattung Außen- und Innenspiegel, Back-up-Alarm, Fahrhebel beidseitig, Fahrtenschreiber, HCQ-GPS-Verdichtungsdokumentation, HCQ-Verdichtungsmesser, Heizung mit staubfreier Lüftung, Klimaanlage, Radio, Rundumkennleuchte



| , | Gesamtlänge | L E E | 5850 | \$ |
|---|-------------------------|---------------------------------|-------------------------------|---------------------------|
| | Breite | в | 2284 | Ben |
| | Gesamthöhe | н | 2960 | 5 |
| | Achsabstand | Α | 3062 | Jde |
| | Bandagenbreite | x | 2140 | Ā |
| Ð | Bandagendurchmesser | D | 1504 | ð |
| | Breite über Reifen | Y | 2160 | aftra |
| 2 | Reifendurchmesser | R | 1565 | (A |
| | Höhe Verladung, Minim. | HI | 2282 | au |
| | | | | |
| | HAMM AG • Hammstrasse 1 | D-95643 Tirschenreuth • Tel. +4 | 19 (0) 9631 80-0 • Fax +49 (0 | 9631 80-111 • www.hamm.eu |

behalten

86

Abbildung 2.45: Datenblatt Hamm AG H13i VIO

VIRTGEN G R O U P

ÿ HD+ 140i W

| Inagen | Oszillationsbandage |
|-----------------|---------------------|
| nali | pun |
| ZINNA UNIX | Vibrations- |
| 1 1 1 | mit |
| a line in waize | Tandemwalze |
| VIIICAGEILALE | Knickgelenkte |
| | - |
| AA IOHI | 140i VC |
| tae | +OH |

| | | HD+ 140i VV | HD+ 140i VO |
|------------------------------------|-------|------------------------|------------------------|
| Gewichte | | | |
| Betriebsgewicht mit ROPS | kg | 12515 | 12715 |
| Betriebsgewicht mit Kabine | ka | 12755 | 12955 |
| Betriebsgewicht max. | ka | 13670 | 13870 |
| Achslast, vorn/hinten | ka | 6400/6355 | 6400/6555 |
| Statische Linienlast, vorn/hinten | kg/cm | 29,9/29,7 | 29,9/30,6 |
| Abmessungen Maschine | | | |
| Maximale Arbeitsbreite | mm | 2310 | 2310 |
| Seitlicher Überstand, links/rechts | mm | 60/60 | 60/60 |
| Bordsteinfreiheit, links/rechts | mm | 900/900 | 900/900 |
| Bodenfreiheit, mitte | mm | 340 | 340 |
| Spurkreisradius, innen | mm | 5980 | 5980 |
| Bandagenart, vorn | | glatt/ungeteilt | glatt/ungeteilt |
| Bandagenart, hinten | | glatt/ungeteilt | glatt/ungeteilt |
| Bandagenstärke, vorn/hinten | mm | 19/19 | 19/17 |
| Dieselmotor | | | |
| Hersteller | | DEUTZ | DEUTZ |
| Тур | | TCD 4.1 L4 | TCD 4.1 L4 |
| Zylinder, Anzahl | | 4 | 4 |
| Leistung ISO 14396, kW/PS/UpM | | 115,0/156,4/2300 | 115,0/156,4/2300 |
| Leistung SAE J1349, kW/HP/UpM | | 115,0/154,1/2300 | 115,0/154,1/2300 |
| Abgasstufe EU / USA | | III B / Tier 4i | III B / Tier 4i |
| Kraftstofftank, Inhalt | É. | 260 | 260 |
| Fahrantrieb | | | |
| Fahrantrieb hydrost., vorn/hinten | | Radmotor/Radmotor | Radmotor/Radmotor |
| Regelung, stufenlos | | Hammtronic | Hammtronic |
| Geschwindigkeit, Arbeitsgang | km/h | 0-6.0 | 0-6,0 |
| Geschwindigkeit, Transportgang | km/h | 0-12,0 | 0-12.0 |
| Steigfähigkeit, mit/ohne Vibration | % | 35/40 | 30/35 |
| Vibration | | | |
| Vibrationsfrequenz, vorn, I/II | Hz | 40/50 | 40/50 |
| Vibrationsfrequenz, hinten, I/II | Hz | 40/50 | |
| Amplitude, vorn, I/II | mm | 0,86/0,47 | 0,86/0,47 |
| Amplitude, hinten, I/II | mm | 0,86/0,47 | |
| Zentrifugalkraft, vorn, I/II | kN | 180/150 | 180/150 |
| Zentrifugalkraft, hinten, I/II | kN | 180/150 | |
| Oszillation | | | |
| Oszillationsfrequenz, hinten | Hz | | 36 |
| Tangentialamplitude, hinten | mm | | 1,48 |
| Oszillationskraft, hinten | kN | | 207 |
| Lenkung | | | 155 May 175 |
| Lenkung, Art | | Knicklenkung | Knicklenkung |
| Lenkung, Betätigung | 97 | hydrostatisch, Lenkrad | hydrostatisch, Lenkrad |
| Lenkeinschlag +/- | 0 | 30 | 30 |
| Pendelwinkel +/- | 0 | 10 | 10 |
| Berieselungsanlage | | Longe | |
| Wasserberieselung, Art | | Druck | Druck |
| Detitioung Wesserbarisselung | | intervall/manuell | intervall/manuell |
| belaligung, wasserbeneselung | | intervent menden | |

Ausstattung Amplitude schaltbar: groß/klein, Aufstiegsgriffe, Batteriehauptschalter, Gefederter Fahrersitz, Geschwindigkeitsmesser, Kontrollieuchten und Notstopp, Multifunktionsfahrhebel rechts vom Sitz, Schwenk- und verschiebbarer Komfortsitz, Vibration schaltbar: vorne/hinten/doppelt, Wasserstandsanzeige

Sonderausstattung alle Scheinwerfer auch in Xenon erhältlich, Außen- und Innenspiegel, Back-up-Alarm, Bandagenbeleuchtung, Fahrersitz-Rückenverlängerung, Fahrtenschreiber, Frequenzregler schaltbar: vorme/hinten/doppelt, HCQ-Asphalttemperaturmesser, HCQ-Asphalt-Verdichtungsmesser, Heiz/Klima mit Entfeuchtung, Hundegang zur Erhöhung der Arbeitsbreite, Innenbeleuchtung, Kabine: 4 Scheinwerfer, Kantenandrück- und Schneidgerät, Radio, ROPS-Panoramakabine, Rundumkennleuchte, Schallisolierung, Sicherheitsgurt, Sonnendach, staubfreie Lüftung, Stoffsitz, zweiter Multifunktionsfahrhebel



HAMM AG • Hammstrasse 1 • D-95643 Tirschenreuth • Tel. +49 (0) 9631 80-0 • Fax +49 (0) 9631 80-111 • www.hamm.eu

Abbildung 2.46: Datenblatt Hamm AG HD+ 140i VO

Für die Auswertung der Messergebnisse wurden von der *Hamm AG* für die drei Testwalzen noch folgende weitere Maschinenparameter angefordert:

| Maschinenparameter | | Einheit | H7i VIO | H13i VIO | HD+ 140i VO |
|--|-------------------------------------|---------|---------|----------|-------------|
| Schwingende N | lasse der Bandage | Kg | 1818 | 3499 | 2907 |
| Rotationsträgheitsmoment, um welches das Oszillationsmoment wirkt | | kgm² | 472 | 1290 | 862,6 |
| Abstand: Unwu | chtwellen / Drehmitte | Mm | 384,4 | 450 | 450 |
| | Schwerpunkt Unwuchtmasse | Mm | 56,7 | 67,6 | 56,7 |
| Footupwyucht | Masse Einzelunwucht | Kg | 10,4 | 24 | 8,8 |
| restunwucht | Unwuchtmoment Festunwucht | Kgm | 0,590 | 1,622 | 0,501 |
| | Anzahl der Unwuchten je Welle | - | 2 | 2 | 2 |
| | Schwerpunkt Unwuchtmasse | Mm | 16,59 | 29,66 | - |
| Umschlag- | Masse Einzelunwucht | Kg | 71,35 | 108,57 | - |
| unwucht VIO | Unwuchtmoment Umschlagunwucht | Kgm | 1,184 | 3,220 | - |
| | Anzahl der Unwuchten je Welle | - | 1 | 1 | - |
| Anzahl Unwuchtwellen / Bandage | | - | 2 | 2 | 4 |
| rechnerische Tangentialbeschleunigung (bei 27 Hz) | | m/s² | - | 48,8 | 42,9 |
| rechnerische Ta | angentialbeschleunigung (bei 30 Hz) | m/s² | 41,2 | 60,2 | 51,7 |
| rechnerische Ta | angentialbeschleunigung (bei 33 Hz) | m/s² | - | 72,8 | 62,6 |
| rechnerische Ta | angentialbeschleunigung (bei 36 Hz) | m/s² | 59,3 | 68,7 | 74,5 |

Tabelle 2.14: Maschinenparameter Testwalzen [36]

4.4 MESSWERTERFASSUNG / DOKUMENTATION

4.4.1 MESSFAHRTENPROTOKOLL

Die Koordination der Messfahrten erfolgte von der Leitstelle im Baucontainer aus. Die Kommunikation wurde mittels Sprechfunk bewerkstelligt. Die verwendeten Prozessparameter sowie die Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche konnten somit übermittelt und in einem MESSFAHRTENPROTOKOLL festgehalten werden. Bei jeder Messfahrt wurden folgende Daten aufgezeichnet:

- Durchlaufende Messwertnummer (FDVK-Werte und/oder Lastplattenversuche)
- Fortlaufende Nummer der FDVK-Messfahrten
- o Datum, Zeit des Starts der Testfahrt (mit Zeitstempel), teilw. Ende der Testfahrt
- Verwendete Testfeldspur
- o Walze
- Anregungsart (Oszillation / Vibration / statische Verdichtung)

- Erregerfrequenz
- Fahrgeschwindigkeit

Die Protokolle der Messfahrten sind dem Anhang in Kapitel 0 zu entnehmen.

4.4.2 BEGLEITENDE UNTERSUCHUNGEN MITTELS DYNAMISCHEN LASTPLATTENVERSUCHEN

Um die in der Walze gemessenen FDVK-Werte mit einer klassischen Verdichtungskontrolle vergleichen zu können, wurden jeweils direkt im Anschluss an die Messfahrt dynamische Lastplattenversuche mit dem leichten Fallgewichtsgerät zur Ermittlung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} durchgeführt. Die dynamischen Lastplattenversuche wurden je nach Bedarf in den Streckenabschnitten mit der internen Bezeichnung "Startpunkt", "Homogen Anfang", "Schwachstelle 1", "Homogen Mitte", "Schwachstelle 2", "Homogen Ende" und "Endpunkt" durchgeführt. Im Regelfall wurden nach jeder Messfahrt zumindest fünf dynamische Lastplattenversuche durchgeführt. Bei einigen Messfahrten wurden, um Aussagen über die Streuung der E_{vd}-Werte machen zu können, jeweils drei Versuche pro Streckenabschnitt durchgeführt. Alle Lastplattenversuche wurden mit kalibrierten Lastplatten (zwei Lastplatten der TU Wien sowie eine Lastplatte der *Hamm AG*) durchgeführt.

Parallel zum Messfahrtenprotokoll wurden die Ergebnisse der Versuche mit der dynamischen Lastplatte im Protokoll festgehalten. Die Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche sind dem Anhang in Kapitel 0 zu entnehmen.

In der nachfolgenden Abbildung 2.47 sind die festgelegten Streckenabschnitte, in welchen die dynamischen Lastplattenversuche durchgeführt wurden, graphisch dargestellt.



Abbildung 2.47: Vergleichsversuche – Dynamische Lastplattenversuche

4.4.3 FDVK-WERTERFASSUNG IN DER WALZE

Mit dem in den Walzen eingebauten FDVK-System konnten erstmals FDVK-Werte online und arbeitsintegriert generiert werden. Die Messwertaufnahme erfolgte über die standardmäßig an der Lagerschale der Oszillationsbandage montierten Beschleunigungsaufnehmer, welche die Vertikal- und Horizontalbeschleunigungen registrieren und in ein elektrisches Signal umwandeln.

Für die Feldversuche wurden die FDVK-Werte nicht an eine Anzeigeeinheit in der Fahrerkabine, sondern mittels Datenschnittstelle auf einen Laptop übertragen. Gleichzeitig wurden auch alle Rohsignale, wie z.B. die Beschleunigungssignale der Sensoren, aber auch teilverarbeitete Parameter, wie z.B. Schwinggeschwindigkeit, Schwingweg oder die Amplitude, aufgezeichnet.

Keine der drei Testwalzen verfügte über einen GPS-Empfänger zur Positionsbestimmung. Für eine eindeutige Zuordnung der FDVK-Werte zur Position am Testfeld wurden maßgebliche Stellen der Teststrecke ("Startpunkt Teststrecke", "Homogen Start", "Beginn Schwachstelle 1", "Homogen Mitte", "Beginn Schwachstelle 2", "Endpunkt Teststrecke") mit Lichtschrankensignalen definiert. Dazu wurde im Bereich der Oszillationsbandage ein Reflexlichtschranken (Sender und Empfänger in einem Gehäuse) montiert und an den maßgeblichen Stellen der Teststrecke wurden Retroreflektoren aufgestellt (siehe Abbildung 2.13).



Foto 2.13: Positionsbestimmung der Walze mittels Reflex-Lichtschrankensystem (J. Pistrol, am 06.11.2015)

Des Weiteren wurden über einen Näherungsschalter am Walzenrahmen und einem Fahnenblech in der Bandage die Zeitpunkte der vollständigen Bandagenrotationen ermittelt und aufgezeichnet. Diese ist für die Korrektur der Periodizität der Bandage maßgeblich. Entsprechend der Abtastrate der von der *Hamm AG* verwendeten Prozessoreinheit von 1000 Hz sowie der über 40 Parameter, welche pro Messfahrt dokumentiert wurden, wurde im Zuge der rund 240 durchgeführten Messfahrten ein Datenvolumen von > 5 GB generiert.

4.4.4 TAGESPROTOKOLL

Zusätzlich beschriebenen zu den Messwerterfassungen wurde ein TAGESPROTOKOLL verfasst, in welchem die wesentlichsten Maßnahmen und Tätigkeiten außerhalb des Messablaufes festgehalten wurden (Herstellen der Teststrecken. Einmessen und wieder Auflockern der Testfelder, verwendetes Material. Wetterbedingungen, sonstiae Maßnahmen).

Abbildung 2.48: exemplarisches Tagesprotokoll der Feldversuche, vom 13.10.2015

| Annesend: . | S. Pistrol, Worner Válkel, Tobias Fehr, Mario Hager, Alexander Lair | lich |
|-------------------------------------|--|--|
| Beginn 8 | in Kiesgrobe | |
| 8°° - 10°° | Voiverdichten des Rohplanums volltlächig mit HD 140' | mit 1x dyn. Vorw |
| | und Instadisch Rickwards | |
| 8 - 10 - | Herstellen der Schwartskiller gemin to Lagepolan | |
| 10 ^{°°-} 11 ³ ° | Durchtichtung un dyn. LP ant Sport 4 - Sport auf vorven (Seuris 3 DLP ortpus Spor und Position [hernogen Beginn, hornigen A | dichk lem Rohjolani itte , honogan Endi |
| 9 ³⁰ -15 ^{°°} | Herstellen des Schöttung mit einer Schöttmächtigkeit | von sol 40cm |
| 9 ³⁰ -15 ⁰⁰ | Paranctrisierung der HD 140 durch Verner + Tobies westlich des Ter | stieldes |
| 15°°-16°° | Nevennessung des Testheldes mil 8 Spuren | |
| 15°-16°° | Durch throug von DLP out Sch itt ung chne Vervadiethung (nur von 1 DLP pro Sper und Position [Bayin Testheld, han aga Bayin, Schwedskille 1, k | binder planis, f) un ugen Mille |
| | Schundskille Z, honogen Ende, Tostkild Ende] mit LP-Honm mit GPS | |
| 16°-17°° | Durchtichern is von Verdichlungspeteren tahrlan Sport bis Sport will | D140,05zi,36bz,3km |
| 17-17 30 | Durch fibrer g DLP and Schiffing nod Vardichting bei Spec 1 - Spe | 13 and Position |
| | [Schwadshille 1, how agen A.He, Schwadshille 2] | |
| chillmakeric | el: GV: m G, Fg, gs, ms, ts, gg, x", u", sohr young soldHig, ordbauell, Advisorboil < 5% | āg, gr', bu |

4.5 VERSUCHSDURCHFÜHRUNG

4.5.1 REGELMESSABLAUF

Nach der Testfeld-Präparierung – wie bereits unter Punkt 4.2 beschrieben – wurden die Testspuren mittels Markierungsspray angezeichnet, um dem Walzenfahrer die Steuerung der Walze im Zuge der Testfahrt zu erleichtern. Der Ablauf einer Testfahrt wurde immer nach dem gleichen Prinzip durchgeführt, um möglichst vergleichbare Messergebnisse zu bekommen. Nachfolgend wird der standardisierte Messablauf beschrieben:

- Positionierung der Messwalze auf der Anfahrtsrampe des Testfeldes deutlich vor Beginn der Testspur. Durch diese Vorlaufzeit von einigen Sekunden konnte garantiert werden, dass die Prozessparameter sich nach dem Hochfahren der Walze stabilisiert hatten und vom Beginn der Testspur weg vergleichbare Verhältnisse vorlagen.
- Entsprechend dem vorher festgelegten Messprogramm wurden die entsprechenden Walzenparamater (Anregungsart, Erregerfrequenz, Geschwindigkeit) sowie die zu verdichtende Messspur per Funk an die Leitstelle weitergegeben und im Messprotokoll festgehalten.
- Bei jeder Messfahrt erfolgte die Vorwärtsfahrt mit oszillatorisch erregter Bandage bis deutlich über den Endpunkt des Testfeldes hinaus. Bei der Rückwärtsfahrt auf der gleichen Spur wurde jeweils statisch verdichtet. Mit Beginn der Messfahrt wurde der FDVK-Wert online und arbeitsintegriert in der Walze mittels mitgeführtem Laptop aufgezeichnet. Mit Überfahren der Startlinie des Testfeldes wurde via Zeitstempel der Beginn der Messfahrt im Messprotokoll festgehalten.

 Umgehend nach der Messfahrt (vorwärts und rückwärts) wurden an den unter Punkt 4.4.2 festgelegten Streckenabschnitten – meist mit zwei Lastplatten parallel – die dynamischen Lastplattenversuche durchgeführt. Die Ergebnisse wurden ebenfalls mittels Sprechfunkverbindung an die Leitstelle übermittelt und protokolliert.

Entsprechend diesem Messablauf wurden die Messfahrten nacheinander mit entsprechenden Parameterkombinationen (Erregerfrequenz, Geschwindigkeit) mit den drei Testwalzen abgewickelt. Der gleiche Ablauf wurde auch bei den Nebentestfeldern abgearbeitet.

4.5.2 GEPLANTES MESSPROGRAMM

Ursprünglich war geplant, im Zuge der Feldversuche mit jeder Testwalze (H7i VIO, H13i VIO, HD+140i VO) – jeweils unter Verwendung der Walze im Oszillationsbetrieb – folgende Prozessparametermatrix abzuarbeiten:

| Prozessparameter | f = 25 Hz | f = 31 Hz | f = 39 Hz |
|------------------|-----------|-----------|-----------|
| 2 km/h | | | |
| 3 km/h | | | |
| 4 km/h | | | |
| 5 km/h | | | |

| Tabelle 2.15: U | Jrsprünalich | deplante | Prozessparametermatrix |
|-----------------|--------------|----------|------------------------|

Des Weiteren war geplant, vier Spuren des Haupttestfeldes mit unterschiedlichen Erregerfrequenzen von f = 27 Hz, 29 Hz, 33 Hz und 36 Hz mit Verdichtungsübergängen solange zu verdichten, bis kein Verdichtungszuwachs mehr zu beobachten ist. Diese Versuche sollten der Identifikation der Korrekturkurve der Periodizität in Abhängigkeit von Frequenz und Fahrgeschwindigkeit dienen.

4.5.3 AUFGETRETENE SCHWIERIGKEITEN / BEGLEITUMSTÄNDE

Aufgrund der guten Vorbereitung und auch der Erfahrung mehrerer am Feldversuch mitwirkenden Personen gab es im Versuchsablauf, bei der Logistik, in der Zusammenarbeit innerhalb der Feldversuchsmannschaft sowie auch an der Schnittstelle nach außen, insbesondere mit der Fa. *Habau*, keine Schwierigkeiten. Alle Walzen sowie die für die Vergleichsversuche verwendeten dynamischen Lastplatten behielten über die gesamte Messdauer ihre Funktionstüchtigkeit.

Leider waren die Feldversuche stark von den Wetterverhältnissen beeinflusst (siehe Fotos 2.14). Wie schon unter Punkt 4.1.3 beschrieben und in Diagramm 2.1 dargestellt, hat es in der Nacht vom zweiten auf den dritten Testtag zu regnen begonnen.



Fotos 2.14: Verhältnisse am Testfeld aufgrund von widrigen Witterungsbedingungen (links oben + rechts oben + links unten: J. Pistrol, am 16.10.2015; rechts unten: A. Leitich, am 28.10.2015)

Durch das Regenwasser wurde das am Haupttestfeld mit einer Mächtigkeit von 45 cm aufgetragene Schüttmaterial stark durchnässt. Aufgrund folgender Punkte hatte das Schüttmaterial über den gesamten Feldversuchszeitraum einen für die Verdichtung zu hohen Wassergehalt:

- Der in situ gewachsene Terrassenschotter, welcher das Schüttplanum bildete, hatte eine eher geringe Durchlässigkeit. Das Oberflächenwasser versickerte eher langsam. Stehendes Wasser war auch nach mehreren regenfreien Tagen noch im Nahbereich der Teststrecke in der Kiesgrube zu beobachten. Neben der grundsätzlich weitgestuften Kornzusammensetzung mit einem Schluffanteil von rd. 5 bis 10% (lt. Kornverteilungskurve der vorausgegangenen Feldversuche in selber Kiesgrube [65]) ist anzunehmen, dass eine oberflächliche Kolmatierung durch den seit mehreren Jahren gegeben Schwerverkehr in der Kiesgrube eine Rolle spielt.
- Das Testfeld mit einer Länge von rund 80 m hat nur ein sehr geringes Gefälle von wenigen %, sodass das Wasser auch nicht seitlich entweichen konnte.

- Beim Schüttmaterial handelte es sich um ein sehr weit gestuftes Material, welches anhand einer geologischen Feldansprache als leicht schluffiger, steiniger, stark sandiger Kies anzusprechen war. Dementsprechend, insbesondere aufgrund des Feinkornanteiles (geschätzt 5 - 10% Schluff-Tonfraktion) war das Schüttmaterial ebenfalls nur bedingt wasserdurchlässig. Dies hat zur Folge, dass durch die Oberflächen, Grenz- und Kapillarkräfte Wasser im Boden gehalten wurde und nur ein Teil des Oberflächenwassers aufgrund der Schwerkraft langsam versickerte.
- Aufgrund der bereits herbstlichen Witterungsverhältnisse mit Lufttemperaturen zwischen 15° bis 0° Celsius wurde das Schüttmaterial durch den Einfluss der Sonne und des Windes nicht mehr ausreichend aufgetrocknet.

Auswirkungen auf die Feldversuche:

- durchfeuchteten Auf dem Schüttmaterial mehreren • waren somit bei Verdichtungsfahrten über eine Spur keine bzw. nur sehr geringe Verdichtungszuwächse zu beobachten.
- Die Ergebnisse der dynamischen Lastplatte hatten teilweise ein sehr niedriges Werteniveau (E_{vd} < 10 MN/m²).
- Aufgrund der geringen Bodensteifigkeit konnten im normalen Schüttbereich und an den künstlich eingebauten Schwachstellen zum Teil keine Unterschiede mehr bei den FDVK-Werten festgestellt werden.
- Die ursprünglich eingeplanten rund 10 Feldversuchstage wurden somit über einen Zeitraum von rund 2 Monaten absolviert.

4.5.4 DURCHGEFÜHRTE MASSNAHMEN

4.5.4.1 Austausch des Schüttmaterials

Da de facto während der gesamten Feldversuchsarbeiten im Oktober nicht bzw. nur bedingt verwendbare FDVK-Wertergebnisse erzielt werden konnten, wurde entschieden, das durchfeuchtete Schüttmaterial am Haupttestfeld auf einer Länge von 10 m zu entfernen und gegen neues Schüttmaterial auszutauschen. Das Bodenaustauschmaterial, welches im Haupttestfeld im Bereich zw. 40 - 50 m (zwischen den beiden Schwachstellen) am 4.11.2015 ausgetauscht wurde, stammte ebenfalls vom Abbaufeld der Kiesgrube.

4.5.4.2 Adaptierung des Messprogrammes

Bei den anschließend – insbesondere im Zeitraum 04.11.2015 bis 06.11.2015 – durchgeführten Versuchen konnte in relativ kurzer Zeit ein – wenn auch verkürztes und abgeändertes – Messprogramm absolviert werden. Im Wesentlichen wurden bei dem durchgeführten Versuch drei maßgebliche Parameter variiert:

• Erregerfrequenz

•

- Prozessparameter
- Bodensteifigkeit

Fahrtgeschwindigkeit

Folgende Versuche wurden durchgeführt:

Generierung von Verdichtungszuwächsen mit konstanten Prozessparametern:

Auf einer unverdichteten Spur wurden mehrere Messfahrten mit einer Testwalze mit konstant gehaltenen Prozessparametern durchgeführt. Nach jeder Messfahrt – mit oszillatorisch angeregter Vorwärtsfahrt und statischer Rückwärtsfahrt – wurden parallel zur FDVK-Wertaufnahme auch dynamische Lastplattenversuche durchgeführt. Das Schüttmaterial wurde mit so vielen Walzenübergängen verdichtet, bis bei den Ergebnissen der dynamischen Lastplatte kein Verdichtungszuwachs mehr gemessen wurde. Der Einzelversuch wurde somit abgebrochen und auf einer weiteren unverdichteten Spur mit geänderten Prozessparametern von neuem begonnen.

Dabei wurde folgende Prozessparametermatrix mit den Testwalzen abgearbeitet:

| H7i VIO = ▲ H13i VIO = ♦ HD+140i VO = ■ | f = 27 Hz | f = 31 Hz | f = 32 Hz | f = 33 Hz | f = 36 Hz | f = 40 Hz |
|---|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 2 km/h | • | | • | • | • | |
| 3 km/h | • | • | • | • | • | |
| 4 km/h | • | • | • | • | • | • |

Tabelle 2.16: Abgearbeitete Prozessparametermatrix – Generierung von Verdichtungszuwächsen

Jedes Symbol (●,■,▲) in der Tabelle 2.16 steht für vier bis sieben Einzelmessfahrten mit den entsprechenden Prozessparametern, die auf einer Spur durchgeführt wurden, bis kein Verdichtungszuwachs mehr festgestellt werden konnte.

Wie in Tabelle 2.16 ersichtlich ist, wurden mehr und andere Erregerfrequenzen gefahren als ursprünglich geplant. Die Frequenzen wurden auf Wunsch der Hamm AG an jene Frequenzen angepasst, welche in der Regel bei den Testwalzen im Zuge der Verdichtung verwendet werden. Dadurch können – wenn auch auf Kosten der Vergleichbarkeit – die Ergebnisse besser in die Anwendung im etwaigen Serieneinsatz übertragen werden.

Um Rückschlüsse auf unterschiedliche Untergrundverhältnisse ziehen zu können, wurden Vergleichsfahrten auf dem Nebentestfeld "Terrassenschotter" mit der Testwalze HD+140i VO sowie auf dem Nebentestfeld "Lösslehm" mit der Testwalze H13i VIO durchgeführt.

Vergleich unterschiedlicher Prozessparameter:

Wurde im ersten Versuchsabschnitt noch die Bodensteifigkeit als variable Größe zugelassen, wurde selbige im zweiten Versuchsabschnitt als konstant vorgegeben und es wurden nur die Fahrgeschwindigkeit sowie die Erregerfrequenz variiert. Die Testfahrten wurden auf einer mit mehreren Walzenübergängen vollkommen verdichteten Spur durchgeführt, bei welcher keine maßgeblichen Verdichtungszuwächse mehr erwartet wurden.

Dabei wurde folgende Parametermatrix mit den Testwalzen abgearbeitet:

Tabelle 2.17 : Abgearbeitete Parametermatrix – vollkommen verdichtetes Material; unterschiedliche Prozessparameter

| H7i VIO = ▲ H13i VIO = ◆ HD+140i VO = ■ | f = 27 Hz | f = 30Hz | f = 33Hz | f = 36Hz |
|---|-----------|----------|----------|----------|
| 2 km/h | • | • • • | • | • • • |
| 3 km/h | ٠ | • • • | • | • |
| 4 km/h | ٠ | • | • | • |

Jedes Symbol $(\bullet, \bullet, \bullet, \bullet)$ in der Tabelle 2.17 steht für eine Einzelmessfahrt mit den entsprechenden Prozessparametern, welche alle auf der vollkommen verdichteten Spur 3 (mit eingebauter Schwachstelle) durchgeführt wurden. Bei diesem Versuchsabschnitt wurden keine vergleichenden dynamischen Lastplattenversuche durchgeführt.

5 VERSUCHSAUSWERTUNG UND ERGEBNISSE

5.1 ALLGEMEINES

Im Zuge der Feldversuche in Fischamend ist erstmals ein FDVK-System für Oszillationswalzen zum Einsatz gekommen, welches den FDVK-Wert in Echtzeit mit dem unter Punkt 3.9.2.2.3 beschriebenen Algorithmus in der verwendeten Messwalze berechnet.

Durch die Auswertung der generierten und aufgezeichneten FDVK-Werte sowie durch den Vergleich der Ergebnisse der parallel durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche konnten folgende Ergebnisse erbracht werden:

- Beurteilung des Verdichtungszuwachses auf den Haupt- und Nebentestfeldern unter Verwendung aller drei Testwalzen (H7i, H13i und HD+140)
- Ergebnisse der Testfahrten mit unterschiedlichen Prozessparametern auf konstanten Untergrundverhältnissen für alle verwendeten Testwalzen
- Vergleich des FDVK-Werts für unterschiedliche Oszillationswalzen mit Aussagen über das Werteniveau bzw. die Sensitivität der FDVK-Systeme unter dem Einfluss der unterschiedlichen Walzenparameter der Testwalzen
- Aussagen über die Reproduzierbarkeit der Messergebnisse bei allen verwendeten Testwalzen
- Beurteilung der Vergleichbarkeit von FDVK-Wertergebnisse und Ergebnissen der dynamischen Lastplattenversuche

5.2 BEGLEITENDE UNTERSUCHUNGEN

Wie schon unter Punkt 4.4.2 beschrieben, wurden in den Testfeldabschnitten "Testfeld Anfang", "Homogen Start", "Schwachstelle 1", "Homogen Mitte", "Schwachstelle 2", "Homogen Ende" und "Testfeld Ende" (Lage der Streckenabschnitte siehe Abbildung 2.41) direkt im Anschluss an die Messfahrten dynamische Lastplattenversuche zur Ermittlung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} durchgeführt. Die gesammelten Ergebnisse sind dem Anhang in Kapitel 0 zu entnehmen.

Aufgrund des durch die Niederschlagsereignisse erhöhten Wassergehaltes im Schüttmaterial wurden teilweise Setzungen von > 2,25 mm (d.h. sehr niedrige E_{vd} -Werte von < 10 MN/m²) gemessen. Insbesondere anhand des Werteniveaus der dynamischen Lastplattenversuche wurde für die weitere Versuchsauswertung eine Vordifferenzierung der Ergebnisse in zeitlicher sowie in räumlicher Hinsicht folgendermaßen durchgeführt:

5.2.1 ZEITLICH ENTWICKLUNG DES E_{VD}-WERTENIVEAUS

Bei den von Beginn des Feldversuches am 12.10.2015 bis zum 04.11.2015 durchgeführten dynamischen Lastplattenversuchen wurde aufgrund des zu stark durchfeuchteten Schüttmateriales ein durchschnittlicher Verdichtungswert von $E_{vd} < 10 \text{ MN/m}^2$ erzielt. Erst durch die stabileren Wetterverhältnisse in der zweiten Feldversuchshälfte sowie durch den durchgeführten Bodenaustausch am 04.11.2015 wurden höhere Verdichtungswerte erzielt (siehe Diagramm 2.2). Für die weitere Auswertung wurden ausschließlich die in den Testwalzen aufgezeichneten FDVK-Messdaten ab 04.11.2015 verwendet, da ab diesem Zeitpunkt für die Validierung der Messdaten erforderliche E_{vd} -Werte zur Verfügung standen, welche zum Vergleich herangezogen werden konnten.



Diagramm 2.2: Vergleich der Ergebnisse der durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche – zeitliche Aufgliederung in Zeitabschnitte vor bzw. nach dem Bodenaustausch (04.11.2015). Dargestellt sind alle Werte aus den Bereichen "Homogen Start", "Homogen Mitte" und "Homogen Ende"

5.2.2 RÄUMLICHE VERTEILUNG DER Evd-WERTE

Im Zuge der Versuchsdurchführung zeigte sich ein räumlich unterschiedliches Werteniveau. In den Diagrammen 2.3 und 2.4 sind für ausgewählte Tage die E_{vd} -Werte zur Veranschaulichung der Messwertverteilung dargestellt.

Das Messwerteniveau der Lastplattenergebnisse hatte über die gesamte Feldversuchsdauer einen je nach Feuchtegehalt im Schüttmaterial mehr oder weniger ausgeprägten Trend aufgezeigt. Wie in Diagramm 2.3 und teilweise auch in Diagramm 2.4 ersichtlich, wurden auf der Teststrecke im westlichen Bereich mit der internen Bezeichnung "Homogen Start" eher niedrige E_{vd} -Werte gemessen. Je weiter östlich, d.h. in Richtung des Testfeldabschnittes "Homogen Ende", desto höhere E_{vd} -Werte wurden auch gemessen.



Diagramm 2.3: Räumliche Werteverteilung der durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche, am 04.11.2015 nach erfolgtem Bodenaustausch im Bereich "Homogen Mitte"

HD+140 27Hz 2km/h Spur 1 - nach4.ÜF

HD+140 27Hz 2km/h Spur 1 - nach6.ÜF

HD+140 27Hz 2km/h Spur 1 - nach3.ÜF

HD+140 27Hz 2km/h Spur 1 - nach5.ÜF

Aus den in Diagramm 2.3 dargestellten Ergebnissen der durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche können folgende grundsätzliche Aussagen abgeleitet werden:

- Das Testfeld besitzt ein von Westen gegen Osten ansteigendes Werteniveau.
- Die Schwachstellen sind beide mit der dynamischen Lastplatte deutlich erkennbar.
- Die "Schwachstelle 1" besitzt ein niedrigeres Werteniveau als "Schwachstelle 2".
- Das Werteniveau im Bereich "Homogen Start" ist großen Schwankungen unterworfen.

Während bei sehr nassen Verhältnissen (siehe Diagramm 2.4; Lastplattenversuche, vom 27.10.2015) – quasi unabhängig vom Verdichtungsgrad – die Schwachstellen auf Basis der Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche aufgrund des allgemein niedrigen

Werteniveaus nicht erkennbar sind, sind bei den Ergebnissen ab 04.11.2015 aufgrund des allgemein höheren Werteniveaus die Schwachstellen deutlich zu erkennen (siehe Diagramm 2.3).



Diagramm 2.4: Räumliche Messwertverteilung der durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche, am 27.10.2015

5.2.3 E_{vd}-WERTENIVEAU DES ANSTEHENDEN TERRASSENSCHOTTERS

Wie schon unter Punkt 4.1 und Punkt 4.2.1 näher beschrieben, wurde durch Abtrag von bis zu 30 cm im nordwestlichen Bereich eine ebene Testfläche im in situ gewachsenen Schotter hergestellt. Bevor das Schüttmaterial aufgebracht wurde, sind in den Haupttestfeld-Bereichen "Homogen Start", "Homogen Mitte" und "Homogen Ende" insgesamt 36 dynamische Lastplattenversuche durchgeführt worden. Wie in Tabelle 7.2 sowie in Diagramm 2.5 ersichtlich, wurden E_{vd} -Werte von rund 50 – 145 MN/m² mit einem Medianwert von rund 100 MN/m² gemessen. Die höchsten E_{vd} -Werte wurden in den westlichen Testfeldabschnitten, in welchen ein Materialabtrag von bis zu 30 cm durchgeführt wurde, beobachtet. Die im Vergleich dazu relativ niedrigen E_{vd} -Werte in den östlichen Testfeldabschnitten – in welchen

kein Materialabtrag stattgefunden hat – lassen sich auf oberflächliche Auflockerungserscheinungen, z.B. durch Frost, zurückführen.

Es ist jedoch anzumerken, dass der Verdichtungsgrad des Untergrundes vollflächig höher ist als die auf der Schüttlage gemessenen E_{vd} -Werte. Aufgrund der geologischen Untergrundverhältnisse sowie den im Vergleich zu den E_{vd} -Werten auf der Schüttlage gemessenen relativ hohen Verdichtungswerten (siehe Diagramm 2.5) wurde das Testfeldplanum als geeignet für die Durchführung der Feldversuche beurteilt. Eine Beeinflussung der Messergebnisse durch etwaige Schwachstellen im gewachsenen Terrassenschotter konnte somit weitgehend ausgeschlossen werden.



Diagramm 2.5: E_{vd} -Wert/Setzungsdiagramm aller im Zeitraum vom 04.11. – 06.11.2015 durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche; die direkt am in situ gewachsenen Terrassenschotter durchgeführten dynamischen Lastplatten (rote Rechteckmarkierungen) sind vom 13.10.2015.

5.2.4 E_{VD}-WERTE NEBENTESTFELDER

Auf dem Nebentestfeld Terrassenschotter, welches mit dem Pflug bis in eine Tiefe von rund 20 cm aufgelockert wurde, wurden vor Beginn der Messfahrten in den Testfeldabschnitten "Start", "Mitte 1", "Mitte 2" und "Ende" (siehe Abbildung 2.42) E_{vd} -Werte von rund 35 – 55 MN/m² (siehe auch Tabelle 7.2) gemessen.

Auf dem Nebentestfeld "Lösslehm" wurde das mit dem Pflug aufgelockerte Feinkorndominierte Material durch eine statische Überfahrt mit der Testwalze H7i vor Beginn der Messfahrten geglättet. Bei den anschließend in den Testfeldabschnitten "Messbereich 1" und "Messbereich 2" (siehe Abbildung 2.43) durchgeführten dynamischen Lastplattenversuchen wurden E_{vd} -Werte von rund 6 – 8 MN/m² gemessen (siehe auch Tabelle 7.2). Die Ergebnisse der auf beiden Nebentestfeldern im Zuge der Messfahrten durchgeführten dynamischen Lastplatten sind in Tabelle 7.2 aufgelistet.

5.2.5 VERDICHTUNGSZUWÄCHSE

Eine detaillierte Interpretation der im Zuge von mehreren Messfahrten generierten Verdichtungszuwächse erfolgt im Vergleich mit den zugehörigen FDVK-Wertergebnissen unter Punkt 5.3. Die in Diagramm 2.6 veranschaulichten Zuwächse des E_{vd} -Wertes mit der Anzahl der Überfahrten sollen jedoch den grundsätzlichen Trend bzw. das gemessene Werteniveau veranschaulichen. Wie bei den dargestellten E_{vd} -Werten (Messfahrten mit der Testwalze HD+140) aus dem Bereich "Homogen Mitte" ersichtlich, konnte meist – jedoch nicht immer – eine Zunahme der E_{vd} -Werte festgestellt werden.



Diagramm 2.6: Verdichtungszuwächse bei mehreren Überfahrten im Bereich "Homogen Mitte", am 04.11.2015, unter Verwendung unterschiedlicher Prozessparametereinstellungen

5.3 FDVK-ERGEBNISSE

5.3.1 VERWENDETE ROHDATEN / DATENAUFBEREITUNG

Im Zuge der Feldversuche wurden mit dem in den Walzen eingebauten FDVK-System die FDVK-Werte online und arbeitsintegriert unter Verwendung der Vertikal- und Horizontalbeschleunigungen entsprechend dem unter Punkt 3.9.2.2.3 beschriebenen Algorithmus generiert und aufgezeichnet. Da – von Seiten der Hamm AG – das Ziel der Feldversuche insbesondere darin bestand, einen stabilen Messwert zu erzeugen, wurden die FDVK-Werte mit unterschiedlichsten Hoch- bzw. Tiefbassfiltern bzw. Faktoren kombiniert und verglichen. In Diagramm 2.7 sind beispielhaft die mit den unterschiedlichen Glättungsfiltern generierten FDVK-Werte der Messfahrt 112 (Testwalze HD+140, f = 31 Hz, v = 3 km/h) dargestellt.



Diagramm 2.7: Systemplot: FDVK-Werte der Messfahrt 112 (Testwalze HD+140, f = 31 Hz, v = 3 km/h) unter Verwendung unterschiedlicher Filtersysteme zur Generierung eines stabilen Wertes

In der vorliegenden Arbeit ist der Schwerpunkt, wie bereits unter Punkt 5.1 beschrieben, auf die Anwendbarkeit bzw. die Funktionalität des noch ungeglätteten über den unter Punkt 3.9.2.2 bereits dargestellten Algorithmus gelegt. Dementsprechend wurden für die weiteren Versuchsauswertungen die während der Messfahrten aufgezeichneten Rohsignale der Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen (siehe Diagramme 2.8 und 2.9) verwendet.



Diagramme 2.8 und 2.9: Systemplot: Rohwerte der aufgezeichneten Horizontal- (links) und Vertikalbeschleunigungssignale (rechts) der Messfahrt 112 (Testwalze HD+140, f = 31 Hz, v = 3 km/h)

Die Auswertung der Messdaten wurde mit dem Programm Matlab durchgeführt. Um die Messfahrten miteinander vergleichen zu können, mussten die Daten folgendermaßen aufbereitet werden:

- Horizontal- und Vertikalbeschleunigungssignale: Die Horizontal- und Vertikalbeschleunigungssignale werden mit einer Abtastrate von 1000 Hz (d.h. 1000 Werte pro Sekunde) aufgezeichnet. Die Vektorenlänge der aufgezeichneten Horizontal- und Vertikalbeschleunigungssignale ergibt sich aus der Messdauer und schaut somit für jede Messfahrt mit unterschiedlicher Fahrtgeschwindigkeit anders aus.
- Lichtschrankensignale:

In Diagramm 2.10 sind die Lichtschrankensignale der beispielhaft gewählten Messfahrt 233 (Testwalze HD+140, f = 30 Hz, v = 4 km/h), bezogen auf die Vektorlänge der Messfahrt, dargestellt.

Diagramm 2.10: Lichtschrankensignale von Messfahrt 233 (Testwalze HD+140, f = 30 Hz, v = 4 km/h)



- Zeitpunkte der vollen Bandagenumdrehung:
 - Für die Korrektur der Periodizität sind die Zeitpunkte der vollen Bandagenumdrehungen erforderlich. Dieser Wegvektor wurde mittels Näherungsschalter (eingebaut am Rahmen der Bandage zugehörigem mit Fahnenblech an der Bandage) gemessen. Die Maxima, welche die Zeitpunkte der vollen Bandagenumdrehung anzeigen, sind in Diagramm 2.11 mit roten Kreisen markiert.



Diagramm 2.11: Zeitpunkte der vollen Bandagenumdrehung von Messfahrt 233 (Testwalze HD+140, f = 30 Hz, v = 4 km/h)

- Aus den Beschleunigungssignalen wurden gemäß dem unter Punkt 3.9.2.2.3 beschriebenen Algorithmus die FDVK-Werte berechnet (chronologische Reihung der Koordinatenpaare, Reihung nach der Größe der Horizontalbeschleunigung, Ermittlung der unteren und oberen Einhüllenden, Berechnung der umschlossenen Fläche, Flächeninhalt entspricht dem FDVK-Wert).
- Für die Ermittlung eines FDVK-Wertes ist dementsprechend zumindest eine Oszillationsperiode erforderlich.
- Der Algorithmus ist als Schleife programmiert, wobei der gemittelte und überlappte FDVK-Wert immer abgespeichert wird. Die einzelnen FDVK-Werte werden aneinandergereiht und in Form eines FDVK-Ergebnisvektors ausgegeben.
- Mit den aufgezeichneten Zeitpunkten der Bandagenumdrehungen wurden um die Messfahrten vergleichen zu können – die Ergebnisvektorlängen gleichgerichtet.
- Abschließend erfolgt die Korrektur der Periodizität über den unter Punkt 3.9.2.2.4 beschriebenen Algorithmus (Abzug der Korrekturkurve in Abhängigkeit von der Steifigkeit).
- In den nachfolgenden Diagrammen 2.12 bis 2.14 sind die berechneten FDVK-Werte f
 ür die verwendeten Testwalzen beispielhaft an drei Messfahrten
 über die Testfeldlänge dargestellt. Die Lage der "Schwachstelle 1" bzw. der "Schwachstelle 2" ist in den Diagrammen mit blauen bzw. gr
 ünen Linien gekennzeichnet. Die berechneten Mittelwerte f
 ür die einzelnen Streckenabschnitte "Schwachstelle 1", "Homogen Mitte" und "Schwachstelle 2" sind als blaue, rote bzw. gr
 üne Punkte dargestellt.



40 Wegstrecke [m]

Diagramm 2.12: Berechneter Wert von Messfahrt 233 HD+140, f = 30 Hz, v = 4 km/h)

Diagramm 2.13: Berechneter FDVK-Wert von Messfahrt 225 (Testwalze H7i, f = 36 Hz, v = 2 km/h

Diagramm 2.14: Berechneter FDVK-Wert von Messfahrt 222 (Testwalze H13i, f = 27 Hz, v = 2 km/h)
5.3.2 ERGEBNISSE DER VERDICHTUNGSZUWACHSVERSUCHE

Im Zuge direkt aufeinander folgender Testfahrten auf einer zuvor unverdichteten Spur wird das geschüttete Material sukzessive verdichtet. Entsprechend der Funktionsweise des FDVK-Systems wurden bei den Testfahrten die Prozessparameter (Geschwindigkeit, Erregerfrequenz) konstant gehalten, sodass der gemessene FDVK-Wert direkt der zunehmenden Steifigkeit des Bodens zugerechnet werden kann.

Die Auswertung einer Messfahrtenreihe auf Spur 1 mit der Messwalze HD+140 bei konstant gehaltenen Prozessparametern (f = 27 Hz, v = 2 km/h) ist in Diagramm 2.15 dargestellt.



Diagramm 2.15: Verdichtungszuwächse mit konstanten Prozessparametern am Haupttestfeld (Testwalze HD+140, f = 27 Hz, v = 2 km/h) auf Spur 1: FDVK-Werte der Messfahrten 88 (1.ÜF), 90 (3.ÜF), 92 (5.ÜF) und 93 (6. ÜF)

Die Auswertung der Messdaten lässt folgende Interpretationen zu:

- Das FDVK-System liefert reproduzierbare Ergebnisse.
- Mit der Anzahl der Überfahrten steigt der FDVK-Wert an.
 - Deutlich ausgeprägt ist dies im Bereich "Homogen Ende" (Testfeldbereich 60 70 m).
 - Unterschiedlich stark ausgeprägt ist das in den anderen Bereichen. Die bereichsweise geringen Verdichtungszuwächse werden dem lokal zu hohen Feuchtegehalt des Schüttmateriales zugeordnet.
 - Ab der 6. Überfahrt können vergleichsweise nur noch geringe oder keine Verdichtungszuwächse mehr generiert werden.
- Die Schwachstellen im Untergrund sind eindeutig lokalisierbar ("Schwachstelle 1" blau markiert; "Schwachstelle 2" grün markiert).
- Im Teststreckenabschnitt "Homogen Ende" wurden die stabilsten FDVK-Verdichtungszuwächse gemessen. Dieses Ergebnis deckt sich auch mit den Ergebnissen der durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche (siehe Diagramm 2.3) bzw. mit den Beobachtungen während der Feldversuche, dass das

Schüttmaterial im Bereich "Homogen Ende" entsprechend einer optischen Ansprache einen geringeren Feuchtegehalt besaß.

 Dass im Bereich "Homogen Mitte" (von 40m – 50m Testfeldstrecke) trotz Bodenaustausch nur geringe Verdichtungszuwächse beobachtet wurden, ist dahingehend zu erklären, dass das Bodenaustauschmaterial (gering schluffiger, kiesiger Sand) Feinkorn-dominierter und weniger weitgestuft ist als das ursprüngliche Schüttmaterial. Bei den jeweils direkt nach den Messfahrten durchgeführten dynamischen Lastplattenversuchen wurden im Bereich "Homogen Mitte" ebenfalls sehr moderate Verdichtungszuwächse von E_{vd} = 33,3 MN/m² (nach 1. ÜF) auf E_{vd} = 40,3 MN/m² (nach 6.ÜF) gemessen.

Zum Vergleich wurden auch Verdichtungszuwachsversuche auf den Nebentestfeldern Terrassenschotter und Lösslehm (beide beschrieben unter Punkt 4.2.2 und 4.2.3) durchgeführt. Die Ergebnisse der Vergleichsfahrten sind in den Diagrammen 2.16 und 2.17 dargestellt.

Interpretation Diagramm 2.16 Nebentestfeld Terrassenschotter:

- Der für die Versuchsfahrten mittels Pflug aufgelockerte am Nebentestfeld anstehende Terrassenschotter besitzt entsprechend einer optischen Ansprache in etwa dieselbe Korngrößenverteilung bzw. Zusammensetzung wie das Schüttmaterial am Haupttestfeld. Wie zu erwarten ist, hat das zu verdichtende Material unter Verwendung gleicher Prozessparameter (f = 27 Hz, v = 2 km/h) auch in etwa dasselbe FDVK-Werteniveau wie das Schüttmaterial am Haupttestfeld.
- Der Verdichtungszuwachs ist klar erkennbar und scheint mit den vier durchgeführten Überfahrten – da ein stetiger Anstieg der FDVK-Werte erkennbar ist – auch noch nicht vollkommen abgeschlossen zu sein.³

³ Der Messwertsprung bei Überfahrt 1 im Wegstreckenbereich von 9 – 11 m kann nicht eindeutig zugeordnet bzw. interpretiert werden.



Diagramm 2.16: Verdichtungszuwächse mit konstanten Prozessparametern am Nebentestfeld Terrassenschotter (Testwalze HD+140, f = 27 Hz, v = 2 km/h) auf Spur 10: FDVK-Werte der Messfahrten 63 (1. \ddot{U} F), 64 (2. \ddot{U} F), 65 (3. \ddot{U} F) und 66 (4. \ddot{U} F)

Interpretation Diagramm 2.17 Nebentestfeld Lösslehm:

 Auf dem Nebentestfeld Lösslehm wurden mit der Testwalze H13i unter Verwendung der Prozessparameter f = 33 Hz und v = 3 km/h bei 4 Überfahrten keine bzw. nur sehr geringe Verdichtungszuwächse generiert. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Ergebnissen der direkt nach den Überfahrten durchgeführten dynamischen Lastplattenversuchen (siehe Tabelle 2.18).

Tabelle2.18:ErgebnissederaufdemNebentestfeldLösslehmdurchgeführtendynamischenLastplattenversuche direkt nach den Versuchsfahrten mit der TestwalzeH13i, f = 33 Hz und v = 3 km/h

| | LP-Messbereich 1 | LP-Messbereich 2 |
|-------------------|--------------------------------------|-------------------------|
| | E _{vd} [MN/m ²] | E _{vd} [MN/m²] |
| Nach 1. Überfahrt | 10,4 | 10 |
| Nach 2. Überfahrt | 10,4 | 10,4 |
| Nach 3. Überfahrt | 10,2 | 11,5 |
| Nach 4. Überfahrt | 9 | 10,6 |

 Insbesondere die Überfahrten 2 – 4 zeigen einen vergleichbaren und überwiegend reproduzierbaren FDVK-Wertverlauf. Die bei Überfahrt 1 auf gut zwei Drittel der Wegstrecke erkennbare scheinbare Periodizität ist wahrscheinlich dem noch stark unebenen, frisch aufgelockerten Untergrund geschuldet.



Diagramm 2.17: Verdichtungszuwächse mit konstanten Prozessparametern am Nebentestfeld Lösslehm (Testwalze H13i, f = 33 Hz, v = 3 km/h) auf Spur 12: FDVK-Werte der Messfahrten 189 (1. \ddot{U} F), 190 (2. \ddot{U} F), 191 (3. \ddot{U} F) und 192 (4. \ddot{U} F)

In den nachfolgenden Diagrammen 2.18, 2.19 und 2.20 sind von jeder Messfahrt die Mittelwerte des FDVK-Wertes im Streckenabschnitt "Homogen Ende" dargestellt. Die Walzen H13i und HD+140 wurden auf Spuren mit eingebauten Schwachstellen durchgeführt, sodass die Mittelwerte dieser Bereiche ebenfalls dargestellt werden können.



Diagramm 2.18: Entwicklung des gemittelten FDVK-Werts im Bereich "Homogen Ende" bei steigender Anzahl der Überfahrten unter Verwendung der Testwalze H7i (Spur 4, f = 36 Hz, v = 3 km/h)



Diagramm 2.19: Entwicklung des gemittelten FDVK-Werts im Bereich "Homogen Ende", "Schwachstelle 1" und "Schwachstelle 2" bei steigender Anzahl der Überfahrten unter Verwendung der Testwalze H13i (Spur 3, f = 36 Hz, v = 3 km/h)



Diagramm 2.20: Entwicklung des gemittelten FDVK-Werts im Bereich "Homogen Ende", "Schwachstelle 1" und "Schwachstelle 2" bei steigender Anzahl der Überfahrten unter Verwendung der Testwalze HD+140 (Spur 1, f = 27 Hz, v = 2 km/h)

Die Auswertung der Messdaten lässt folgende Interpretationen zu:

• Bei allen drei Testwalzen (H7i, H13i und HD+140) ist im Bereich "Homogen Ende" eine Zunahme der Bodensteifigkeit und somit ein Verdichtungszuwachs bei steigender Anzahl der Überfahrten feststellbar. Der Verdichtungszuwachs wird – wenn auch

aufgrund der geringen Anzahl an Überfahrten nicht immer eindeutig erkennbar – mit steigender Anzahl der Messfahrten über die Teststrecke geringer.

- Die Messfahrten der Testwalze H13i wurden auf Spur 3 in welche zwei Schwachstellen eingebaut wurden – durchgeführt (siehe Diagramm 2.19). Die Auswertung der Mittelwerte dieser Bereiche zeigen folgendes Ergebnis:
 - Die "Schwachstelle 1" (Regufoam 270 plus; mit einem statischen E-Modul von 0,25 bis 0,45 N/mm²) wurde vom FDVK-System erkannt und zeigt im Vergleich zu den Mittelwerten im Bereich "Homogen Ende" ein niedrigeres Messwertniveau. Eine sukzessive wenn auch nicht so ausgeprägte Verdichtung des über der Schwachstelle liegenden Schüttmateriales ist bei steigender Anzahl der Überfahrten zu erkennen.
 - Die "Schwachstelle 2" (Regufoam 510 Plus; statischer E-Modul von 1,1 bis 1,7N/mm²) wird bei den ersten drei Überfahrten (Durchlaufende Nr.: 207-209) nicht als solche erkannt. Erst bei den folgenden Überfahrten (Durchlaufende Nr.: 210-211) zeigt sich, dass im Bereich der "Schwachstelle 2" keine weitere Verdichtung mehr möglich ist.
- Die Auswertung der Messfahrten der Testwalze HD+140 auf Spur 1, in welcher ebenfalls Schwachstellen eingebaut waren, zeigen folgendes Ergebnis (siehe Diagramm 2.20):
 - Beide Schwachstellen werden vom FDVK-System als solche erkannt und besitzen im Vergleich zu den Mittelwerten des Bereichs "Homogen Ende" ein deutlich niedrigeres Messwertniveau.

Zusammenfassung der Ergebnisse der Verdichtungszuwachsversuche:

Bei allen drei im Zuge der Feldversuche verwendeten Testwalzen konnten für den Bereich "Homogen Ende" Verdichtungszuwächse generiert werden. Die Zunahme der Bodensteifigkeit ist während den ersten Fahrten am größten, ehe sie später asymptotisch geringer werden, bis die maximale Verdichtung erreicht wird. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Erkenntnissen vorangegangener Arbeiten insbesondere von PISTROL [57]. Dass nicht über die gesamte Strecke Verdichtungszuwächse generiert werden konnten, wird dem erhöhten Feuchtegehalt des Schüttmateriales in weiten Teilen der Strecke zugeschrieben.

Während mit der Testwalze H13i über beiden Schwachstellen – wenn auch auf ein niedrigeres Werteniveau im Vergleich zu den Mittelwerten im Bereich "Homogen Ende" – eine Verdichtung erzielt worden ist, konnte bei den Überfahrten mit der Testwalze HD+140 de facto kein Anstieg der FDVK-Werte verzeichnet werden. Anders ausgedrückt werden die Schwachstellen von der Testwalze HD+140 ab der ersten Überfahrt sehr gut (siehe Diagramm 2.15 und 2.20), von der Testwalze H13i hingegen kaum bzw. erst ab der 4. Überfahrt wahrgenommen (siehe Diagramm 2.19). Bezüglich einer weiterführenden Interpretation wird auf Punkt 6.1 der vorliegenden Arbeit verwiesen.

Bei den Versuchen auf dem Nebentestfeld Terrassenschotter wurden – da eine ähnliche Korngrößenverteilung bzw. Zusammensetzung gegeben war – ähnliche Ergebnisse wie bei den Versuchen am Haupttestfeld erzielt. Das Feinkorn-dominierte Material am Nebentestfeld

Lösslehm konnte nicht bzw. nur unwesentlich verdichtet werden. Bei mehrmaligen Überfahrten konnten jedoch vergleichbare und überwiegend reproduzierbare FDVK-Werte generiert werden.

5.3.3 EINFLUSS DER PROZESSPARAMETER

Wie insbesondere in den Arbeiten von KOPF [46] und HAGER [35] beschrieben, haben die Prozessparameter (Erregerfrequenz, Fahrtgeschwindigkeit) maßgeblichen Einfluss auf das FDVK-Werteniveau sowie auf die Sensitivität der FDVK-Systeme für Vibrationswalzen.

Wie sich anhand der Erkenntnisse der Feldarbeiten in Fischamend herausstellte, haben die Prozessparameter (Erregerfrequenz, Fahrgeschwindigkeit) auch im Falle des FDVK-Systems für Oszillationswalzen Einfluss auf das FDVK-Werteniveau bzw. die Sensitivität.

Wurde bei den Verdichtungszuwachsversuchen noch die Bodensteifigkeit als variable Größe zugelassen, wurden die Testfahrten mit variierenden Prozessparametern (f = 27 - 36 Hz, v = 2 - 4 km/h) nun auf einer mit mehreren Walzenübergängen vollkommen verdichteten Spur durchgeführt. Die Ergebnisse der mit allen drei Testwalzen auf dem Haupttestfeld durchgeführten Versuchsfahrten sind in den nachfolgenden Diagrammen 2.21, 2.22 und 2.23 dargestellt.



Diagramm 2.21: Gemittelte FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung der Testwalze H7i – Prozessparametervariation (bei der Testwalze H7i wurden nur die Erregerfrequenzen f = 30 Hz und 36 Hz verwendet, v = 2 - 4 km/h)

Interpretation der Prozessparametervariation für die Testwalze H7i (siehe Diagramm 2.21):

- Das FDVK-Werteniveau bei einer Erregerfrequenz von f = 30 Hz ist mit FDVK ≈ 900 1100 m²/s⁴ signifikant höher als bei einer Erregerfrequenz von f = 36 Hz mit FDVK ≈ 520 – 610 m²/s⁴.
- Bei einer Variation der Geschwindigkeit können bei den untersuchten Erregerfrequenzen ähnliche FDVK-Wertveränderungen festgestellt werden. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von v = 3 km/h wurden die größten FDVK-Werte aufgezeichnet. Bei höheren als auch bei langsameren Geschwindigkeiten nimmt der gemittelte FDVK-Wert geringfügig ab.



Diagramm 2.22: Gemittelte FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung der Testwalze H13i – Prozessparametervariation (f = 27 Hz, 30 Hz, 33 Hz und 36 Hz, v = 2 - 4 km/h)

Interpretation der Prozessparametervariation für die Testwalze H13i (siehe Diagramm 2.22):

- Das FDVK-Werteniveau bleibt bei einer Variation der Fahrgeschwindigkeit von 2 4 km/h stabil und im Wesentlichen unverändert.
- Allerdings zeigt sich auch bei der Testwalze H13i eine starke Beeinflussung des FDVK-Wertes bei Verwendung unterschiedlicher Erregerfrequenzen. Bei Verwendung einer Erregerfrequenz von f = 30 Hz wurde der höchste FDVK-Wert gemessen. Signifikant und bei allen drei Fahrgeschwindigkeiten zu beobachten ist der Abfall des FDVK-Wertes bei Verwendung einer Erregerfrequenz von f = 27 Hz.



Diagramm 2.23: Gemittelte FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung der Testwalze HD+140 – Prozessparametervariation (f = 27 Hz, 30 Hz, 33 Hz und 36 Hz, v = 2 - 4 km/h)

Interpretation der Prozessparametervariation für die Testwalze HD+140 (siehe Diagramm 2.23):

- Während das FDVK-Werteniveau bei einer Variation der Fahrgeschwindigkeit von v = 2 4 km/h bei den niedrigeren Erregerfrequenzen von f = 27 Hz und f = 30 Hz eher stabil bleibt, ist bei den höheren Erregerfrequenzen f = 33 Hz und f = 36 Hz mit steigender Fahrgeschwindigkeit eine Reduzierung des FDVK-Werteniveaus zu beobachten.
- Deutlich stärker ausgeprägt ist auch bei der Testwalze HD+140 die Beeinflussung des FDVK-Wertes bei Verwendung unterschiedlicher Erregerfrequenzen. Bei Verwendung von hohen Erregerfrequenzen wurden markant höhere FDVK-Werte gemessen.⁴

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Beurteilung des Einflusses der Prozessparameter:

Die durchgeführten Testfahrten zeigten, dass durch die Änderung eines oder beider Prozessparameter (Erregerfrequenz und Fahrgeschwindigkeit) sich auch das FDVK-Werteniveau ändert. Während sich die Änderungen der Fahrgeschwindigkeit bei allen drei getesteten Walzen moderat bis gering auf das FDVK-Wertniveau auswirkten, beeinflussten Änderungen der Erregerfrequenz zum Teil signifikant das Ergebnis des FDVK-Wertes. Die verwendeten Messwalzen reagierten unterschiedlich auf veränderte Erregerfrequenzen:

 Während bei den Testwalzen H7i und H13i bei einer Erregerfrequenz von f = 30 Hz vergleichsweise ein hohes FDVK-Wertniveau generiert wurde, ergab die Auswertung

⁴ Die Messfahrt mit der durchlaufenden Nummer 239 (f = 36 Hz, v = 2 km/h) wurde fehlerhaft aufgezeichnet und konnte für die weitere Auswertung nicht verwendet werden.

der Messfahrten der Testwalze HD+140 bei gleicher Erregerfrequenz ein vergleichsweise niedriges FDVK-Werteniveau.

 Signifikant ist bei der Testwalze H13i der Abfall des FDVK-Wertes bei Verwendung der Erregerfrequenz von f = 27 Hz zu bezeichnen.

Bezüglich einer weiterführenden Interpretation wird auf Punkt 6.1 der vorliegenden Arbeit verwiesen.

5.3.4 EINFLUSS DER WALZENPARAMETER

Wie schon unter Punkt 2.7 beschrieben, haben die Walzenparameter (z.B. Masse der schwingenden Bandage bzw. statische Linienlast, Bandagengeometrie, statisches Moment, Amplitude der Erregerschwingung) maßgeblichen Einfluss auf das FDVK-Wertniveau bzw. auf die Sensitivität des Messsystems.

Um einen Vergleich der Ergebnisse der FDVK-Systeme zwischen den drei verwendeten Messwalzen zu bekommen, wurden auf der völlig verdichteten Spur 3 des Haupttestfeldes mit unterschiedlichen Prozessparameterkombinationen Testfahrten durchgeführt.

Im nachfolgenden Diagramm 2.24 werden die gemittelten FDVK-Werte der drei verwendeten Messwalzen im Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeiten bei einer konstanten Erregerfrequenz von f = 30 Hz Testfahrten verglichen.



Diagramm 2.24: Gemittelte FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung aller Testwalzen (H7i, H13i und HD+140) mit einer konstanten Erregerfrequenz von f = 30 Hz auf der völlig verdichteten Spur 3 am Haupttestfeld

Bei einem Vergleich der FDVK-Werte unter Verwendung des identen FDVK-Systems, unter konstanten Prozessparametern auf bereits verdichtetem Untergrund mit konstanter Bodensteifigkeit, wird der Einfluss der Walzenparameter augenscheinlich. Wie in Diagramm 2.24 ersichtlich, besitzen alle drei Messwalzen ein völlig unterschiedliches Werteniveau. Ein signifikant höheres Werteniveau besitzt die Testwalze H7i.

Eine Gegenüberstellung der gemittelten FDVK-Werte aller Testwalzen aus dem Bereich "Homogen Ende" bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von v = 3 km/h und unterschiedlichen Erregerfrequenzen ist in Diagramm 2.25 dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die drei Messwalzen ein unterschiedliches Werteniveau besitzen. Wie schon in Diagramm 2.21 dargestellt, zeigt sich auch hier die hohe Sensibilität der Testwalze H7i in Bezug auf unterschiedliche Erregerfrequenzen.⁵



Diagramm 2.25: Gemittelte FDVK-Werte aus dem Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung aller Testwalzen (H7i, H13i und HD+140) mit einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von v = 3 km/h auf der völlig verdichteten Spur 3 am Haupttestfeld (bei der Testwalze H7i wurden nur die Erregerfrequenzen f = 30 Hz und f = 36 Hz verwendet)

In nachfolgendem Diagramm 2.26 sind die FDVK-Wertverläufe der drei Testwalzen H7i, H13i und HD+140 gegenübergestellt. Auch bei diesen Versuchsfahrten wurden die Untergrundverhältnisse konstant gehalten. Um eine Aussage über den Einfluss der Walzenparameter treffen zu können, wurden alle Messfahrten mit f = 30 Hz, v = 3 km/h, d.h. konstant gehaltenen Prozessparametern, durchgeführt.

 ⁵ Bei den Testwalzen H13i und HD+140 wurden die Erregerfrequenzen f = 27 Hz, f = 30 Hz, f = 33 Hz und f = 36 Hz untersucht.
 Bei der Testwalze H7i konnte nur zwischen den Erregerfrequenzen f = 30 Hz und f = 36 Hz umgeschulten werden.



Diagramm 2.26: FDVK-Wertverläufe aller Testwalzen (H7i, H13i und HD+140) mit konstanten Prozessparametern (f = 30 Hz, v = 3 km/h) am Haupttestfeld auf völlig vorverdichteter Spur 3: FDVK-Werte der Messfahrten 230 (H7i), 213 (H13i) und 237 (HD+140)

Die in Diagramm 2.26 dargestellten Messergebnisse zeigen, welch großen Einfluss die Walzenparameter auf das FDVK-Werteniveau des FDVK-Systems besitzen. So generiert das FDVK-System der H7i in etwa doppelt so hohe FDVK-Werte wie die Testwalze H13i bzw. viermal so hohe FDVK-Werte wie die Testwalze HD+140.



Diagramm 2.27: Normierte FDVK-Wertverläufe (Division der Einzelwerte durch den Mittelwert aller Einzelwerte) aller Testwalzen (H7i, H13i und HD+140) mit konstanten Prozessparametern (f = 30 Hz, v = 3 km/h) am Haupttestfeld auf völlig vorverdichteter Spur 3: FDVK-Werte der Messfahrten 230 (H7i), 213 (H13i) und 237 (HD+140)

Durch Division der Einzelwerte einer Messfahrt durch den Mittelwert aller Einzelwerte einer Messfahrt können die FDVK-Wertverläufe normiert werden und dementsprechend besser verglichen werden. Über die in Diagramm 2.27 normiert dargestellten FDVK-Wertverläufe können Aussagen über die Sensitivität der Messsysteme der einzelnen Testwalzen getroffen werden. Es wurden – um den Vergleich ziehen zu können – dieselben Messfahrten wie bei Diagramm 2.26 verwendet.

Während bei den Testwalzen H7i und HD+140 die Schwachstellen eindeutig lokalisiert werden können, reagiert das FDVK-System der Testwalze H13i weniger sensitiv. Der Verlauf des FDVK-Wertes der Testwalze H13i ist gleichmäßiger und reagiert weniger auf Änderungen der Bodensteifigkeit. Grundsätzlich ist jedoch anzumerken, dass mit jeder Testwalze der FDVK-Wertverlauf der anderen verwendeten Testwalzen qualitativ nachgebildet werden kann.

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Beurteilung des Einflusses der Walzenparameter:

Die bei den Testwalzen unterschiedlichen Walzenparameter, wie z.B. die Masse der schwingenden Bandage bzw. die statische Linienlast, das statische Moment, die Amplitude der Erregerschwingung sowie Kombinationen derselben, haben einen maßgeblichen Einfluss auf das FDVK-Wertniveau des FDVK-Systems. Das FDVK-System der H7i erzeugt im Vergleich zur Testwalze H13i doppelt, im Vergleich zur Testwalze HD+140 viermal so hohe FDVK-Werte. Während die Testwalzen H7i und HD+140 Schwachstellen durchwegs gut erkennen, reagiert das FDVK-System der Testwalze H13i weniger sensitiv. Bezüglich einer weiterführenden Interpretation wird auf Punkt 6.1 der vorliegenden Arbeit verwiesen.

5.3.5 REPRODUZIERBARKEIT DER MESSDATEN

Wie schon unter Punkt 3.3 beschrieben, ist für ein funktionierendes FDVK-System maßgeblich, dass es eindeutige und reproduzierbare FDVK-Werte liefert. Um die Reproduzierbarkeit der FDVK-Werte zu untersuchen, wurden mit allen drei Testwalzen Messfahrten durchgeführt. Zu diesem Zwecke wurden jeweils zwei Messfahrten mit denselben Prozessparametern auf einer vorverdichteten Spur des Haupttestfeldes durchgeführt. Die Ergebnisse der Messfahrten sind in den Diagrammen 2.28, 2.29 und 2.30 dargestellt.



Diagramm 2.28: FDVK-Wertverläufe von jeweils zwei Messfahrten mit der Testwalze H7i auf der vorverdichteten Spur 3 des Haupttestfeldes unter Verwendung folgender Prozessparameter:

- f = 30 Hz und v = 3 km/h Messfahrt mit der durchlaufenden Nr. 227 (21. ÜF) und 230 (24. ÜF)
- f = 36 Hz und v = 3 km/h Messfahrt mit der durchlaufenden Nr. 224 (18. ÜF) und 229 (23. ÜF)



Diagramm 2.29: FDVK-Wertverläufe von jeweils zwei Messfahrten mit der Testwalze H13i auf der vorverdichteten Spur 3 des Haupttestfeldes unter Verwendung folgender Prozessparameter:

- f = 27 Hz und v = 4 km/h Messfahrt mit der durchlaufenden Nr. 132 (4. ÜF) und 133 (5. ÜF)
- f = 32 Hz und v = 4 km/h Messfahrt mit der durchlaufenden Nr. 150 (4. ÜF) und 152 (6. ÜF)



Diagramm 2.30: FDVK-Wertverläufe von jeweils zwei Messfahrten mit der Testwalze HD+140 auf der vorverdichteten Spur 3 des Haupttestfeldes unter Verwendung folgender Prozessparameter:

- f = 36 Hz und v = 3 km/h Messfahrt mit der durchlaufenden Nr. 80 (4. ÜF) und 81 (5. ÜF)
- f = 31 Hz und v = 4 km/h Messfahrt mit der durchlaufenden Nr. 104 (5. ÜF) und 105 (6. ÜF)

Zusammenfassende Interpretation zur Reproduzierbarkeit der Messergebnisse:

Wie in den Diagrammen 2.28, 2.29 und 2.30 ersichtlich, können die FDVK-Wertverläufe bei allen drei Testwalzen unter Verwendung unterschiedlichster Prozessparameterkombinationen sehr gut reproduziert werden. Bei den jeweils zweiten Überfahrten mit denselben Prozessparametern werden die FDVK-Wertverläufe qualitativ und quantitativ unter Berücksichtigung einer relativ geringen Streuung der Messwerte gut wiedergegeben. Folgende Faktoren werden für die geringfügig unterschiedlichen Messwerte als maßgeblich erachtet:

- Die Messfahrten sind zum Teil nicht direkt hintereinander abgearbeitet worden. Die Bodensteifigkeit des Bodens ist nicht völlig konstant.
- Teilweise wurden Messfahrten herangezogen, bei welchen die Verdichtung der Strecken noch nicht vollkommen abgeschlossen war (4. 6. Überfahrten).
- Die Messspur hat sich von Messfahrt zu Messfahrt entsprechend einer natürlichen Streuung um bis zu 10 cm seitlich verschoben. Dadurch wurde bei einer Bandagenbreite von 1,7 m - 2,2 m das Ergebnis mit beeinflusst.

Die Grundbedingung für ein FDVK-System – die eindeutige und reproduzierbare Abbildung des Bewegungsverhaltens der schwingenden Bandage in Abhängigkeit von den Untergrundverhältnissen – ist damit erfüllt.

5.3.6 VERGLEICH DES FDVK-WERTES MIT ERGEBNISSEN DES DYNAMISCHEN LASTPLATTENVERSUCHES

Wie bereits unter Punkt 3.9.2.2 beschrieben, wurde von PISTROL [57] anhand einer mittels mechanischen Modells durchgeführten Parameterstudie ein eindeutiger Zusammenhang zwischen dem FDVK-Wert und der Steifigkeit des Bodens hergestellt. Bei den experimentellen Untersuchungen wurden von PISTROL [57] bei der Gegenüberstellung von FDVK-Werten und Ergebnissen der direkt im Anschluss der Messfahrten durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche gute Korrelationen festgestellt.

Zur Validierung dieser Ergebnisse werden die gemittelten FDVK-Werte aus dem Bereich "Homogen Ende" den Ergebnissen der zugehörigen dynamischen Lastplattenversuchen gegenübergestellt. Das Ergebnis ist in Diagramm 2.31 dargestellt. Für die nachfolgenden drei Diagramme wurden die Messfahrten mit der durchlaufenden Nummer 179-184 (H7i), 207-211 (H13i) und 77-81 (HD+140) verwendet. Alle Messfahrten wurden mit den Prozessparametern f = 36 Hz und v = 3 km/h durchgeführt.



Diagramm 2.31: Zusammenhang zwischen dem dynamischen Verformungsmodul E_{vd} und dem gemittelten FDVK-Wert aus dem Bereich "Homogen Ende" für alle drei verwendeten Testwalzen mit den Prozessparametern f = 36 Hz und v = 3 km/h

Bei den Testwalzen H7i und H13i wurden vergleichsweise gute Übereinstimmungen mit Korrelationskoeffizienten von R = 0,86 bzw. R = 0,96 festgestellt. Bei der Testwalze HD+140 beträgt der Korrelationskoeffizient R = 0,38. Der geforderte Korrelationskoeffizient für eine

ordnungsgemäße Kalibrierung gemäß RVS 08.03.02 [62] von R \ge 0, 7 wäre somit für die Testwalzen H7i und H13i erreicht.⁶

Eine Erklärung für die schlechte Korrelation der HD+140 ist in den variierenden Ergebnissen der dynamischen Lastplattenversuche zu finden. Wie in Diagramm 2.32 dargestellt, zeigen die Ergebnisse der gemittelten FDVK-Werte mit steigender Anzahl der Überfahrten einen stetigen Verdichtungszuwachs mit einem hohen Bestimmtheitsmaß von R² > 0,9. Die Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche zeigen insbesondere bei den Messfahrten der HD+140 keinen stetigen Zuwachs der E_{vd}-Werte (siehe Diagramm 2.33).



Diagramm 2.32: Verdichtungszuwachs der gemittelten FDVK-Werte im Bereich "Homogen Ende" für alle drei Testwalzen mit den Prozessparametern f = 36 Hz und v = 3 km/h

⁶ Die RVS 08.03.02 ist derzeit jedoch nur für die Kalibrierung von Vibrationswalzen gültig.

Zusammenfassende Interpretation zur Vergleichbarkeit der FDVK-Messergebnisse mit den Ergebnissen der dynamischen Lastplattenversuche:

Während bei den Testwalzen H7i und H13i eine gute Korrelation der FDVK-Werte mit den Ergebnissen der dynamischen Lastplattenversuche festgestellt wurde, beträgt der Korrelationskoeffizient bei der Testwalze HD+140 nur R = 0,38. Folgende Faktoren werden für die unterschiedlichen Korrelationen bei den verwendeten Testwalzen als maßgeblich erachtet:

- Wie die Darstellungen der FDVK-Werte in den Diagrammen 2.32 und 2.33 zeigen, stellen die gemittelten FDVK-Werte einen stetigen Verdichtungszuwachs dar. Dies ist sicherlich auch dem Umstand geschuldet, dass der FDVK-Wert über eine Testfeldstrecke von 10 m gemittelt wird und dementsprechend etwaige Streuungen gedämpft und ausgeglichen werden. Die dynamischen Lastplattenversuche ermitteln die Bodensteifigkeit nur punktuell und besitzen demnach eine größere Streuung. Wie schon in Diagramm 2.6 dargestellt, wurden mit den dynamischen Lastplattenversuchen insbesondere aufgrund des unterschiedlichen Feuchtegehaltes des Schüttmaterials oft keine eindeutigen Verdichtungszuwächse gemessen.
- Bei den Feldversuchen wurden maximal 6 Überfahrten mit identen Prozessparametern durchgeführt. Die Auswertungen zeigen, dass die Verdichtung des Schüttkörpers mit einer Mächtigkeit von 45 cm meist noch nicht vollständig abgeschlossen war. Die fünf bis sechs Überfahrten pro Testwalze, mit welcher die Korrelation zwischen den FDVK-Werten und den E_{vd}-Werten berechnet wurde, sind für ein statistisch aussagekräftiges Ergebnis als unzureichend zu beurteilen und haben demnach nur eine bedingte Aussagekraft.
- Die FDVK-Systeme der drei Testwalzen beziehen sich im Vergleich zu den dynamischen Lastplattenversuchen auf eine unterschiedliche Messtiefe. Dadurch ist der Vergleich der Werte nur bedingt möglich. Die dynamische Lastplatte besitzt, wie anhand von numerischen Berechnungen und experimentellen Untersuchungen bekannt, eine Messtiefe von rund 60 cm [46]. Während numerische Untersuchungen von KOPF und ERDMANN [46] bei Vibrationswalzen eine Messtiefe von in etwa dem 1,5-fachen Bandagendurchmesser ergaben, sind ausführliche Untersuchungen zur Messtiefe von Oszillationswalzen noch nicht vorhanden. Die durchgeführten Verdichtungszuwachsversuche, dargestellt in den Diagrammen 2.19 und 2.20, zeigen



jedoch eindeutig, dass die Walzen, je nach gegebenen Walzenparametern bzw. voreingestellten Prozessparametern, eine unterschiedliche Messtiefe besitzen.

Diagramm 2.33: E_{vd} -Werte im Bereich "Homogen Ende" für alle drei Testwalzen mit steigender Anzahl der Überfahrten

5.3.7 FAKTORISIERUNG DES FDVK-WERTES

Wie bereits von PISTROL [57] disskutiert kann eine Faktorisierung des FDVK-Wertes mit Prozess- oder Maschinenparametern zweckmäßig sein, um für unterschiedliche Maschinen und Walzeneinstellungen vergleichbare Werte zu bekommen. Nachdem der FDVK-Wert eine Fläche in einem Beschleunigungs-Beschleunigung Diagramm darstellt, ist seine Einheit m²/s⁴.

Durch Division des FDVK-Wertes durch

- die rechnerische Tangentialbeschleunigung a_T [m/s²] (siehe Tabelle 2.14)
- sowie Multiplikation mit der Masse der Bandage m [kg] (siehe Tabelle 2.14)
- und eine Division durch die Bandagenbreite b [m] (siehe Abbildungen 2.44, 2.45 und 2.46)

wird nachfolgend beispielhaft versucht, den FDVK-Wert auf die Einheit N/m zu faktorisieren. Um die FDVK-Werte besser vergleichen zu können, wurde das Messwerteniveau durch Division der faktorisierten FDVK-Werte mit 25 auf ein einheitliches Messwerteniveau angepasst.

Für den <u>Vergleich der Testwalzen</u> (H7i, H13i und HD+140) wurden die gemittelten FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" mit einer konstanten Erregerfrequenz von f = 30 Hz auf der völlig verdichteten Spur 3 am Haupttestfeld verwendet (siehe Diagramm 2.34).

Für den Vergleich der Werte <u>einer Walze bei unterschiedlichen Erregerfrequenzen</u> wurden gemittelte FDVK-Werte der Testwalze H13i aus dem Bereich "Homogen Ende" mit einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von v = 3 km/h auf der völlig verdichteten Spur 3 am Haupttestfeld verwendet (siehe Diagramm 2.35).

Zusammenfassende Interpretation zur Faktorisierung der Messergebnisse:

- Wie in Abbildung 2.34 ersichtlich, werden die FDVK-Werte der drei Messwelzen durch die durchgeführte Faktorisirung nicht auf ein einheitliches und vergleichbares Messwertniveau gehoben. Die FDVK-Werte werden um einen konstanten Wert verschoben jedoch nicht angeglichen.
- Durch die größere rechnerische Tangentialbeschleunigung bei höheren Erregerfrequenzen kommt es zu einer Verschiebung der FDVK-Messwerte (siehe Diagramm 2.35). Ein Angleichen der Messwerte auf ein vergleichbares Messniveau kann nicht festgestellt werden.



Diagramm 2.34: Vergleich der gemittelten FDVK-Werte $[m^2/s^4]$ vom Bereich "Homogen Ende" aus Diagramm 2.24 bei einer konstanten Erregerfrequenz von f = 30 Hz mit den fakoristierten FDVK-Werten mit der Einheit [N/m]



Diagramm 2.35: Vergleich der gemittelten FDVK-Werte $[m^2/s^4]$ der Testwalze H13i vom Bereich "Homogen Ende" aus Diagramm 2.25 bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von v = 3 km/h mit den fakoristierten FDVK-Werten mit der Einheit [N/m]

6 ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

6.1 ZUSAMMENFASSUNG

Seit 2011 läuft ein von der *Hamm AG* in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Wien (Institut für Geotechnik) groß angelegtes Forschungsprojekt, bei welchem erstmals ein System zur Flächendeckenden Dynamischen Verdichtungskontrolle für Oszillationswalzen entwickelt wurde. Die Erkenntnisse aus den experimentellen Untersuchungen sowie die Ergebnisse der durchgeführten semi-analytischen Modellierungen sind in der Dissertation von PISTROL [57] ausführlich beschrieben worden, auch ist der Algorithmus zur Berechnung des FDVK-Wertes zum Patent angemeldet worden.

Im Herbst 2015 wurden in der Kiesgrube der Fa. *HABAU Hoch- u. Tiefbaugesellschaft m.b.H.* in Fischamend groß angelegte Feldversuche mit drei unterschiedlichen Testwalzen mit Oszillationsbandagen durchgeführt. Mit dem neu entwickelten und erstmals in den Walzen eingebauten FDVK-System konnten somit FDVK-Werte erstmalig online und arbeitsintegriert generiert werden. In der vorliegenden Arbeit sind die Ergebnisse der bei den Feldversuchen im Herbst 2015 durchgeführten Testfahrten systematisch aufgearbeitet, dargestellt und interpretiert.

6.1.1 ZUSAMMENFASSUNG DER FELDVERSUCHE

Die Feldversuche wurden in der Kiesgrube der Fa. *HABAU Hoch- u. Tiefbaugesellschaft m.b.H.* im Gemeindegebiet von Fischamend, unweit des Flughafens Wien-Schwechat, durchgeführt. Das Testfeld mit einer Größe von ca. 80 m x 20 m liegt vollflächig in den gut verdichteten in situ gewachsenen quartären Terrassenschottern.

Bevor das Schüttmaterial aufgebracht wurde, sind in den Spuren 1 bis 3 jeweils zwei künstliche Schwachstellen eingebaut worden, um deren Einfluss auf das Bewegungsverhalten der Walze bzw. auf die FDVK-Werte untersuchen zu können. Als Schwachstellenmaterial wurden je 6 Platten mit 1,5 x 5,0 m der Materialien Regufoam 270 plus und Regufoam 510 plus mit einer Dicke von 25 mm verwendet.

Als Schüttmaterial wurde der in der Kiesgrube abgebaute, unaufbereitete, sandige Kies verwendet. Um das Material nicht innerhalb weniger Walzübergänge vollkommen zu verdichten, sondern deutlich mehr Messfahrten durchführen zu können, wurde die Schüttmächtigkeit mit 45 cm absichtlich zu groß gewählt.

Als Testwalzen wurden von der Fa. *Hamm AG* zwei Walzenzüge (H7i und H13i) sowie eine Tandemwalze (HD+140) zur Verfügung gestellt. Alle Testwalzen konnten als Oszillationswalzen betrieben werden. Ziel der Testläufe war, das auf den Testwalzen installierte FDVK-System unter Verwendung von unterschiedlichsten Walzenparametern zu testen. Dementsprechend konnten bei den verwendeten Walzen bei Verwendung als Oszillationswalze die Erregerfrequenz (von f = 27 Hz bis f = 40 Hz) und die Geschwindigkeit von v = 2 km/h bis v = 4 km/h variiert werden.

Folgende Versuche wurden durchgeführt:

- Generierung von Verdichtungszuwächsen mit konstanten Prozessparametern (Erregerfrequenz, Fahrgeschwindigkeit):
 Dazu wurden auf einer unverdichteten Spur mehrere Messfahrten mit einer Testwalze mit konstant gehaltenen Prozessparametern durchgeführt. Nach jeder Messfahrt – mit oszillatorisch angeregter Vorwärtsfahrt und statischer Rückwärtsfahrt – wurden parallel zur FDVK-Wertaufnahme auch dynamische Lastplattenversuche durchgeführt. Das Schüttmaterial wurde mit so vielen Walzenübergängen verdichtet, bis in den Ergebnissen der dynamischen Lastplatte kein Verdichtungszuwachs mehr gemessen wurde. Der Einzelversuch wurde somit abgebrochen und auf einer weiteren unverdichteten Spur mit geänderten Walzenparametern von neuem begonnen.
- Vergleich unterschiedlicher Prozess- und Walzenparameter:
 Wurde im ersten Versuchsabschnitt noch die Bodensteifigkeit als variable Größe zugelassen, wurde selbige im zweiten Versuchsabschnitt als konstant vorgegeben und es wurden nur die Fahrgeschwindigkeit sowie die Erregerfrequenz variiert. Die Testfahrten wurden auf einer mit mehreren Walzenübergängen vollkommen verdichteten Spur durchgeführt, bei welcher keine maßgeblichen Verdichtungszuwächse mehr erwartet werden konnten.

6.1.2 ZUSAMMENFASSUNG DER ERGEBNISSE

Im Zuge der Feldversuche wurden mit dem in den Walzen eingebauten FDVK-System die FDVK-Werte online und arbeitsintegriert unter Verwendung der Vertikal- und Horizontalbeschleunigungen entsprechend dem unter Punkt 3.9.2.2.3 beschriebenen Algorithmus generiert und aufgezeichnet. Die Auswertung der Messdaten wurde mit dem Programm Matlab durchgeführt. Direkt im Anschluss an die Testfahrten wurden in mehreren Testfeldabschnitten dynamische Lastplattenversuche zur Ermittlung des dynamischen Verformungsmoduls E_{vd} durchgeführt.

Insbesondere aus den Ergebnissen der dynamischen Lastplattenversuche konnten die vorherrschenden Rahmenbedingungen im Zuge der Feldarbeiten gut herausgearbeitet werden:

• Untergrundverhältnisse:

Der Verdichtungsgrad des im Liegenden des Haupttestfeldes anstehenden in situ gewachsenen Terrassenschotters ist vollflächig höher als die auf der Schüttlage gemessenen E_{vd}-Werte.

- Zeitliche Entwicklung des E_{vd}-Werteniveaus:
 - Zu Beginn der Feldversuche wurden aufgrund des zu stark durchfeuchteten Schüttmateriales sehr geringe Verdichtungswerte von E_{vd} < 10 MN/m² erzielt. Erst durch die stabileren Wetterverhältnisse in der zweiten Feldversuchshälfte sowie durch den durchgeführten Bodenaustausch am 04.11.2015 wurden höhere Verdichtungswerte erzielt, welche schlussendlich für die weitere Auswertung der FDVK-Messdaten verwendet wurden.
- Räumliche Verteilung des FDVK-Werteniveaus:
 Das Testfeld zeigte ein von Westen gegen Osten ansteigendes Werteniveau.
 Augenscheinlich korrelierte das Werteniveau mit dem Feuchtegehalt des Schüttmateriales, welcher gegen Osten hin sukzessive geringer wurde.
 Dementsprechend werden bei den durchgeführten Auswertungen meist die im Bereich "Homogen Ende" gemessenen Messdaten verwendet.
- Bei den Verdichtungszuwächsen konnte mit steigender Anzahl der Überfahrten bei den begleitend durchgeführten dynamischen Lastplattenversuchen meist jedoch nicht immer eine Zunahme der Evd-Werte festgestellt werden.

Die Auswertung der gemessenen und aufgezeichneten FDVK-Werte sowie der Vergleich der Ergebnisse mit den parallel durchgeführten dynamischen Lastplattenversuchen haben folgende Ergebnisse geliefert:

• <u>Beurteilung des Verdichtungszuwachses</u> auf den Haupt- und Nebentestfeldern unter Verwendung aller drei Testwalzen (H7i, H13i und HD+140):

Bei allen drei im Zuge der Feldversuche verwendeten Testwalzen konnten für den Bereich "Homogen Ende" Verdichtungszuwächse generiert werden. Die Zunahme der Bodensteifigkeit ist während den ersten Fahrten am größten, ehe sie später asymptotisch geringer wird, bis die maximale Verdichtung erreicht wird. Während die Schwachstellen von der Testwalze HD+140 ab der ersten Überfahrt sehr gut (siehe Diagramm 2.15 und 2.20) lokalisiert werden, werden selbige von der Testwalze H13i hingegen kaum bzw. erst ab der 4. Überfahrt wahrgenommen (siehe Diagramm 2.19). Bei den Versuchen auf dem Nebentestfeld Terrassenschotter wurden ähnliche Ergebnisse wie bei den Versuchen am Haupttestfeld erzielt. Das Feinkorn-dominierte Material am Nebentestfeld Lösslehm konnte nicht bzw. nur unwesentlich verdichtet werden. Bei mehrmaligen Überfahrten konnten jedoch vergleichbare und überwiegend reproduzierbare FDVK-Werte generiert werden.

• Beurteilung des Einflusses der Prozessparameter:

Die durchgeführten Testfahrten zeigten, dass sich durch Änderung eines oder beider Prozessparameter (Erregerfrequenz und Fahrgeschwindigkeit) auch das FDVK-Werteniveau ändert. Während sich die Änderungen der Fahrgeschwindigkeit bei allen drei getesteten Walzen moderat bis gering auf das FDVK-Wertniveau auswirkten, beeinflussten Änderungen der Erregerfrequenz das Ergebnis des FDVK-Wertes zum Teil signifikant.

• Beurteilung des Einflusses der Walzenparameter:

Das FDVK-System der H7i erzeugt im Vergleich zur Testwalze H13i doppelt, im Vergleich zur Testwalze HD+140 viermal so hohe Messwerte. Während die Testwalzen H7i und HD+140 Schwachstellen durchwegs gut erkennen, reagiert das FDVK-System der Testwalze H13i weniger sensitiv.

• Reproduzierbarkeit der Messergebnisse:

Die FDVK-Wertverläufe konnten bei allen drei Testwalzen unter Verwendung unterschiedlichster Prozessparameterkombinationen sehr gut reproduziert werden. Bei den Überfahrten mit denselben Prozessparametern werden die FDVK-Wertverläufe qualitativ und quantitativ unter Berücksichtigung einer relativ geringen Streuung der Messwerte gut wiedergegeben. Die Grundbedingung für ein FDVK-System – die eindeutige und reproduzierbare Abbildung des Bewegungsverhaltens der schwingenden Bandage in Abhängigkeit von den Untergrundverhältnissen – ist damit erfüllt.

<u>Vergleichbarkeit der FDVK-Wertergebnisse mit den Ergebnissen der dynamischen</u>
 <u>Lastplattenversuche:</u>

Bei den Testwalzen H7i und H13i konnte eine gute Korrelation der FDVK-Werte mit den Ergebnissen der dynamischen Lastplattenversuche festgestellt werden, bei der Testwalze HD+140 jedoch nicht.

Während der zum Vergleich herangezogene FDVK-Wert über eine Teststreckenlänge von 10 m gemittelt wurde zeigen die Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche nur die Bodensteifigkeit an einer Stelle und besitzen demnach eine größere Streuung. Dementsprechend wurden aufgrund des unterschiedlichen Feuchtegehaltes des Schüttmaterials oft keine eindeutigen Verdichtungszuwächse mit der dynamischen Lastplatte gemessen. Die fünf bis sechs Überfahrten pro Testwalze, mit welcher die Korrelation zwischen den FDVK-Werten und den Evd-Werten berechnet wurde, sind für ein statistisch aussagekräftiges Ergebnis als unzureichend zu beurteilen und haben demnach nur eine bedingte Aussagekraft.

6.2 AUSBLICK

Durch das seit 2011 laufende Forschungsprojekt der Hamm AG in Zusammenarbeit mit der Technischen Universität Wien (Institut für Geotechnik) wurden bei der Qualitätssicherung der klassischen Oberflächenverdichtung mittels Oszillationswalzen enorme Innovations- und Entwicklungsschübe vollzogen. Wie die Auswertung der Feldversuche vom Herbst 2015 in der vorliegenden Arbeit eindrucksvoll zeigen ist mit dem neuen FDVK-System erstmals eine funktionierende Flächendeckende Dynamischen Verdichtungskontrolle für Oszillationswalzen entwickelt welche reproduzierbare Messwerte worden. aeneriert. Die Verdichtungszuwachsversuche zeigten, wie schon bei PISTROL [57] in den vorangegangenen experimentellen und semianalytischen Untersuchungen, dass der FDVK-Wert proportional mit der Bodensteifigkeit zunimmt. Mit den durchgeführten Untersuchungen welche in der vorliegenden Arbeit unter Kapitel 5 ausgewertet und dargestellt wurden, konnten über die Funktionsweise des neu entwickelten FDVK-Systems viele Erkenntnisse und Rückschlüsse gezogen werden. Wie so oft ergeben sich bei einer detaillierten Betrachtung sehr viele neue Fragestellungen. Nachfolgend werden Denkanstöße gegeben wie und in welchem Bereich weiterführende Untersuchungen sinnvoll erscheinen:

- Eine <u>Validierung des It. Erkenntnissen der Dissertation von PISTROL [57] linearen</u> <u>Zusammenhanges zwischen den FDVK-Werten und den E_{vd}-Werten</u> ist wie unter Punkt 5.3.6 beschrieben aufgrund der geringen Anzahl an aufeinanderfolgenden Verdichtungsfahrten sowie den teilweise streuenden Ergebnissen der dynamischen Lastplattenversuche nur bedingt gelungen. Die Auswertung der Messergebnisse zeigt, dass für etwaig in weiterer Folge ergänzend durchgeführte Untersuchungen für die Validierung des linearen Zusammenhanges folgender Versuchsaufbau bzw. folgende Versuchsbedingungen sinnvoll sind:
 - Sehr weit gestuftes gut verdichtbares Schüttmaterial sowie überdimensionierte Schüttlagenmächtigkeiten (> 50 cm), sodass für die vollständige Verdichtung sehr viele Überfahrten erforderlich sind und dementsprechend viele FDVK-Werte sowie E_{vd}-Werte für die Auswertung herangezogen werden können.
 - Die Streuung der Ergebnisse der dynamischen Lastplatte kann durch mehrere Versuche (mind. 3 Stk.) in einem Streckenabschnitt und Verwendung des Mittelwertes reduziert werden.
- Das FDVK-System der H7i erzeugt im Vergleich zur Testwalze H13i doppelt, im Vergleich zur Testwalze HD140 viermal so hohe Messwerte. Eine geeignete Faktorisierung des FDVK-Wertes – wie unter Pkt. 5.3.7 dargestellt - wurde nicht gefunden. Da nur beispielhaft unter Verwendung einiger Maschinen- und Prozessparameter Faktorisierungen der FDVK-Werte durchgeführt wurden könnte auf Basis weiterführender Untersuchungen die Vergleichbarkeit der Messwerte noch verbessert werden.
- Während die Testwalzen H7i und HD+140 Schwachstellen durchwegs gut erkennen, reagiert das FDVK-System der Testwalze H13i weniger sensitiv. Diese

unterschiedliche Sensitivität ist den unterschiedlichen Walzenparametern der Testwalzen geschuldet. Eine mögliche Erklärung ist, dass die Testwalze H13i mit der deutlich schwersten schwingenden Bandagenmasse nur bedingt in der Lage ist, die dynamische Reaktion des Bodens widerzuspiegeln, während die leichteren Bandagen der Testwalzen H7i und HD+140 durch die Reaktion des Bodens (= Bodensteifigkeit) in ihrem Bewegungsverhalten mehr beeinflusst werden [57]. Dies lässt sich aus den bis dato durchgeführten Untersuchungen nicht ableiten. Was sich jedoch gezeigt hat ist, dass es – um ein sensitiv ausgeprägtes FDVK-System zu erhalten – erforderlich ist die Walzenparameter wie z. B. die Bandagenmasse, die Massenverhältnisse zwischen Bandage und Walze, die Bandagenform oder die Größe der Erregeramplitude aufeinander abzustimmen.

 Wie die durchgeführten Verdichtungszuwachsversuche, dargestellt in den Diagrammen 2.19 und 2.20, zeigen haben die FDVK-Systeme der drei Testwalzen untereinander als auch im Vergleich zur dynamischen Lastplatte eine unterschiedliche Messtiefe. Dadurch ist der Vergleich der Messwerte nur bedingt möglich. Die dynamische Lastplatte besitzt, wie aus numerischen Berechnungen und experimentellen Untersuchungen bekannt, eine Messtiefe von rund 60 cm [46]. Um die Aussagekraft der Ergebnisse zu erhöhen, erscheinen experimentelle Untersuchungen zur Messtiefe von FDVK-Systemen für Oszillationswalzen zielführend.

Literaturverzeichnis

- [1] Adam, D.: *Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen*. Dissertation, Technische Universität Wien, 1996
- [2] Adam, D.: *Studienblätter zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik*. Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der Technischen Universität Wien, 2011
- [3] Adam, D.: *RVS 08.03.01 "Erdarbeiten", Technische Vertragsbedingungen, Vor-, Abbruch- und Erdarbeiten.* FSV-Seminarunterlagen, Linz 21. November 2012
- [4] Adam, D.: Aktuelle Entwicklungen in der Geotechnik. Leipzig: 9. Erdbaufachtagung, Bauakademie Sachsen, Januar, 2013
- [5] Adam, D.; Kopf, F.: Anwendung der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) im Deponiebau, Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft; 56, 5-6, S.64-70. 2004
- [6] Adam, D.; Kopf, F.: Operational devices for compaction optimization and quality control (Continuous Compaction Control, Light Falling Weight Device). Athens, Greece: Proc. Intl. Seminar on Geotechnics in Pavement and Railway Design and Construction, S. 97-106, December 16 - 17, 2004
- [7] Adam, D.; Kopf, F.: *Studienunterlagen zur Bodendynamik*. Wien: Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der Technischen Universität Wien, 2013
- [8] Adam, D.; Kopf, F.; Paulmichl, I.: Untersuchungen des dynamischen Lastplattenversuches mit dem leichten Fallgewichtsgerät unter Verwendung der Randelementmethode. Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift (ÖIAZ), 150. Jahrgang, Heft 4-5/2005
- [9] Adam, D.; Mooney, M.: Vibratory Roller Integrated Measurement of Earthwork Compaction: An Overview.
 FMGM 2007: Seventh International Symposium on Field Measurements in Geomechanics, 2007
- Paulmichl, [10] Bodenmechanische Adam. D.: 1.: und bodenphysikalische Grundlagen der Bodenverbesserung. Veranstaltung der VÖBU: Neue Entwicklung auf dem Gebiet der Bodenverbesserung, 2009
- [11] Adam, D.; Paulmichl, I.; Kopf, F.; Erdmann, P.: Integrierte Verdichtungskontrollen bei dynamischen Verdichtungsverfahren; Symposium "Baugrundverbesserung in der Geotechnik", Universität Siegen; 09-14-2010 - 09-15-2010; in: "Baugrundverbesserung in der Geotechnik", Eigenverlag, (2010).
- [12] Adam, D.; Szabo, M.; Paulmichl, I.: Einsatz von innovativen Verdichtungstechnologien zur Sanierung von Hochwasserschutzdämmen in Ideen werden Wirklichkeit - 50 Jahre Ingenieurleistungen. Wien : FCP -Fritsch, Chiari und Partner ZT GmbH, Eigenverlag 2010, S. 60-75, 2010
- [13] AMMANN AG, Group H.: Broschüren und Prospekte. Langenthal, Schweiz, o.O. und o.J.
- [14] Anderegg, R.: Nichtlineare Schwingungen bei dynamischen Bodenverdichtern. Dissertation,
 Eidgenössische Technische Hochschule ETH Zürich, ETH Nr. 12419, 1997

- [15] Anderegg, R.: *Compaction Monitoring Using Intelligent Soil Compactors*. Windisch, Schweiz: FHNW, Hochschule für Technik, Institut für Automation, Jahresbericht 2010, 2004
- [16] Anderegg, R.: Dynamik der Verdichtungsgeräte Chaos und Nichtlinearität. Langenthal, Schweiz: SGA-Schweizerische Gesellschaft für Automatik, Bulletin Nr. 56, 2010
- [17] Berleburger Schaumstoffwerk GmbH: Regupol® | Regufoam® Schwingungstechnik *Technische Daten* Version 1, Release 01. 2014
- [18] Blovsky, S.: Vergleich bestehender Normen und Richtlinien zum Thema flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) sowie Vergleich der marktführenden Mess-Systeme und ihrer normgerechten Anwendbarkeit. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 1997
- [19] BOMAG, Maschinenhandelsgesellschaft mbH: Broschüren und Prospekte. Deutschland, o.J.
- [20] Brandl, H.: *Studienblätter zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik*. Institut für Grundbau und Bodenmechanik an der Technischen Universität Wien, 2006
- [21] Brandl, H.; Adam, D.: Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit Vibrationswalzen
 Grundlagenforschung und praktische Anwendung. Republik Österreich, Bundesministerium für Verkehr,
 Innovation u. Technologie, Bundesstraßenverwaltung, Heft 506, 2000
- [22] Brandl, H.; Adam, D.; Kopf, F.: Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) mit unterschiedlich angeregten dynamischen Walzen - Grundlagenforschung und praktische Anwendung.
 Republik Österreich, Bundesministerium für Verkehr, Innovation u. Technologie, Bundesstraßenverwaltung, Heft 517, 2002
- [23] Bräu, G.; Hartmann, K.; Pelz, G.: Flächendeckende Prüfung der Verdichtung (FDVK) baupraktische Umsetzung und verfahrensbezogene Verdichtungsanforderungen. Bonn; Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung; Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 897, 2004
- [24] Bräu, G.; Vogt, S.; Vogt, N.: Ermittlung der bodenspezifischen Anwendungsgrenzen der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK). Bonn: Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung, Forschung, Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 1015, 2009
- [25] Decker, K. und Lankreijer, A.: *Tectonic controls on the formation of the thinskinned Vienna pull-apart basin.* 1997
- [26] Floss, R.: Dynamische Verdichtungspr
 üfung bei Erd- und Straßenbauten. Bundesministerium f
 ür Verkehr, Forschung Straßenbau und Straßenverkehrstechnik, Heft 612, 1991
- [27] Floss, R.; Henning, J.: Variomatic ein entscheidender Schritt zur Qualitätssicherung im modernen Erdund Verkehrswegebau. Boppard: Bomag, BA 049 [3/98], 1998
- [28] Forschungsgesellschaft für Straßen- und Verkehrswesen: Arbeitspapier Tragfähigkeit von Verkehrsflächenbefestigungen, Teil C 1 Benkelman-Balken: Auswertung und Bewertung von Einsenkungsmessungen (AP Trag Teil C 1), Ausgabe 2014 (W 2, [FGSV-Nr. 433 C 1]

- [29] Forssblad, L.: Compaction meter on vibratoring rollers for improved compaction control. Proceedings of International Conference on Compaction, Paris, Vol II, 541-546, 1980
- [30] Forssblad, L.; Thurner, H.: *Compaction meter on vibrating rollers*. Solna: Research Bulletin of Dynapac AB, No.8022, 1980
- [31] Geodynamik, AB: *Compactometer Verdichtungsmesser für vibrierende Walzen ALFA-022R*. Stockholm, 1996
- [32] Geodynamik, AB: Dokumentationssystem für flächendeckende Verdichtungskontrolle CDS-012-J. Stockholm, 1996
- [33] Grabe, J.: *Experimentelle und theoretische Untersuchungen zur flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle*. Dissertation, Universität Fridericiana Karlsruhe, 1991
- [34] Habau Hoch- u. Tiefbaugesellschaft m.b.H.: Auszüge aus der "Lagerstättenkundlichen Beurteilung der Abbaufelder Habau IV bis XI und Rotter III bis XI im Zuge des Gewinnungsbewilligungsverfahren" von Univ. Prof. Dr. Hans Kurzweil, vom 25.07.1997 (unveröffentlichter Bericht)
- [35] Hager, M.: Messwerte der Flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK) im theoretischen und experimentellen Vergleich. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, April, 2015
- [36] HAMM AG: *Broschüren und Prospekte*. Tirschenreuth, Deutschland, o.J.
- [37] HAMM AG: Datenblatt H13i VIO. 2015.
- [38] HAMM AG: Datenblatt H7i VIO. 2015.
- [39] HAMM AG: Datenblatt HD+ 140i VO. 2015.
- [40] König, H.: Maschinen im Baubetrieb Grundlagen und Anwendungen. Augsburg: Vieweg+Teubner, 2011
- [41] Kopf, F.: *Großversuch zur flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle (FDVK)*. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, 1995
- [42] Kopf, F.: Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) bei der Verdichtung von Böden durch dynamische Walzen mit unterschiedlichen Anregungsarten. Dissertation, Technische Universität Wien, 1999
- [43] Kopf, F.: Groß*versuch Oszillationsverdichtung Fischamend*. Power Point Präsentation (unveröffentlicht), Wien, 12.05.2014
- [44] Kopf, F.; Adam, Ch.; Paulmichl, I.: Untersuchungen des statischen Lastplattenversuches mit der Randelementmethode. Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ), 150. Jg., Heft 4-5/2005

- [45] Kopf, F.; Adam D.: Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) Kalibrierung und Anwendung gemäß RVS 8S.02.6. Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift (ÖIAZ), 150.Jahrgang, Heft 4-5/2005
- [46] Kopf, F.; Erdmann, P.: Numerische Untersuchungen der flächendeckenden dynamischen Verdichtungskontrolle. Österreichische Ingenieur- und Architektenzeitschrift (ÖIAZ), 150.Jahrgang, Heft 4-5/2005, 2005
- [47] Markiewicz, R.: Untersuchungen zur Arbeitsweise und Tiefenwirkung der Polygonbandage auf nichtbindigem Boden. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, März, 2001
- [48] ÖNORM B 4414-1: Erd- und Grundbau; *Untersuchung von Bodenproben; Bestimmung der Dichte des Bodens*; Labormethoden. August 1976
- [49] ÖNORM B 4414-2: Erd- und Grundbau, Untersuchung von Bodenproben, Bestimmung der Dichte des Bodens, Feldverfahren. Oktober 1979
- [50] ÖNORM B 4417: Erd- und Grundbau; Untersuchung von Böden; Lastplattenversuch. Dezember 1979
- [51] ÖNORM B 4418: Geotechnik Durchführung von Proctorversuchen im Erdbau. Jänner 2007
- [52] ÖNORM B 4419 Geotechnik Besondere Rammsondierverfahren. Dezember 2006
- [53] ÖNORM EN ISO 14688-1: Geotechnische Erkundung und Untersuchung Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden, Teil 1: Benennung und Beschreibung, Ausgabe: 2013-11-15
- [54] ÖNORM EN ISO 14688-2: Geotechnische Erkundung und Untersuchung Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden, Teil 2: Grundlagen von Bodenklassifizierungen, Ausgabe: 2004-12-01
- [55] ÖNORM EN ISO 22476-1 : Geotechnische Erkundung und Untersuchung Felduntersuchungen Teil 1: Drucksondierungen mit elektrischen Messwertaufnehmern und Messeinrichtungen für den Porenwasserdruck (ISO 22476-1:2012+Cor 1:2013)
- [56] ÖNORM EN ISO 22476-2 : Geotechnische Erkundung und Untersuchung Felduntersuchungen Teil 2: Rammsondierungen (ISO 22476-2:2005 + Amd 1:2011)
- [57] Pistrol, J.: Verdichtung mit Oszillationswalzen: Bewegungsverhalten, walzenintegrierte Verdichtungskontrolle und Verschleißbeurteilung. Dissertation, Technische Universität Wien, Februar 2016.
- [58] Pistrol, J.; Adam, D.; Kopf, F.; Villwock, S.; Völkel, W.: Walzenverdichtung Dynamisch erregte Bandagen im Vergleich; Vortrag: 21. Darmstädter Geotechnik-Kolloquium; Mitteilungen des Institutes und der Versuchsanstalt für Geotechnik der Technischen Universität Darmstadt, Heft 93 / Darmstadt (2014), ISBN: 978-3-942068-08-6; S. 79 – 88, März 2014

- [59] Pistrol, J.; Kopf, F.; Adam, D.; Villwock, S.; Völkel, W.: Ambient vibration of oscillating and vibrating rollers.
 Wien: Vienna Congress on Recent Advances in Earthquake Engineering and Structural Dynamics 2013 (VEESD 2013), 28-30, August 2013
- [60] Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau: *RVS 03.08.63: Straßenplanung Bautechnische Details Oberbaubemessung*. Jänner 2009
- [61] Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau: RVS 08.03.01: Erdarbeiten. 2010
- [62] Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau: RVS 08.03.02: Erdarbeiten Kontinuierlicher walzenintegrierter Verdichtungsnachweis. 1999
- [63] Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau: *RVS 08.03.04: Erdarbeiten Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuches.* 2008
- [64] Richtlinien und Vorschriften für den Straßenbau: *RVS 08.15.01: Technische Vertragsbedingungen für Unterbauplanum und ungebundene Tragschichten. Oktober 2010*
- [65] Sonderegger, N.C.: Ermittlung der Verformungsmoduln von Böden durch Auswertung der Kontaktlänge zwischen der Bandage einer Walze und dem Boden. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, Oktober, 2014
- [66] Stöberl, L.: Auswertung und Interpretation akustischer Messungen zur Ermittlung der Kontaktlänge und Schiebewirkung von Erdbauwalzen. Diplomarbeit, Technische Universität Wien, September, 2015
- [67] Technische Pr
 üfvorschriften f
 ür Boden und Fels im Stra
 ßenbau, TP BF-StB, Teil B 4.3 Anwendung radiometrischer Verfahren zur Bestimmung der Dichte und des Wassergehaltes von B
 öden – (1999) – 591/B 4
- [68] Thurner, H.: Verfahren und Vorrichtung zur Beurteilung des Verdichtungsgrades beim Verdichten einer Unterlage mit einem vibrierenden Verdichtungsgerät. Deutsches Patentamt, Offenlegungsschrift 2710811, Aktenzeichen P2710811.8, 1978
- [69] Thurner, H.; Sandström, A.: Compaction meter on vibrating roller. Solna: Dynapac Research, 1980
- [70] Thurner, H.; Sandström, A.: A new device for instant compaction control. Proceedings of International Conference on Compaction, Paris, Vol II, 611-614, 1980
- [71] Weingart, W. (2005): Anwendungsmöglichkeiten des Leichten Fallgewichtsgerätes ZFG 2000 im Straßenund Erdbau, Österreichische Ingenieur- und Architekten-Zeitschrift (ÖIAZ), 150. Jg., Heft 4-5/2005

Abbildungsverzeichnis

- 2.1. Methoden der mechanischen Bodenverdichtung [8]
- 2.2. Walzenzüge mit unterschiedlichen Bandagenformen [19][36]
- 2.3. Tandemwalzen unterschiedlicher Walzenhersteller [13][19][36]
- 2.4. Arten der Bandagen: a) Glattmantelbandage, b) Schaffußbandage, c) Polygonbandage [65]
- 2.5. Verdichtungswirkung der Polygonbandage in vorrangig feinkörnigen Böden im Vergleich zur Glattmantelbandage [4]
- 2.6. Prinzip der statischen Walze [11]
- 2.7. Prinzip der Vibrationswalze [11]
- 2.8. Anregung der Bandage mit einer Vibrationswalze. Die rotierende Unwucht erzeugt eine kreisförmig translatorische Schwingung [1, adaptiert]
- 2.9. Prinzip der Oszillationswalze [11]
- 2.10. Anregung der Bandage mit einer Oszillationswalze. Zwei axialsymmetrisch angeordnete Unwuchtmassen bewirken eine rotatorische Schwingung der Walzentrommel [1]
- 2.11. Prinzip der Richtschwingerwalze [11]
- 2.12. Richtschwingeranregung der Bandage. Zwei gegenlaufende Unwuchtmassen erzeugen eine gerichtete Schwingung, wobei hier die beiden Extremzustände reine Vertikal- und reine Horizontalschwingung dargestellt sind [1]
- 2.13. Statisch unausgewogene Bandage [42]
- 2.14. Dynamisch unausgewogene Bandage [42]
- 2.15. Erregung durch unterschiedliche Exzenter = Oszillationsanteil + Störanteil der Erregung [42]
- 2.16. Erregung durch verdrehte Unwuchten [42]
- 2.17. Proctorkurven des Standard-Proktorversuches und des Modifizierten Proctorversuches [3]
- 2.18. Beispielhaftes Drucksetzungsdiagramm aus ÖNORM B 4417 [50]
- 2.19. Komponenten des Leichen Fallgewichtgerätes [8]

- 2.20. Bodenpressung sowie Verschiebung und Arbeitsdiagramm der dynamischen Lastplatte [8]
- 2.21. Zusammenhang zwischen dem Erstbelastungsmodul E_{v1} und dem dynamischen Verformunsgmodul E_{vd} [45]
- 2.22. Komponenten eines FDVK-Systems (oben links), Beispielhafter Verlauf von Beschleunigungssignalen (unten links), übliche Darstellung eines Flächenplots der FDVK-Werte von 10 Verdichtungsspuren (rechts) [4]
- 2.23. FDVK-Werte für Vibrationswalzen: CMV, OMEGA, EVIB, kB [4]
- 2.24. Verlauf der FDVK-Messgrößen aus Simulationsberechnungen von unterschiedlich stark angeregten Vibrationswalzen auf homogenem Untergrund variabler Steifigkeit [4]
- 2.25. Vergleich der FDVK-Werte bei den verschiedenen Betriebszuständen [7]
- 2.26. Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen des Bodens in einer Tiefe von 50 cm unter GOK während einer Oszillationsmessfahrt bei den Feldversuchen 2012 [57]
- 2.27. Beschleunigungen für zwei Perioden im Lager der Oszillationsbandage [57]
- 2.28. Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen einer oszillierenden Bandage nach dem mechanischen Bandage-Boden-Modell f
 ür unterschiedliche dynamische Schubmoduln G_d des Bodens [57]
- 2.29. Der FDVK-Wert in Abhängigkeit von der Bodensteifigkeit in Form des dynamischen Schubmoduls G_d des Bodens[57]
- 2.30. Koordinatenpaare von Vertikal- und Horizontalbeschleunigungen über die Dauer einer Anregungsperiode, verbunden in chronologischer Reihenfolge [57]
- 2.31. Koordinatenpaare von Vertikal- und Horizontalbeschleunigungen über die Dauer einer Anregungsperiode, nach der Größe der Horizontalbeschleunigung geordnet und verbunden [57]
- 2.32. Obere und untere Einhüllende der nach der Größe der Horizontalbeschleunigung geordneten und verbundenen Koordinatenpaare. Die Fläche zwischen den beiden Einhüllenden entspricht dem vorgeschlagenen FDVK-Wert [57]
- 2.33. Darstellung eines zu korrigierenden Messwerteverlaufes. Fette vertikale Striche markieren vollständige Bandagenrotationen [57]
- 2.34. Darstellung des Messwertebereiches von ausschließlich vollen Umdrehungen [57]
- 2.35. Messwertverläufe der separierten Bandagenrotationen [57]

- 2.36. Übereinanderlegen aller Bandagenrotationen von: unterschiedlicher Länge, korrigierter nun gleicher Länge und nach Abzug des Mittelwertes [57]
- 2.37. Ausgangssignal (mit Periodizität) und mit dem beschriebenen Algorithmus korrigiertes Signal [57]
- 2.38. Ausschnitt aus AMAP-Online Durchführungsort der Feldversuche in Fischamend
- 2.39. Ausschnitt aus Google Maps Satellitenbild der Kiesgrube
- 2.40. Wiener Becken (gelb hinterlegt) [25]
- 2.41. Haupttestfeld Lage der Schwachstellen
- 2.42. Nebentestfeld Terrassenschotter
- 2.43. Nebentestfeld Lösslehm
- 2.44. Datenblatt Hamm AG H7i VIO
- 2.45. Datenblatt Hamm AG H13i VIO
- 2.46. Datenblatt Hamm AG HD+ 140i VO
- 2.47. Vergleichsversuche Lastplattenabdrückversuche
- 2.48. Exemplarisches Tagesprotokoll der Feldversuche, vom 13.10.2015

Tabellenverzeichnis

- 2.1. Übersicht über die Bodenverbesserungsmaßnahmen [10]
- 2.2. Begriffe für die Beschreibung eines Gesteinskorns gemäß ÖNORM EN ISO 14688-1:2003, Tabelle 4 [53]
- 2.3. Bezeichnungen für die bezogene Lagerungsdichte gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2004, Abschnitt 5.2 [54]
- 2.4. Konsistenzformen über die Konsistenzzahl sowie den Wassergehalt gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2004 [54]
- 2.5. Betriebszustände einer Vibrationswalze [2]
- 2.6. Betriebszustände einer Oszillationswalze [57]
- 2.7. Mindestanforderungen an die Verdichtung gemäß RVS 08.03.01 (Klammerwerte gelten für bindige Böden) für Dammaufstandsfläche bis Unterbauplanum [61]
- 2.8. Mindestanforderungen an die Verdichtung gemäß RVS 08.15.01 für ungebundene Tragschichten [64]
- 2.9. Mindestanforderungen an die Verdichtung empirisch abgeleitete Lagerungsdichten aus Feldversuchen [2, adaptiert]
- 2.10. Prüfverfahren zur Verdichtungskontrolle
- 2.11. Anwendbarkeit der Verfahren in Abhängigkeit von der Bodenart [49]
- 2.12. Koordinaten Testfeld (Messpunkt: Testfeldmitte; Genauigkeit ± 5 m)
- 2.13. Materialeigenschaften Schwachstellenmaterial Regufoam 270 plus und Regufoam 510 plus [17]
- 2.14. Maschinenparameter Testwalzen
- 2.15. Ursprünglich geplante Parametermatrix
- 2.16. Abgearbeitete Parametermatrix Generierung von Verdichtungszuwächsen
- 2.17. Abgearbeitete Parametermatrix vollkommen verdichtetes Material; unterschiedliche Walzenparameter
- 2.18. Ergebnisse der auf dem Nebentestfeld Lösslehm durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche direkt nach Versuchsfahrten mit der Testwalze H13i, f = 33 Hz und v = 3 km/h
- 2.19. Messfahrtenprotokoll
2.20. Lastplattenprotokoll

Diagrammverzeichnis

- 2.1. Niederschlagsdaten Messstelle Schwechat-Aichhof
- 2.2. Vergleich der Ergebnisse der durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche zeitliche Aufgliederung in vor bzw. nach dem am 4.11.2015 durchgeführtem Bodenaustausch. Dargestellt sind alle Werte aus den Bereichen "Homogen Start", "Homogen Mitte" und "Homogen Ende"
- 2.3. Räumliche Werteverteilung der durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche, am 04.11.2015 nach erfolgtem Bodenaustausch im Bereich "Homogen Mitte"
- 2.4. Räumliche Werteverteilung der durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche, am 27.10.2015
- 2.5. E_{VD}-Wert/Setzungsdiagramm aller im Zeitraum vom 4.11. 6.11.2015 durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche; die direkt am insitu gewachsenen Terrassenschotter durchgeführten Lastplatten (rote Rechteckmarkierungen) sind vom 13.10.2015
- 2.6. Verdichtungszuwächse bei mehreren Überfahrten im Bereich Homogen Mitte, am 04.11.2015, unter Verwendung unterschiedlicher Maschinenparametereinstellungen
- 2.7. FDVK-Werte der Messfahrt 112 (Testwalze HD+140, f = 31 Hz, v = 3 km/h) unter Verwendung unterschiedlicher Filtersysteme zur Generierung eines stabilen Messwertes
- 2.8. Rohwert des aufgezeichneten Horizontalbeschleunigungssignals der Messfahrt 112 (Testwalze HD+140, f = 31 Hz, v = 3 km/h)
- 2.9. Rohwert des aufgezeichneten Vertikalbeschleunigungssignals der Messfahrt 112 (Testwalze HD+140, f = 31 Hz, v = 3 km/h)
- 2.10. Lichtschrankensignale von Messfahrt 233 (Testwalze HD+140, f = 30 Hz, v = 4 km/h)
- 2.11. Zeitpunkte der vollen Bandagenumdrehung von Messfahrt 233 (Testwalze HD+140, f = 30 Hz, v = 4 km/h)
- 2.12. Berechneter FDVK-Wert von Messfahrt 233 (Testwalze HD+140, f = 30 Hz, v = 4 km/h)
- 2.13. Berechneter FDVK-Wert von Messfahrt 225 (Testwalze H7i, f = 36 Hz, v = 2 km/h)
- 2.14. Berechneter FDVK-Wert von Messfahrt 222 (Testwalze H13i, f = 27 Hz, v = 2 km/h)

- 2.15. Verdichtungszuwächse mit konstanten Prozessparametern am Haupttestfeld (Testwalze HD+140, f = 27 Hz, v = 2 km/h) auf Spur 1: FDVK-Werte der Messfahrten 88 (1.ÜF), 90 (3.ÜF), 92 (5.ÜF) und 93 (6. ÜF)
- 2.16. Verdichtungszuwächse mit konstanten Prozessparametern am Nebentestfeld Terrassenschotter (Testwalze HD+140, f = 27 Hz, v = 2 km/h) auf Spur 10: FDVK-Werte der Messfahrten 63 (1.ÜF), 64 (2.ÜF), 65 (3.ÜF) und 66 (4. ÜF)
- 2.17. Verdichtungszuwächse mit konstanten Prozessparametern am Nebentestfeld Lösslehm (Testwalze H13i, f = 33 Hz, v = 3 km/h) auf Spur 12: FDVK-Werte der Messfahrten 189 (1.ÜF), 190 (2.ÜF), 191 (3.ÜF) und 192 (4. ÜF)
- 2.18. Entwicklung des gemittelten FDVK-Werts im Bereich "Homogen Ende" bei steigender Anzahl der Überfahrten unter Verwendung der Testwalze H7i (Spur 4, f = 36 Hz, v = 3 km/h)
- 2.19. Entwicklung des gemittelten FDVK-Werts im Bereich "Homogen Ende", "Schwachstelle 1" und "Schwachstelle 2" bei steigender Anzahl der Überfahrten unter Verwendung der Testwalze H13i (Spur 3, f = 36 Hz, v = 3 km/h)
- 2.20. Entwicklung des gemittelten FDVK-Werts im Bereich "Homogen Ende", "Schwachstelle 1" und "Schwachstelle 2" bei steigender Anzahl der Überfahrten unter Verwendung der Testwalze HD+140 (Spur 1, f = 27 Hz, v = 2 km/h)
- 2.21. Gemittelte FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung der Testwalze H7i Prozessparametervariation (f = 30 Hz und 36 Hz, v = 2 4 km/h)
- 2.22. Gemittelte FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung der Testwalze H13i – Prozessparametervariation (f = 27 Hz, 30 Hz, 33 Hz und 36 Hz, v = 2 - 4 km/h)
- 2.23. Gemittelte FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung der Testwalze HD+140 – Prozessparametervariation (f = 27 Hz, 30 Hz, 33 Hz und 36 Hz, v = 2 - 4 km/h)
- 2.24. Gemittelte FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung aller Testwalzen (H7i, H13i und HD+140) mit einer konstanten Erregerfrequenz von f = 30 Hz auf der völlig verdichteten Spur 3 am Haupttestfeld
- 2.25. Gemittelte FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung aller Testwalzen (H7i, H13i und HD+140) mit einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von v = 3 km/h auf der völlig verdichteten Spur 3 am Haupttestfeld
- 2.26. FDVK-Wertverläufe aller Testwalzen (H7i, H13i und HD+140) mit konstanten Prozessparametern (f = 30 Hz, v = 3 km/h) am Haupttestfeld auf völlig vorverdichteter Spur 3: FDVK-Werte der Messfahrten 230 (H7i), 213 (H13i) und 237 (HD+140)

- 2.27. Normierte FDVK-Wertverläufe (Division der Einzelwerte durch den Mittelwert aller Einzelwerte) aller Testwalzen (H7i, H13i und HD+140) mit konstanten Prozessparametern (f = 30 Hz, v = 3 km/h) am Haupttestfeld auf völlig vorverdichteter Spur 3: FDVK-Werte der Messfahrten 230 (H7i), 213 (H13i) und 237 (HD+140)
- 2.28. FDVK-Wertverläufe von jeweils zwei Messfahrten mit der Testwalze H7i auf der vorverdichteten Spur 3 des Haupttestfeldes unter Verwendung folgender Prozessparameter:
 - f = 30 Hz und v = 3 km/h Messfahrt mit der durchlaufenden Nr. 227 (21. ÜF) und 230 (24. ÜF)
 - f = 36 Hz und v = 3 km/h Messfahrt mit der durchlaufenden Nr. 224 (18. ÜF) und 229 (23. ÜF)
- 2.29. FDVK-Wertverläufe von jeweils zwei Messfahrten mit der Testwalze H13i auf der vorverdichteten Spur 3 des Haupttestfeldes unter Verwendung folgender Prozessparameter:
 - f = 27 Hz und v = 4 km/h Messfahrt mit der durchlaufenden Nr. 132 (4. ÜF) und 133 (5. ÜF)
 - f = 32 Hz und v = 4 km/h Messfahrt mit der durchlaufenden Nr. 150 (4. $\ddot{\text{UF}}$) und 152 (6. $\ddot{\text{UF}}$)
- 2.30. FDVK-Wertverläufe von jeweils zwei Messfahrten mit der Testwalze HD+140 auf der vorverdichteten Spur 3 des Haupttestfeldes unter Verwendung folgender Prozessparameter:
 - f = 36 Hz und v = 3 km/h Messfahrt mit der durchlaufenden Nr. 80 (4. ÜF) und 81 (5. ÜF)
 - f = 31 Hz und v = 4 km/h Messfahrt mit der durchlaufenden Nr. 104 (5. ÜF) und 105 (6. ÜF)
- 2.31. Zusammenhang zwischen dynamischem Verformungsmodul E_{vd} und dem gemittelten FDVK-Wert aus dem Bereich "Homogen Ende" für alle drei verwendeten Testwalzen mit den Prozessparametern f = 36 Hz und v = 3 km/h.
- 2.32. Verdichtungszuwachs der gemittelten FDVK-Werte im Bereich "Homogen Ende" für alle drei Testwalzen mit den Prozessparametern f = 36 Hz und v = 3 km/h.
- 2.33. E_{vd}-Werte im Bereich "Homogen Ende" für alle drei Testwalzen mit steigender Anzahl der Überfahrten.
- 2.34. Vergleich der gemittelten FDVK-Werte [m²/s⁴] vom Bereich "Homogen Ende" aus Diagramm 2.24 bei einer konstanten Erregerfrequenz von f = 30 Hz mit den fakoristierten FDVK-Werten mit der Einheit [N/m].
- 2.35. Vergleich der gemittelten FDVK-Werte [m²/s4] der Testwalze H13i vom Bereich "Homogen Ende" aus Diagramm 2.25 bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von v = 3 km/h mit den fakoristierten FDVK-Werten mit der Einheit [N/m].

Fotoverzeichnis

- Verwendung der dynamischen Lastplatte im Zuge der Feldversuche in der Schottergrube Fischamend durch Univ.Ass. DI Dr. Johannes Pistrol (A. Leitich, am 13.10.2015)
- 2.2. Testfeld in der Kiesgrube der Fa. *Habau* (auf den insitu gewachsenen Terrassenschottern, bereits mit dem Grader plan abgezogen, noch ohne Schüttmaterial; A. Leitich, am 12.10.2015)
- 2.3. Typische Ablagerungsstrukturen der Terrassenschotter in der Kiesgrube der Fa. Habau (A. Leitich)
- 2.4. Grenzfläche Terrassenschotter zu den im Hangenden befindlichen Lösslehm (A. Leitich, am 06.11.2015)
- 2.5. Künstlich hergestellte Schwachstellen im Haupttestfeld auf Spur 1 bis 3 (A. Leitich, am 13.10.2015)
- 2.6. Herstellung der Schüttlage (A. Leitich, am 13.10.2015)
- 2.7. "Auflockern" des verdichteten Schüttmaterials mittels Pflug (A. Leitich, am 19.10.2015)
- 2.8. Entfernen des Schüttmaterials auf einer Breite von 10 m; stark durchfeuchtetes Schüttmaterial (A. Leitich, am 04.11.2015)
- 2.9. Neu aufgebrachtes Bodenaustauschmaterial auf einer Breite von 10 m; gering schluffiger, steiniger, stark kiesiger Sand (A. Leitich, am 04.11.2015)
- 2.10. Nebentestfeld Terrassenschotter (A. Leitich, am 06.11.2015)
- 2.11. Nebentestfeld Lösslehm (A. Leitich, am 06.11.2015)
- 2.12. Testwalzen (J. Pistrol, am 12.10.2015)
- 2.13. Positionsbestimmung der Walze mittels Reflex-Lichtschrankensystem (J. Pistrol, am 06.11.2015)
- 2.14. Verhältnisse am Testfeld aufgrund von widrigen Witterungsbedingungen (links + rechts oben + links unten: J. Pistrol, am 16.10.2015; rechts unten: A. Leitich, am 28.10.2015)

7 ANHANG

7.1 MESSFAHRTPROTOKOLLE

| Messfahrtenprotokoll | | | | | | | | | | | |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|------|--------|------------------------|-------------|-------------------|--|--|--|
| Durchlaufende Messwert-Nr. | Durchlaufende Messfahrt-Nr. | Zeit d. Starts | Ende der dyn. Vorwärtsfahrt | Spur | Walze | Anregung Oszi/Vibro | Frequ. [Hz] | Geschw. [km/h] | | | |
| Datum der Messung: 13.10.2015 | | | | - | | | | | | | |
| 13 | 1 | 16:08:02 | 16:09:31 | 8 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 14 | 2 | 16:14:25 | 16:15:56 | 1 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 15 | 3 | 16:19:32 | 16:20:55 | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 16 | 4 | 16:28:49 | 16:30:14 | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 17 | 5 | 16:40:36 | 16:42:04 | 4 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 18 | 6 | 16:46:04 | 16:47:32 | 5 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 19 | 7 | 16:52:41 | 16:54:04 | 6 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 20 | 8 | 17:00:30 | 17:02:00 | 7 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| Datum der Messung: 19.10.2015 | | | | | | | | | | | |
| 26 | 9 | 10:11:00 | 10:12:25 | 4 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 27 | 10 | 10:22:49 | 10:24:14 | 4 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 28 | 11 | 10:34:25 | 10:35:45 | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 29 | 12 | 10:41:45 | 10:43:08 | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 30 | 13 | 10:50:42 | 10:52:02 | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 31 | 14 | 10:58:43 | 11:00:06 | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| Datum der Messung: 27.10.2015 | | | | 1 | | | | <u> </u> | | | |
| 34 | 15 | 14:15:08 | | 4 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 35 | 16 | 14:26:03 | | 4 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 36 | 17 | 14:37:40 | | 4 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 37 | 18 | 14:49:20 | | 4 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 38 | 19 | 15:01:01 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 39 | 20 | 15:11:54 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 40 | 21 | 15:21:11 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 41 | 22 | 15:31:24 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 42 | 23 | 15:43:58 | | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 43 | 24 | 15:47:43 | | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 44 | 25 | 15:51:35 | | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 45 | 26 | 15:55:40 | | 1 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 46 | 27 | 15:59:51 | | 1 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 47 | 28 | 16:09:32 | | 5 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 48 | 29 | 16:13:51 | | 5 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |
| 49 | 30 | 16:19:15 | | 6 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 | | | |

| Durchlaufende Messwert-Nr. | Durchlaufende Messfahrt-Nr. | Zeit d. Starts | Ende der dyn. Vorwärtsfahrt | Spur | Walze | Anregung Oszi/Vibro | Frequ. [Hz] | Geschw. [km/h] |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|------|--------|------------------------|-------------|----------------|
| Datum der Messung: 28.10.2015 | | | | | | | | |
| 58 | 31 | 09:06:24 | | 1 | HD+140 | Oszi | 36 | 2 |
| 59 | 32 | 09:13:08 | | 1 | HD+140 | Oszi | 36 | 2 |
| 60 | 33 | 09:20:59 | | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |
| 61 | 34 | 09:26:21 | | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |
| 62 | 35 | 09:30:55 | | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |
| 63 | 36 | 09:37:07 | | 3 | HD+140 | Oszi | 31 | 4 |
| 64 | 37 | 09:41:51 | | 3 | HD+140 | Oszi | 31 | 4 |
| 65 | 38 | 09:46:21 | | 3 | HD+140 | Oszi | 31 | 4 |
| 66 | 39 | 09:50:51 | | 3 | HD+140 | Oszi | 31 | 4 |
| 67 | 40 | 10:46:59 | | 4 | HD+140 | Oszi | 33 | 4 |
| 68 | 41 | 10:52:00 | | 4 | HD+140 | Oszi | 33 | 4 |
| 69 | 42 | 10:56:12 | | 4 | HD+140 | Oszi | 33 | 4 |
| 70 | 43 | 11:00:34 | | 4 | HD+140 | Oszi | 33 | 4 |
| 71 | 44 | 11:07:05 | | 8 | HD+140 | Oszi | 27 | 4 |
| 72 | 45 | 11:11:37 | | 8 | HD+140 | Oszi | 27 | 4 |
| 73 | 46 | 11:16:40 | | 8 | HD+140 | Oszi | 27 | 4 |
| Datum der Messung: 29.10.2015 | | | | • | L | | | |
| 76 | 52 | 09:35:10 | | 4 | HD+140 | Oszi | 30 | 4 |
| 77 | 53 | 10:01:42 | | 4 | HD+140 | Oszi | 30 | 4 |
| 78 | 54 | 10:28:28 | | 4 | HD+140 | Oszi | 30 | 4 |
| 79 | 55 | 10:52:45 | | 4 | HD+140 | Oszi | 30 | 4 |
| 80 | 56 | 11:13:18 | | 4 | HD+140 | Oszi | 30 | 4 |
| 81 | 57 | 12:16:29 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |
| 82 | 58 | 12:38:36 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |
| 83 | 59 | 12:59:09 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |
| 84 | 60 | 16:36:14 | | 9 | HD+140 | Oszi | 36 | 2 |
| Datum der Messung: 30.10.2015 | | | | | | | | 11 |
| 86 | 61 | 08:36:57 | | 9 | HD+140 | Oszi | 36 | 2 |
| 87 | 62 | 09:01:23 | | 9 | HD+140 | Oszi | 36 | 2 |
| 89 | 63 | 09:30:29 | | 10 | HD+140 | Oszi | 27 | 2 |
| 90 | 64 | 09:43:48 | | 10 | HD+140 | Oszi | 27 | 2 |
| 91 | 65 | 09:56:34 | | 10 | HD+140 | Oszi | 27 | 2 |
| 92 | 65 | 10:12:16 | | 10 | HD+140 | Oszi | 27 | 2 |
| 94 | 67 | 11:13:26 | | 4 | HD+140 | Oszi | 30 | 4 |
| 95 | 68 | 11:37:25 | | 4 | HD+140 | Oszi | 30 | 4 |
| 96 | 69 | 11:59:23 | | 4 | HD+140 | Oszi | 30 | 4 |
| 98 | 70 | 12:17:27 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |

| Durchlaufende Messwert-Nr. | Durchlaufende Messfahrt-Nr. | Zeit d. Starts | Ende der dyn. Vorwärtsfahrt | Spur | Walze | Anregung Oszi/Vibro | Frequ. [Hz] | Geschw. [km/h] |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|------|--------|------------------------|-------------|-------------------|
| Datum der Messung: 04.11.2015 | | | | | | | | |
| 113 | 71 | 10:40:37 | | 4 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |
| 114 | 72 | 10:47:00 | | 4 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |
| 115 | 73 | 10:53:05 | | 4 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |
| 116 | 74 | 10:58:35 | | 4 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |
| 117 | 75 | 11:04:12 | | 4 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |
| 118 | 76 | 11:08:58 | | 4 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |
| 119 | 77 | 11:14:15 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 |
| 120 | 78 | 11:19:36 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 |
| 121 | 79 | 11:25:00 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 |
| 122 | 80 | 11:30:26 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 |
| 123 | 81 | 11:35:44 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 |
| 124 | 82 | 11:41:26 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 |
| 125 | 83 | 11:49:07 | | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 2 |
| 126 | 84 | 11:55:20 | | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 2 |
| 127 | 85 | 12:01:27 | | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 2 |
| 128 | 86 | 12:08:34 | | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 2 |
| 129 | 87 | 12:15:14 | | 2 | HD+140 | Oszi | 36 | 2 |
| 130 | 88 | 12:22:29 | | 1 | HD+140 | Oszi | 27 | 2 |
| 131 | 89 | 12:30:08 | | 1 | HD+140 | Oszi | 27 | 2 |
| 132 | 90 | 12:36:42 | | 1 | HD+140 | Oszi | 27 | 2 |
| 133 | 91 | 12:42:54 | | 1 | HD+140 | Oszi | 27 | 2 |
| 134 | 92 | 12:48:45 | | 1 | HD+140 | Oszi | 27 | 2 |
| 135 | 93 | 12:54:58 | | 1 | HD+140 | Oszi | 27 | 2 |
| 141 | 94 | 14:22:16 | | 4 | HD+140 | Oszi | 27 | 4 |
| 142 | 95 | 14:27:02 | | 4 | HD+140 | Oszi | 27 | 4 |
| 143 | 96 | 14:32:30 | | 4 | HD+140 | Oszi | 27 | 4 |
| 144 | 97 | 14:37:06 | | 4 | HD+140 | Oszi | 27 | 4 |
| 145 | 98 | 14:41:43 | | 4 | HD+140 | Oszi | 27 | 4 |
| 146 | 99 | 14:46:24 | | 4 | HD+140 | Oszi | 27 | 4 |
| 147 | 100 | 14:51:36 | | 3 | HD+140 | Oszi | 31 | 4 |
| 148 | 101 | 14:56:43 | | 3 | HD+140 | Oszi | 31 | 4 |
| 149 | 102 | 15:01:19 | | 3 | HD+140 | Oszi | 31 | 4 |
| 150 | 103 | 15:05:58 | | 3 | HD+140 | Oszi | 31 | 4 |
| 151 | 104 | 15:10:39 | | 3 | HD+140 | Oszi | 31 | 4 |
| 152 | 105 | 15:15:45 | | 3 | HD+140 | Oszi | 31 | 4 |
| 153 | 106 | 15:20:48 | | 2 | HD+140 | Oszi | 27 | 3 |
| 154 | 107 | 15:26:30 | | 2 | HD+140 | Oszi | 27 | 3 |
| 155 | 108 | 15:31:51 | | 2 | HD+140 | Oszi | 27 | 3 |
| 156 | 109 | 15:37:34 | | 2 | HD+140 | Oszi | 27 | 3 |
| 157 | 110 | 15:42:44 | | 2 | HD+140 | Oszi | 27 | 3 |

| Durchlaufende Messwert-Nr. | Durchlaufende Messfahrt-Nr. | Zeit d. Starts | Ende der dyn. Vorwärtsfahrt | Spur | Walze | Anregung Oszi/Vibro | Frequ. [Hz] | Geschw. [km/h] |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|------|--------|------------------------|-------------|----------------|
| 158 | 111 | 15:49:13 | | 1 | HD+140 | Oszi | 31 | 3 |
| 159 | 112 | 15:54:25 | | 1 | HD+140 | Oszi | 31 | 3 |
| 160 | 113 | 15:59:17 | | 1 | HD+140 | Oszi | 31 | 3 |
| 161 | 114 | 16:06:01 | | 1 | HD+140 | Oszi | 31 | 3 |
| 162 | 115 | 16:10:39 | | 1 | HD+140 | Oszi | 31 | 3 |
| 163 | 116 | 16:24:56 | | 5 | H13i | Oszi | 36 | 3 |
| 164 | 117 | 16:31:19 | | 5 | H13i | Oszi | 36 | 3 |
| 165 | 118 | 16:36:07 | | 5 | H13i | Oszi | 36 | 3 |
| Datum der Messung: 05.11.2015 | | | | | | | | |
| 171 | 119 | 09:15:37 | | 5 | H13i | Oszi | 40 | 4 |
| 172 | 120 | 09:20:19 | | 5 | H13i | Oszi | 40 | 4 |
| 173 | 121 | 09:24:48 | | 5 | H13i | Oszi | 40 | 4 |
| 174 | 122 | 09:29:30 | | 5 | H13i | Oszi | 40 | 4 |
| 175 | 123 | 09:34:03 | | 4 | H13i | Oszi | 32 | 4 |
| 176 | 124 | 09:38:33 | | 4 | H13i | Oszi | 32 | 4 |
| 177 | 125 | 09:42:59 | | 4 | H13i | Oszi | 32 | 4 |
| 178 | 126 | 09:47:27 | | 4 | H13i | Oszi | 32 | 4 |
| 179 | 127 | 09:51:37 | | 4 | H13i | Oszi | 32 | 4 |
| 180 | 128 | 09:56:06 | | 4 | H13i | Oszi | 32 | 4 |
| 181 | 129 | 10:00:41 | | 3 | H13i | Oszi | 27 | 4 |
| 182 | 130 | 10:05:27 | | 3 | H13i | Oszi | 27 | 4 |
| 183 | 131 | 10:10:13 | | 3 | H13i | Oszi | 27 | 4 |
| 184 | 132 | 10:14:35 | | 3 | H13i | Oszi | 27 | 4 |
| 185 | 133 | 10:18:56 | | 3 | H13i | Oszi | 27 | 4 |
| 186 | 134 | 10:23:15 | | 3 | H13i | Oszi | 27 | 4 |
| 187 | 135 | 10:53:02 | | 2 | H13i | Oszi | 27 | 3 |
| 188 | 136 | 10:58:00 | | 2 | H13i | Oszi | 27 | 3 |
| 189 | 137 | 11:02:49 | | 2 | H13i | Oszi | 27 | 3 |
| 190 | 138 | 11:07:37 | | 2 | H13i | Oszi | 27 | 3 |
| 191 | 139 | 11:13:25 | | 2 | H13i | Oszi | 27 | 3 |
| 192 | 140 | 11:18:56 | | 2 | H13i | Oszi | 27 | 3 |
| 193 | 141 | 11:24:39 | | 1 | H13i | Oszi | 27 | 2 |
| 194 | 142 | 11:30:17 | | 1 | H13i | Oszi | 27 | 2 |
| 195 | 143 | 11:35:41 | | 1 | H13i | Oszi | 27 | 2 |
| 196 | 144 | 11:41:32 | | 1 | H13i | Oszi | 27 | 2 |
| 197 | 145 | 11:47:20 | | 1 | H13i | Oszi | 27 | 2 |
| 198 | 146 | 11:53:13 | | 1 | H13i | Oszi | 27 | 2 |
| 203 | 147 | 13:44:41 | | 3 | H13i | Oszi | 32 | 4 |
| 204 | 148 | 13:50:21 | | 3 | H13i | Oszi | 32 | 4 |
| 205 | 149 | 13:54:52 | | 3 | H13i | Oszi | 32 | 4 |
| 206 | 150 | 13:59:39 | | 3 | H13i | Oszi | 32 | 4 |

| Durchlaufende Messwert-Nr. | Durchlaufende Messfahrt-Nr. | Zeit d. Starts | Ende der dyn. Vorwärtsfahrt | Spur | Walze | Anregung Oszi/Vibro | Frequ. [Hz] | Geschw. [km/h] |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|------|-------|------------------------|-------------|-------------------|
| 207 | 151 | 14:03:35 | | 3 | H13i | Oszi | 32 | 4 |
| 208 | 152 | 14:07:40 | | 3 | H13i | Oszi | 32 | 4 |
| 209 | 153 | 14:11:43 | | 2 | H13i | Oszi | 32 | 3 |
| 210 | 154 | 14:16:35 | | 2 | H13i | Oszi | 32 | 3 |
| 211 | 155 | 14:21:12 | | 2 | H13i | Oszi | 32 | 3 |
| 212 | 156 | 14:25:55 | | 2 | H13i | Oszi | 32 | 3 |
| 213 | 157 | 14:30:38 | | 2 | H13i | Oszi | 32 | 3 |
| 214 | 158 | 14:36:20 | | 2 | H13i | Oszi | 32 | 3 |
| 215 | 159 | 14:40:49 | | 1 | H13i | Oszi | 32 | 2 |
| 216 | 160 | 14:46:17 | | 1 | H13i | Oszi | 32 | 2 |
| 217 | 161 | 14:51:42 | | 1 | H13i | Oszi | 32 | 2 |
| 218 | 162 | 14:57:20 | | 1 | H13i | Oszi | 32 | 2 |
| 219 | 163 | 15:02:59 | | 1 | H13i | Oszi | 32 | 2 |
| 220 | 164 | 15:08:35 | | 1 | H13i | Oszi | 32 | 2 |
| 221 | 165 | 15:14:54 | | 3 | H13i | Oszi | 32 | 3 |
| 222 | 166 | 15:18:32 | | 3 | H13i | Oszi | 32 | 2 |
| 223 | 167 | 15:36:23 | | 3 | H7i | Oszi | 30 | 4 |
| 224 | 168 | 15:39:11 | | 3 | H7i | Oszi | 30 | 3 |
| 225 | 169 | 15:42:05 | | 3 | H7i | Oszi | 30 | 2 |
| 226 | 170 | 15:45:39 | | 3 | H7i | Oszi | 36 | 4 |
| 227 | 171 | 15:48:00 | | 3 | H7i | Oszi | 36 | 3 |
| 228 | 172 | 15:53:29 | | 3 | H7i | Oszi | 36 | 2 |
| 229 | 173 | 15:57:41 | | 2 | H7i | Oszi | 30 | 4 |
| 230 | 174 | 16:00:16 | | 2 | H7i | Oszi | 30 | 3 |
| 231 | 175 | 16:03:39 | | 2 | H7i | Oszi | 30 | 2 |
| 232 | 176 | 16:06:38 | | 2 | H7i | Oszi | 36 | 4 |
| 233 | 177 | 16:08:50 | | 2 | H7i | Oszi | 36 | 3 |
| 234 | 178 | 16:11:30 | | 2 | H7i | Oszi | 36 | 2 |
| 235 | 179 | 16:15:58 | | 4 | H7i | Oszi | 36 | 3 |
| 236 | 180 | 16:21:22 | | 4 | H7i | Oszi | 36 | 3 |
| 237 | 181 | 16:25:45 | | 4 | H7i | Oszi | 36 | 3 |
| 238 | 182 | 16:29:40 | | 4 | H7i | Oszi | 36 | 3 |
| 239 | 183 | 16:33:44 | | 4 | H7i | Oszi | 36 | 3 |
| 240 | 184 | 16:38:05 | | 4 | H7i | Oszi | 36 | 3 |
| Datum der Messung: 06.11.2015 | | | | | | | | |
| 249 | 185 | 09:19:32 | | 11 | H13i | Oszi | 33 | 4 |
| 250 | 186 | 09:21:44 | | 11 | H13i | Oszi | 33 | 4 |
| 251 | 187 | 09:24:56 | | 11 | H13i | Oszi | 33 | 4 |
| 252 | 188 | 09:28:12 | | 11 | H13i | Oszi | 33 | 4 |
| 253 | 189 | 09:31:45 | | 12 | H13i | Oszi | 33 | 3 |
| 254 | 190 | 09:35:03 | | 12 | H13i | Oszi | 33 | 3 |

| Durchlaufende Messwert-Nr. | Durchlaufende Messfahrt-Nr. | Zeit d. Starts | Ende der dyn. Vorwärtsfahrt | Spur | Walze | Anregung Oszi/Vibro | Frequ. [Hz] | Geschw. [km/h] |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|------|--------|------------------------|-------------|-------------------|
| 255 | 191 | 09:38:48 | | 12 | H13i | Oszi | 33 | 3 |
| 256 | 192 | 09:42:05 | | 12 | H13i | Oszi | 33 | 3 |
| 257 | 193 | 09:45:38 | | 13 | H13i | Oszi | 33 | 2 |
| 258 | 194 | 09:49:23 | | 13 | H13i | Oszi | 33 | 2 |
| 259 | 195 | 09:53:19 | | 13 | H13i | Oszi | 33 | 2 |
| 260 | 196 | 09:57:29 | | 13 | H13i | Oszi | 33 | 2 |
| 261 | 197 | 10:12:33 | | 1 | H13i | Oszi | 36 | 2 |
| 262 | 198 | 10:18:14 | | 1 | H13i | Oszi | 36 | 2 |
| 263 | 199 | 10:23:33 | | 1 | H13i | Oszi | 36 | 2 |
| 264 | 200 | 10:28:59 | | 1 | H13i | Oszi | 36 | 2 |
| 265 | 201 | 10:33:50 | | 1 | H13i | Oszi | 36 | 2 |
| 266 | 202 | 10:39:54 | | 2 | H13i | Oszi | 36 | 4 |
| 267 | 203 | 10:47:09 | | 2 | H13i | Oszi | 36 | 4 |
| 268 | 204 | 10:51:12 | | 2 | H13i | Oszi | 36 | 4 |
| 269 | 205 | 10:55:13 | | 2 | H13i | Oszi | 36 | 4 |
| 270 | 206 | 10:59:29 | | 2 | H13i | Oszi | 36 | 4 |
| 271 | 207 | 11:05:09 | | 3 | H13i | Oszi | 36 | 3 |
| 272 | 208 | 11:09:55 | | 3 | H13i | Oszi | 36 | 3 |
| 273 | 209 | 11:14:34 | | 3 | H13i | Oszi | 36 | 3 |
| 274 | 210 | 11:19:34 | | 3 | H13i | Oszi | 36 | 3 |
| 275 | 211 | 11:24:37 | | 3 | H13i | Oszi | 36 | 3 |
| 276 | 212 | 11:32:53 | | 3 | H13i | Oszi | 33 | 3 |
| 277 | 213 | 11:36:11 | | 3 | H13i | Oszi | 30 | 3 |
| 278 | 214 | 11:39:29 | | 3 | H13i | Oszi | 27 | 3 |
| 279 | 215 | 11:42:48 | | 3 | H13i | Oszi | 36 | 4 |
| 280 | 216 | 11:45:41 | | 3 | H13i | Oszi | 33 | 4 |
| 281 | 217 | 11:48:23 | | 3 | H13i | Oszi | 30 | 4 |
| 282 | 218 | 11:51:09 | | 3 | H13i | Oszi | 27 | 4 |
| 283 | 219 | 11:54:18 | | 3 | H13i | Oszi | 36 | 2 |
| 284 | 220 | 12:08:43 | | 3 | H13i | Oszi | 33 | 2 |
| 285 | 221 | 12:13:19 | | 3 | H13i | Oszi | 30 | 2 |
| 286 | 222 | 12:17:28 | | 3 | H13i | Oszi | 27 | 2 |
| 287 | 223 | 12:36:50 | | 3 | H7i | Oszi | 36 | 4 |
| 288 | 224 | 12:39:11 | | 3 | H7i | Oszi | 36 | 3 |
| 289 | 225 | 12:41:47 | | 3 | H7i | Oszi | 36 | 2 |
| 290 | 226 | 12:45:16 | | 3 | H7i | Oszi | 30 | 4 |
| 291 | 227 | 12:47:58 | | 3 | H7i | Oszi | 30 | 3 |
| 292 | 228 | 12:50:49 | | 3 | H7i | Oszi | 30 | 2 |
| 293 | 229 | 12:56:12 | | 3 | H7i | Oszi | 36 | 3 |
| 294 | 230 | 12:59:03 | | 3 | H7i | Oszi | 30 | 3 |
| 295 | 231 | 13:08:19 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 4 |

| Durchlaufende Messwert-Nr. | Durchlaufende Messfahrt-Nr. | Zeit d. Starts | Ende der dyn. Vorwärtsfahrt | Spur | Walze | Anregung Oszi/Vibro | Frequ. [Hz] | Geschw. [km/h] |
|-------------------------------|--------------------------------|----------------|--------------------------------|------|--------|------------------------|-------------|-------------------|
| 296 | 232 | 13:11:14 | | 3 | HD+140 | Oszi | 33 | 4 |
| 297 | 233 | 13:14:13 | | 3 | HD+140 | Oszi | 30 | 4 |
| 298 | 234 | 13:17:06 | | 3 | HD+140 | Oszi | 27 | 4 |
| 299 | 235 | 13:22:24 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 3 |
| 300 | 236 | 13:25:42 | | 3 | HD+140 | Oszi | 33 | 3 |
| 301 | 237 | 13:28:55 | | 3 | HD+140 | Oszi | 30 | 3 |
| 302 | 238 | 13:32:20 | | 3 | HD+140 | Oszi | 27 | 3 |
| 303 | 239 | 13:40:02 | | 3 | HD+140 | Oszi | 36 | 2 |
| 304 | 240 | 13:43:53 | | 3 | HD+140 | Oszi | 33 | 2 |
| 305 | 241 | 13:47:51 | | 3 | HD+140 | Oszi | 30 | 2 |
| 306 | 242 | 13:52:01 | | 3 | HD+140 | Oszi | 27 | 2 |

Tabelle 2.19: Messfahrtenprotokoll⁷

⁷ Unverändertes Messfahrtenprotokoll: Zahlensprünge bei der "Messfahrt- Nr." (wie zw. 46 und 52) sind auf die Aufzeichnung der Messdaten zurückzuführen. Es wurde – ohne einen im Nachhinein nachvollziehbaren Grund - am nächsten Tag mit einer höheren "Messfahrt-Nr." fortgefahren. Aufgrund des großen Datenvolumens wurde – um keine weitere Unordnung zu generieren – die ursprüngliche Messungsnummer belassen und nicht korrigiert.

7.2 PROTOKOLL LASTPLATTENVERSUCHE

| fende t-Nr. | fende rt-Nr. | Startpunkt | Homogen Start | Schwachstelle 1 | Homogen Mitte | Schwachstelle 2 | Homogen Ende | Endpunkt |
|----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------|
| chlau swer | chlau sfahr | E _{vd} | E_{vd} |
| Durd Mes | Durc Mes | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m²] |
| 1 | 0 | | 133,1 | | 100,7 | | 63 | |
| 2 | | | 111 | | 107,3 | | 60,4 | |
| 3 | | | 129,6 | | 98,4 | | 87,2 | |
| 4 | | | 105,8 | | 100,5 | | 52,8 | |
| 5 | | 26,4 | 41,67 | 12 | 40,91 | 14,9 | 43 | 44,91 |
| 6 | | 27,4 | 37,38 | 14,6 | 45,45 | 20,5 | 35,8 | 40,39 |
| 7 | | 37 | 53,7 | 8,78 | 36,41 | 12,2 | 39,5 | 35,38 |
| 8 | | 42,2 | 50,79 | 40,7 | 35,05 | 49,2 | 38,1 | 35,1 |
| 9 | | 31,1 | 44,73 | 35,2 | 52,82 | 41,5 | 40,4 | 37,82 |
| 10 | | 28,7 | 40,61 | 29,8 | 35,94 | 41,6 | 42,1 | 38,2 |
| 11 | | 44,2 | 46,01 | 44,6 | 43,69 | 48,5 | 40,1 | 58,44 |
| 12 | | 43,6 | 35,49 | 39,5 | 41,28 | 44,1 | 37,5 | 48,81 |
| 13 | 1 | | | | | | | |
| 14 | 2 | | | 14 | 41,21 | 17,9 | | |
| 15 | 3 | | | 15,6 | 45 | 18,4 | | |
| 16 | 4 | | | 15,1 | 51,4 | 12,9 | | |
| 17 | 5 | | | | | | | |
| 18 | 6 | | | | | | | |
| 19 | 7 | | | | | | | |
| 20 | 8 | | | | | | | |
| 21 | 0 | | 23,7 | 5,8 | 22,8 | 10,5 | 27,5 | |
| 22 | | | 17,5 | 6,8 | 19,1 | 12 | 26,5 | |
| 23 | | | 10,1 | 7,1 | 19,9 | 7,2 | 21,6 | |
| 24 | | | 14,4 | 16,3 | 22,1 | 24,4 | 19,5 | |
| 25 | | | 21,2 | 20,7 | 25 | 20,2 | 34,3 | |
| 26 | 9 | | 14,3 | 7,1 | 12 | 9,5 | 23,6 | |
| 27 | 10 | | 6,2 | 5,3 | 7,6 | 4,8 | 13,8 | |
| 28 | 11 | | 7,4 | 7,7 | 4,6 | 5,7 | 15,2 | |
| 29 | 12 | | 5,2 | 7 | 4,8 | 5,7 | 9,4 | |

| aufende rert-Nr. | aufende ahrt-Nr. | Startpunkt | Homogen Start | Schwachstelle 1 | Homogen Mitte | Schwachstelle 2 | Homogen Ende | Endpunkt |
|---------------------|---------------------|----------------|---------------|-----------------|---------------|-----------------|--------------|----------|
| urchl Iessw | urchl Iessfa | Evd [MN/m²] | Evd | Evd | Evd | Evd | Evd | Evd |
| 30 | 13 | [| 14.7 | 77 | 4.6 | 11.5 | 26.6 | [|
| 31 | 14 | | 5.4 | 7.04 | 4,0 | 7 1 | 28,0 | |
| 37 | 0 | | 5 /1 | 5 26 | 4.63 | 4.75 | 22,1 | |
| 32 | 0 | | 7 27 | 5,20 | 5 29 | 5.02 | 8.2 | |
| 24 | 15 | | 10.22 | 5,07 | 6.27 | 5,02 | 50.0 | |
| 35 | 15 | | 6 55 | 5,37 | 0,37 | 5,50 | 39.8 | |
| 36 | 17 | | 5.04 | 1 87 | ч Л 1 | 5,5 | 26.4 | |
| 37 | 18 | | 4.64 | 4,07 | 4.2 | 5 | 26.8 | |
| 38 | 19 | | 4,04 | 5 99 | 4,2 | 47 | 16.4 | |
| 39 | 20 | | 5.04 | 5,55 | 3.9 | 63 | 13.7 | |
| 40 | 20 | | 5,51 | 5,57 | 3,5 | 6 | 11.6 | |
| 41 | 22 | | 4.95 | 5.08 | 4 | 5.4 | 13.9 | |
| 42 | 23 | | ., | 5,00 | | | | |
| 43 | 24 | | | | | | | |
| 44 | 25 | | | | | | | |
| 45 | 26 | | | | | | | |
| 46 | 27 | | | | | | | |
| 47 | 28 | | | | | | | |
| 48 | 29 | | | | | | | |
| 49 | 30 | | | | | | | |
| 50 | 0 | | 4,5 | 6 | 13,3 | 8,8 | 23,3 | |
| 51 | | | 14,6 | 5,2 | 14,2 | 11,7 | 25 | |
| 52 | | | 6,4 | 4,9 | 5 | 6 | 8,9 | |
| 53 | | | 6,2 | 4,8 | 4,8 | 5,2 | 18,5 | |
| 54 | | | 6,3 | 5,8 | 5,4 | 5,7 | 14 | |
| 55 | | | 9,4 | 4,9 | 8,1 | 7,6 | 9 | |
| 56 | | | 15,2 | 8,7 | 7,7 | 12,6 | 4,8 | |
| 57 | | | 13,7 | 14,1 | 9 | 8,6 | 15,4 | |
| 58 | 31 | | 4,1 | 6,5 | 6,9 | 13,2 | 37,5 | |
| 59 | 32 | | 4,2 | 6,3 | 6,1 | 10,6 | 38,4 | |
| 60 | 33 | | 20,9 | 10,7 | 5,5 | 15,3 | 41,9 | |

| ifende t-Nr. | ifende rt-Nr. | Startpunkt | Homogen Start | Schwachstelle 1 | Homogen Mitte | Schwachstelle 2 | Homogen Ende | Endpunkt |
|-----------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| chlau swer | chlau sfahi | E _{vd} |
| Dur Mes | Dur Mes | [MN/m²] |
| 61 | 34 | | 11,8 | 11,4 | 4,8 | 15,7 | 45,9 | |
| 62 | 35 | | 16,2 | 11,4 | 4,1 | 12,6 | 48 | |
| 63 | 36 | | 7,2 | 8,9 | 5,5 | | 15,9 | |
| 64 | 37 | | 6,5 | 9 | 4,7 | 6,9 | 19,6 | |
| 65 | 38 | | 6,5 | 9 | 5 | 8,2 | 17,6 | |
| 66 | 39 | | 6,5 | 8,6 | 4,6 | 6,6 | 23,2 | |
| 67 | 40 | | 5,9 | 5,8 | 4,9 | 6,4 | 38,6 | |
| 68 | 41 | | 5,2 | 5,5 | 5,8 | 5,4 | 43,4 | |
| 69 | 42 | | 5,6 | 5,3 | 4,7 | 5,4 | 39,4 | |
| 70 | 43 | | 5,1 | 5,8 | 5,2 | 5,1 | 27,8 | |
| 71 | 44 | | 5 | 4,8 | 4,8 | 3,7 | 17,9 | |
| 72 | 45 | | 4,2 | 4,5 | 3,7 | 3,6 | 9,1 | |
| 73 | 46 | | | | 4,7 | | 5,6 | |
| 74 | 0 | 9,34 | 8,08 | 5,84 | 5,43 | 6,91 | 9,25 | 6,32 |
| 75 | | 6,03 | 5,693 | 5,05 | 4,927 | 5,3 | 34,4 | 25,78 |
| 76 | 52 | 21,9 | 5,89 | 5,74 | 5,103 | 5,43 | 44,5 | 27,73 |
| 77 | 53 | 15,2 | 5,817 | 5,07 | 5,257 | 5,33 | 44,1 | 32,06 |
| 78 | 54 | 19,4 | 5,9 | | 4,343 | | 47,4 | 34,54 |
| 79 | 55 | 24,9 | 5,677 | | 5,05 | | 47,5 | 37,35 |
| 80 | 56 | 14,7 | 5,883 | | 5 <i>,</i> 053 | | 49 | 30,78 |
| 81 | 57 | 9,11 | 7,38 | 6,33 | 5,253 | 5,05 | 12,6 | 5,77 |
| 82 | 58 | 7,68 | 6,62 | 6,6 | 4,66 | 5,51 | 11,6 | 7,58 |
| 83 | 59 | 14 | 5,543 | 6,22 | 4,757 | 7,26 | 7,28 | 5,91 |
| 84 | 60 | 53,1 | 50,04 | 50,6 | 43,65 | | | |
| 85 | 0 | 51,1 | 55,27 | 50,9 | 52,07 | | | |
| 86 | 61 | 53,7 | 51,63 | 48,8 | 47,43 | | | |
| 87 | 62 | 55,8 | 56,52 | 52,3 | 50,41 | | | |
| 88 | 0 | 48,9 | 38,58 | 37,3 | 38,43 | | | |
| 89 | 63 | 52,4 | 50,25 | 45,2 | 40,21 | | | |
| 90 | 64 | 57,1 | 48,92 | 50 | 43,13 | | | |
| 91 | 65 | 55,5 | 51,22 | 48,8 | 43,68 | | | |

| ıfende rt-Nr. | ıfende rt-Nr. | Startpunkt | Homogen Start | Schwachstelle 1 | Homogen Mitte | Schwachstelle 2 | Homogen Ende | Endpunkt |
|------------------|------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| chlau sswei | chlau ssfah | E _{vd} |
| Dur Me: | Dur Mes | [MN/m²] |
| 92 | 65 | 61,7 | 58,44 | 53,6 | 45,09 | | | |
| 93 | 0 | 22,3 | 7,713 | 5,7 | 5,957 | 5,74 | 42,7 | 33,53 |
| 94 | 67 | 24 | 7,473 | 4,59 | 5 <i>,</i> 893 | 5,85 | 46,7 | 33,94 |
| 95 | 68 | 15 | 6,253 | 5,02 | 5 <i>,</i> 467 | 5,17 | 50,4 | 39,14 |
| 96 | 69 | 16,5 | 6,33 | | 5,277 | | 46,6 | 31,39 |
| 97 | 0 | 21,8 | 7,427 | 6,5 | 5 <i>,</i> 457 | 6,55 | 24,2 | 13,49 |
| 98 | 70 | 8,3 | 6,873 | 6,08 | 5,283 | 7,09 | 10,4 | 22,89 |
| 99 | | | 8,30 | 4,6 | 7,2 | 5,8 | 11,8 | |
| 100 | | | 10,50 | 8,6 | 6,9 | 8,2 | 23,1 | |
| 101 | | | 10,40 | 7,7 | 5,1 | 7,5 | 41,1 | |
| 102 | | | 7,60 | 7,9 | 6,8 | 7,3 | 28 | |
| 103 | | | 7,20 | 6,4 | 4,6 | 6,8 | 45,6 | |
| 104 | | | 7,80 | 4,9 | 7,8 | 8,6 | 9 | |
| 105 | | | 6,40 | 6,1 | 5,7 | 5 | 51,7 | |
| 106 | | | 5,90 | 6,5 | 5,5 | 4,8 | 54,9 | |
| 107 | | | 5,60 | 5,8 | 4,6 | 5,1 | 57,8 | |
| 108 | | | 5,60 | 5,2 | 4,7 | 3,9 | 54,5 | |
| 109 | | | 9,43 | 8,3 | 21 | 12,8 | 37 | |
| 110 | | | 31,61 | 10,4 | 22,33 | 15,8 | 39,1 | |
| 111 | | | 10,10 | 8,2 | 21,37 | 8,87 | 34,9 | |
| 112 | | | 8,68 | 6,17 | 21,03 | 7,53 | 45,9 | |
| 113 | 71 | | 8,58 | 6,19 | 24,2 | 6 | 57,5 | |
| 114 | 72 | | 8,23 | 6,14 | 30,3 | 5,9 | 54,3 | |
| 115 | 73 | | 7,90 | 6,4 | 33,5 | 5,9 | 67,6 | |
| 116 | 74 | | 6,60 | 5,3 | 31,5 | 6 | 60,6 | |
| 117 | 75 | | 7,96 | 5,7 | 33,8 | 5,06 | 62,2 | |
| 118 | 76 | | 6,60 | 5,5 | 38,7 | 5,7 | 61,3 | |
| 119 | 77 | | 9,50 | 7,5 | 29,6 | 9,8 | 46 | |
| 120 | 78 | | 11,40 | 7,4 | 33,1 | | 58,6 | |
| 121 | 79 | | 7,90 | 8,5 | 35,2 | 9,8 | 57,1 | |
| 122 | 80 | | 9,10 | 8,4 | 41,1 | 8 | 48,2 | |

| ufende rt-Nr. | Jfende rt-Nr. | Startpunkt | Homogen Start | Schwachstelle 1 | Homogen Mitte | Schwachstelle 2 | Homogen Ende | Endpunkt |
|------------------|------------------|----------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| chlau sswei | chlau ssfah | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} |
| Dui Me | Dui Me | [MN/m ²] | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m ²] | [MN/m ²] |
| 123 | 81 | | 8,20 | 8,7 | 41,4 | 11,8 | 57,7 | |
| 124 | 82 | | 7,80 | 9,3 | 45,6 | 7,3 | 48,2 | |
| 125 | 83 | | 33,30 | 11,1 | 31,5 | 16,3 | 50,1 | |
| 126 | 84 | | 22,60 | 12,3 | 30,4 | 18,2 | 52 <i>,</i> 6 | |
| 127 | 85 | | 34,20 | 11,7 | 32,9 | 16,4 | 54,7 | |
| 128 | 86 | | 25,60 | 12 | 36,3 | 16,1 | 51,6 | |
| 129 | 87 | | 14,10 | 10,9 | 33,9 | 17 | 56,8 | |
| 130 | 88 | | 6,70 | 9,4 | 24,7 | 15,3 | 50,6 | |
| 131 | 89 | | 5,80 | 8,6 | 33,3 | 15,4 | 59,2 | |
| 132 | 90 | | 6,40 | 8,5 | 30,6 | 15,2 | 56,8 | |
| 133 | 91 | | 5,60 | 7,8 | 38,9 | 15,5 | 50,1 | |
| 134 | 92 | | 5,60 | 7,8 | 39,8 | 15,3 | 49,8 | |
| 135 | 93 | | 5,40 | 7,3 | 40,3 | 15,2 | 56,3 | |
| 136 | | | 5,20 | 6,6 | 31,4 | 11,9 | 42,4 | |
| 137 | | | 31,70 | 11,6 | 39,8 | 15,8 | 42,4 | |
| 138 | | | 11,90 | 8,8 | 29,8 | 9,4 | 39,5 | |
| 139 | | | 9,20 | 7,5 | 22,3 | 6,9 | 49,1 | |
| 140 | | | 22,30 | 29,5 | 22,3 | 4,1 | 32,8 | |
| 141 | 94 | | 10,30 | 8,2 | 33,2 | 6,6 | 52,8 | |
| 142 | 95 | | 9,50 | 7,7 | 38,9 | 6,9 | 52,6 | |
| 143 | 96 | | 9,10 | 6,9 | 39,1 | 6,1 | 57 | |
| 144 | 97 | | 9,50 | 6,8 | 40,1 | 6,8 | 61,5 | |
| 145 | 98 | | 8,40 | 6,9 | 40,3 | 5,4 | 55,9 | |
| 146 | 99 | | 9,00 | 7,5 | 38,9 | 6,4 | 57,1 | |
| 147 | 100 | | 10,70 | 10,3 | 35,3 | 10,5 | 46,1 | |
| 148 | 101 | | 11,00 | 8,2 | 35,9 | 9,7 | 49,9 | |
| 149 | 102 | | 9,30 | 9,5 | 37,2 | 9,8 | 42,2 | |
| 150 | 103 | | 11,10 | 11,1 | 39,8 | 9 | 56,7 | |
| 151 | 104 | | 9,00 | 8,5 | 39,7 | 6,5 | 41,8 | |
| 152 | 105 | | 8,70 | 9,6 | 48,5 | 9,6 | 56 | |
| 153 | 106 | | 16,60 | 12,1 | 37,9 | 17 | 50,4 | |

| ufende rt-Nr. | Jfende rt-Nr. | Startpunkt | Homogen Start | Schwachstelle 1 | Homogen Mitte | Schwachstelle 2 | Homogen Ende | Endpunkt |
|------------------|------------------|-----------------|-----------------|----------------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|
| rchlau sswei | rchlau ssfah | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} |
| Du | Dui Me | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m ²] | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m ²] | [MN/m ²] |
| 154 | 107 | | 14,00 | 13,9 | 36,2 | 15,8 | 54,7 | |
| 155 | 108 | | 12,10 | 12 | 42,2 | 16,7 | 57,1 | |
| 156 | 109 | | 12,80 | 12,1 | 42,7 | 17 | 59 <i>,</i> 4 | |
| 157 | 110 | | 22,60 | 10,9 | 40,4 | 21 | 49,3 | |
| 158 | 111 | | 6,40 | 8 | 33,7 | 12,5 | 52,4 | |
| 159 | 112 | | 6,00 | 8,3 | 38,4 | 14,2 | 61 | |
| 160 | 113 | | 6,10 | 8,5 | 44,1 | 16,1 | 51,8 | |
| 161 | 114 | | 5,20 | 7,3 | 40,7 | 12,5 | 56,3 | |
| 162 | 115 | | 5,70 | 7,7 | 43,7 | 15,2 | 57,4 | |
| 163 | 116 | | 15,40 | 32,2 | 23,8 | 4,5 | 44,9 | |
| 164 | 117 | | 11,50 | 13,7 | 30,4 | 5 | 53,1 | |
| 165 | 118 | | 8,90 | 10,9 | 30,3 | 3,8 | 52,9 | |
| 166 | | | 8,71 | 8,53 | 29,2 | 11,5 | 38,1 | |
| 167 | | | 34,83 | 10,2 | 29,77 | 14,3 | 39,5 | |
| 168 | | | 11,67 | 9,4 | 29,53 | 8,6 | 29,2 | |
| 169 | | | 9,77 | 7,53 | 28,87 | 6,47 | 47,2 | |
| 170 | | | 12,77 | 12,1 | 26,9 | 6,07 | 36,4 | |
| 171 | 119 | | 9,90 | 11,2 | | 4,6 | 40,2 | |
| 172 | 120 | | 9,40 | 13,1 | 35,6 | 5 | 47,5 | |
| 173 | 121 | | 8,50 | 11,7 | 38,5 | 3,9 | 48,9 | |
| 174 | 122 | | 7,70 | 12,9 | 46,4 | 4,7 | 37,6 | |
| 175 | 123 | | 11,90 | 8,2 | 35,8 | 7,2 | 56 | |
| 176 | 124 | | 9,50 | 7,3 | 35,1 | 6,7 | 56,5 | |
| 177 | 125 | | 9,50 | 7,2 | 37,9 | 6,6 | 58,3 | |
| 178 | 126 | | 9,20 | 6,9 | 40,5 | 6,4 | 49,2 | |
| 179 | 127 | | 9,10 | 6,7 | 43,1 | 6,2 | 61,1 | |
| 180 | 128 | | 8,80 | 7,2 | 39,1 | 7 | 48,8 | |
| 181 | 129 | | 8,90 | 9 | 32,1 | 11,1 | 40,7 | |
| 182 | 130 | | 10,30 | 9,7 | 39,4 | 9,5 | 40,3 | |
| 183 | 131 | | 8,80 | 9,6 | 34,6 | 9,8 | 51,8 | |
| 184 | 132 | | 10,20 | 9,7 | 36,3 | 9,3 | 46,3 | |

| ufende rt-Nr. | ufende rt-Nr. | Startpunkt | Homogen Start | Schwachstelle 1 | Homogen Mitte | Schwachstelle 2 | Homogen Ende | Endpunkt |
|------------------|------------------|-----------------|-----------------|----------------------|----------------------|-----------------|-----------------|----------------------|
| rchlau sswei | rchlau ssfah | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} | E _{vd} |
| Me | Dui Me | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m ²] | [MN/m ²] | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m ²] |
| 185 | 133 | | 9,40 | 10,9 | 38,5 | 11,5 | 59,4 | |
| 186 | 134 | | 9,20 | 10,3 | 38,9 | 10,7 | 49,5 | |
| 187 | 135 | | 20,10 | 12 | 33,1 | 17,5 | 49 | |
| 188 | 136 | | 31,30 | 12 | 33,8 | 20,8 | 48,2 | |
| 189 | 137 | | 30,20 | 10,9 | 33 <i>,</i> 5 | 18 | 52,7 | |
| 190 | 138 | | 36,80 | 11,4 | 34,2 | 16,5 | 49,1 | |
| 191 | 139 | | 35,50 | 11,4 | 34,1 | 17,3 | 47,9 | |
| 192 | 140 | | 35,30 | 11,5 | 35,3 | 16,2 | 32,2 | |
| 193 | 141 | | 6,90 | 9 | 33,7 | 14,8 | 49,5 | |
| 194 | 142 | | 8,00 | 9,1 | 34,1 | 12,9 | 45,3 | |
| 195 | 143 | | 7,40 | 10,6 | 33,8 | 14,8 | 45,6 | |
| 196 | 144 | | 7,70 | 9,4 | 36,9 | 13 | 43,8 | |
| 197 | 145 | | 8,60 | 9,1 | 41,7 | 13,4 | 42,9 | |
| 198 | 146 | | 6,40 | 8,5 | 35 | 9,8 | 40,8 | |
| 199 | | | 6,60 | 7,6 | 33,3 | 11,4 | 30,6 | |
| 200 | | | 17,00 | 9,5 | 28,3 | 10,8 | 28,4 | |
| 201 | | | 10,10 | 8,3 | 35,7 | 8,7 | 29,7 | |
| 202 | | | 9,20 | 7,3 | 31,8 | 6,7 | 47,2 | |
| 203 | 147 | | 12,20 | 11 | 32,2 | 8,1 | 45,5 | |
| 204 | 148 | | 12,80 | 10,4 | 39,1 | 7,7 | 43,7 | |
| 205 | 149 | | 11,20 | 10,4 | 36,4 | 9,8 | 45,6 | |
| 206 | 150 | | 11,00 | 9,3 | 42,4 | 11,1 | 29,1 | |
| 207 | 151 | | 9,30 | 10,7 | 45,1 | 11 | 48,6 | |
| 208 | 152 | | 10,10 | 11,3 | 38,5 | 9,1 | 45,6 | |
| 209 | 153 | | 20,40 | 9,4 | 34,6 | 12,9 | 47,4 | |
| 210 | 154 | | 16,70 | 10,6 | 39,1 | 17,3 | 46,6 | |
| 211 | 155 | | 35,80 | 10,8 | 37,4 | 17,9 | 48,9 | |
| 212 | 156 | | 49,60 | 11,9 | 38,4 | | 46,7 | |
| 213 | 157 | | 9,50 | 11,6 | 39,8 | 16,8 | 55 | |
| 214 | 158 | | 45,70 | 11,3 | 39 | 18,2 | 49,7 | |
| 215 | 159 | | 7,10 | 8,4 | 46,1 | 11,6 | 40,5 | |

| ufende srt-Nr. | ufende 1rt-Nr. | Startpunkt | Homogen Start | Schwachstelle 1 | Homogen Mitte | Schwachstelle 2 | Homogen Ende | Endpunkt |
|-------------------|-------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| chla sswe | chla ssfał | E _{vd} |
| Dur Me: | Dur Me: | [MN/m²] |
| 216 | 160 | | 8,70 | 8,8 | 43,4 | 16,4 | 42,1 | |
| 217 | 161 | | 8,20 | 8,8 | 47,8 | 15,3 | 46,3 | |
| 218 | 162 | | 8,20 | 9,3 | 46,5 | 16,9 | 37,3 | |
| 219 | 163 | | 6,90 | 10,2 | 44,6 | 15,4 | 37,8 | |
| 220 | 164 | | 8,20 | 9,1 | 38,6 | 13,1 | 35,4 | |
| 221 | 165 | | | | 40,3 | | | |
| 222 | 166 | | | | 47 | | | |
| 223 | 167 | | | | 49,6 | | | |
| 224 | 168 | | | | 51,3 | | | |
| 225 | 169 | | | | 53,3 | | | |
| 226 | 170 | | | | 56,4 | | | |
| 227 | 171 | | | | 48,4 | | | |
| 228 | 172 | | | | 49,6 | | | |
| 229 | 173 | | | | 46,1 | | | |
| 230 | 174 | | | | | | | |
| 231 | 175 | | | | 43,2 | | | |
| 232 | 176 | | | | 46,9 | | | |
| 233 | 177 | | | | 53,9 | | | |
| 234 | 178 | | | | 54,5 | | | |
| 235 | 179 | | 9,9 | 7,7 | 40,9 | 7,7 | 50,8 | |
| 236 | 180 | | 9,9 | 7,3 | 38,5 | 6,5 | 51,5 | |
| 237 | 181 | | 10,8 | 7,7 | 42,9 | 7,8 | 61,6 | |
| 238 | 182 | | 8,9 | 7,5 | 46,8 | 7,5 | 76,8 | |
| 239 | 183 | | 10,4 | 6,9 | 47,3 | 7,1 | 76,8 | |
| 240 | 184 | | 9,5 | 7,6 | 50,4 | 5,6 | 76,2 | |
| 241 | | | 6,9 | 6,7 | 28,4 | 11,1 | 32,2 | |
| 242 | | | 30,6 | 8,2 | 29,2 | 12,2 | 40,6 | |
| 243 | | | 9,9 | 8,5 | 30,3 | 8,5 | 26,8 | |
| 244 | | | 9,6 | 7,9 | 31,1 | 7,7 | 40,2 | |
| 245 | | | 10,5 | 15,2 | 27,5 | 6,2 | 25,9 | |
| 246 | | | 7,3 | | 7,9 | | | |

| ufende rt-Nr. ufende rt-Nr. | | Startpunkt | Homogen Start | Schwachstelle 1 | Homogen Mitte | Schwachstelle 2 | Homogen Ende | Endpunkt |
|--------------------------------------|-------------|------------|-----------------|-----------------|---------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| chlau swer | sfahi | Evd | E _{vd} | Evd | Evd | Evd | E _{vd} | E _{vd} |
| Durc Mes | Durc Mes | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m²] | [MN/m²] |
| 247 | | | 6,6 | | 7 | | | |
| 248 | | | 6,7 | | 6 | | | |
| 249 | 185 | | 8,0 | | 11,6 | | | |
| 250 | 186 | | 8,1 | | 11,4 | | | |
| 251 | 187 | | 6,6 | | 11,6 | | | |
| 252 | 188 | | 4,7 | | 11,2 | | | |
| 253 | 189 | | 10,4 | | 10 | | | |
| 254 | 190 | | 10,4 | | 10,4 | | | |
| 255 | 191 | | 10,2 | | 11,5 | | | |
| 256 | 192 | | 9,0 | | 10,6 | | | |
| 257 | 193 | | 16,0 | | 12,3 | | | |
| 258 | 194 | | 14,7 | | 14,2 | | | |
| 259 | 195 | | 16,8 | | 16,5 | | | |
| 260 | 196 | | 16,3 | | 16,5 | | | |
| 261 | 197 | | 7,5 | 9 | 43,3 | 16,1 | 50,9 | |
| 262 | 198 | | 7,8 | 7,9 | 43,9 | 18,2 | 51,8 | |
| 263 | 199 | | 7,6 | 8,7 | 45,2 | 18,2 | 51,2 | |
| 264 | 200 | | 7,5 | 10,5 | 44 | 18,4 | 55,2 | |
| 265 | 201 | | 11,2 | 9,9 | 42,5 | 19,5 | 60,5 | |
| 266 | 202 | | 52,6 | 11 | 32,6 | 19 | 52,7 | |
| 267 | 203 | | 56,1 | 10,8 | 43,7 | 19,5 | 60,7 | |
| 268 | 204 | | 44,6 | 11,9 | 40 | 20,7 | 63,6 | |
| 269 | 205 | | 50,6 | 12,1 | 44,2 | 21,2 | 65 | |
| 270 | 206 | | 54,0 | 13,5 | 41 | 18,3 | 71,4 | |
| 271 | 207 | | 17,7 | 13 | 44,9 | 12,5 | 44,3 | |
| 272 | 208 | | 14,7 | 13,3 | 47,1 | 11,1 | 54,5 | |
| 273 | 209 | | 12,5 | 14,5 | 42,3 | 12,6 | 57,1 | |
| 274 | 210 | | 10,9 | 11,5 | 42,2 | 10,8 | 58,3 | |
| 275 | 211 | | 13,2 | 12,3 | 50,6 | 13,9 | 60,5 | |

Ab durchlaufender Messwertnummer 276 bis Messwertnummer 306 wurden noch FDVK-Messwerte aufgezeichnet, allerdings wurden, da diese Messfahrten alle auf dem vollkommen verdichteten Testfeld stattfanden, keine weiteren dyn. Lastplatten mehr durchgeführt.

Tabelle 2.20: Lastplattenprotokoll

- Inhomogene, anisotrope Gesteine mit vordefinierten Schwächezonen (z.B. geschieferte Gesteine) sind zur Verdichtung nicht bzw. nur bedingt geeignet.
- Das Material muss eine Verwitterungsbeständigkeit besitzen. Dementsprechend sind Bestandteile, die quellen, schwellen, zerfallen, sich lösen, sich verflüssigen oder sich chemisch umsetzen können, nicht geeignet, da sich sonst die Tragfähigkeit der Schüttung im Zuge der Lebensdauer verändern kann. Als nicht geeignete Beispiele werden quellfähige Tone bzw. Tonsteine, Gips und Anhydrit, stark pyritführende Gesteine sowie andere veränderlich feste Gesteine genannt. Diese Eigenschaft wird auch als Raumbeständigkeit bezeichnet.
- Feinkörnige Böden sind frostempfindlich, da die Poren sehr klein und meist mit Wasser gefüllt sind. Je höher der Feinkornanteil in einem Boden, desto größer ist der Anteil des adsorptiv gebundenen Wassers. Eis- bzw. Eislinsenbildung führt zu Frosthebungen und dementsprechend zu einer Abminderung der Tragfähigkeit.
- Weitgestuftes Material mit hoher Lagerungsdichte neigt weniger zu Kornbruch. Zwickelräume zwischen den größeren Körnern sind mit kleineren Körnern verfüllt [2].

2.3.3 KORNFORM / RUNDUNGSGRAD / KORNRAUIGKEIT

Gemäß ÖNORM EN ISO 14688-1:2003, Abschnitt 5.2, gibt es folgende Begriffe zur Beschreibung eines Gesteinskorns:

| Begriffe | Beschreibung |
|---------------------------|--|
| Kornform | kubisch flach (plattig) länglich (stängelig) |
| Rundungsgrad | scharfkantig kantig kantengerundet angerundet gerundet gut gerundet |
| Oberflächenbeschaffenheit | rau glatt |

| ſabelle 2.2: Begriffe für die Beschreibung eines G | esteinskorns gemäß ÖNORM EN ISO 14688-1, Tabelle 4 [53] |
|--|---|
|--|---|

Die Verdichtung eines Bodens erfolgt in erster Linie durch Überwindung der Kornreibung, sodass sich das Material in einen Zustand höherer Lagerungsdichte umlagern kann. Dementsprechend lässt sich ein Boden leichter verdichten, je kugeliger (kubisch und gut gerundet) und glatter die Gesteinskörner sind. Allerdings besitzt ein Material mit kugeligen, glatten Gesteinskörnern (z.B. Flussschotter) aufgrund der kleineren Kornreibung und der geringeren mechanischen Verzahnung im Vergleich zu kantigem Material (z.B. Felsbruch) reduzierte Scherfestigkeiten [2], [53].

2.3.4 LAGERUNGSDICHTE / KONSISTENZ

Bei der Bestimmung des Verdichtungsgrades ist zwischen nichtbindigen und bindigen Böden zu unterscheiden.

Bei NICHTBINDIGEN BÖDEN erfolgt – wie bereits erwähnt – die Verdichtung in erster Linie durch Überwindung der Kornreibung, sodass die Einregelung der Körner in einen dichteren Lagerungszustand möglich wird. Der Verdichtungsgrad eines nichtbindigen Bodens ist mit der

Lagerungsdichte D $D = \frac{n_{max} - n}{n_{max} - n_{min}}$

bzw. mit der

bezogenen Lagerungsdichte I_D $I_D = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$

Legende:

n

n_{max} = Porenanteil in lockerster Lagerung

n_{min} = Porenanteil in dichtester Lagerung

e = Porenzahl, Porenvolumen des Bodens bezogen auf das Feststoffvolumen

= Porenanteil, Porenvolumen des Bodens bezogen auf das Gesamtvolumen

- e_{max} = Porenzahl in lockerster Lagerung
- e_{min} = Porenzahl in dichtester Lagerung

als ein linearer Verhältniswert zwischen lockerster Lagerung und dichtester Lagerung definiert. Die lockerste Lagerung eines Materials wird mit dem Zylinderversuch, die dichtest mögliche Lagerung über den Schlaggabel- und den Rütteltischversuch versuchstechnisch im Laboratorium ermittelt. Gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2004, Abschnitt 5.2, wird die Lagerungsdichte grobkörniger Böden über die bezogene Lagerungsdichte in folgende fünf Bereiche gegliedert:

Tabelle 2.3: Bezeichnungen für die bezogene Lagerungsdichte gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2004, Abschnitt 5.2 [54]

| Bozoichnungon | Bezogene Lagerungsdichte I _D |
|---------------|---|
| Bezeichnungen | % |
| sehr locker | 0 bis 15 |
| locker | 15 bis 35 |
| mitteldicht | 35 bis 65 |
| dicht | 65 bis 85 |
| sehr dicht | 85 bis 100 |

Bei BINDIGEN BÖDEN ist die Verdichtungsfähigkeit weniger von der Korngrößenverteilung als vom Wassergehalt des Bodens abhängig. Die Festigkeit des Feinkorn-dominierten Bodens

lässt sich am besten über die – je nach Wassergehalt angenommene – Zustandsform des Materials beschreiben. Mit steigendem Wassergehalt geht bindiger fester Boden in den halbfesten, dann in den plastischen und schließlich in den flüssigen Zustand über. Über die labormäßig zu ermittelnden Zustands- bzw. Konsistenzgrenzen nach Atterberg (Fließ-, Ausroll- und Schrumpfgrenze) kann die Plastizität bzw. die Empfindlichkeit des Bodens gegenüber Änderungen des Wassergehaltes beschrieben werden. Über die Zustandsformen in Verbindung mit dem jeweiligen Wassergehalt eines Materials kann eine Aussage über die Festigkeit getroffen werden.

Zur Beschreibung eines bindigen Bodens werden u.a. folgende Kennzahlen verwendet:

Plastizitätszahl I_P $I_P = W_L - W_P$

Konsistenzzahl I_C $I_{C} = \frac{W_{L} - W}{I_{P}}$

w = natürlicher Wassergehalt

Legende:

w_L = Wassergehalt bei Fließgrenze des Bodens

 w_P = Wassergehalt bei Ausrollgrenze des Bodens

Gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2004 können über die Konsistenzzahl sowie den Wassergehalt folgende Konsistenzformen definiert werden:

Tabelle 2.4: Konsistenzformen über die Konsistenzzahl sowie den Wassergehalt gemäß ÖNORM EN ISO 14688-2:2004 [54]

| Wassergehalt | Konsistenzzahl I _C | Konsistenz |
|--------------------|--|---|
| w > w _L | 0 bis 15 | flüssig |
| w = w _L | Ic = 0 | Fließgrenze |
| w < w _L | 0 < I _c < 1 0 - 0,25 0,25 - 0,5 0,5 - 0,75 0,75 - 1,0 | bildsam breiig sehr weich weich steif |
| w = w _P | Ic = 1,0 | Ausrollgrenze |
| w < w _P | I _C > 1,0 | halbfest |
| w = ws | | Schrumpfgrenze |
| w < w _s | I _C >> 1,0 | fest |

Es ist jedoch anzumerken, dass diese Untergliederung insbesondere für Böden mit geringer Plastizität nur eine grobe Klassifizierung darstellt, da das bodenmechanische Verhalten von Der Wechsel zwischen Haften und Gleiten erfolgt zwei Mal pro Unwuchtdrehung, wobei die Gleitphasen in beide Richtungen gleich lang sind [57].

2.10 VERDICHTUNGSKONTROLLE

2.10.1 ALLGEMEINES

Durch die maschinelle Entwicklung Anwendung verbesserter der neuer bzw. Verdichtungsverfahren sowie durch den zunehmenden Gebrauch von Recyclingbaustoffen als Schüttmaterial kam es in den letzten Jahrzehnten auf dem Gebiet der Erdarbeiten zu maßgeblichen Neuerungen, die sich in höheren qualitativen und quantitativen Verdichtungsleistungen manifestierten. Dementsprechend höher sind die Anforderungen an die methodischen Verfahren der Qualitätssicherung geworden, welche im Erd- und Grundbau zum Einsatz kommen [4].

Beim erforderlichen Prüfumfang wird unterschieden zwischen der Erst-, Konformitäts-, und der Identitätsprüfung. Während bei den ersteren beiden keine Regelung vorliegt, ist der Prüfumfang von Identitätsprüfungen (Abnahmeprüfungen) in der RVS 08.03.01 je nach Tiefenbereich, bezogen auf die Verdichtungsfläche bzw. das Schüttvolumen, geregelt.

2.10.2 VERDICHTUNGSANFORDERUNGEN

Da nicht immer projektspezifische Eignungsuntersuchungen in vollem Umfang vorliegen werden, können oder müssen der Planung oft gesicherte Erfahrungswerte für die Verdichtungsanforderungen zugrunde gelegt werden.

Solche Verdichtungsanforderungen und auch die Auswahl des richtigen Prüfverfahrens sind in Österreich für erdbauliche Maßnahmen bei Straßen und Eisenbahnen in der RVS 08.03.01 [61] sowie für ungebundene Tragschichten in der RVS 08.15.01 [64] geregelt (siehe Tabelle 2.7 und Tabelle 2.8).

| Tiefenbereich | E _{vd} [MN/m²] | E _{v1} [MN/m²] | D _{Pr} [%] | Δ _{FDVK} [%] | SD _{FDVK} [%] |
|---|-------------------------|-------------------------|---------------------|-----------------------|------------------------|
| Unterbauplanum | 38 | 35 | 100 | ≤ 5 (0) | ≤ 20 |
| ab 1 m unter Unterbauplanum (einschl. Bodenauswechslung) | 24 (26) | 20 | 99 | ≤ 5 (0) | ≤ 20 |
| ab Dammaufstandsfläche | 18 (16) | 15 (7,5) | 97 (95) | ≤ 5 (0) | ≤ 20 |
| Hinterfüllung | 38 | 35 | 100 | | |

Tabelle 2.7: Mindestanforderungen an die Verdichtung gemäß RVS 08.03.01 (Klammerwerte gelten für bindige Böden) für Dammaufstandsfläche bis Unterbauplanum [61]

| | | Ungebundene obere Tragschicht | | | | | Ungebundene untere Tragschicht | | | Ungebundene Tragschichten | |
|----------------------------------|-------------------|---------------------------------------|--------------|------|-------------|---------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------|------------------------------|-----------------------------|
| | | Für alle LK ¹ LK II bis LI | | K VI | Für alle LK | | ₋K | gebundene Überbauung | | | |
| Kennwert | Klasse | U12 | U2 | U3 | U4 | U5 | U6 | U7 | U8 | U9 | U10 |
| E _{v1} | ÖNORM B 4417 | ≥ 120 MN/m² | ≥ 90 MN/m² | | | ≥ 75 MN/m² | ≥ 7 MN | '2 //m² | ≥ 60 MN/m² | | L |
| E _{v1} /E _{v2} | ÖNORM B 4417 | | | | - | ≤ 2,2 | | | | K Anfor | eine derung, |
| D _{Pr} | ÖNORM B 4414-2 | | ≥ 103% | | | | ≥ 101% | | | | w. im vertrag :ulegen |
| Sollhöhe | | ± 2 cm | | | | | ± 3 cm | | | | |
| Ebenheit | ÖNORM EN13036- | | ≤ 15 mm/ 4 m | | | | | | | | |

Tabelle 2.8: Mindestanforderungen an die Verdichtung gemäß RVS 08.15.01 für ungebundene Tragschichten [64]

Gemäß Dienstanweisung des Bundesministeriums für Verkehr, Innovation und Technologie sind diese Verdichtungsanforderungen im Bereich von Bundesstraßen verbindlich anzuwenden. Da diese den Stand der Technik widerspiegeln, wird in den Richtlinien angeregt, selbige auch außerhalb des Bundesstraßenbereiches anzuwenden.

Für andere erdbauliche Maßnahmen, wie z.B. Bauwerksgründungen, Hochwasser- oder Lärmschutzdämme, sind die Verdichtungsanforderungen üblicherweise in

- Leitfäden und Normen
- geotechnischen Gutachten
- Bescheidauflagen
- Vertragsbedingungen
- sonstigen Regelungen

festgelegt. Diese Qualitätsanforderungen an den Verdichtungsgrad sind je nach verwendetem Regelwerk bzw. den projektspezifisch durchgeführten Erkundungsmaßnahmen mehr oder weniger detailliert.

Insbesondere bei kleinen bis mittelgroßen Projekten ohne vollem Vorerkundungsumfang werden die Verdichtungsanforderungen oft nur über die bezogene Lagerungsdichte (z.B.: "…es sind mindestens mitteldichte Lagerungsverhältnisse erforderlich…") vorgegeben. Die bezogene Lagerungsdichte kann aus den Ergebnissen von Feldversuchen abgeleitet werden. In Tabelle 2.9 sind für Druck- und Rammsondierungen die empirisch abgeleiteten Lagerungsdichten, bezogen auf die Versuchsergebnisse, dargestellt.

¹ Lastklassenbezeichnung gemäß der RVS 03.08.63 [60]

² In den U-Klassen sind gemäß RVS 08.15.01 die Anforderungen an die Eigenschaften von Gesteinskörnungsgemischen geregelt.

| Bezeichnung | bei C _u > 3 D (-) | Verdichtungs- grad D _{Pr} | Spitzenwiderstand Drucksonde q _s [MN/m²] | Rammson Schla DPH N ₁₀ | dierungen Igzahl SPT N ₃₀ |
|-------------|---------------------------------|---------------------------------------|---|---|--|
| sehr locker | < 0,2 | | | < 5 | < 4 |
| locker | 0,2 - 0,45 | | | 5 – 15 | 4 – 15 |
| mitteldicht | 0,45 – 0,65 | ≥ 98% | ≥ 7,5 | 16 – 30 | 16 – 40 |
| dicht | > 0,65 | ≥ 100% | ≥ 15 | 30 - > 40 | > 40 |
| Bezeichnung | bei C _u ≤ 3 D (-) | Verdichtungs- grad D _{Pr} | Spitzenwiderstand Drucksonde q _s [MN/m²] | Rammsondierungen Schlagzahl DPH N ₁₀ DPL-5 N ₁₀ | |
| sehr locker | < 0,15 | | < 2,0 | 0 – 1 | 0 – 3 |
| locker | 0,15 – 0,30 | | 2,0 – 5,0 | 1 – 4 | 3 – 7 |
| mitteldicht | 0,30 – 0,50 | ≥ 95% | 5,0 – 12,0 | 4 – 13 | 7 – 20 |
| dicht | 0,50 – 0,75 | ≥ 98% | 12,0 – 20,0 | 13 – 24 | > 20 |
| sehr dicht | 0,75 - 1 | | | | |

Tabelle 2.9: Mindestanforderungen an die Verdichtung - empirisch abgeleitete Lagerungsdichten aus Feldversuchen [2]

Da außerhalb des Straßenbau- und Eisenbahnwesens die Verdichtungsanforderungen oft unzureichend oder zu unpräzise vorgegeben sind, ist es empfehlenswert, diese projektspezifisch auf Basis der Ergebnisse von entsprechenden geotechnischen Vorerkundungsmaßnahmen zu definieren und dem Auftragnehmer bereits in den Vertragsbedingungen bekanntzugeben.

2.10.3 PRÜFVERFAHREN

Die Prüfverfahren der Verdichtung können grundsätzlich in die klassischen, punktuellen und in die flächendeckenden, arbeitsintegrierten Methoden unterschieden werden.

| Tabelle 2.10: Prüfverfahren zur | Verdichtungskontrolle | |
|---------------------------------|-----------------------|--|
| | | |

| Prüfverfahren | Prüfnorm / Richtlinie |
|--|---|
| Proctorversuch | ÖNORM B 4418 [51] |
| Dichte im Feld | ÖNORM B 4414-2 [49] |
| Statischer Lastplattenversuch | ÖNORM B 4417 [50] |
| Dynamischer Lastplattenversuch | RVS 08.03.04 [63] |
| Flächendeckende dynamische Verdichtungskontrolle (FDVK) | RVS 08.03.02 [62] |
| Weitere Prüfverfahren Isotopensonde Drucksondierungen Rammsondierungen Benkelman-Balken Nivellierung der Schüttlage | TP-BF-StB, Teil B 4.3 [67] ÖNORM EN ISO 22476-1 [55] ÖNORM EN ISO 22476-2 [56] und ÖNORM B 4419 [52] Merkblatt FGSV [28] |

der Teststrecke im westlichen Bereich mit der internen Bezeichnung "Homogen Start" eher niedrige E_{vd} -Werte gemessen. Je weiter östlich, d.h. in Richtung des Testfeldabschnittes "Homogen Ende", desto höhere E_{vd} -Werte wurden auch gemessen.



 →→ HD+140 27Hz 2km/h Spur 1 - nach1.ÜF
 →→ HD+140 27Hz 2km/h Spur 1 - nach2.ÜF

 →→ HD+140 27Hz 2km/h Spur 1 - nach3.ÜF
 →→ HD+140 27Hz 2km/h Spur 1 - nach4.ÜF

 →→ HD+140 27Hz 2km/h Spur 1 - nach5.ÜF
 →→ HD+140 27Hz 2km/h Spur 1 - nach6.ÜF

Diagramm 2.3: Räumliche Werteverteilung der durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche, am 04.11.2015 nach erfolgtem Bodenaustausch im Bereich "Homogen Mitte"

Aus den in Diagramm 2.3 dargestellten Ergebnissen der durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche können folgende grundsätzliche Aussagen abgeleitet werden:

- Das Testfeld besitzt ein von Westen gegen Osten ansteigendes Werteniveau.
- Die Schwachstellen sind beide mit der dynamischen Lastplatte deutlich erkennbar.
- Die "Schwachstelle 1" besitzt ein niedrigeres Werteniveau als "Schwachstelle 2".
- Das Werteniveau im Bereich "Homogen Start" ist großen Schwankungen unterworfen.

Während bei sehr nassen Verhältnissen (siehe Diagramm 2.4; Lastplattenversuche, vom 27.10.2015) – quasi unabhängig vom Verdichtungsgrad – die Schwachstellen auf Basis der Ergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche aufgrund des allgemein niedrigen

Werteniveaus nicht erkennbar sind, sind bei den Ergebnissen ab 04.11.2015 aufgrund des allgemein höheren Werteniveaus die Schwachstellen deutlich zu erkennen (siehe Diagramm 2.3).



Diagramm 2.4: Räumliche Messwertverteilung der durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche, am 27.10.2015

5.2.3 E_{vd}-WERTENIVEAU DES ANSTEHENDEN TERRASSENSCHOTTERS

Wie schon unter Punkt 4.1 und Punkt 4.2.1 näher beschrieben, wurde durch Abtrag von bis zu 30 cm im nordwestlichen Bereich eine ebene Testfläche im in situ gewachsenen Schotter hergestellt. Bevor das Schüttmaterial aufgebracht wurde, sind in den Haupttestfeld-Bereichen "Homogen Start", "Homogen Mitte" und "Homogen Ende" insgesamt 36 dynamische Lastplattenversuche durchgeführt worden. Wie in Tabelle 7.2 sowie in Diagramm 2.5 ersichtlich, wurden E_{vd} -Werte von rund 50 – 145 MN/m² mit einem Medianwert von rund 100 MN/m² gemessen. Die höchsten E_{vd} -Werte wurden in den westlichen Testfeldabschnitten, in welchen ein Materialabtrag von bis zu 30 cm durchgeführt wurde, beobachtet. Die im Vergleich dazu relativ niedrigen E_{vd} -Werte in den östlichen Testfeldabschnitten – in welchen

5.3 FDVK-ERGEBNISSE

5.3.1 VERWENDETE ROHDATEN / DATENAUFBEREITUNG

Im Zuge der Feldversuche wurden mit dem in den Walzen eingebauten FDVK-System die FDVK-Werte online und arbeitsintegriert unter Verwendung der Vertikal- und Horizontalbeschleunigungen entsprechend dem unter Punkt 3.9.2.2.3 beschriebenen Algorithmus generiert und aufgezeichnet. Da – von Seiten der Hamm AG – das Ziel der Feldversuche insbesondere darin bestand, einen stabilen Messwert zu erzeugen, wurden die FDVK-Werte mit unterschiedlichsten Hoch- bzw. Tiefbassfiltern bzw. Faktoren kombiniert und verglichen. In Diagramm 2.7 sind beispielhaft die mit den unterschiedlichen Glättungsfiltern generierten FDVK-Werte der Messfahrt 112 (Testwalze HD+140, f = 31 Hz, v = 3 km/h) dargestellt.



Diagramm 2.7: Systemplot: FDVK-Werte der Messfahrt 112 (Testwalze HD+140, f = 31 Hz, v = 3 km/h) unter Verwendung unterschiedlicher Filtersysteme zur Generierung eines stabilen Wertes

In der vorliegenden Arbeit ist der Schwerpunkt, wie bereits unter Punkt 5.1 beschrieben, auf die Anwendbarkeit bzw. die Funktionalität des noch ungeglätteten über den unter Punkt 3.9.2.2 bereits dargestellten Algorithmus gelegt. Dementsprechend wurden für die weiteren Versuchsauswertungen die während der Messfahrten aufgezeichneten Rohsignale der Horizontal- und Vertikalbeschleunigungen (siehe Diagramme 2.8 und 2.9) verwendet.



Diagramme 2.8 und 2.9: Systemplot: Rohwerte der aufgezeichneten Horizontal- (links) und Vertikalbeschleunigungssignale (rechts) der Messfahrt 112 (Testwalze HD+140, f = 31 Hz, v = 3 km/h)

Die Auswertung der Messdaten wurde mit dem Programm Matlab durchgeführt. Um die Messfahrten miteinander vergleichen zu können, mussten die Daten folgendermaßen aufbereitet werden:

- Horizontal- und Vertikalbeschleunigungssignale: Die Horizontal- und Vertikalbeschleunigungssignale werden mit einer Abtastrate von 1000 Hz (d.h. 1000 Werte pro Sekunde) aufgezeichnet. Die Vektorenlänge der aufgezeichneten Horizontal- und Vertikalbeschleunigungssignale ergibt sich aus der Messdauer und schaut somit für jede Messfahrt mit unterschiedlicher Fahrtgeschwindigkeit anders aus.
- Lichtschrankensignale:

In Diagramm 2.10 sind die Lichtschrankensignale der beispielhaft gewählten Messfahrt 233 (Testwalze HD+140, f = 30 Hz, v = 4 km/h), bezogen auf die Vektorlänge der Messfahrt, dargestellt.

Diagramm 2.10: Lichtschrankensignale von Messfahrt 233 (Testwalze HD+140, f = 30 Hz, v = 4 km/h)



- Zeitpunkte der vollen Bandagenumdrehung:
 - Für die Korrektur der Periodizität sind die Zeitpunkte der vollen Bandagenumdrehungen erforderlich. Dieser Wegvektor wurde mittels Näherungsschalter (eingebaut am Rahmen der Bandage mit zugehörigem Fahnenblech an der Bandage) gemessen. Die Maxima, welche die Zeitpunkte der vollen Bandagenumdrehung anzeigen, sind in Diagramm 2.11 mit roten Kreisen markiert.



Diagramm 2.11: Zeitpunkte der vollen Bandagenumdrehung von Messfahrt 233 (Testwalze HD+140, f = 30 Hz, v = 4 km/h)

- Aus den Beschleunigungssignalen wurden gemäß dem unter Punkt 3.9.2.2.3 beschriebenen Algorithmus die FDVK-Werte berechnet (chronologische Reihung der Koordinatenpaare, Reihung nach der Größe der Horizontalbeschleunigung, Ermittlung der unteren und oberen Einhüllenden, Berechnung der umschlossenen Fläche, Flächeninhalt entspricht dem FDVK-Wert).
- Für die Ermittlung eines FDVK-Wertes ist dementsprechend zumindest eine Oszillationsperiode erforderlich.
- Der Algorithmus ist als Schleife programmiert, wobei der gemittelte und überlappte FDVK-Wert immer abgespeichert wird. Die einzelnen FDVK-Werte werden aneinandergereiht und in Form eines FDVK-Ergebnisvektors ausgegeben.
- Mit den aufgezeichneten Zeitpunkten der Bandagenumdrehungen wurden um die Messfahrten vergleichen zu können die Ergebnisvektorlängen gleichgerichtet.
- Abschließend erfolgt die Korrektur der Periodizität über den unter Punkt 3.9.2.2.4 beschriebenen Algorithmus (Abzug der Korrekturkurve in Abhängigkeit von der Steifigkeit).
- In den nachfolgenden Diagrammen 2.12 bis 2.14 sind die berechneten FDVK-Werte für die verwendeten Testwalzen beispielhaft an drei Messfahrten über die Testfeldlänge dargestellt. Die Lage der "Schwachstelle 1" bzw. der "Schwachstelle 2" ist in den Diagrammen mit blauen bzw. grünen Linien gekennzeichnet. Die berechneten Mittelwerte für die einzelnen Streckenabschnitte "Schwachstelle 1", "Homogen Mitte" und "Schwachstelle 2" sind als blaue, rote bzw. grüne Punkte dargestellt.



Wegstrecke [m]

Diagramm 2.12: Berechneter FDVK-Wert von Messfahrt 233 (Testwalze HD+140, f = 30 Hz, v = 4 km/h)

Diagramm 2.13: Berechneter FDVK-Wert von Messfahrt 225 (Testwalze H7i, f = 36 Hz, v = 2 km/h)

Diagramm 2.14: Berechneter FDVK-Wert von Messfahrt 222 (Testwalze H13i, f = 27 Hz, v = 2 km/h)



Diagramm 2.16: Verdichtungszuwächse mit konstanten Prozessparametern am Nebentestfeld Terrassenschotter (Testwalze HD+140, f = 27 Hz, v = 2 km/h) auf Spur 10: FDVK-Werte der Messfahrten 63 (1. \ddot{U} F), 64 (2. \ddot{U} F), 65 (3. \ddot{U} F) und 66 (4. \ddot{U} F)

Interpretation Diagramm 2.17 Nebentestfeld Lösslehm:

 Auf dem Nebentestfeld Lösslehm wurden mit der Testwalze H13i unter Verwendung der Prozessparameter f = 33 Hz und v = 3 km/h bei 4 Überfahrten keine bzw. nur sehr geringe Verdichtungszuwächse generiert. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Ergebnissen der direkt nach den Überfahrten durchgeführten dynamischen Lastplattenversuchen (siehe Tabelle 2.18).

Tabelle 2.18: Ergebnisse der auf dem Nebentestfeld Lösslehm durchgeführten dynamischen Lastplattenversuche direkt nach den Versuchsfahrten mit der Testwalze H13i, f = 33 Hz und v = 3 km/h

| | LP-Messbereich 1 | LP-Messbereich 2 | |
|-------------------|-------------------------|--------------------------------------|--|
| | E _{vd} [MN/m²] | E _{vd} [MN/m ²] | |
| Nach 1. Überfahrt | 10,4 | 10 | |
| Nach 2. Überfahrt | 10,4 | 10,4 | |
| Nach 3. Überfahrt | 10,2 | 11,5 | |
| Nach 4. Überfahrt | 9 | 10,6 | |

Lösslehm konnte nicht bzw. nur unwesentlich verdichtet werden. Bei mehrmaligen Überfahrten konnten jedoch vergleichbare und überwiegend reproduzierbare FDVK-Werte generiert werden.

5.3.3 EINFLUSS DER PROZESSPARAMETER

Wie insbesondere in den Arbeiten von KOPF [46] und HAGER [35] beschrieben, haben die Prozessparameter (Erregerfrequenz, Fahrtgeschwindigkeit) maßgeblichen Einfluss auf das FDVK-Werteniveau sowie auf die Sensitivität der FDVK-Systeme für Vibrationswalzen.

Wie sich anhand der Erkenntnisse der Feldarbeiten in Fischamend herausstellte, haben die Prozessparameter (Erregerfrequenz, Fahrgeschwindigkeit) auch im Falle des FDVK-Systems für Oszillationswalzen Einfluss auf das FDVK-Werteniveau bzw. die Sensitivität.

Wurde bei den Verdichtungszuwachsversuchen noch die Bodensteifigkeit als variable Größe zugelassen, wurden die Testfahrten mit variierenden Prozessparametern (f = 27 - 36 Hz, v = 2 - 4 km/h) nun auf einer mit mehreren Walzenübergängen vollkommen verdichteten Spur durchgeführt. Die Ergebnisse der mit allen drei Testwalzen auf dem Haupttestfeld durchgeführten Versuchsfahrten sind in den nachfolgenden Diagrammen 2.21, 2.22 und 2.23 dargestellt.



Diagramm 2.21: Gemittelte FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung der Testwalze H7i – Prozessparametervariation (bei der Testwalze H7i wurden nur die Erregerfrequenzen f = 30 Hz und 36 Hz verwendet, v = 2 - 4 km/h)

Interpretation der Prozessparametervariation für die Testwalze H7i (siehe Diagramm 2.21):

- Das FDVK-Werteniveau bei einer Erregerfrequenz von f = 30 Hz ist mit FDVK ≈ 900 1100 m²/s⁴ signifikant höher als bei einer Erregerfrequenz von f = 36 Hz mit FDVK ≈ 520 – 610 m²/s⁴.
- Bei einer Variation der Geschwindigkeit können bei den untersuchten Erregerfrequenzen ähnliche FDVK-Wertveränderungen festgestellt werden. Bei einer Fahrgeschwindigkeit von v = 3 km/h wurden die größten FDVK-Werte aufgezeichnet. Bei höheren als auch bei langsameren Geschwindigkeiten nimmt der gemittelte FDVK-Wert geringfügig ab.



Diagramm 2.22: Gemittelte FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung der Testwalze H13i – Prozessparametervariation (f = 27 Hz, 30 Hz, 33 Hz und 36 Hz, v = 2 - 4 km/h)

Interpretation der Prozessparametervariation für die Testwalze H13i (siehe Diagramm 2.22):

- Das FDVK-Werteniveau bleibt bei einer Variation der Fahrgeschwindigkeit von 2 4 km/h stabil und im Wesentlichen unverändert.
- Allerdings zeigt sich auch bei der Testwalze H13i eine starke Beeinflussung des FDVK-Wertes bei Verwendung unterschiedlicher Erregerfrequenzen. Bei Verwendung einer Erregerfrequenz von f = 30 Hz wurde der höchste FDVK-Wert gemessen. Signifikant und bei allen drei Fahrgeschwindigkeiten zu beobachten ist der Abfall des FDVK-Wertes bei Verwendung einer Erregerfrequenz von f = 27 Hz.



Diagramm 2.23: Gemittelte FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung der Testwalze HD+140 – Prozessparametervariation (f = 27 Hz, 30 Hz, 33 Hz und 36 Hz, v = 2 - 4 km/h)

Interpretation der Prozessparametervariation für die Testwalze HD+140 (siehe Diagramm 2.23):

- Während das FDVK-Werteniveau bei einer Variation der Fahrgeschwindigkeit von v = 2 – 4 km/h bei den niedrigeren Erregerfrequenzen von f = 27 Hz und f = 30 Hz eher stabil bleibt, ist bei den höheren Erregerfrequenzen f = 33 Hz und f = 36 Hz mit steigender Fahrgeschwindigkeit eine Reduzierung des FDVK-Werteniveaus zu beobachten.
- Deutlich stärker ausgeprägt ist auch bei der Testwalze HD+140 die Beeinflussung des FDVK-Wertes bei Verwendung unterschiedlicher Erregerfrequenzen. Bei Verwendung von hohen Erregerfrequenzen wurden markant höhere FDVK-Werte gemessen.⁴

Zusammenfassung der Ergebnisse zur Beurteilung des Einflusses der Prozessparameter:

Die durchgeführten Testfahrten zeigten, dass durch die Änderung eines oder beider Prozessparameter (Erregerfrequenz und Fahrgeschwindigkeit) sich auch das FDVK-Werteniveau ändert. Während sich die Änderungen der Fahrgeschwindigkeit bei allen drei getesteten Walzen moderat bis gering auf das FDVK-Wertniveau auswirkten, beeinflussten Änderungen der Erregerfrequenz zum Teil signifikant das Ergebnis des FDVK-Wertes. Die verwendeten Messwalzen reagierten unterschiedlich auf veränderte Erregerfrequenzen:

• Während bei den Testwalzen H7i und H13i bei einer Erregerfrequenz von f = 30 Hz vergleichsweise ein hohes FDVK-Wertniveau generiert wurde, ergab die Auswertung

⁴ Die Messfahrt mit der durchlaufenden Nummer 239 (f = 36 Hz, v = 2 km/h) wurde fehlerhaft aufgezeichnet und konnte für die weitere Auswertung nicht verwendet werden.
der Messfahrten der Testwalze HD+140 bei gleicher Erregerfrequenz ein vergleichsweise niedriges FDVK-Werteniveau.

 Signifikant ist bei der Testwalze H13i der Abfall des FDVK-Wertes bei Verwendung der Erregerfrequenz von f = 27 Hz zu bezeichnen.

Bezüglich einer weiterführenden Interpretation wird auf Punkt 6.1 der vorliegenden Arbeit verwiesen.

5.3.4 EINFLUSS DER WALZENPARAMETER

Wie schon unter Punkt 2.7 beschrieben, haben die Walzenparameter (z.B. Masse der schwingenden Bandage bzw. statische Linienlast, Bandagengeometrie, statisches Moment, Amplitude der Erregerschwingung) maßgeblichen Einfluss auf das FDVK-Wertniveau bzw. auf die Sensitivität des Messsystems.

Um einen Vergleich der Ergebnisse der FDVK-Systeme zwischen den drei verwendeten Messwalzen zu bekommen, wurden auf der völlig verdichteten Spur 3 des Haupttestfeldes mit unterschiedlichen Prozessparameterkombinationen Testfahrten durchgeführt.

Im nachfolgenden Diagramm 2.24 werden die gemittelten FDVK-Werte der drei verwendeten Messwalzen im Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung unterschiedlicher Fahrgeschwindigkeiten bei einer konstanten Erregerfrequenz von f = 30 Hz Testfahrten verglichen.



Diagramm 2.24: Gemittelte FDVK-Werte vom Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung aller Testwalzen (H7i, H13i und HD+140) mit einer konstanten Erregerfrequenz von f = 30 Hz auf der völlig verdichteten Spur 3 am Haupttestfeld

Bei einem Vergleich der FDVK-Werte unter Verwendung des identen FDVK-Systems, unter konstanten Prozessparametern auf bereits verdichtetem Untergrund mit konstanter Bodensteifigkeit, wird der Einfluss der Walzenparameter augenscheinlich. Wie in Diagramm 2.24 ersichtlich, besitzen alle drei Messwalzen ein völlig unterschiedliches Werteniveau. Ein signifikant höheres Werteniveau besitzt die Testwalze H7i.

Eine Gegenüberstellung der gemittelten FDVK-Werte aller Testwalzen aus dem Bereich "Homogen Ende" bei einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von v = 3 km/h und unterschiedlichen Erregerfrequenzen ist in Diagramm 2.25 dargestellt. Auch hier zeigt sich, dass die drei Messwalzen ein unterschiedliches Werteniveau besitzen. Wie schon in Diagramm 2.21 dargestellt, zeigt sich auch hier die hohe Sensibilität der Testwalze H7i in Bezug auf unterschiedliche Erregerfrequenzen.⁵



Diagramm 2.25: Gemittelte FDVK-Werte aus dem Bereich "Homogen Ende" unter Verwendung aller Testwalzen (H7i, H13i und HD+140) mit einer konstanten Fahrgeschwindigkeit von v = 3 km/h auf der völlig verdichteten Spur 3 am Haupttestfeld (bei der Testwalze H7i wurden nur die Erregerfrequenzen f = 30 Hz und f = 36 Hz verwendet)

In nachfolgendem Diagramm 2.26 sind die FDVK-Wertverläufe der drei Testwalzen H7i, H13i und HD+140 gegenübergestellt. Auch bei diesen Versuchsfahrten wurden die Untergrundverhältnisse konstant gehalten. Um eine Aussage über den Einfluss der Walzenparameter treffen zu können, wurden alle Messfahrten mit f = 30 Hz, v = 3 km/h, d.h. konstant gehaltenen Prozessparametern, durchgeführt.

 ⁵ Bei den Testwalzen H13i und HD+140 wurden die Erregerfrequenzen f = 27 Hz, f = 30 Hz, f = 33 Hz und f = 36 Hz untersucht.
Bei der Testwalze H7i konnte nur zwischen den Erregerfrequenzen f = 30 Hz und f = 36 Hz umgeschulten werden.