



Diplomarbeit

Master Thesis

Impulsverdichtung

**Auswertung und Interpretation von Messdaten zur Erfassung
des Verdichtungserfolgs**

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

unter der Leitung von

Univ.-Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dietmar Adam

und

Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Péter Nagy, BSc

(E220 Institut für Geotechnik, Forschungsbereich für Grundbau, Boden- und Felsmechanik)

eingereicht an der Technischen Universität Wien

Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Diana Yanulova

E 610/1129529

Alexander Battenberg Str. 12

BG-2070 Pirdop

Vorwort

Die vorliegende Diplomarbeit ist am Institut für Geotechnik an der Technischen Universität Wien im Rahmen eines Doppel-Diplom Studiums an der TU-Wien und an der Universität für Architektur, Bauingenieurwesen und Geodäsie – Sofia entstanden.

An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die zum Gelingen meiner Diplomarbeit beigetragen haben.

Bei Herrn Univ. Prof. Dipl.-Ing. Dr. techn. Dietmar Adam möchte ich mich herzlich für die Ermöglichung dieser Arbeit, für die Geduld und die tatkräftige Unterstützung bei Schwierigkeiten bedanken. Weiters danke ich besonders Herrn Univ.-Ass. Dipl.-Ing. Peter Nagy für seine ausgezeichnete Betreuung, die Bereitstellung wichtiger Arbeitsunterlagen und das kollegiale Arbeitsklima.

Danken möchte ich außerdem den Mitarbeitern der Firma Terra-Mix Bodenstabilisierungs-GmbH für ihre Unterstützung, insbesondere Herrn Johannes Fürpaß und Herrn Martin Müller für die Hilfsbereitschaft.

Herzlich möchte ich mich bei Herrn Univ.-Doz. Dipl.-Ing. Dr. techn. Andrey Totsev (UABG - Sofia) bedanken, der mein Interesse an die Impulsverdichtung geweckt hat und die Verbindung zwischen mir und der Firma Terra-Mix herstellte, und dadurch die Bearbeitung dieses Diplomarbeitsthema ermöglichte.

Ganz besonders bedanken möchte ich mich bei meinen Eltern, Dipl.-Ing. Sofia Yanulova und Dipl.-Ing. Plamen Yanulov, die meine Ausbildung ermöglicht und gefördert haben und immer hinter mir gestanden sind. Meiner Schwester Silvia danke ich dafür, dass sie immer für mich da war.

Meinem Freund Dipl.-Ing. Aleksander Mihov danke ich für die Unterstützung und das Verständnis.

Bester Dank gilt auch meinen Kollegen und Freunde, die mich durch einen spannenden Lebensabschnitt begleitet haben.

Kurzfassung

Die Impulsverdichtung ist ein dynamisches Verdichtungsverfahren, das die Technologie des hydraulischen Schlaghammers ausnutzt und zur Verbesserung der Untergrundeigenschaften dient. Ursprünglich wurde das Verfahren Anfang der 90er Jahre in England zur raschen Reparatur von Explosionsschäden auf Militärflugplätzen entwickelt. Heute findet seine weiterentwickelte Variante bei der mitteltiefen Verdichtung von Kiesen, Sanden, Schluffen und künstlichen Auffüllungen weltweit ihre Anwendung. 2007 wurde die Technologie der Impulsverdichtung von der österreichischen Firma Terra-Mix Bodenstabilisierungs- GmbH adaptiert und erfolgreich eingesetzt. Zur Qualitätssicherung der Bodenverbesserungsarbeiten wurden die firmeneigenen Verdichtungsgeräte mit einem automatischen Datenerfassungssystem ausgerüstet, das die Dokumentation von Verfahrensparametern während des Verdichtungsablaufes ermöglicht.

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit, die in Kooperation mit Fa. Terra-Mix abgewickelt wurde, wurden die während der Impulsverdichtung dokumentierten Messdaten aus 27 ausgeführten Projekten analysiert, um Zusammenhänge zwischen den Herstellungsparametern und den Untergrundverhältnissen zu finden. Das zentrale Ziel der Datenauswertung war die Grundlagen einer Auswertungsdatenbank zu erarbeiten, die der Firma Terra-Mix bei der weiteren Datensammlung, Datenauswertung und auf Basis der ausgewerteten Projektdaten in der Angebotsphase bei der Kalkulation und Kostenrechnung unterstützen kann. Die 27 Projekte wurden zu vier Untergrundkategorien zugeordnet – „Kies“, „Sand“, „Schluff“ und „künstliche Auffüllung“. Die Ergebnisse der Auswertung liefern neue Erkenntnisse über das Verhalten des Bodens bei der Impulsverdichtung und bieten eine Unterstützung zur vorläufigen Bestimmung der Verfahrensparameter für neue Projekte mit ähnlichen Untergrundverhältnissen. Die Erkenntnisse der vorliegenden Diplomarbeit bestätigen, dass mit dem Impulsverdichter in erster Linie nichtbindige Böden effektiv verdichtbar sind.

In der Diplomarbeit wurden im Rahmen einer umfangreichen Literaturstudie die Möglichkeiten zur Verdichtungskontrolle im Erdbau untersucht. Der Schwerpunkt der durchgeführten Literaturstudie fällt dabei auf die Einsatz- und Auswertungsmöglichkeiten von Rammsondierungen, da die Kontrolle des Verdichtungserfolgs bei der Impulsverdichtung mit Hilfe von Sondierverfahren, in erster Linie mit Hilfe von Rammsondierungen erfolgt.

Abstract

The Rapid Impact Compaction (RIC) is a dynamic compaction method based on the piling hammer technology used to improve the ground or respectively the fill materials through controlled impacts. This technique was originally developed in the early 1990's in England for the rapid repair of explosion damage to military airfield runways. Nowadays the rapid impact compactor is used worldwide for middle-deep compaction of gravels, sands, silts and fill materials. In 2007 the Austrian company Terra-Mix adapted the rapid impact compaction technique and since then has been successfully applying it. The rapid impact compactors of the company are provided with an on-board data acquisition system for quality control of the compaction process. This system automatically records the compaction parameters.

In the present master thesis, which was conducted in cooperation with the company Terra-Mix, the recorded data during the compaction process from 27 past projects were analyzed to find connection between the compaction parameters and the ground conditions. The main objective of the analysis was to develop the basics of a database that can assist in future the data collection, data analysis and based on the analyzed project data the calculation and cost estimation of future projects in the offer phase. The recorded compaction parameters of the 27 projects were evaluated in four ground categories – gravel, sand, silt and fill materials. The evaluation results provide new insights into the soil behavior during rapid impact compaction and can be used as guideline for preliminary determination of the compaction parameters for future projects with similar ground conditions. The findings of this thesis confirm that non-cohesive soils can be effectively compacted by rapid impact compactor.

The present master thesis also provides an overview about the possibilities for soil compaction control. The primary focus of the conducted literature study falls on the application and evaluation of dynamic probing tests because the improvement depth for ground treated with rapid impact compaction is determined mainly by dynamic probing tests.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	1
1 Einleitung	3
1.1 Einführung in die Fragestellung	3
1.2 Ziel und Struktur der Arbeit	3
2 Geotechnische Grundlagen	5
2.1 Übersicht der Bodenverbesserungsverfahren.....	5
2.2 Bodenverdichtung.....	8
2.2.1 Verdichtbarkeit von Böden.....	8
2.2.2 Möglichkeiten zur Verdichtungskontrolle im Erdbau.....	13
2.2.3 Verdichtungskontrolle durch Rammsondierungen – Interpretation der Messergebnisse.....	22
3 Impulsverdichtung – Stand der Technik und Forschung	29
3.1 Entwicklung des Verfahrens	29
3.2 Anwendungsmöglichkeiten	30
3.3 Aufbau des Impulsverdichters.....	33
3.3.1 Verdichtungsfuß und Schlaghaube.....	34
3.3.2 Gerätetypen nach der Größe des Fallgewichtes	35
3.3.3 Trägergeräte.....	37
3.3.4 Maschinensteuerung	38
3.3.5 Transport des Impulsverdichters.....	39
3.4 Arbeitsweise	40
3.5 Wellenausbreitung und Erschütterungswirkung	43
3.6 Tiefenwirkung der Verdichtung.....	47
3.7 Verdichtungskontrolle und Überwachung.....	48
3.8 Anbieter	49
4 Firma Terra-Mix - Vorgehensweise bei der Impulsverdichtung und Datenaufzeichnung.....	51
4.1 Firmenbeschreibung	51
4.2 Verdichtungsablauf mit dem Impulsverdichter	52
4.3 Dokumentation der Herstellungsparameter und Aufbau der firmeneigenen Datenbank.....	55
5 Auswertung der während der Verdichtung aufgezeichneten Messdaten	57
5.1 Vorgehensweise bei der Auswertung	57
5.2 Aufbau der im Zuge der Auswertung entwickelten Struktur zur Aufbereitung und Auswertung der Projektdaten	59
5.3 Auswertung der Projektdaten nach Untergrundkategorien.....	68

5.3.1 Ergebnisse der Auswertung der Projektdaten der Untergrundkategorie „Kies“	68
5.3.2 Ergebnisse der Auswertung der Projektdaten der Untergrundkategorie „Sand“	75
5.3.3 Ergebnisse der Auswertung der Projektdaten der Untergrundkategorie „Schluff“ ..	82
5.3.4 Ergebnisse der Auswertung der Projektdaten der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“.....	91
6 Gegenüberstellung und Interpretation der Ergebnisse	101
6.1.1 Anzahl der Übergänge	101
6.1.2 Abbruchkriterien	102
6.1.3 Verdichtungsenergie.....	103
6.1.4 Setzungsverlauf	104
6.1.5 Tiefenwirkung	107
7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	109
8 Ausblick.....	111
Anhang A. Auswertung der Verdichterdaten nach Untergrundkategorien	112
Anhang B. Untergrundkategorie 1: Kies	115
B 1. Zusammenfassung der Ergebnisse aller Projekten	115
B 2. Ausgewertete Verfahrensparameter je Einzelprojekt.....	117
Anhang C. Untergrundkategorie 2: Sand	120
C 1. Zusammenfassung der Ergebnisse aller Projekten	120
C 2. Ausgewertete Verfahrensparameter je Einzelprojekt.....	122
Anhang D. Untergrundkategorie 3: Schluff	126
D 1. Zusammenfassung der Ergebnisse aller Projekten	126
D 2. Ausgewertete Verfahrensparameter je Einzelprojekt.....	128
Anhang E. Untergrundkategorie 4: Künstliche Auffüllung	135
E 1. Zusammenfassung der Ergebnisse aller Projekten	135
E 2. Ausgewertete Verdichterdaten Verfahrensparameter je Einzelprojekt.....	137
Anhang F. Formblatt zur Erfassung der Projektinformation (<i>Beispiel</i>)	150
Literaturverzeichnis	156
Normenverzeichnis	158
Abbildungsverzeichnis	160
Tabellenverzeichnis.....	163
Abkürzungsverzeichnis	164
Symbolverzeichnis	166

1 Einleitung

1.1 Einführung in die Fragestellung

Die ordnungsgemäße Abtragung von Bauwerkslasten erfordert eine Gründung auf tragfähigem und setzungsarmem Baugrund. Durch die starke Urbanisierung und die räumliche Verdichtung werden Gründungsmaßnahmen auch auf gering tragfähigen bzw. setzungsempfindlichen Böden immer häufiger. Zur Anwendung kommen dafür entweder Tiefgründungs- oder Bodenverbesserungsmaßnahmen. Da in vielen Fällen wirtschaftlich und technisch günstiger ist, die Baugrundeigenschaften zu verbessern, statt die Bauwerkslasten mit Pfählen auf tiefer liegende tragfähige Schichten zu führen, werden in den letzten Jahrzehnten zahlreiche Bodenverbesserungsmethoden entwickelt und erforscht. Eine der bedeutendsten und häufig eingesetzten davon ist die Bodenverdichtung. Je nach Tiefenwirkung wird grundsätzlich zwischen oberflächennaher (Walzenverdichtung), mitteltiefer (Impulsverdichtung) und tiefer (Tiefenrüttelverfahren, dynamische Intensivverdichtung) Verdichtung unterschieden [1, 8].

Die Technologie des Impulsverdichters zur mitteltiefen Bodenverdichtung wurde anfangs der 90er Jahre in England vorgestellt. Die innovative Verdichtungsmethode fand rasch breite Anwendung und wurde im Zuge von Bodenverbesserungsmaßnahmen in Europa, den USA, Kanada, Mittelasien, den VAE und Südafrika herangezogen. Erste Grundlagenforschung zur Untersuchung der Anwendungsgrenzen des Verfahrens und zur Optimierung der Geräteparameter wurde 2010 vom Büro Geotechnik ADAM in Kooperation mit der Universität Innsbruck und der Fa. Terra-Mix durchgeführt.

Die Firma TERRA-MIX Bodenstabilisierungs-GmbH ist seit 2007 im Bereich Impulsverdichtung tätig und hat die Technologie zur mitteltiefen Bodenverbesserung erfolgreich in Österreich, Deutschland, Polen, Frankreich, Ungarn und Rumänien eingesetzt. Die Qualitätssicherung erfolgt bei der Impulsverdichtung mit Hilfe eines GPS-basierten Datenerfassungssystems, das eine Dokumentation von Verfahrensparametern während des Verdichtungs Vorgangs ermöglicht. Die Daten für jedes ausgeführte Projekt werden in der Firmendatenbank gespeichert und können somit eine Grundlage für zukünftige Weiterentwicklung der Methode bilden. Bis dato wurden die gesammelten Daten nicht untersucht und ausgewertet. An dieser Stelle schließt sich diese Arbeit an.

1.2 Ziel und Struktur der Arbeit

Das zentrale Ziel dieser Arbeit ist die Erarbeitung einer strukturierten Auswertungsmethodik der aufgezeichneten Verfahrensparameter, die in der Zukunft als Unterstützung für die Kalkulation und Kostenrechnung von neuen Bauprojekten dienen kann. Zu diesem Zweck werden im Rahmen dieser Diplomarbeit die praktischen Erfahrungen mit der Impulsverdichtung von Fa. Terra-Mix zusammengefügt, ausgewertet und interpretiert. Darauf aufbauend werden Empfehlungen für die Aufbereitung der erfassten Verfahrensparameter erarbeitet.

Kapitel 2 der Diplomarbeit gibt eine allgemeine Übersicht über die gängigen Verdichtungsverfahren und die Möglichkeiten zur Verdichtungskontrolle im Erdbau. Der Schwerpunkt der durchgeführten Literaturstudie fällt dabei auf die Einsatz- und

Auswertungsmöglichkeiten von Rammsondierungen, da die Kontrolle des Verdichtungserfolgs bei der Impulsverdichtung mit Hilfe von Sondierverfahren, in erster Linie mit Hilfe von Rammsondierungen erfolgt.

Kapitel 3 behandelt das Verdichtungsverfahren Impulsverdichtung. Arbeitsweise, Geräteaufbau sowie die Überwachung und Kontrolle der Verdichtungsarbeiten werden ausführlich erläutert. Zusätzlich werden die Ergebnisse der bis dato durchgeführten Forschungstätigkeit zur Ermittlung der Erschütterungs- und Verdichtungswirkung des Verfahrens zusammengefasst.

Kapitel 4 befasst sich mit der Verfahrenstechnik und dem Qualitätsmanagement bei der Impulsverdichtung von Fa. Terra-Mix und gibt eine Übersicht über den Aufbau derzeitiger Firmendatenbank.

In Kapitel 5 folgt die ausführliche Beschreibung des Hintergrundes und der Mechanismen der durchgeführten Analyse der Verdichterdaten, sowie die Darstellung und Auswertung der Ergebnisse.

In Kapitel 6 beinhaltet die Interpretation der ausgewerteten Ergebnisse aller Untergrundkategorien.

Das letzte Kapitel fasst die gewonnenen Erkenntnisse zusammen und gibt einen Ausblick auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten für eine nutzbare Auswertungsdatenbank von Impulsverdichter-Baustellen.

Der Diplomarbeit ist eine CD-ROM beigelegt, welche folgendes enthält:

- die vorliegende Diplomarbeit in PDF-Format,
- alle verwendeten Abbildungen in hoher Auflösung,
- den bearbeiteten Lageplan der Verdichtungsarbeiten für jedes Projekt,
- Auswertungsdatei für jedes Projekt in PDF-Format,
- Excel-Mustervorlage zur Auswertung der Verfahrensparameter.

2 Geotechnische Grundlagen

2.1 Übersicht der Bodenverbesserungsverfahren

Im vorliegenden Unterkapitel wird primär auf die allgemeine Klassifikation der Bodenverbesserungsmaßnahmen und die historische Entwicklung der einzelnen Bodenverdichtungsverfahren eingegangen. Auf eine detaillierte Beschreibung der einzelnen Verfahren wird jedoch verzichtet.

Bodenverbesserungsmaßnahmen werden zunehmend im Zuge von Optimierung von Gründungen herangezogen. Üblicherweise sind die Ziele einer Baugrundverbesserung:

- Erhöhung der Dichte und der Scherfestigkeit mit günstiger Beeinflussung von Stabilitätsproblemen (GZ 1¹),
- Verringerung der Zusammendrückbarkeit mit günstiger Beeinflussung der Verformbarkeit (GZ 2²),
- Beeinflussung der Durchlässigkeit entweder zur Verminderung des Wasserandrangs bzw. -abflusses oder zur Erhöhung der Verformungsgeschwindigkeiten (GZ 2),
- Homogenisierung und Vergleichmäßigung des Setzungsverhaltens (GZ1/GZ 2)
- Erhöhung der Erdbebenstandsicherheit durch Verringerung des Verflüssigungspotenzials (GZ1/GZ 2) [3, 50].

Da immer neue Verfahren auf dem Markt erscheinen, steht heute eine große Bandbreite an unterschiedlichen Methoden zur Verfügung, mit denen in Abhängigkeit von der Bodenart eine zielführende Baugrundverbesserung erreicht werden kann. Eine Übersicht der derzeit gebräuchlichsten Bodenverbesserungsverfahren ist in Abb. 1 zusammengestellt. Generell sind die Verfahren im Hinblick auf das Verbesserungsprinzip zu unterscheiden.

Welches Verfahren zur Anwendung kommt, hängt vor allem von den Eigenschaften des anstehenden Bodens ab. Weitere erforderliche Rahmen- und Randbedingungen für die Auswahl des technisch und wirtschaftlich sinnvollsten Verfahrens sind z.B.

- Fläche, Volumen und Mächtigkeit des zu verbessernden Baugrundes;
- Nutzungsart des Baugrunds;
- Einflüsse auf Umgebung und Nachbarbebauung;
- Verfügbarkeit an Materialien, Geräten und Personal;
- Zugänglichkeit, Befahrbarkeit des Geländes;
- Umweltschutz (Grundwasser, Boden, Luft, Geräusche, Erschütterungen) [3, 31, 50].

Die Bodenverdichtung (*in Abb. 1 grün schraffiert*) ist eine der ältesten und am häufigsten eingesetzten Methoden zur Verbesserung von Untergrundeigenschaften. Beim Verdichtungsprozess erfährt der Boden zufolge mechanischer Einwirkungen eine Verringerung

¹ GZ 1: Grenzzustand der Tragfähigkeit (Ultimate Limit State – ULS) - Lage, Bemessung Bauteile, Gesamttragfähigkeit Baugrund (nach Eurocode 7, Eurocode 8, DIN 1054 und ÖNORM B 4435-2)

² GZ 2: Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (Serviceability Limit State – SLS) - Verformung, Verschiebung (nach Eurocode 7, Eurocode 8, DIN 1054 und ÖNORM B 4435-2)

des Porenanteils, was eine Dichteerhöhung zur Folge hat. Dadurch können die zu erwartenden Setzungen zum Teil vorweggenommen, bzw. auf ein zulässiges Maß reduziert werden. Die Verdichtung führt außerdem zu einer Erhöhung der Steifigkeit und der Scherfestigkeit des Bodens [31, 50].

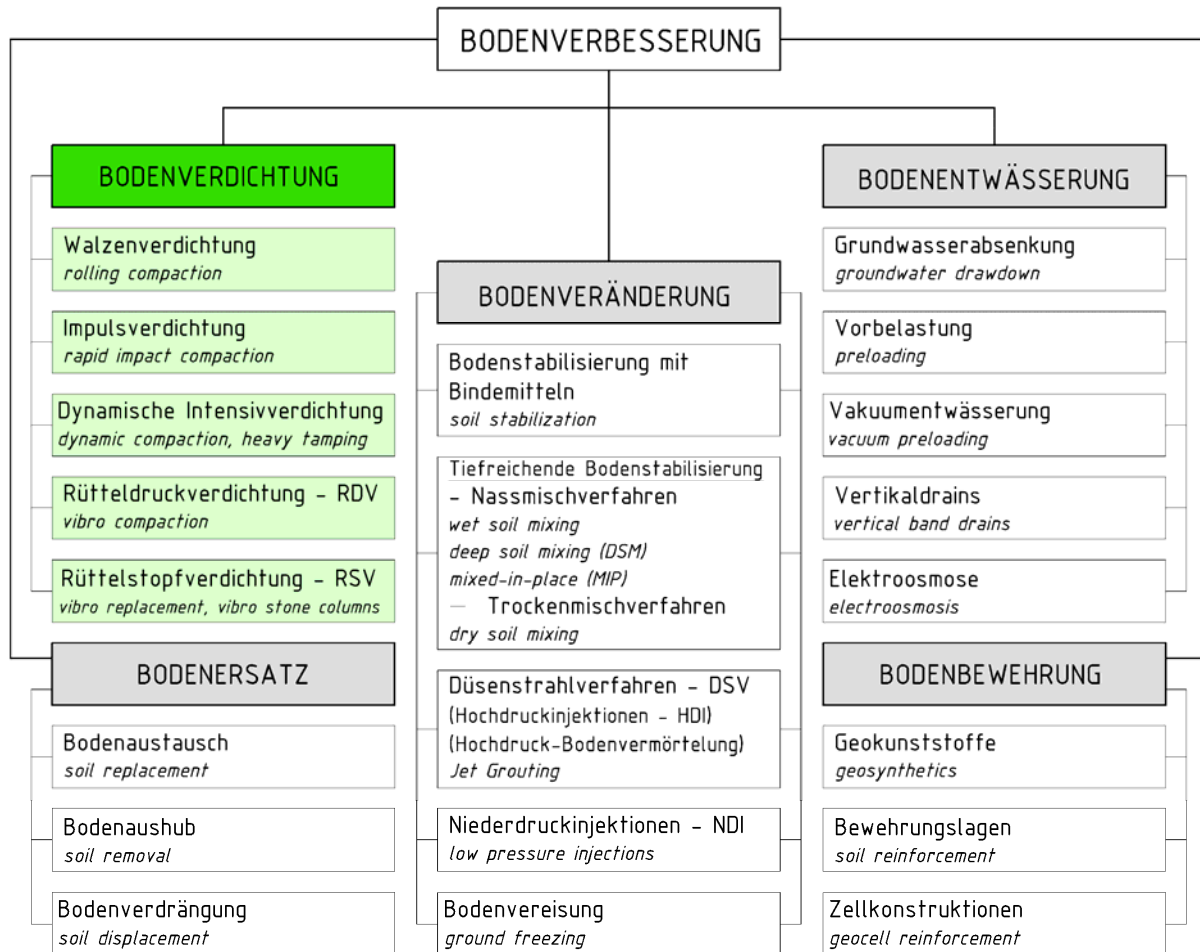


Abb. 1: Übersicht der Bodenverbesserungsverfahren (adaptiert nach [8])

Bei der Bodenverdichtung unterscheidet man zwischen dynamischen und statischen Verdichtungsverfahren. Da die statische Bodenverdichtung in der Regel eine geringere Tiefenwirkung hat, wird im Erdbau heutzutage die dynamische Verdichtung bevorzugt. Die Abb.2 gibt eine Übersicht über die dynamischen Verdichtungsverfahren. Die einzelnen Verfahren lassen sich grundsätzlich in Abhängigkeit von der Anregungsart (periodisch oder impulsförmig) und der Tiefenwirkung (oberflächennah, mitteltief und tief) gliedern [8].

Walzen werden seit etwa 1830 im Erd- und Straßenbau zur Oberflächenverdichtung eingesetzt. In der Frühzeit waren diese vorwiegend von Pferden gezogene Geräte, deren Bandage anfangs aus Stein und später aus Gusseisen bestand. Mit dem raschen technischen Fortschritt wurde zuerst die Dampfwalze (Anfang 1860er Jahren), dann die Walze mit Dieselmotor (1911) und später auch die Tandemwalze (1932) entwickelt. Jedoch erst 1958 erschien die Vibrationswalze auf dem Markt [24]. Heute erfolgt die Oberflächenverdichtung primär durch statische oder dynamische Walzen in Form von Vibrations- und Oszillationswalzen, Walzen mit Richtschwingern (VARIO-Walzen) und auch selbstregelnden Walzen (VARIOCONTROL, VARIOMATIC, ACE) [3].

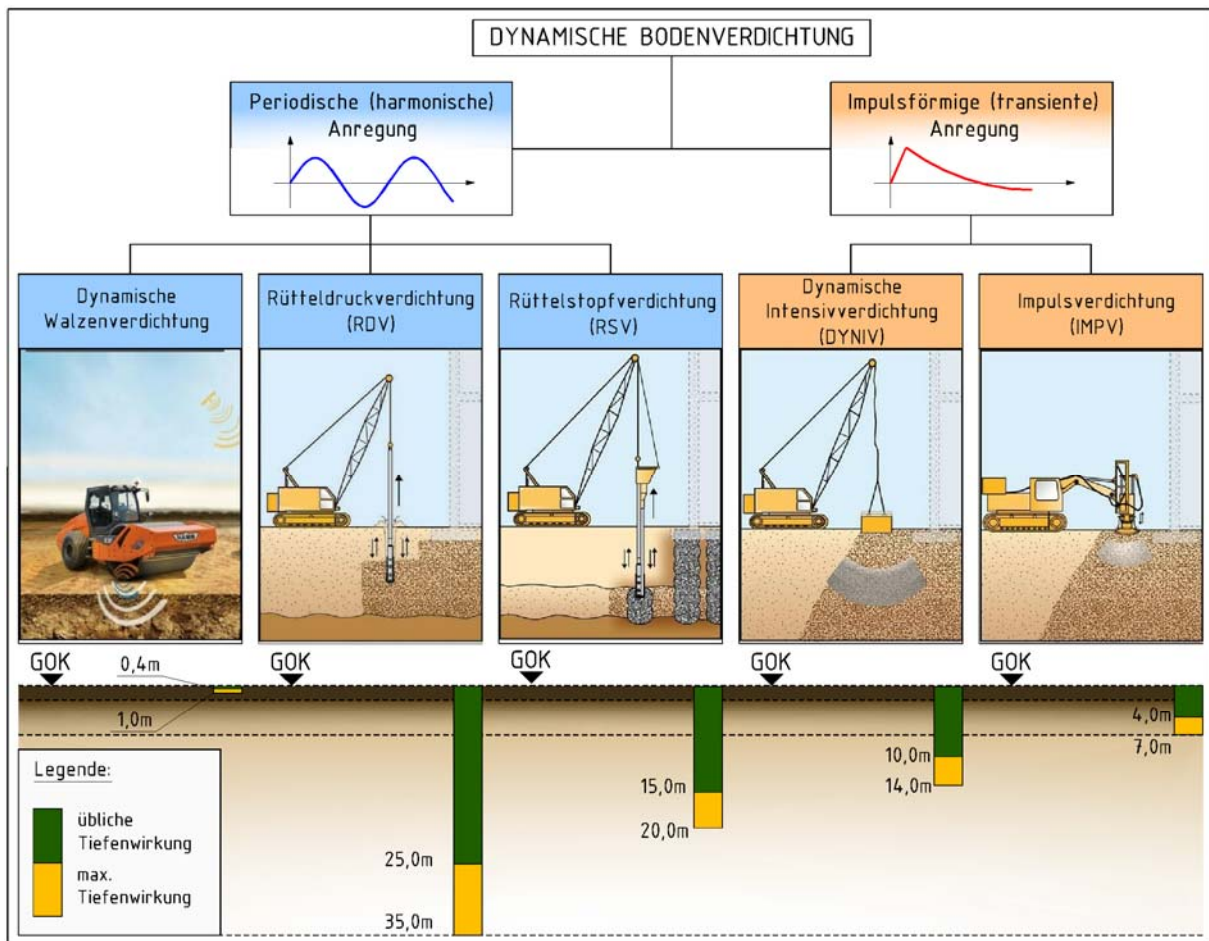


Abb. 2: Übersicht der dynamischen Bodenverdichtungsverfahren (adaptiert nach [8])

Die Rütteldruckverdichtung (RDV) wurde in den 30er Jahren in Deutschland von der Fa. Keller entwickelt und findet heutzutage in ihrer weiterentwickelten Form weltweit die Anwendung als tief reichende Bodenverbesserungsmaßnahme für nichtbindige Böden (Kiese und Sande). Ca. 20 Jahre später entwickelte die Fa. Keller auch die Rüttelstopfverdichtung (RSV), die in bindigen Böden eingesetzt wird. Heute wird die Bodenverdichtung durch Tiefenrüttler in EN 14731 geregelt [37].

Die Anfänge der Bodenverbesserung durch Stoßverdichtung mit Stampfen können bis ins Altertum zurückverfolgt werden. Für eine breite kommerzielle Anwendung konnte das Verfahren aber erst Ende 60er Jahren mit dem Aufkommen von leistungs- und widerstandsfähigeren Baugeräten umgesetzt werden. Louis Ménard meldete die Methode als dynamische Intensivverdichtung (DYNIV) zum Patent. Seitdem wurde der Verdichtungsprozess und Tiefenwirkung laufend untersucht und folglich der Einsatz optimiert [32].

Vor etwa 20 Jahren wurde die Impulsverdichtung (*Rapid Impact Compaction*) in England von Fa. BSP International Foundations vorgestellt. Mit Wirkungstiefen von 4 bis 7 m ermöglichte die Methode eine mitteltiefe Bodenverdichtung und füllte auf diese Weise die Nische zwischen oberflächennaher Verdichtung (Walzen) und Tiefenverdichtung (RDV, DYNIV) aus [3]. Das Verfahren wurde 2007 von Fa. Terra-Mix übernommen und im Zuge des o.g. Forschungsprojektes wurden die Geräteparameter und der Verdichtungsprozess optimiert. In Kapitel 3 wird die Technologie der Impulsverdichtung ausführlich beschrieben.

2.2 Bodenverdichtung

2.2.1 Verdichtbarkeit von Böden

Der Boden ist ein Dreiphasensystem, das sich aus den Phasen Mineralkörnern (feste Phase), Porenwasser (flüssige Phase) und Luft (gasförmige Phase) zusammensetzt. Die flüssige und gasförmige Phase füllen die Hohlräume zwischen den einzelnen Mineralbestandteilen aus. Beim Verdichten werden die Porenräume zufolge statischer oder dynamischer Einwirkung zusammengedrückt, und die Bodenpartikel enger zusammengepackt. Durch die Verringerung des mit Luft und Wasser gefüllten Porenvolumens wird die Dichte des Bodens erhöht.

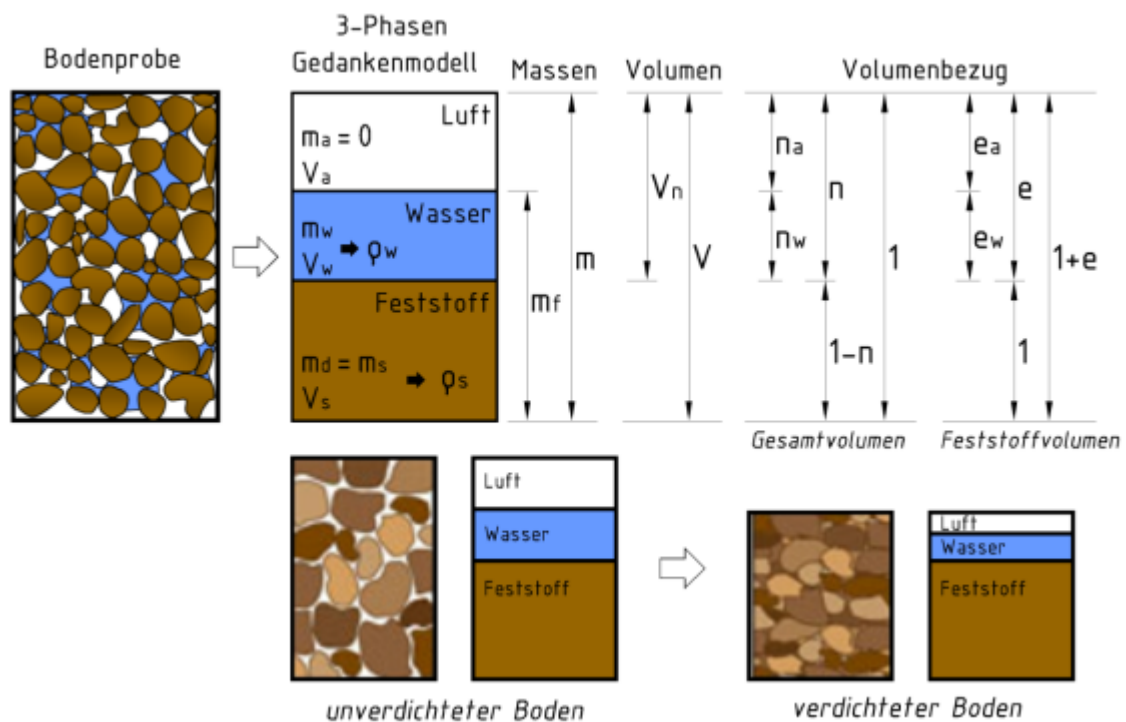


Abb. 3: Boden als Dreiphasensystem (adaptiert nach [12])

Das auf Abb. 3 dargestellte idealisierte Gedankenmodell verdeutlicht diese Zusammenhänge und erleichtert die Herleitung grundlegender Beziehungen, die für die theoretische Beschreibung der Verdichtung wichtig sind:

- Porenanteil (Verhältnis des Porenvolumens zum gesamten Bodenvolumen)

$$n = \frac{V_n}{V} = 1 - \frac{\rho_d}{\rho_s} = \frac{e}{1+e} \quad [-] \quad (\text{Gl. 1}),$$

- Porenzahl (Verhältnis des Porenvolumens zum Volumen der Festmasse)

$$e = \frac{V_n}{V_s} = \frac{\rho_s}{\rho_d} - 1 = \frac{n}{1-n} \quad [-] \quad (\text{Gl. 2}),$$

- Wassergehalt (Verhältnis der Masse des Porenwassers zur Festmasse)

$$w = \frac{m_w}{m_d} = \frac{m_f - m_d}{m_d} \quad [\%] \quad (\text{Gl. 3}),$$

- Korndichte (*Dichte des Korngerüstes ohne Einfluss der Poren*)

$$\rho_s = \frac{m_d}{V_s} \quad [g / cm^3] \quad (Gl.4),$$

- Trockendichte (*Verhältnis der Trockenmasse zum Volumen des feuchten Bodens*)

$$\rho_d = \frac{m_d}{V} = (1 - n) \rho_s \quad [g / cm^3] \quad (Gl.5),$$

Die Verdichtbarkeit eines Bodens wird von der Verdichtungsfähigkeit und der Verdichtungswilligkeit bestimmt [43].

Unter Verdichtungsfähigkeit versteht man die erdspezifische Voraussetzung zur Erreichung eines hohlraumarmen Korngemisches. Je günstiger die Kornabstufung ist, d.h. Hohlräume der groben Fraktionen des Korngemisches lassen sich durch Körner der jeweils feineren Fraktionen ausfüllen, desto größer ist die Verdichtungsfähigkeit. Die Verdichtungsfähigkeit hängt auch von der Scherfestigkeit des Bodens ab. Bei den bindigen Böden ist die Scherfestigkeit von dem Reibungswinkel und der Kohäsion (Haftfestigkeit) des Bodens geprägt. Die Scherfestigkeit nichtbindiger Böden beruht auf dem Reibungswiderstand der einzelnen sich berührenden Körner und dem Gefügewiderstand infolge von Verschachtelung und Verkeilung der einzelnen Körner [43]. Aus diesem Grund haben auch die Kornform und die Kornrauhigkeit einen Einfluss auf die Verdichtungseigenschaften nichtbindiger Böden. Beispielhaft lässt sich ein rundes gedrungenes Korn leichter verdichten als ein gebrochenes Korn, da es sich leichter ineinander verschieben lässt.

Die Verdichtungswilligkeit bezeichnet den Widerstand eines zu verdichtenden Bodens bei der Verlagerung der einzelnen Körner in ein dichteres Korngerüst. Mit dem Wassergehalt steigt die Verdichtungswilligkeit bis zu einem optimalen Wert infolge einer Verringerung der inneren Reibung. Bei bindigen Böden nimmt die Verdichtungswilligkeit mit zunehmender Plastizität stark ab, bei nichtbindigen Böden mit steigender Ungleichförmigkeitszahl C_u und zunehmender innerer Reibung [43]. In Abhängigkeit von der Bodengruppe lässt sich nach ZTVA-StB 97 die Verdichtungswilligkeit in drei Klassen unterteilen:

Tabelle 1: Verdichtbarkeit von Böden nach ZTVA-StB 97

Verdichtbarkeitsklasse	Kurzbeschreibung	Bodengruppe (nach DIN 18196)
V 1 (gut verdichtbar)	nicht bindige bis schwach bindige, grobkörnige und gemischtkörnige Böden	GW, GI, GE, SW, SI, SE, GU, GT, SU, ST
V 2 (weniger gut verdichtbar)	bindige, gemischtkörnige Böden	GU*, GT*, SU*, ST*
V 3 (schwer verdichtbar)	bindige, feinkörnige Böden	UL, UM, TL, TM

Tabelle 2 fasst die Faktoren zusammen, die die Verdichtungseigenschaften eines Bodens beeinflussen:

Tabelle 2: Einflussfaktoren auf die Verdichtbarkeit [26]

Einflussfaktor	Bindige Böden	Nichtbindige Böden	Mischböden
	UL, UM, UA, TL, TM, TA	GE, GW, GI, SE, SW, SI	GU, GU*, GT, GT*, SU, SU*, ST, ST*
Kornform:		+	
Kornrauigkeit:		+	
Kornverteilung:	+	+	+
Kornabstufung:		+	
Plastizität:	+		
Wassergehalt:	+	+	+
Mischungsverhältnis: <i>grob – fein</i>			+

Die Verdichtbarkeit eines Bodens wird durch den Proctorversuch (*genormt in ÖNORM B 4418 und DIN 18127*) untersucht, der die Beziehung zwischen der erzielbaren Trockendichte und dem Wassergehalt festlegt. Der Versuch wird vorrangig zur Beurteilung der Verdichtungsfähigkeit von bindigen und gemischtkörnigen Böden, aber auch von größeren nichtbindigen Böden verwendet. Die ermittelte Proctordichte bezeichnet dabei die maximale unter definierter Verdichtungsarbeit erreichbare Trockendichte des Bodens, die sich bei optimalem Wassergehalt einstellt [3].

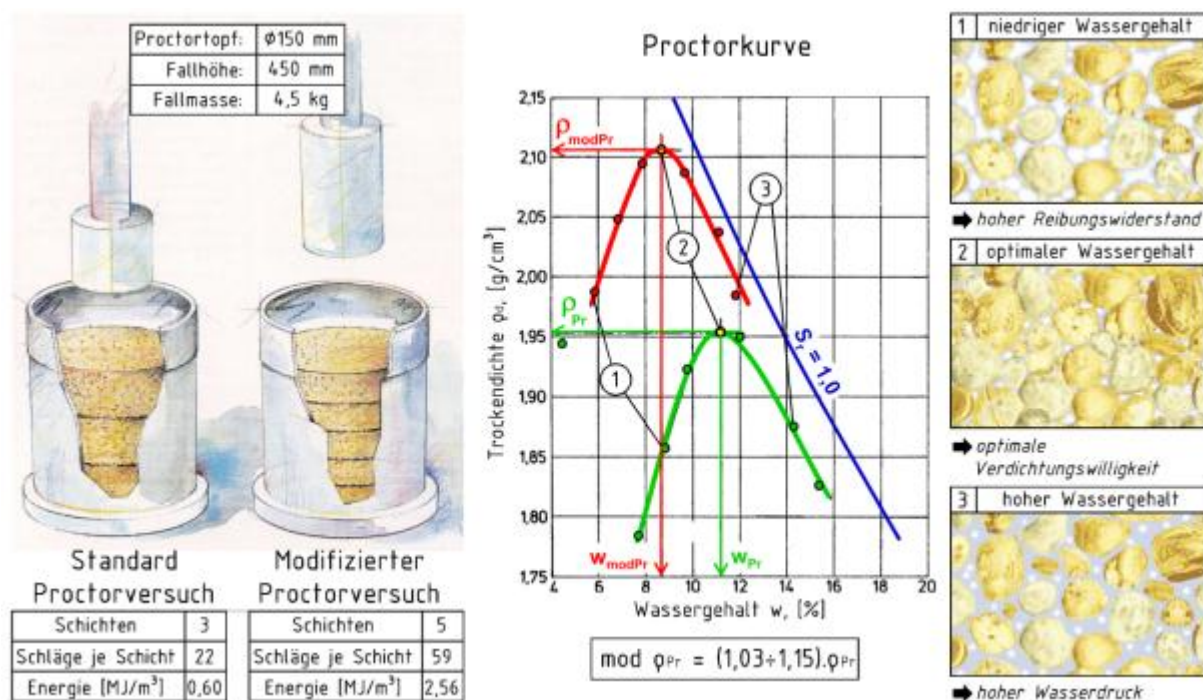


Abb. 4: Proctorversuch (adaptiert nach [5])

Aus der Proctorkurve (s. Abb. 4) geht hervor, dass beiderseits des optimalen Wassergehaltes die gleiche Dichte bei unterschiedlichem Wassergehalt erreicht werden kann. Bei konstanter Verdichtungsenergie beruht die Abnahme der Trockendichte auf der linken („trockenen“) Seite der Proctorkurve auf dem hohen Luftgehalt des Bodens, der einen hohen Reibungswiderstand

bewirkt und somit die Verdichtungswilligkeit herabsinkt. Ähnlichen Effekt hat auf die Verdichtung der zu hohe Wassergehalt, da sich im Zuge der Verdichtung Porenwasserüberdruck im Korngerüst aufbauen kann.

Die Proctordichte ist Bezugsgröße für die Beurteilung der vorhandenen bzw. der bei Verdichtungsarbeiten erreichten Dichte und für Angabe von Anforderungen an Verdichtungsmaßnahmen. In Tabelle 3 ist die Eignung einer Bodenart als Schüttmaterial in Abhängigkeit von der Größe der Proctordichte nach [34] angegeben.

Tabelle 3: Proctordichte und Güte des Schüttmaterials [34]

Proctordichte ρ_{Pr} , [g/cm ³]	Eignung als Schüttmaterial
< 1.6	sehr schlecht verdichtbar
1.6 – 1.75	Schlecht verdichtbar
1.75 – 1.95	ziemlich gut verdichtbar
1.95 – 2.10	gut verdichtbar
> 2.10	sehr gutes Schüttmaterial

In Tabelle 4 sind Anhaltswerte für die Proctordichte und den optimalen Wassergehalt unterschiedlicher Bodenarten nach [49] zusammengefasst.

Tabelle 4: Anhaltswerte für die Proctordichte nach Bodenart [49]

Bodenart	Bodengruppe nach DIN 18196	Proctorwerte		Durchlässigkeitsfaktor k_f , [m/s]
		Proctordichte ρ_{Pr} , [g/cm ³]	Optimaler Wassergehalt w_{opt} , [%]	
Kies, gleichkörnig	GE	1.70 – 1.90	8 – 5	$2 \cdot 10^{-1} - 1 \cdot 10^{-2}$
Kies, sandig, mit wenig Feinkorn	GW, GI	2.00 – 2.25	7 – 4	$1 \cdot 10^{-2} - 1 \cdot 10^{-5}$
Kies, sandig, mit Schluff- oder Tonbeimengungen	GU*, GT*	2.10 – 2.35	7 – 4	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-9}$
Kies-Sand-Feinkorgemisch, das Feinkorn sprengt das Korngerüst	GU, GT	1.90 – 2.20	10 – 5	$1 \cdot 10^{-7} - 1 \cdot 10^{-11}$
Sand, gleichkörnig Feinsand	SE	1.60 – 1.75	15 – 10	$1 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-5}$
Sand, gleichkörnig Grobsand	SE	1.60 – 1.75	13 – 81	$1 \cdot 10^{-3} - 5 \cdot 10^{-4}$
Sand, gut abgestuft und Sand, kiesig	SW, SI	1.90 – 2.15	10 – 6	$5 \cdot 10^{-4} - 2 \cdot 10^{-5}$
Sand mit Feinkorn, das das Korngerüst nicht sprengt	SU, ST	2.00 – 2.20	11 – 7	$2 \cdot 10^{-5} - 5 \cdot 10^{-7}$
Sand mit Feinkorn, das das Korngerüst sprengt	SU*, ST*	1.70 – 2.00	19 – 12	$2 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-9}$
Schluff, leicht plastisch	UL	1.60 – 1.80	22 – 15	$1 \cdot 10^{-5} - 1 \cdot 10^{-7}$
Schluff, mittel- und ausgeprägt plastisch	UM, UA	1.55 – 1.75	24 – 18	$2 \cdot 10^{-6} - 1 \cdot 10^{-9}$
Ton, leicht plastisch	TL	1.65 – 1.85	20 – 15	$1 \cdot 10^{-7} - 2 \cdot 10^{-9}$
Ton, mittelpastisch	TM	1.55 – 1.75	23 – 17	$5 \cdot 10^{-8} - 1 \cdot 10^{-10}$
Ton, ausgeprägt plastisch	TA	1.45 – 1.65	27 – 20	$1 \cdot 10^{-9} - 1 \cdot 10^{-12}$
Schluff oder Ton, organisch	OU, OT	1.45 – 1.70	27 – 18	$1 \cdot 10^{-9} - 2 \cdot 10^{-11}$

Der Verdichtungsgrad, der sich als Verhältnis der örtlich bestimmten Trockendichte durch die Proctordichte ergibt, wird als Beurteilungskriterium bei Prüfung der Verdichtungsleistung herangezogen. Oft wird sein erforderlicher Wert bei Verdichtungskontrollen im Erdbau vorgeschrieben [3].

$$D_{Pr} = \frac{\rho_d}{\rho_{Pr}} \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{Gl. 6}),$$

Im Zuge der Verdichtung wird die Lagerungsdichte erhöht. Die Extremwerte der Lagerungsdichte sind die lockerste bzw. die dichteste Lagerung, die in Abb. 5 schematisch als Kugelmodell dargestellt sind.

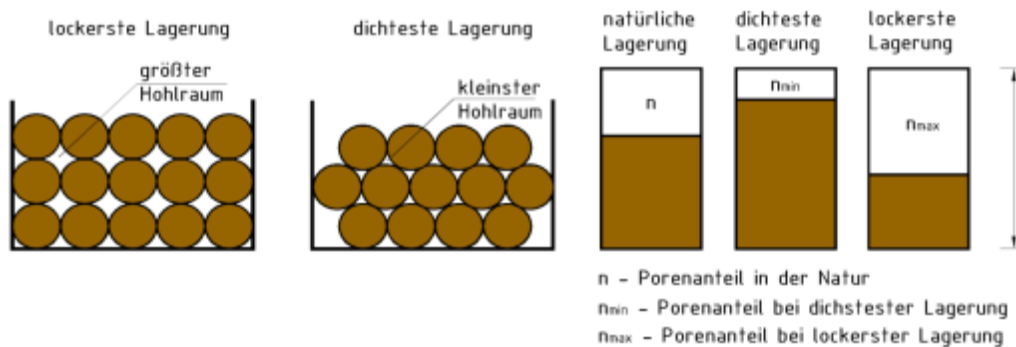


Abb. 5: Kugelmodell mit lockerster und dichtester Lagerung (adaptiert nach [40])

Die idealisierten Extremwerte für den Porenanteil bzw. Trockendichte werden im Labor mit dem Schlaggabel- oder Rütteltischversuch und dem Zylinderversuch (*genormt in DIN 18126*) bestimmt. Mit Hilfe der im Labor oder im Feld bestimmten Werte für den Porenanteil n bzw. der Trockendichte für natürliche Lagerung ρ_d wird die Qualität der natürlichen Lagerungsdichte des Bodens beurteilt [10]:

- Lagerungsdichte

$$D = \frac{n_{\max} - n}{n_{\max} - n_{\min}} = \frac{\rho_d - \min \rho_d}{\max \rho_d - \min \rho_d} \quad [-] \quad (\text{Gl. 7}),$$

- Bezogene Lagerungsdichte

$$I_D = \frac{e_{\max} - e}{e_{\max} - e_{\min}} = \frac{\max \rho_d (\rho_d - \min \rho_d)}{\rho_d (\max \rho_d - \min \rho_d)} \quad [-] \quad (\text{Gl. 8}),$$

- Verdichtungsfähigkeit

$$I_f = \frac{e_{\max} - e_{\min}}{e_{\min}} = \frac{\rho_s (\max \rho_d - \min \rho_d)}{\min \rho_d (\rho_s - \max \rho_d)} \quad [-] \quad (\text{Gl. 9}).$$

Tabelle 5 zeigt die Zusammenhänge für die bezogene Lagerungsdichte nach *EN ISO 14688-1*. In Tabelle 6 sind zum Vergleich die Zusammenhänge nach der nicht mehr gültigen *DIN 1054* angegeben:

Tabelle 5: Bezogene Lagerungsdichte nach *EN ISO 14688-1*

Bezeichnung	Bezogene Lagerungsdichte I_D , [-]
sehr locker	0 – 0.15
locker	0.15 – 0.35
mitteldicht	0.35 – 0.65
dicht	0.65 – 0.85
sehr dicht	0.85 – 1.00

Tabelle 6: Lagerungsdichte nach *DIN 1054* [15]

Bezeichnung	Lagerungsdichte D , [-]	
	gleichförmige nichtbindige Böden ($C_u \leq 3$)	ungleichförmige nichtbindige Böden ($C_u > 3$)
sehr locker	< 0.15	< 0.20
locker	0.15 – 0.30	0.20 – 0.45
mitteldicht	0.30 – 0.50	0.45 – 0.65
dicht	0.50 – 0.75	0.65 – 0.90
sehr dicht	> 0.75	> 0.90

2.2.2 Möglichkeiten zur Verdichtungskontrolle im Erdbau

Bei der Kontrolle des Verdichtungserfolges ist zwischen Eignungs-, Eigenüberwachungs- und Kontrollprüfungen zu unterscheiden.

Im Rahmen der Eignungsprüfungen wird die Eignung des anstehenden Bodens für Verbesserung durch Verdichtung oder die Eignung eines Bodenmaterials für seine Verwendung als Verfüllmaterial nachgewiesen. Hierfür sind z.B. die Kornverteilung zu ermitteln und die Proctorversuche zur Ermittlung der Proctordichte und des optimalen Wassergehalts durchzuführen [35].

Eigenüberwachungsprüfungen und Kontrollprüfungen sind baubegleitend vorzunehmen und haben das Ziel den Erfolg der Bodenverdichtung nachzuweisen. Je nach Anforderungsprofil gibt es heute verschiedene Prüfmethode, die grundsätzlich in indirekte und direkte Prüfmethode gegliedert werden können. Die Auswahl der Prüfmethode hängt im Wesentlichen von den Randbedingungen der Baumaßnahme, der zu überprüfenden Tiefe sowie von den Bodenverhältnissen ab. In Abb. 6 werden die gängigen direkten und indirekten Prüfverfahren zur Verdichtungskontrolle im Erdbau dargestellt.

Als direkte Prüfverfahren gelten Verdichtungsprüfungen, bei denen anhand von Labor- und Feldversuchen entweder der Verdichtungsgrad oder die Lagerungsdichte des zu prüfenden Bodens ermittelt wird. Für bindige, fein- und gemischtkörnige Böden wird die Trockendichte des zu prüfenden Bodens auf dem Feld oder im Labor bestimmt und mit der Proctordichte verglichen. Der Verhältniswert beider Dichten bezeichnet den Verdichtungsgrad und dient als Referenzwert zur eindeutigen Beurteilung des Verdichtungserfolgs. Die Mindestanforderungen an den zu erreichenden Verdichtungsgrad sind den entsprechenden Richtlinien (z.B. in Österreich den RVS 08.03.01 und in Deutschland den ZTVE-StB für Straßenbau und RIL 834 für Eisenbahnbau) zu entnehmen. Bei nichtbindigen Böden wird die Lagerungsdichte ermittelt, indem vor der Dichtebestimmung des zu überprüfenden Bodens zusätzlich der Versuch zur Bestimmung der lockersten und dichtesten Lagerung im Labor ausgeführt wird.

Die Methoden mit direkter Dichtebestimmung (geregelt in ÖNORM B 4414 und DIN 18125) dienen zum Verdichtungsnachweis der Erdarbeiten im Straßenbau. Für Überprüfung des Verdichtungserfolges nach einer mitteltiefen oder tiefen Verdichtung (z. B. Impulsverdichtung, DYNIV, RDV) eignen sie sich nicht, da damit nur der oberflächennahe Bereich (ca. 0,30 m unter GOK) geprüft wird. Nachteilig für dieses Prüfverfahren ist auch der große Zeitaufwand, da in der Regel die Auswertung der Ergebnisse 1 bis 2 Tage dauert [35]. Außerdem sind Aussagen zur Tragfähigkeit des Bodens nur bedingt möglich. Aus diesem Grund werden die indirekten Verdichtungsprüfungen entwickelt und heute ist ihr Einsatz zunehmend bevorzugt.

Indirekte Prüfverfahren sind Prüfungen, bei denen über mechanische Bodenwiderstände aufgrund von Erfahrungswerten auf den zugehörigen Verdichtungsgrad bzw. Lagerungsdichte geschlossen wird. In der Praxis finden folgende Methoden Anwendung:

- CBR-Versuch (*EN 13286-47, TP BF-StB Teil 7.1*),
- Plattendruckversuche (*EN ISO 22476-13, RVS 08.03.04, TP BF StB Teil 8.3*),
- Sondierungen (*EN ISO 22476, ÖNORM B 4419, DIN 4094*).

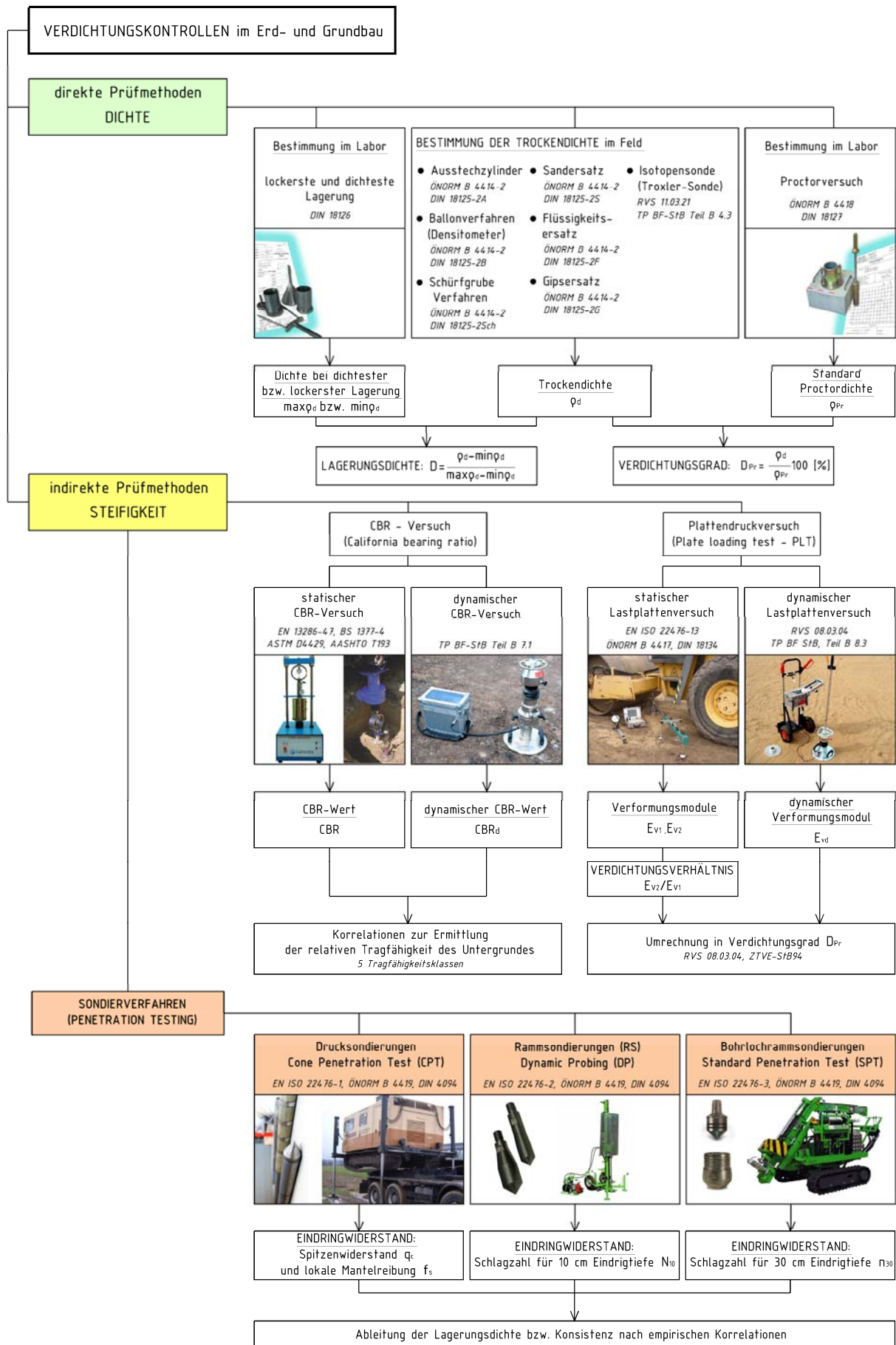


Abb. 6: Verdichtungsprüfungen im Erdbau

Beim CBR-Versuch (California Bearing Ratio) wird ein Druckstempel (\varnothing 50 mm) mit gleichbleibender Geschwindigkeit (1,25 mm/min) in den zu prüfenden Boden bis max. 1,25 cm eingedrückt. Die für Eindringtiefen von 2,5 mm und 5 mm erforderlichen Stempeldrücke werden gemessen und in Bezug zu den korrespondierenden Drücken eines optimal verdichteten, kalifornischen Standardbodens mit hoher Tragfähigkeit (Splitt-Brechsand-Gemisch) gesetzt [34, 39]. Der Versuch kann sowohl im Labor mit einer Druckpresse als auch auf dem Feld mit Hilfe einer Druckvorrichtung durchgeführt werden. Mit dem ermittelten CBR-Wert können Aussagen über die relative Tragfähigkeit des Bodens und folglich über die erreichte Verdichtung nach Tabelle 7 getroffen werden.

$$\text{CBR-Wert} = \frac{p}{p_s} \cdot 100 \quad [\%] \quad (\text{Gl. 10}),$$

- p - Pressung unter dem Druckstempel bei der Bodenprobe, [N/mm²]
 p_s - Pressung unter dem Druckstempel beim Standardboden, [N/mm²].

Tabelle 7: Relative Tragfähigkeit des Bodens in Abhängigkeit vom CBR-Wert [39]

CBR-Wert	relative Tragfähigkeit
2 – 4 %	sehr schlechter Untergrund
4 – 7 %	schlechter Untergrund
7 – 15 %	mittelmäßiger Untergrund
15 – 40 %	guter Untergrund
40 – 100%	sehr guter Untergrund

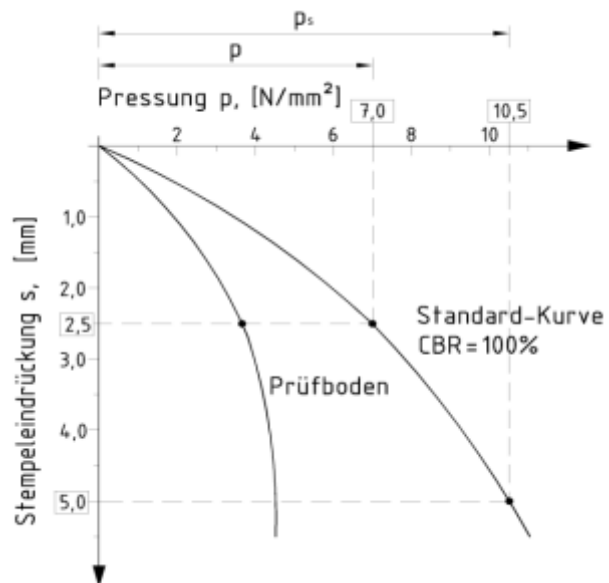


Abb. 7: Diagramm zur Ermittlung des CBR-Wertes

Beim statischen Lastplattenversuch wird der zu prüfende Boden durch eine kreisförmige Lastplatte (standardmäßig mit 300 mm Durchmesser) mit Hilfe einer Druckvorrichtung wiederholt stufenweise be- und entlastet, wobei die Einsenkung der Lastplatte in den Boden für die jeweilige Laststufe gemessen wird. Als Gegengewicht für die hydraulische Presse wird auf dem Feld ein beladener LKW, ein Bagger oder ein vergleichbar schweres Gerät benötigt. Die grafische Auftragung der Setzungen in Abhängigkeit von den aufgebrachten Lasten ergibt die Drucksetzungslinien (s. Abb. 8), aus denen der jeweilige Verformungsmodul E_{vi} (s. Gl. 11) bestimmt wird [34]:

$$E_{vi} = 1,5 \times r \times \frac{\Delta\sigma_i}{\Delta s_i} \quad \text{in} \quad [\text{MN} / \text{m}^2] \quad (\text{Gl. 11}),$$

wo

- r - Radius der Lastplatte,
 $\sigma_{1\max}$ - die maximale Spannung der Erstbelastung),
 $\Delta\sigma_i$ - Differenz der Spannungen zwischen $0,7 \cdot \sigma_{1\max}$ und $0,3 \cdot \sigma_{1\max}$
 Δs_i - Setzungsdifferenz, die zu $\Delta\sigma_i$ gehört,
 E_{v1} - Verformungsmodul der Erstbelastung
 E_{v2} - Verformungsmodul der Zweitbelastung

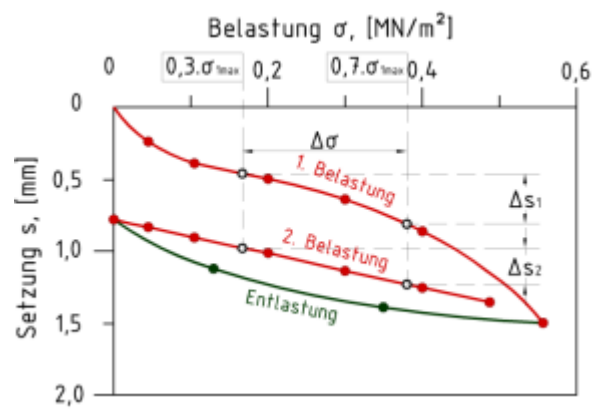


Abb. 8: Auswertung des statischen Lastplattenversuches

Die ermittelten Verformungsmoduln zeigen die Verformbarkeit und die Tragfähigkeit des untersuchten Bodens und werden als Bezugsgrößen zur Beurteilung der Verdichtungsqualität im Erdbau herangezogen. Zur Umrechnung in Verdichtungsgrad wird in Abhängigkeit von den Regelwerken entweder der Erst- oder der Zweitbelastungsmodul genommen. Der Verhältniswert E_{v2}/E_{v1} wird oft als Zusatzkriterium der Verdichtungskontrolle herangezogen, was jedoch aus bodenmechanischer Sicht sehr kritisch betrachtet werden muss [3].

In der Praxis finden auch die weiterentwickelten Varianten des CBR- bzw. des statischen Lastplattenversuchs Anwendung, die sog. dynamischen CBR- bzw. Lastplattenversuche. Dabei werden CBR-Stempel bzw. Lastplatte mit einem leichten Fallgewicht impulsartig belastet. Durch einen Beschleunigungssensor wird die Beschleunigung der Lastplatte bzw. des CBR- Stempels gemessen. Durch zweimalige Integration über die Zeit wird die Setzung und daraus ein dynamischer Verformungsmodul bzw. dynamischer CBR-Wert nach folgenden Beziehungen ermittelt [50]:

$$E_{vd} = \frac{22,5}{s} \left[MN / m^2 \right] \quad , \text{ wenn } s \text{ in [mm]} \quad \text{(Gl. 12),}$$

$$CBR_d = \frac{87,3}{s^{0,59}} \left[\% \right] \quad , \text{ wenn } s \text{ in [mm]} \quad \text{(Gl. 13).}$$

Gegenüber der herkömmlichen CBR- bzw. statischen Lastplattenversuche haben die dynamischen Varianten den Vorteil, dass sie kein Gegengewicht benötigen und somit eine schnellere Versuchsdurchführung ermöglichen.

Der statische Lastplattenversuch bzw. der CBR-Versuch und ihre dynamischen Varianten werden vorwiegend zur Qualitätssicherung der Erdarbeiten im Verkehrswegebau eingesetzt, wobei der CBR-Versuch Anwendung überwiegend im angloamerikanischen Raum findet. Die Prüftiefe beim statischen Plattendruckversuch ist aufgrund der Spannungsverteilung unter der Lastplatte begrenzt und erfasst in der Regel maximal das 2 bis 3-fache des Plattendurchmessers. Die Prüfschichtdicke bei der dynamischen Variante des Versuchs ist sogar kleiner – etwa 0,30 m [35]. Daher dürfen die Ergebnisse nicht als repräsentative Baugrundprobelastungen für Gründungen gewertet werden. Da mit diesen Methoden nur der oberflächennahe Bereich (0,30 – 0,80 m) [35] des Untergrundes geprüft werden kann, sind sie für eine Qualitätskontrolle bei der Impulsverdichtung nicht geeignet. Allerdings können statische Lastplattenversuche zum Nachweis der Tragfähigkeit der Ersatztragschicht bei einer Hybridgründung mit Impulsverdichtung und Bodenstabilisierung (*s. Kap. 3.2*) eingesetzt werden.

Von allen gängigen Methoden zur Verdichtungskontrolle sind die Sondierungen für die Überprüfung des Verdichtungserfolges einer mitteltief- bzw. tiefreichenden Verdichtung anwendbar. Dabei wird ein schlanker Stahlstab in den Boden durch Rammen oder Drücken eingebracht und der Eindringwiderstand gemessen. Das geeignete Sondiergerät ist nach der erforderlichen Untersuchungstiefe sowie nach Art und Beschaffenheit des Bodens zu wählen. Die einzelnen Sondierverfahren sind in Tabelle 8 zusammengestellt.

Tabelle 8: Arten und Einsatzmöglichkeiten der Stabsondierungen nach EN ISO 22476, DIN 4094, ÖNORM B 4419

Bezeichnung	Kurzzeichen		Regelwerk	Messgröße	Prüftiefe	Einsatz eingeschränkt in	Sondiergerät										Bemerkung
	Rammvorrichtung						Spitze			Rammbarren			Gestänge			Rammenenergie je Schlag	
	neue	alt					Spitzenquerschnitt	Spitzenmesser	Masse des Rammbarrens	Fallhöhe	Masse der Eintreibvorrichtung ohne Rammbar	Gestänge durchmesser außen/innen	Gestänge-Verbindung mit Gewindestift	Gestängeabschnitte	W/A		
Deutsch	Englisch	[cm ²]	[mm]	[kg]	[cm]	[kg]	[mm]	[mm]	[mm]	[m]	[kJ/m ²]						
Leichte Rammsonde	Dynamic probing light	DPL-5	LRS-5	DIN 4094-3, ÖNORM B 4419	N ₁₀	8	tonigen und schluffigen Böden und dicht gelagerten grobkörnigen Böden	5	25.2	10	50	6	22/6	M 16	1.0	-	sog. Künzelstab, nicht mehr normgerecht!
		DPL	LRS-10	EN ISO 22476-2	N ₁₀	10	mitteldicht und dicht gelagerten Kiesen, festen tonigen und schluffigen Böden	10	35.6	10	50	6	22/6	M 16	1.0	50	
Mittelschwere Rammsonde	Dynamic probing medium	DPM-A	MRS-A	DIN 4094-3	N ₁₀	15	dicht gelagerten Kiesen, festen tonigen und schluffigen Böden	10	35.6	30	20	6	22/6	M 16	1.0/1.5	-	nicht mehr normgerecht!
		DPM	MRS-B	EN ISO 22476-2	N ₁₀	20	dicht gelagerten Kiesen	10	35.6	30	50	18	32/9	M 20	1.0/1.5	100	-
Schwere Rammsonde	Dynamic probing heavy	DPH-10	SRS-10	ÖNORM B 4419	N ₁₀	25	-	10	35.6	50	50	18	32/9	M 20	1.0/1.5	-	nicht mehr normgerecht!
		DPH	SRS-15	EN ISO 22476-2	N ₁₀	30	-	15	43.7	50	50	18	32/9	M 20	1.0/1.5	167	-
Überschwere Rammsonde	Dynamic probing super heavy	DPSH-A	USRS-A	EN ISO 22476-2	N ₁₀ bzw. N ₂₀	40	-	16	45.0	63.5	50	18	32/-	M 20	1.0/1.5	194	-
		DPSH-B	USRS-B	EN ISO 22476-2	N ₁₀ bzw. N ₂₀	40	-	20	50.5	63.5	75	30	35/-	M 20	1.0/1.5	238	-
Überschwere Rammsonde	Dynamic probing giant	SRS100	SRS100	DIN 4094-3	N ₁₀ bzw. N ₂₀	40	-	20	50.7	100	50	18	35/-	M 20	1.0	-	nicht mehr normgerecht!
		DPG	SRS200	DIN 4094-3	N ₁₀ bzw. N ₂₀	40	-	20	50.7	200	50	18	35/-	M 20	1.0	-	nicht mehr normgerecht!
Bohrlochrammsondierung	Borehole dynamic probing (en) Standard Penetration Test (us)	BDP	SPT	EN ISO 22476-3	N ₃₀	30	-	20	50.5	63.5	0.76	30	ohne Gestänge Rammbar im Bohrohr		241	-	
Drucksondierung	Cone penetration test	CPT	DS	EN ISO 22476-1	q _c , f _s	40	Böden mit Steineinlagerungen, dicht gelagerten Kiesen, festen tonigen und schluffigen Böden	10	35.7	-	-	-	-	-	-	-	CPTU - Drucksondierung mit zusätzlicher Messung des Porenwasserdruck CPTM - Drucksondierungen mit mechanischen Messwertaufnehmern
								15	43.8	-	-	-	-	-	-	-	

- **Rammsondierungen**

(geregelt in EN ISO 22476-2, DIN 4094, ÖNORM B 4419)

Bei der Rammsondierung wird eine Stahlstange mit verdickter Spitze mit Hilfe eines Rammhärens bei gleichbleibender Fallhöhe (in der Regel 50 cm) in den Untergrund gerammt. Als Maß für den Eindringwiderstand des Bodens wird die Schlagzahl N_{10} für die Eindringtiefe von 10 cm herangezogen. In Ausnahmefällen wird bei der überschweren Rammsondierung die Schlagzahl N_{20} für 20 cm Eindringung angegeben [3]. Da mit zunehmender Lagerungsdichte der Eindringwiderstand steigt, lässt sich aus den gemessenen Schlagzahlen die Veränderung der Bodensteifigkeit mit der Tiefe ableiten, indem die Ergebnisse der Rammsondierung als Einzelprofil über die Rammtiefe aufgetragen werden. Es ergibt sich ein treppenförmiges Diagramm, das dann anhand empirischer Korrelationen ausgewertet werden kann. Die Überprüfung der Tiefenwirkung einer Verdichtung kann somit durch Vergleich der Schlagzahlen vorher und nachher oder mit Vorgabe eines Sollwertes für die Schlagzahl erfolgen.

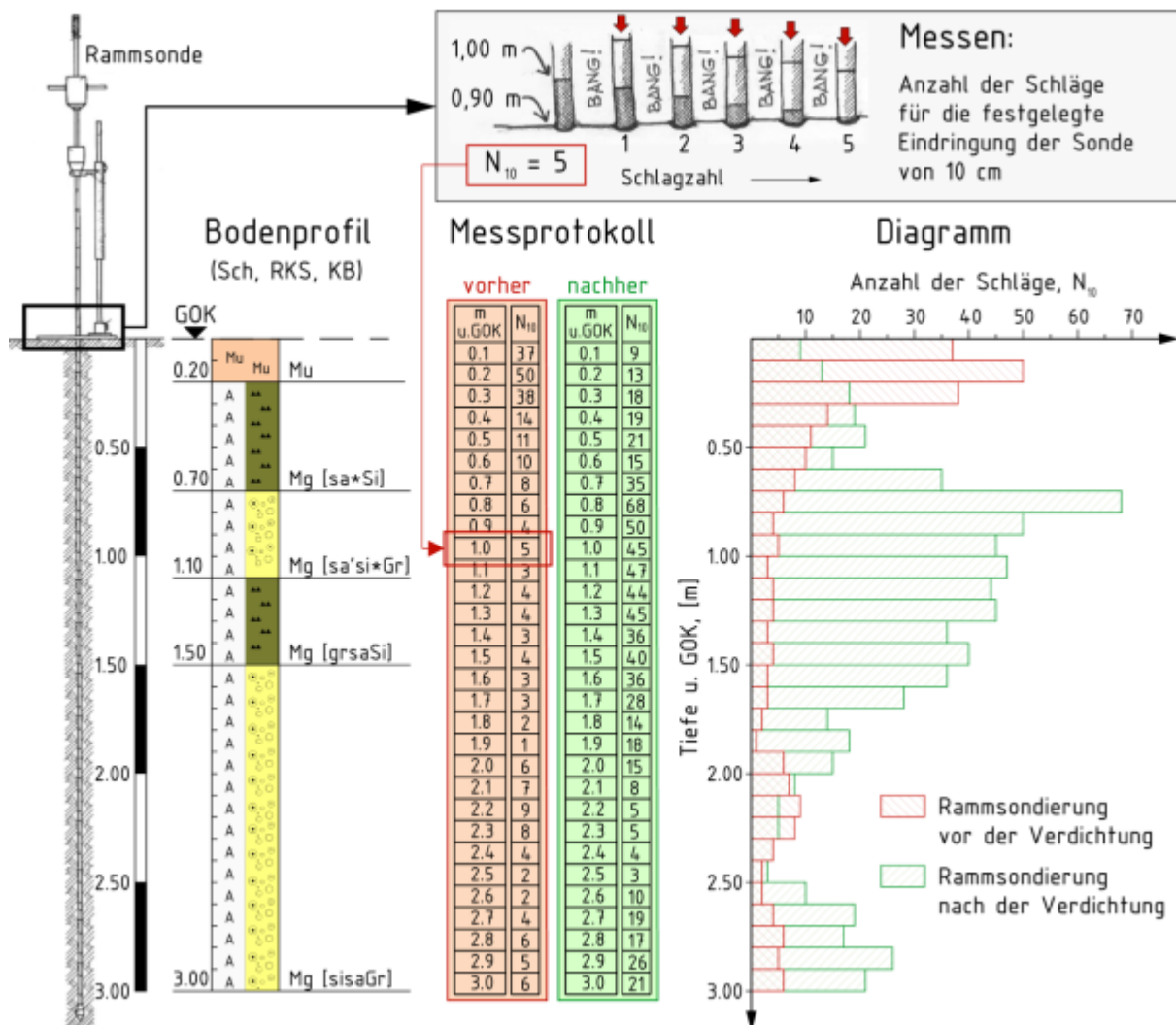


Abb. 9: Ausführung und grafische Auswertung der Verdichtungskontrolle mit einer Rammsonde

In Abb. 9 werden die Ergebnisse von zwei Rammsondierungen (vor und nach der Impulsverdichtung) aufgezeigt. Das Beispiel illustriert die Ermittlung der Tiefenwirkung einer Impulsverdichtung mit Hilfe einer leichten Rammsonde. Durch Auftragen der Sondiererergebnisse über der Tiefe ergeben sich zwei Diagramme – eines vor der Verdichtung (in Abb. 9 mit Rot

gekennzeichnet) und das andere nach der Verdichtung (*in Abb. 9 mit Grün gekennzeichnet*). Aus der Zusammenführung der beiden Diagramme lässt sich die Tiefenwirkung der Verdichtung erkennen.

In Abhängigkeit vom Spitzenquerschnitt und der eingebrachten Rammenergie kommen verschiedene Rammsonden zum Einsatz, die in Tabelle 8 zusammengestellt sind. In der europäischen Praxis ist der Einsatz von folgenden drei Sonden gebräuchlich:

- die leichte Rammsonde DPL (früher: LRS-10),
- die schwere Rammsonde DPH (früher: SRS-15) und
- die mittelschwere Rammsonde DPM (früher: MRS-B).

Jede Rammsonde besteht aus Rammvorrichtung (Rambär, Amboss und Führung), Hohlgestänge und Sondenspitze. Zur Verminderung der Mantelreibung bei der Rammsondierung ist die Spitze gegenüber dem Gestänge leicht verdickt [49]. Das Anheben des Rambärens mit dem Fallgewicht erfolgt in der Regel pneumatisch. Bei der leichten Rammsondierung können auch handgetriebene Geräte zur Anwendung kommen. Schematische Darstellung des Aufbaus von der leichten und schweren Rammsonde wird in Abb. 10 bzw. Abb. 11 angegeben.

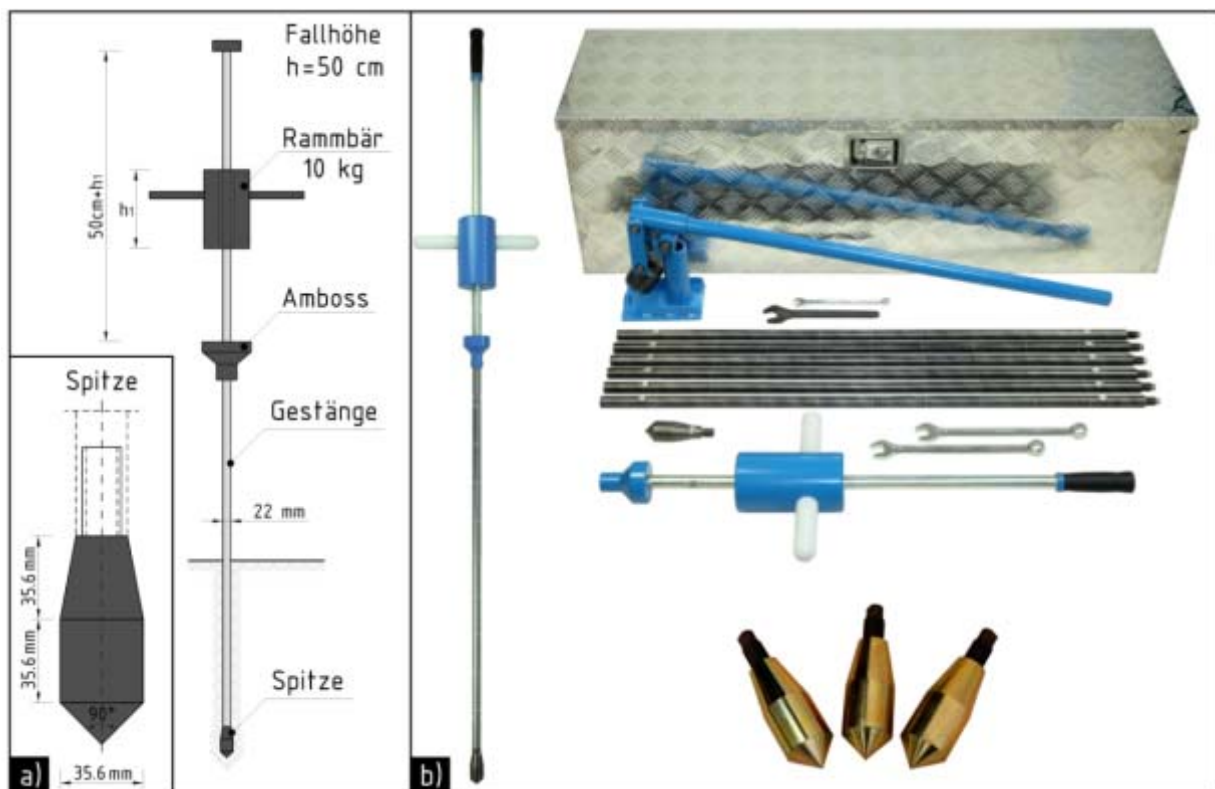


Abb. 10: Leichte Rammsonde - DPL
 a) Schematischer Aufbau der manuellen leichten Rammsonde nach DIN 4094
 b) Leichtes Rammsondiergerät mit 10 kg Fallmasse (links),
 Transportkiste (rechts oben),
 Sondenspitzen mit 10 cm² Querschnittsfläche (rechts unten) [44]

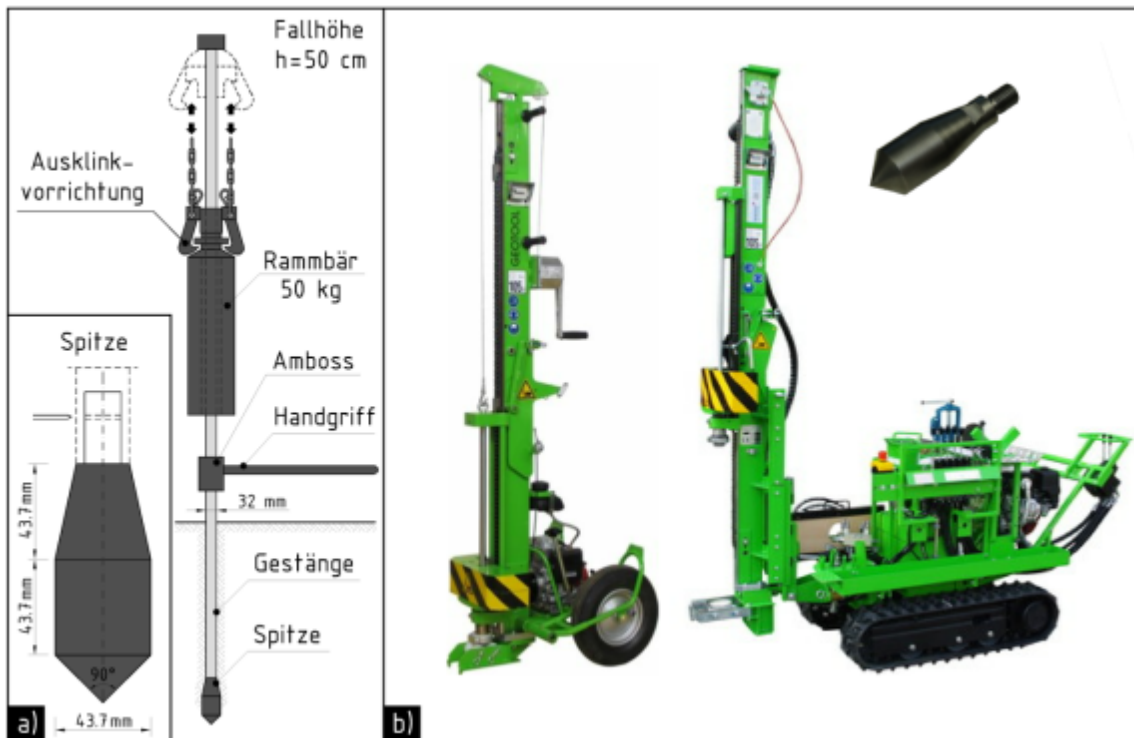


Abb. 11: Schwere Rammsonde - DPH
 a) Schematischer Aufbau nach DIN 4094
 b) Schwere Rammsonde auf einem Fahrgestell (links) und auf einem Raupenfahrwerk (rechts), Sondenspitze mit 15 cm^2 Querschnittsfläche (rechts oben) [22]

Bezüglich der Auswahlkriterien des geeigneten Sondiergeräts für die Rammsondierungen ist zu bemerken, dass

- leichtere Rammsonden empfindlicher auf Steifigkeitsänderungen des untersuchten Bodens reagieren als schwerere [31];
- mit abnehmendem Durchmesser der Sondenspitze auch die Auflösungsfähigkeit der Sondierergebnisse abnimmt [38];
- beim Einsatz einer Rammsonde in grobkörnigen Böden das Größtkorn des zu untersuchenden Bodens nicht größer als das 0,1-fache des gewählten Sondenspitzen­durchmessers sein soll [31];
- in bindigen Böden vorrangig der Einsatz der leichten, in nichtbindigen Böden in erster Linie dieser der schweren Rammsonde empfohlen ist [9];
- in schlecht zugänglichen Gebieten, aber auch zur Erzielung einer differenzierten Auflösung des Rammwiderstands anstatt der schweren kann die mittelschwere Rammsonde eingesetzt werden [34].

- **Drucksondierungen**

(geregelt in EN ISO 22476-1, DIN 4094, ÖNORM B 4419)

Bei Drucksondierungen (CPT) wird die Sondierspitze bei gleichbleibender Eindringgeschwindigkeit ($20 \text{ mm/s} \pm 5 \text{ mm/s}$) in den Böden eingedrückt. Dabei werden u.a. der Spitzenwiderstand q_c , die lokale Mantelreibung f_s und ggf. bei den sog. Piezosonden (CPTU) auch der Porenwasserdruck u in Abhängigkeit von der Sondiertiefe getrennt gemessen [3, 31]. Bei der Auswertung wird der Widerstand über die Tiefe aufgetragen. (s. Abb. 12).

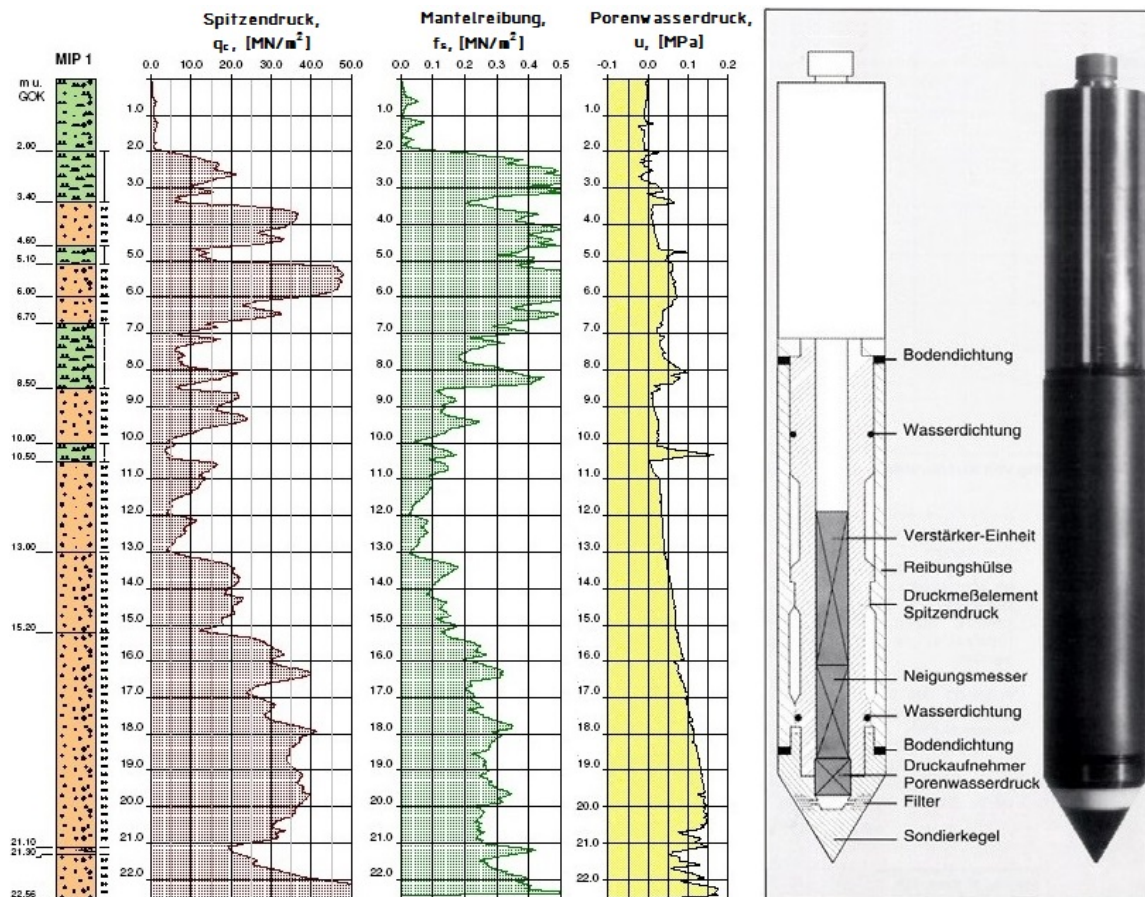


Abb. 12: Drucksondierung (CPT) [20]
 (links) Darstellung von Messdaten – Bodenprofil, Spitzendruck, Mantelreibung, Porenwasserdruck,
 (rechts) kegelförmige Sondierspitze mit 60°-Öffnungswinkel

Durch die Möglichkeit, neben dem Spitzenwiderstand zusätzlich auch die lokale Mantelreibung messen zu können, liefert die Methode qualitativ hochwertige Ergebnisse hinsichtlich der Interpretierbarkeit der gemessenen Werte [19].

Die Drucksondierung ist vor allem bei bindigen Böden der Rammsondierung vorzuziehen. Allerdings ist der Einsatz der Drucksonde in gröberen nichtbindigen Böden eingeschränkt und wird nicht empfohlen, da die gröberen Körner nicht nur die Spitze beschädigen können, sondern auch zu nicht tolerierbaren Auslenkungen des Gestänges führen können [31]. Zu Zwecken der Verdichtungskontrolle nach einer mitteltief- bzw. tiefreichenden Verdichtung ist dieses Verfahren selten bevorzugt, da es einen größeren gerätetechnischen Aufwand als Rammsondierungen erfordert.

- **Bohrlochrammsondierungen (Standard Penetration Test)**
(geregelt in EN ISO 22476-3, DIN 4094, ÖNORM B 4419)

Die Bohrlochrammsondierung bzw. der Standard Penetration Test ist eine Rammsondierung im Bohrloch, die von der Bohrlochsohle aus über eine definierte Eindringtiefe durchgeführt wird. Dabei wird die Sonde 45 cm tief eingetrieben und die Schlagzahl N_{30} für die letzten 30 cm Eindringung gemessen.

Die Spitze des ursprünglich aus den USA kommenden Standard Penetration Test (SPT) ist offen und daher auch zur Probenentnahme geeignet. Im europäischen Raum wird die Variante mit

einer geschlossenen Spitze mit 60°-Öffnungswinkel bevorzugt. Der Versuch wird dann als Bohrlochrammsondierung (BDP = Borehole Dynamic Probing) oder Standard Penetration Test (Cone) - SPT(C) bezeichnet.

Zur Verdichtungskontrolle nach einer mitteltief- bzw. tiefreichenden Verdichtung, sowie zur Untergründerkundung wird das Verfahren oft in USA und Kanada eingesetzt. In deutschsprachigen Ländern werden Bohrlochrammsondierungen relativ selten angewendet. Sie werden nur zur Baugründerkundung durchgeführt, wenn Druck- bzw. Rammsondierungen nicht ausführbar sind.

2.2.3 Verdichtungskontrolle durch Rammsondierungen – Interpretation der Messergebnisse

Im Rahmen von diversen Forschungsarbeiten und Vergleichsuntersuchungen wurde eine Reihe von Korrelationen zwischen gemessenen Schlagzahlen und den Eigenschaften des Bodens (z.B. Lagerungsdichte bei nichtbindigen bzw. Konsistenz bei bindigen Böden) abgeleitet. Die ermittelten Zusammenhänge können als Hilfsmittel zur Beurteilung der Sondierergebnisse herangezogen werden. Diese sind jedoch nur als Anhaltswerte zu betrachten, da mehrere Faktoren Einfluss auf die gemessenen Schlagzahlen haben können [3]. Aus den o.g. Gründen muss für die Auswertung von Sondierergebnissen und die Beurteilung des Verdichtungserfolges vom Baugrundsachverständigen erfolgen.

Bei der Interpretation von Rammsondierdiagrammen sind folgende Punkte zu beachten:

- Der Eindringwiderstand schwankt umso stärker, je grobkörniger der Boden ist [25].
- Bei eckigen und rauen Körnern ist der Eindringwiderstand größer als bei runden und glatten Körnern [25].
- Eingelagerte Steine können den Eindringwiderstand beträchtlich erhöhen. Daher ist ein vereinzelt auftretender erhöhter Eindringwiderstand nicht für die ganze Bodenschicht indikativ [25].
- Die Korngrößenverteilung (Ungleichförmigkeitszahl C_u und Krümmungszahl C_c) beeinflusst die Sondierergebnisse. Erfahrungsgemäß weisen weitgestufte Böden einen größeren Eindringwiderstand als enggestufte Böden auf [38].
- Der Eindringwiderstand schwankt bei grobkörnigen stärker als bei feinkörnigen Böden [16].
- In bindigen Böden können die Sondierpausen beim Gestängewechsel die Schlagzahl sprunghaft erhöhen [36].
- Der Eindringwiderstand wird in Oberflächennähe durch die Auflockerung des Bodens zur Oberfläche hin reduziert [36].
- In nichtbindigen Böden ergeben sich unterhalb des Grundwasserspiegels bei sonst gleichen Verhältnissen geringere Eindringwiderstände als über dem Grundwasser [36].
- In wassergesättigten Böden kann der Porenwasserdruck zu Fehlermessungen führen, da er den Eindringwiderstand erhöht [3].
- Bei weichen bindigen Böden hat die Mantelreibung einen großen Einfluss auf den gemessenen Schlagzahlen. Bei unverrohrten Rammsonden kann sie den Eindringwiderstand stetig erhöhen und somit eine hohe Festigkeit vortäuschen [3].

Die Beziehungen zwischen Sondierergebnissen und der Lagerungsdichte bzw. der bezogenen Lagerungsdichte nichtbindiger Böden wurden von *Stenzel et al. (1978)* zusammengefasst und sind in Form von Diagrammen in DIN 4094-3 zu finden. Sie lassen sich mit folgenden Gleichungen beschreiben [49]:

$$\begin{aligned} \text{Lagerungsdichte:} \quad D &= a_1 + a_2 \log N_{10} && \text{für Rammsondierungen} \\ D &= a_1 + a_2 \log N_{30} && \text{für Bohrlochrammsondierungen} \\ D &= a_1 + a_2 \log q_c && \text{für Drucksondierungen} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 14}),$$

$$\begin{aligned} \text{Bezogene} \quad I_D &= b_1 + b_2 \log N_{10} && \text{für Rammsondierungen} \\ \text{Lagerungsdichte:} \quad I_D &= b_1 + b_2 \log N_{30} && \text{für Bohrlochrammsondierungen} \\ I_D &= b_1 + b_2 \log q_c && \text{für Drucksondierungen} \end{aligned} \quad (\text{Gl. 15}),$$

In Tabelle 9 werden Beispiele für die Koeffizienten von Gl.14 bzw. Gl.15 für verschiedene nichtbindige Böden je nach Sondiergerät angeführt.

Tabelle 9: Koeffizienten zur Ermittlung der Lagerungsdichte D bzw. der bezogenen Lagerungsdichte I_D aus Sondierergebnissen nach EN 1997-2 und DIN 4094-3 Beiblatt 1 (adaptiert nach [49])

Bodenart		Grundwasser	Lagerungsdichte D									
			DPL-5		DPL		DPH		BDP		CPT	
			a_1	a_2	a_1	a_2	a_1	a_2	a_1	a_2	a_1	a_2
SE	Sand ($C_u \leq 3$)	über GW	0,02	0,375	0,03	0,270	0,02	0,455	0,02	0,400	-0,23	0,60
SE	Sand ($C_u \leq 3$)	unter GW	0,14	0,315	0,13	0,250	0,15	0,405	0,10	0,390		
SW GW	Sand-Kies-Gemische ($C_u \geq 6$)	über GW	-	-	-	-	-0,18	0,545	-0,08	0,450	0,16	0,33
Bodenart		Grundwasser	Bezogene Lagerungsdichte I_D									
			DPL-5		DPL		DPH		BDP		CPT	
			b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2	b_1	b_2
SE	Sand ($C_u \leq 3$)	über GW	0,10	0,365	0,15	0,260	0,10	0,435	0,10	0,385	-0,33	0,73
SE	Sand ($C_u \leq 3$)	unter GW	0,22	0,300	0,21	0,230	0,23	0,380	0,18	0,370		
SW GW	Sand-Kies-Gemische ($C_u \geq 6$)	über GW	-	-	-	-	-0,14	0,550	-0,03	0,455	0,25	0,31

Gültigkeitsbereich:
für Ramm- und Bohrlochrammsondierungen: $3 < N_k < 50$
für Drucksondierungen: $3 < q_c < 30$

Der Zusammenhang zwischen dem Sondierergebnis und der Zusammendrückbarkeit des Bodens wird mit der Formel nach *Ohde* beschrieben [16, 17]:

$$E_s = \nu \times p_a \times \left[\frac{\sigma'_v + 0,5\sigma'_p}{p_a} \right]^w \quad (\text{Gl. 16}),$$

- E_s - spannungsabhängige Steifemodul
 σ_v' - effektive Vertikalspannung;
 σ_p' - durch das Bauwerk hervorgerufene zusätzliche Vertikalspannung in der Gründungssohle
 p_a - atmosphärischer Druck
 w - Steifeexponent
 $w = 0,5$ für Sande und Sand-Kies-Gemische mit $C_u \leq 3$
 $w = 0,6$ für leicht- und mittelplastische Tone mit $I_p \leq 10$, $w_L \leq 35$ und $S_r \approx 0,8$
 $w = 0,7$ für leicht- und mittelplastische Tone mit $I_p \leq 10$, $w_L \leq 35$ und $S_r \geq 0,8$
 ν - Steifebeiwert

Zur Ableitung des Steifebeiwertes wurden Untersuchungen in nichtbindigen und bindigen Böden von *Stenzel et. al (1978)* und *Biedermann (1984)* durchgeführt. In Abhängigkeit von der Bodenart ergaben sich folgende Beziehungen zwischen Schlagzahl und Steifebeiwert [16, 17, 49]:

für Sande und Sand-Kies-Gemische:

$$\begin{aligned}
 \nu &= c_1 + c_2 \log N_{10} && \text{für Rammsondierungen} \\
 \nu &= c_1 + c_2 \log N_{30} && \text{für Bohrlochrammsondierungen} \quad \text{(Gl. 17),} \\
 \nu &= c_1 + c_2 \log q_c && \text{für Drucksondierungen}
 \end{aligned}$$

für leicht und mittelplastische Tone:

$$\begin{aligned}
 \nu &= c_1 + c_2 N_{10} && \text{für Rammsondierungen} \\
 \nu &= c_1 + c_2 N_{30} && \text{für Bohrlochrammsondierungen} \quad \text{(Gl. 18),} \\
 \nu &= c_1 + c_2 q_c && \text{für Drucksondierungen}
 \end{aligned}$$

Der spannungsabhängige Steifemodul lässt sich dann näherungsweise mit den Koeffizienten c_1 und c_2 aus Tabelle 11 bestimmen.

Tabelle 10: Koeffizienten zur Ermittlung der Steifebeiwert ν aus Sondierergebnissen nach EN 1997-2 und DIN 4094-3 Beiblatt 1 (adaptiert nach [49])

Bodenart		Grundwasser	Steifebeiwert ν							
			DPL		DPH		BDP		CPT	
			c_1	c_2	c_1	c_2	c_1	c_2	c_1	c_2
SE	Sand ($C_u \leq 3$)	über GW	71	214	161	249	146	217	113	167
SW	Sand ($C_u \geq 6$)	über GW	–	–	–	–	–	–	-13	463
TM TL	leicht und mittelplastische Tone ($I_c = 0,75 - 1,30$)	über GW	30	4	50	6	50	4	50	15,2
<u>Gültigkeitsbereich:</u> DPL: $4 < N_{10} < 50$ (SE) $6 < N_{10} < 19$ (TL, TM) DPH: $3 < N_{10} < 10$ (SE) $3 < N_{10} < 13$ (TL, TM) BDP: $3 < N_{30} < 25$ (SE) $3 < N_{30} < 23$ (TL, TM) CPT: $5 < q_c < 30$ (SE, SW) $0,6 < q_c < 3,5$ (TL, TM)										

Die Beziehungen, die den Einfluss des Grundwassers auf das Sondierergebnis berücksichtigen, sind in Tabelle 11 zusammengestellt. Da Grundwasser vorwiegend in nichtbindigen Böden ein deutlicher Einfluss auf die gemessenen Schlagzahlen aufweist und somit diese verfälschen kann, werden solche Beziehungen nur für Sand und Kies-Sand-Gemische abgeleitet.

Tabelle 11: Einfluss des Grundwassers auf die Schlagzahlen von Rammsondierungen in nichtbindigen Böden nach DIN 4094-3 [49]

Sondentyp	Bodenart				Gültigkeitsbereich: $3 < N_{k,u} < 50$
	SE	enggestufter Sand ($C_u \leq 3$)	GW	weitgestufte Kies-Sand-Gemische ($C_u \geq 6$)	
DPL	$N_{10,u} = 2N_{10,u} + 2$		-		Anmerkung: N_{ku} – Schlagzahl unter GW $N_{kü}$ – Schlagzahl über GW
DPH	$N_{10,u} = 1,3N_{10,u} + 2$		$N_{10,u} = 1,2N_{10,u} + 4,5$		
BDP	$N_{30,u} = 1,1N_{30,u} + 5$		$N_{30,u} = 1,1N_{30,u} + 5,9$		

In den nachfolgenden Tabellen 12 bis 19 werden weitere rein empirische Zusammenhänge zwischen Sondierergebnissen und Bodenkenngößen angegeben, die aus einer Vielzahl, zum Teil stark streuender Versuchsergebnisse abgeleitet sind. Bei der Anwendung der aus Sondierergebnissen abgeleiteten empirischen Zusammenhänge ist jedoch immer darauf zu achten, dass sie nicht allgemeingültig sind. Korrelationen dürfen nur dann angewendet werden, wenn örtliche Erfahrungen bezüglich der Eigenschaften des Bodens und die Grundwassergegebenheiten vorliegen. Die aus Sondierergebnissen abgeleiteten Bodeneigenschaften ersetzen nicht die direkten geotechnischen Aufschlussmethoden und die Ergebnisse der bodenphysikalischen Laboruntersuchungen.

Tabelle 12: Empirische Korrelationen zwischen den Sondierergebnissen verschiedener Sonde und der Lagerungsdichte nichtbindiger Böden bzw. der Konsistenz bindiger Böden [39]

Lagerungsdichte nichtbindiger Böden	Spitzendruck CPT q_c , [MN/m ²]	Eindringwiderstand			
		DPH N_{10} , [-]	DPM N_{10} , [-]	DPL N_{10} , [-]	BDP / SPT N_{30} , [-]
sehr locker	-	≤ 1	≤ 4	≤ 6	≤ 3
locker	< 5 (7,5)	1 – 4	4 – 11	6 – 10	3 – 8
mitteldicht	5 (7,5) – 10 (15)	4 – 13	11 – 26	10 – 50	8 – 25
dicht	10 (15) – 20 (25)	13 – 24	26 – 44	50 – 64	25 – 42
sehr dicht	> 20 (25)	> 24	> 44	> 64	42 – 58
Konsistenz bindiger Böden	Spitzendruck CPT q_c , [MN/m ²]	Eindringwiderstand			
		DPH N_{10} , [-]	DPM N_{10} , [-]	DPL N_{10} , [-]	BDP / SPT N_{30} , [-]
breiig	-	≤ 2	≤ 3	≤ 3	≤ 2
weich	1.0 – 1.5	2 – 5 (4)	3 – 8	3 – 10	2 – 8
steif	1.5 – 2.5	(4) 5 – 9 (8)	8 – 14	10 – 17	8 – 15
halbfest	2.5 – 5.0	(8) 9 – 17	14 – 28	17 – 37	15 – 30
fest	> 5.0	> 17	> 28	> 37	> 30

Tabelle 13: Zusammenhänge für Druck-, Ramm- und Bohrlochrammsondierungen in nichtbindigen Böden nach Erfahrungen von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) [14]

Spitzenwiderstand q_c , [MN/m ²]	Eindringwiderstand DPH N_{10} , [-]	Eindringwiderstand BDP N_{30} , [-]	Reibungswinkel ϕ' , [°]	Steifemodul E_s , [MN/m ²]	Benennung der Festigkeit
< 2	< 2	< 4	< 30	< 15	sehr gering
2 – 6	2 – 6	4 – 12	30 – 35	15 – 50	gering
6 – 11	6 – 11	12 – 22	35 – 37,5	50 – 80	mittel
11 – 19	11 – 19	22 – 38	37,5 – 40	80 – 100	groß
> 19	> 19	> 38	> 40	> 100	sehr groß

Tabelle 14: Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Sondiererergebnissen bei nichtbindigen Böden nach TUM – Zentrum Geotechnik [34]

Bezeichnung	Lagerungsdichte bei ungleichförmigen Böden ($C_u > 3$) D , [-]	Verdichtungsgrad D_{Pr} , [%]	Spitzenwiderstand CPT q_c , [MN/m ²]	Eindringwiderstand	
				DPH N_{10} , [-]	BDP / SPT N_{30} , [-]
sehr locker	< 0,20			< 5	< 4
locker	0,20 – 0,45			5 – 15	4 – 15
mitteldicht	0,45 – 0,65	≥ 98 %	≥ 7,5	15 – 30	15 – 40
dicht	> 0,65	≥ 100 %	≥ 15	30 – 40	> 40

Bezeichnung	Lagerungsdichte bei gleichförmigen Böden ($C_u \leq 3$) D , [-]	Verdichtungsgrad D_{Pr} , [%]	Spitzenwiderstand CPT q_c , [MN/m ²]	Eindringwiderstand	
				DPH N_{10} , [-]	DPL-5 N_{10} , [-]
sehr locker	< 0,15		< 2,0	< 1	< 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	≥ 98%	12,0 – 20,0	13 – 24	> 20

Tabelle 15: Abschätzung der Lagerungsdichte anhand Rammsondierungen bei kiesig-sandigen Böden nach Türke 1984 [38]

Bodengruppe	Ungleichförmigkeitszahl C_u , [-]	Lagerungsdichte D , [-]		Verdichtungsgrad D_{Pr} , [%]	Leichte Rammsonde DPL N_{10} , [-]	Drucksondierung CPT q_c , [MN/m ²]
SE, GE, SU, GU, GT	≤ 3	mitteldicht	≥ 0,30	≥ 95%	5 – 15	≥ 1,5
		dicht	≥ 0,50	≥ 98%	> 15	≥ 15
SE, SW, SI, GE, GW, GI, SU, GU	> 3	mitteldicht	≥ 0,45	≥ 98%	15 – 30	≥ 7,5
		dicht	≥ 0,65	≥ 100%	> 30	≥ 15

Tabelle 16: Abschätzung der Lagerungsdichte und des Steifemoduls anhand schweren Rammsondierungen im sandigen Kies (saGr) nach Gstöttner 1987 [38]

Lagerungsdichte	DPH N_{10} , [-]	Steifemodul E_s , [MN/m ²]
sehr locker	≤ 4	10
locker	4 – 8	10 – 20
mitteldicht	8 – 12	20 – 55
dicht	12 – 20	50 – 75
sehr dicht	> 20	> 75

Tabelle 17: Interpretation der Sondierergebnisse im Sand nach Kirsch 1979 [38]

Bezeichnung	sehr locker	locker	mitteldicht	dicht	sehr dicht
Relative Dichte D_{Pr} , [%]	< 15	15 – 35	35 – 65	65 – 85	85 – 100
DPL-5 Eindringwiderstand N_{10} , [-]	< 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	> 40
DPH Eindringwiderstand N_{10} , [-]	< 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	> 20
BDP/SPT Eindringwiderstand N_{30} , [-]	< 4	4 - 10	10 - 30	30 - 50	> 50
CPT Spitzenwiderstand q_c , [MN/m ²]	< 5	5 - 10	10 - 15	15 - 20	> 20
Trockenraumgewicht γ_d , [kN/m ³]	< 14	14 - 16	16 - 18	18 - 20	> 20
Steifemodul E_s , [MN/m ²]	15 - 30	30 - 50	50 - 80	80 - 100	> 100
Reibungswinkel φ , [°]	< 30	30,0 – 32,5	32,5 – 35,0	35,0 – 37,5	$> 37,5$

Tabelle 18: Zusammenhang zwischen Schlagzahlen von schweren Rammsonde DPH und der Bohrlochrammsonde BDP (SPT) und diversen Bodenparametern [28]

Nichtbindige Böden über Wasser			Bindige Böden			
DPH N_{10} , [-]	BDP N_{30} , [-]	Lagerungs- dichte	DPH N_{10} , [-]	BDP N_{30} , [-]	Konsistenz I_c , [-]	Undrainierte Kohäsion (undrainierte Scherfestigkeit) c_u , [kN/m ²]
			< 1	< 3	breiig < 0.50	< 12.5
< 5	< 12	locker	1 - 4	3 - 15	weich 0.50 – 0.75	12.5 – 50
5 - 20	12 - 30	mitteldicht	4 – 8	15 - 30	steif 0.75 – 1.00	50 – 100
> 20	> 30	dicht	8 - 15	30 - 45	halbfest > 1.00	100 – 200
			> 15	> 45	fest $\gg 1.00$	entf.

Tabelle 19: Zusammenhang zwischen Sondierergebnissen und undrainierter Scherfestigkeit bindiger Böden nach Placzek 1985 [41]

Konsistenz	Undrainierte Kohäsion (undrainierte Scherfestigkeit) c_u , [kN/m ²]	Spitzendruck CPT q_c , [MN/m ²]	Eindringwiderstand			
			DPH N_{10} , [-]	DPM N_{10} , [-]	DPL N_{10} , [-]	BDP / SPT N_{30} , [-]
breiig	< 20	< 2,0	< 2	< 3	< 3	< 2
weich	20 - 60	2,0 - 5,0	2 - 5	3 - 8	3 - 10	2 - 6
steif	60 - 200	5,0 - 8,0	5 - 9	8 - 14	10 - 17	6 - 15
halbfest	> 200	8,0 - 15,0	9 - 17	14 - 28	17 - 37	15 - 30
fest	> 400	> 15,0	> 17	> 28	> 37	> 30

Tabelle 20: Zusammenhang zwischen Schlagzahlen der schweren Rammsonde DPH und der relativen Dichte [38]

Bodenzustand		Schwere Rammsonde DPH N_{10} , [-]	Relative Dichte D_{Pr} [%]
Nichtbindiger Boden und geschütteter bindiger Boden	Gewachsener bindiger Boden		
sehr locker	weich	≤ 2	≤ 90
locker	steif	2 - 7	90 - 95
mitteldicht	halbfest	7 - 12	95 - 97
		12 - 15	97 - 98
dicht		15 - 30	98 - 100
sehr dicht	fest	> 30	> 100

Weitere Korrelationen zwischen Sondierergebnissen und Bodeneigenschaften können aus den Regelwerken EN 1997-2, EN ISO 22476, ÖNORM B 4419, DIN 4094 und aus der Fachliteratur entnommen werden.

3 Impulsverdichtung – Stand der Technik und Forschung

3.1 Entwicklung des Verfahrens

Anfang der 50er Jahre begann Fa. Keller die Entwicklung einer neuen Methode, bei der die Bodenverdichtung mittels Stöße aus einer relativ geringen Höhe erfolgte. Das neue Verdichtungsgerät, der sog. Mammutrüttler, wurde zum ersten Mal im Jahre 1951 für den Bau eines Staudamms im Dorf Roßhaupten (Deutschland) eingesetzt. Da die Idee dieses Verfahrens sich an der Technologie der Impulsverdichtung sehr ähnelt, kann der Mammutrüttler (s. Abb. 13) als Vorgänger des heutigen Impulsverdichters betrachtet werden [23].



Abb. 13: Der Mammutrüttler [23]

Der erste Impulsverdichter wurde Anfang der 90er Jahre von BSP International Foundations Ltd. für das Britische Militär entwickelt, um Militärflugpisten, die im Kriegsfall durch Bombenangriffe zerstört wurden, raschest wieder in Stand zu setzen. Das Verdichtungsgerät (s. Abb. 14) wurde Rapid Runway Compactor (RRC) genannt und seine zivile weiterentwickelte Variante Rapid Impact Compactor (RIC). Mit Wirkungstiefen von 2 bis max. 7 m ermöglichte die Methode eine mitteltiefe Bodenverdichtung [3].

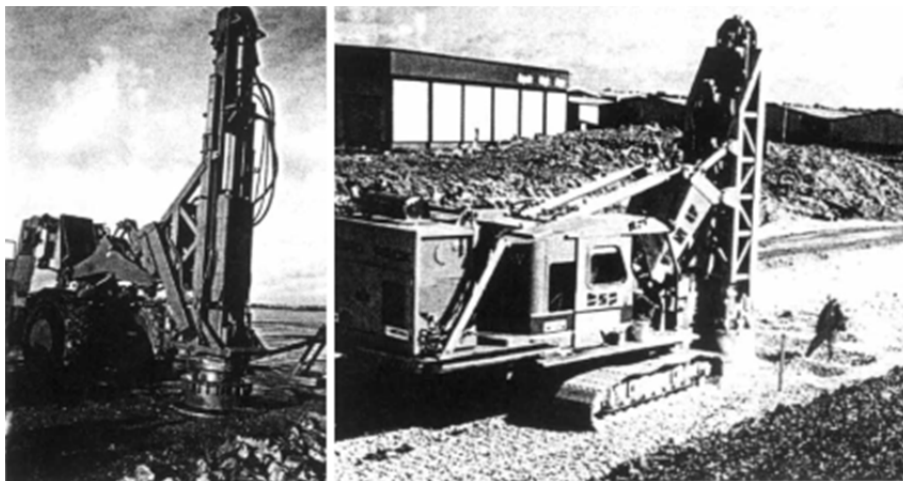


Abb. 14: Rapid Runway Compactor [13]

In den letzten 20 Jahren wurde die neue Technologie der Impulsverdichtung in Europa, den USA, Kanada, Mittelasien, den VAE und Südafrika eingesetzt. Die ersten Untersuchungen hinsichtlich Verdichtungsvorgang, Tiefen- und Erschütterungswirkung wurden von *Watts & Charles* (1993) in England [47, 48], *Braithwaite & du Preez* (1997) in Südafrika [11], *Kristiansen & Davies* (2004) in Kanada [27], *Tara & Wilson* (2004) in den USA [45] und *Serridge & Synac* (2006) in Kasachstan und Mittelasien [42] durchgeführt. Das erste grundlagenorientierte Forschungsprojekt „Dynamische Bodenverdichtung mit dem Impulsverdichter“ wurde 2010 vom Büro Geotechnik ADAM ZT GmbH und von der Universität Innsbruck – Institut für Grundlagen der Bauingenieurwissenschaften in Kooperation mit Fa. Terra-Mix Bodenstabilisierungs-GmbH abgewickelt. Die Ergebnisse der Forschungsarbeit bestimmen die Anwendungsbereiche und die Anwendungsgrenzen der Impulsverdichtung, geben entscheidende Hinweise für Optimierungen zur Festlegung der Herstellungsparameter, zum Verdichtungsablauf und zu den baubegleitenden Qualitätskontrollen [2].

3.2 Anwendungsmöglichkeiten

Die Anwendbarkeit des Verfahrens wird durch

- die Untergrundverhältnisse (angetroffene Bodenarten, Homogenität, Schichtstärke etc.),
- die Art und Belastung des zu gründenden Bauwerks,
- die Größe der zu verbessernde Fläche und
- die Entfernung zur Nachbarbebauung

beeinflusst.

Für eine Impulsverdichtung sind geeignet:

- locker gelagerte Sande und Kiese,
- bindige Kies- bzw. Sand-Schluff-Gemische mit begrenztem Feinkornanteil,
- inhomogene Böden mit geringem Feinkornanteil,
- Anschüttungen unterschiedlicher Herkunft (Auffüllung mit Bauschutt, Abbruchresten, Hausmüll und industriellen Nebenprodukten)

Mit zunehmendem Feinkornanteil und damit steigender Wasserundurchlässigkeit ($k_f < 1 \cdot 10^{-7}$) nimmt die Effektivität der Verdichtung ab, da bindige Böden mit hohem Wassergehalt praktisch nicht verdichtbar sind. Abb. 15 stellt eine Gegenüberstellung der Einsatzmöglichkeiten der Impulsverdichtung in Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung im Vergleich zu anderen Bodenverbesserungsverfahren dar.

Die Impulsverdichtung wird vorrangig in den folgenden Bereichen eingesetzt:

- Erhöhung der Fundamenttragfähigkeit,
- Verbesserung der Bettungsbedingungen für Bodenplatten,
- Reduzierung des Verflüssigungsvermögens,
- Stabilisierung von Abfallprodukten.
- Sanierung von Hochwasserschutzdämmen.

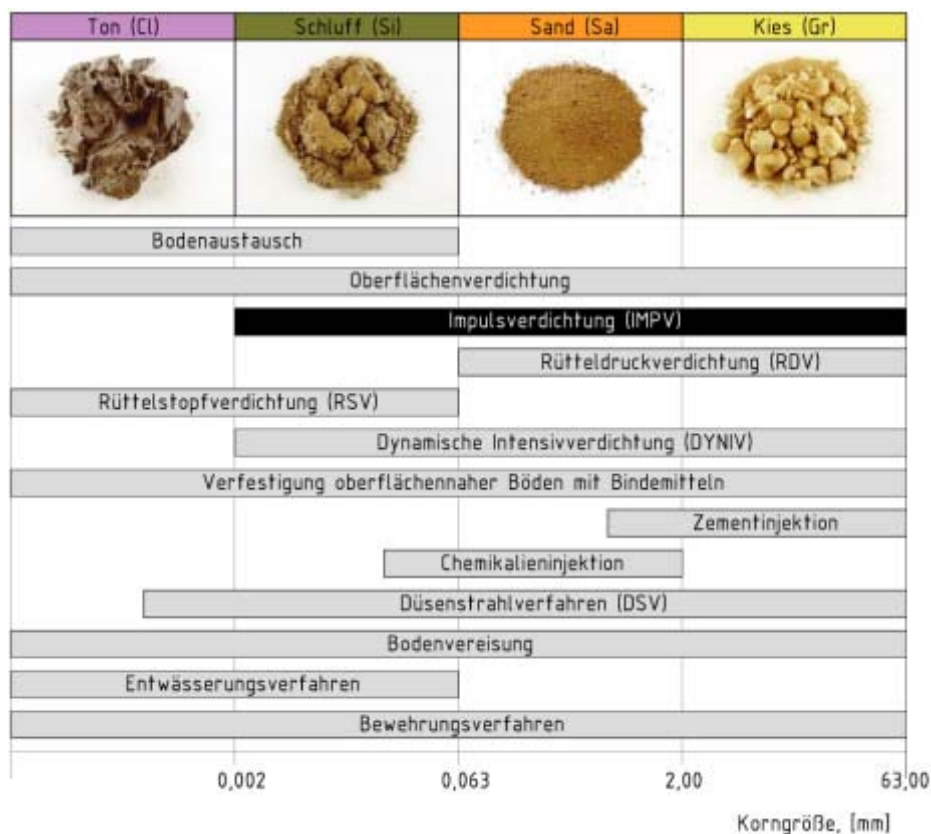


Abb. 15: Einsatzmöglichkeiten des Impulsverdichters gegenüber verschiedenen Baugrundverbesserungsmethoden in Abhängigkeit von der Bodenart (adaptiert nach [30])

Die Technologie kommt für Bodenverbesserungsmaßnahmen im Bereich des Hochbaus (Industrie-, Werk- und Wohnanlagen) und der Infrastruktur (Straßen, Gleisanlagen, Flugplätze) zum Einsatz. Im Straßen-, Eisenbahn- und Flugplatzbau ist die Impulsverdichtung besonders vorteilhaft, weil dadurch Setzungen, wie sie durch Erschütterungen des Verkehrs hervorgerufen werden, bereits weitgehend vorweggenommen werden können [30].

In Kombination mit einer Bodenstabilisierung gibt der Impulsverdichter eine wirtschaftliche und effektive Lösung zur mitteltiefen Bodenverbesserung auch von weichen bindigen Böden. Bei diesem Gründungskonzept erfolgt zuerst die Impulsverdichtung. Die entstandenen Krater werden entweder mit anstehendem Bodenmaterial oder mit geeignetem Fremdmaterial aufgefüllt. Nach Beendigung der Verdichtungsarbeiten wird die Oberfläche mit Kalk oder mit einer Kalk-Zement-Mischung stabilisiert. Die so hergestellte obere Ersatztragschicht ermöglicht eine Lastabtragung zwischen den Verdichtungspunkten.

In Abb. 16 ist das Ergebnis aus einer numerischen Simulation der Verdichtungswirkung bei der Kombination Impulsverdichtung und Bodenstabilisierung dargestellt. Nach der Impulsverdichtung auf dem Primärraster zeigen die Ergebnisse keine gegenseitige Beeinflussung der Verdichtungspunkte. Erst nach der Impulsverdichtung auf dem Sekundärraster entsteht aufgrund der Rasterverdichtung eine gegenseitige Beeinflussung der Verdichtungspunkte. Nach Beendigung der Verdichtungsarbeiten wird das geeignete Bindemittel auf dem Boden verteilt und eingefräst. Aus betriebstechnischen Gründen ist die maximale Frästiefe, d.h. die Mächtigkeit der Ersatztragschicht mit 50 cm begrenzt. In Ausnahmefällen kann die Ersatztragschicht lagenweise in Lagenstärken von max. 50 cm hergestellt werden. Die Stabilisierung der Oberfläche resultiert eine Plattenwirkung, die einen

positiven Einfluss auf die Lastverteilung hat. Die Bauwerkslasten können durch die Ersatztragschicht gleichmäßig auf die Verdichtungspunkte verteilt werden.

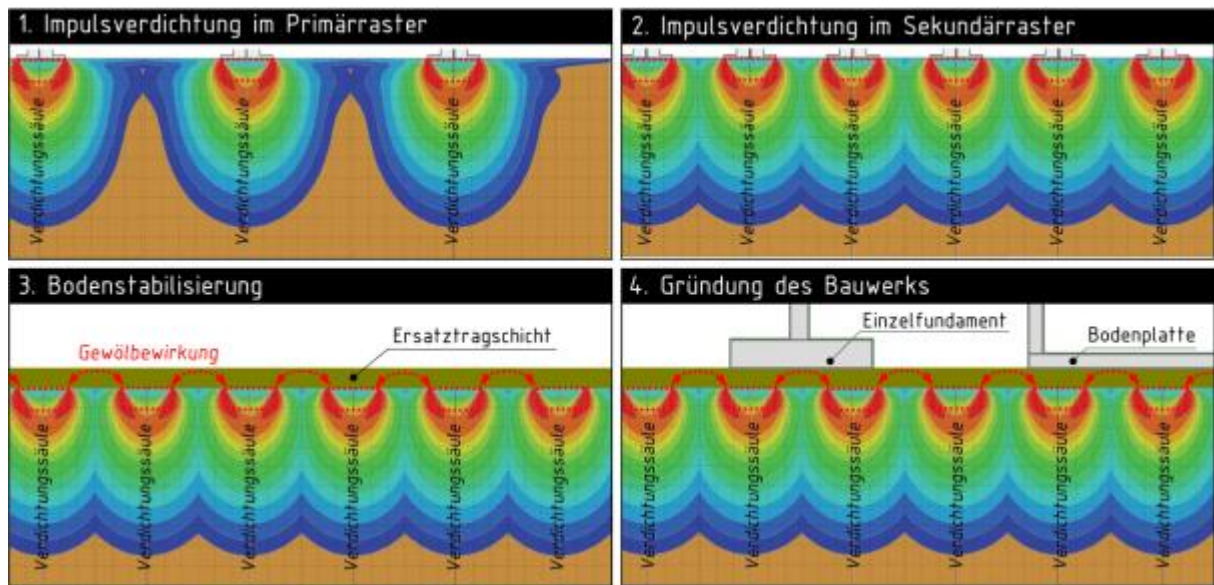


Abb. 16: Numerische Computersimulation der Tiefenwirkung bei der Hybridgründung mit Impulsverdichtung und Bodenstabilisierung (nach [4])

Der Einsatz des Impulsverdichters in Kombination mit einer Bodenstabilisierung bewirkt also neben der Erhöhung der Tragfähigkeit und der Homogenisierung der Untergrundeigenschaften auch eine Verbesserung der Lastverteilung und der Bettungsbedingungen. Abb. 17 gibt ein Beispiel für den Einsatz des Bodenverbesserungskonzeptes mit Impulsverdichtung und einer Kalk-Zement-Stabilisierung bei der Gründung von 4 Windkraftanlagen im Windpark Tortoman II in Rumänien.



Abb. 17: Bodenverbesserung mit Impulsverdichtung in Kombination mit Bodenstabilisierung für die Gründung einer Windkraftanlage in Tortoman, Rumänien [46]

- a) Impulsverdichtung des anstehenden Bodens,
 b) Herstellung der Ersatztragschicht - Aufstreuen des Bindemittels mit dem Streuwagen und
 c) Herstellung der Ersatztragschicht - Einfräsen des Bindemittels in den Boden

Gegebenenfalls kann die Impulsverdichtung auch mit anderen Bodenverbesserungsverfahren wie z.B. der DYNIV kombiniert werden. In diesem Fall erfolgt der Verdichtungsvorgang mit der DYNIV nach einem größeren Raster und die Zwischenfläche wird mit dem Impulsverdichter nachverdichtet. Bei der Verdichtung großflächiger Baustellen kann somit die Bauzeit deutlich verkürzt werden. Dieses Verdichtungskonzept wurde beispielsweise bei der Erweiterung des Container-Terminals im Hafen von Marseille, Südfrankreich angewendet (s. Abb. 18).



Abb. 18: Kombiniertes Verdichtungsverfahren mit DYNIV und Impulsverdichtung bei der Erweiterung eines Containerterminals in Marseille (Südfrankreich) [23]
 (links) Raupenkrane mit 15 m Fallhöhe für DYNIV
 (rechts) Impulsverdichter mit Verdichtungsfuß mit 2,0 m Durchmesser

3.3 Aufbau des Impulsverdichters

Der Impulsverdichter besteht aus folgenden drei Hauptkomponenten:

- dem Verdichtungsfuß,
- der Schlaghaube und
- dem hydraulischen Hammer mit dem Fallgewicht.

Der Verdichtungsfuß, die Schlaghaube und der hydraulische Hammer werden als eine Einheit auf den Ausleger eines Trägergeräts montiert. Abb. 19 illustriert den prinzipiellen Systemaufbau des Impulsverdichters. Die Beschreibung der Einzelkomponenten und der geeigneten Trägergeräte erfolgt in den nachfolgenden Unterkapiteln.

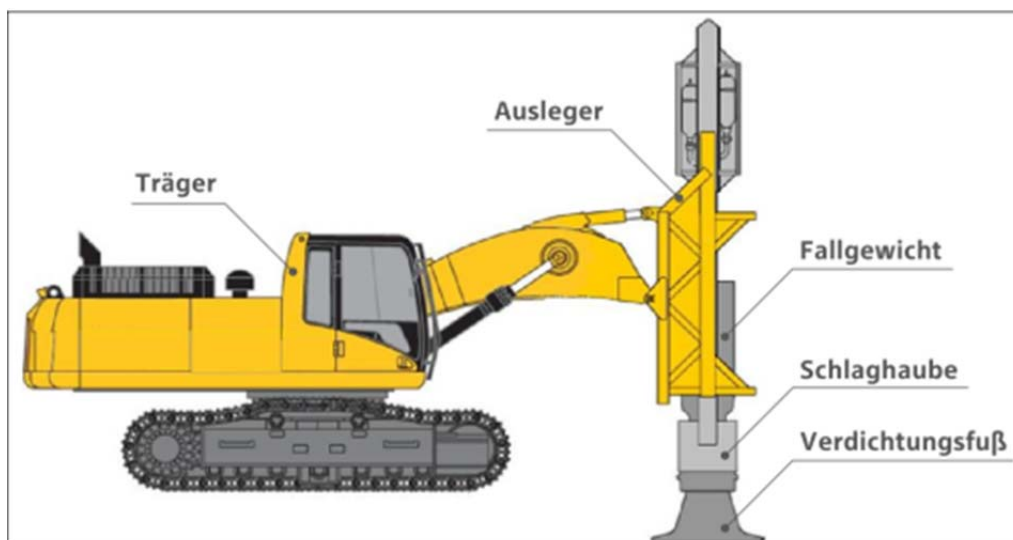


Abb. 19: Systemaufbau eines Impulsverdichters (adaptiert nach [46])

3.3.1 Verdichtungsfuß und Schlaghaube

Der Verdichtungsfuß ist eine kreisrunde, ebene Lastplatte aus Stahl, die im Regelfall einen Durchmesser von 1,5 m hat. Dieser ist mit der Schlaghaube des Impulsverdichters lose verbunden, damit nur stoßartige Druckkräfte auf die Verdichtungsplatte übertragen werden. Zur Erzielung einer Schalldämmung werden zwei Kunststoffringe (Ringstärke: 50 mm) zwischen den Verdichtungsfuß und der Schlaghaube eingebaut. Während der Verdichtung entstehen hohe Druckspannungen zwischen den beiden Elementen und die Ringe werden zusammengedrückt. Aufgrund des schnellen Verschleißes müssen diese ca. jede 2 Stunden Arbeit ausgetauscht werden. Laut Erfahrungen ermöglichen die Kunststoffringe eine Schallminderung um ca. 10 dB. Abb.20 zeigt eine detaillierte Skizze des Verdichtungsfußes.

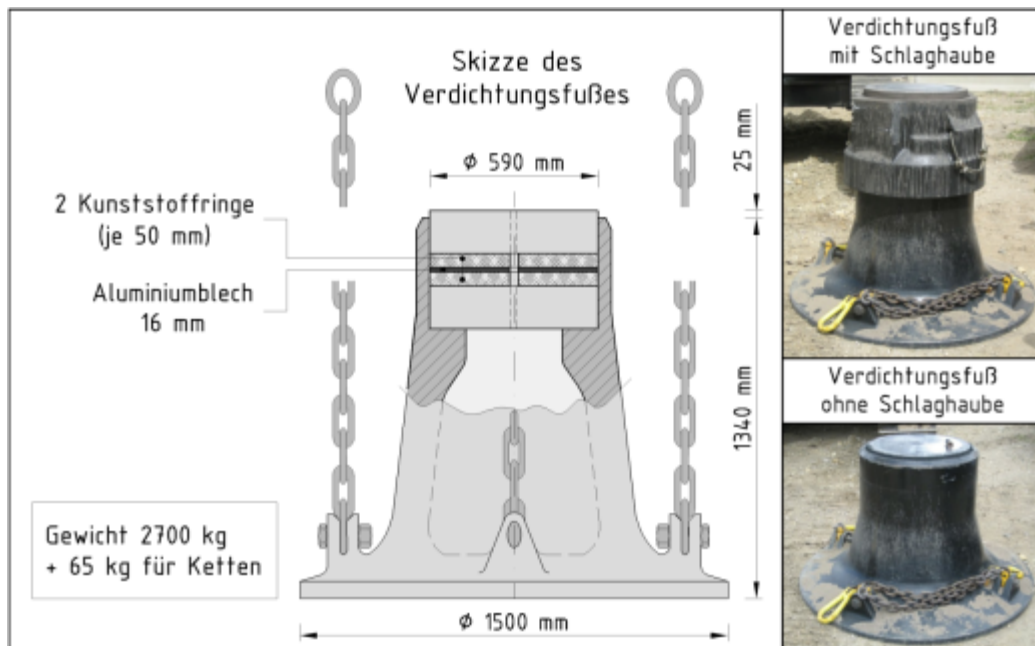


Abb. 20: Verdichtungsfuß (adaptiert nach [13, 1])

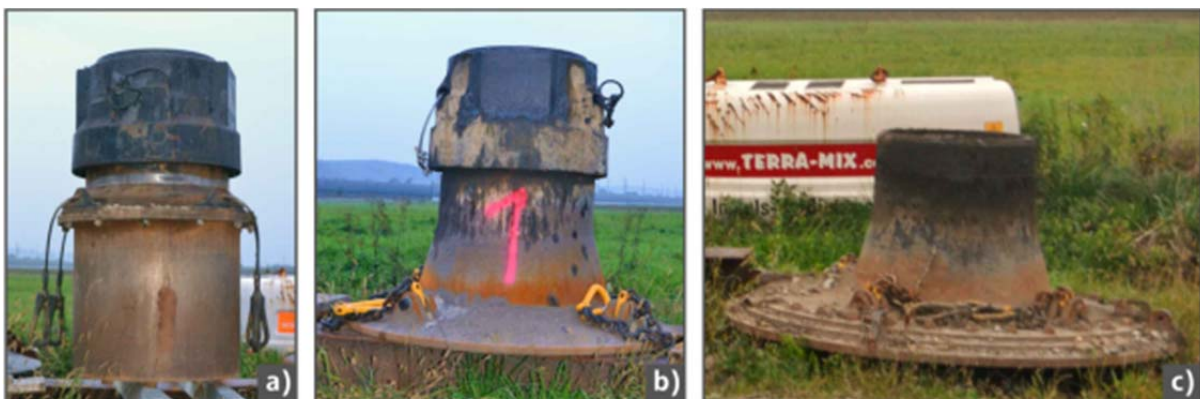


Abb. 21: Verdichtungsfüße mit verschiedenen Durchmessern
a) Durchmesser 0,8 m, b) Durchmesser 1,5 m und c) Durchmesser 2,0 m.

In Abb. 21 werden die derzeit eingesetzten Verdichtungsfüße gezeigt. Außer dem herkömmlichen Verdichtungsfuß mit Durchmesser von 1,5 m kommen in Ausnahmefällen auch Verdichtungsplatten mit Durchmesser von 0,8 und 2,0 m zum Einsatz. Der Verdichtungsfuß mit Durchmesser von 0,8 m wird bei einer Verdichtung unter Einzelfundamente und dieser mit Durchmesser von 2,0 m vorwiegend bei einer Flächenverdichtung eingesetzt.

Im Rahmen eines von der Österreichischen Forschungsförderungsgesellschaft (FFG) geförderten Forschungsprojektes wurden die Geräteparameter des Impulsverdichters anhand theoretischen und experimentellen Untersuchungen optimiert. Bei den durchgeführten numerischen Simulationen wurde unter anderem die Veränderung der Verdichtungswirkung durch Variation der Form des Verdichtungsfußes untersucht. Der Untergrund wurde als homogener bzw. geschichteter Halbraum mit Hilfe des numerischen Berechnungsprogrammes ABAQUS modelliert. Neben dem herkömmlichen Standardfuß (Fußform A in Abb. 21) wurden zwei modifizierte Fußformen (Fußform B und C in Abb. 22) untersucht [2]. Bei der Untersuchung wurden die Bodenparameter eines Bodens mit mittlerer Steifigkeit herangezogen.

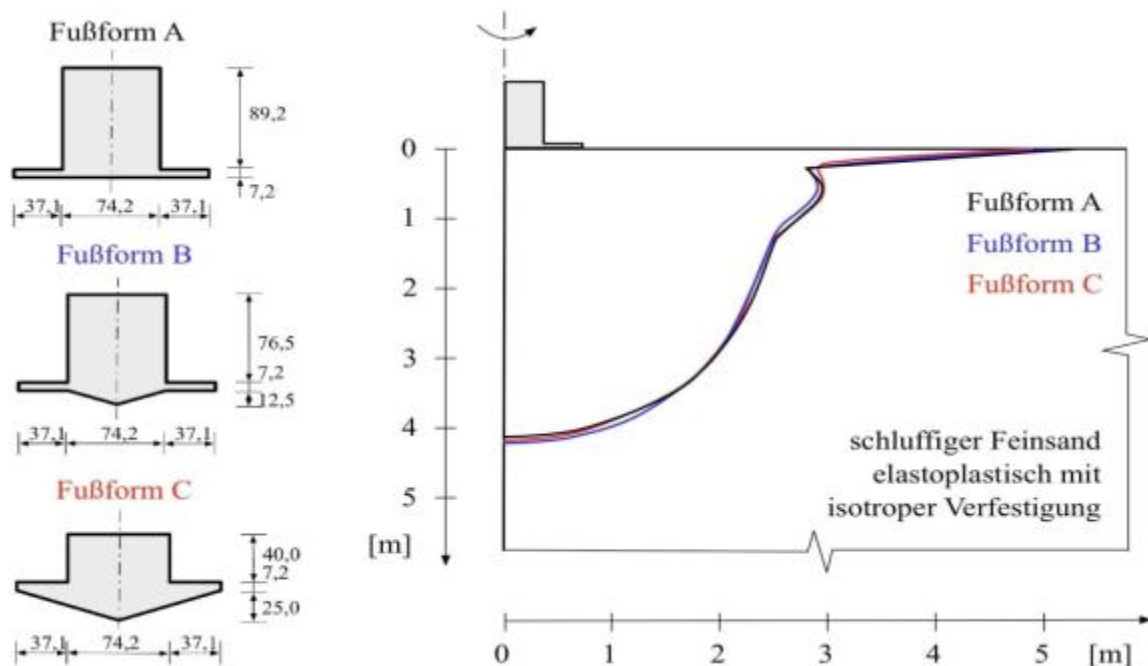


Abb. 22: Ergebnisse der numerischen Simulationen mit Variation der Form des Verdichtungsfußes [2]
Fußform A – Standardfuß, Fußform B und C – abgeänderte Fußformen

Die abgestimmte Formgestaltung soll eine Verbesserung der Verdichtung in schlecht verdichteten Bereichen durch Erzeugung von Spannungssingularitäten ermöglichen. Als Maß für die Gegenüberstellung der Tiefenwirkung für die drei unterschiedlichen Fußformen wurde die Grenzwert für die äquivalenten plastischen Verzerrungen von 0,02 gewählt [2]. Wie aus Abb. 22 ersichtlich, hat die Veränderung der Fußform einen geringen Einfluss auf die Tiefenwirkung.

3.3.2 Gerätetypen nach der Größe des Fallgewichtes

Die Gerätetypen von BSP International Foundations Ltd. unterscheiden sich nach der Größe des Fallgewichtes. Derzeit sind Fallmassen von 5 000, 7 000, 9 000, 12 000 und 16 000 kg (RIC 5000, RIC 7000, RIC 9000, RIC 12000 und RIC 16000) verfügbar. Die Abmessungen der verschiedenen Geräte sind der Abb. 23 und der Tabelle 21 zu entnehmen.

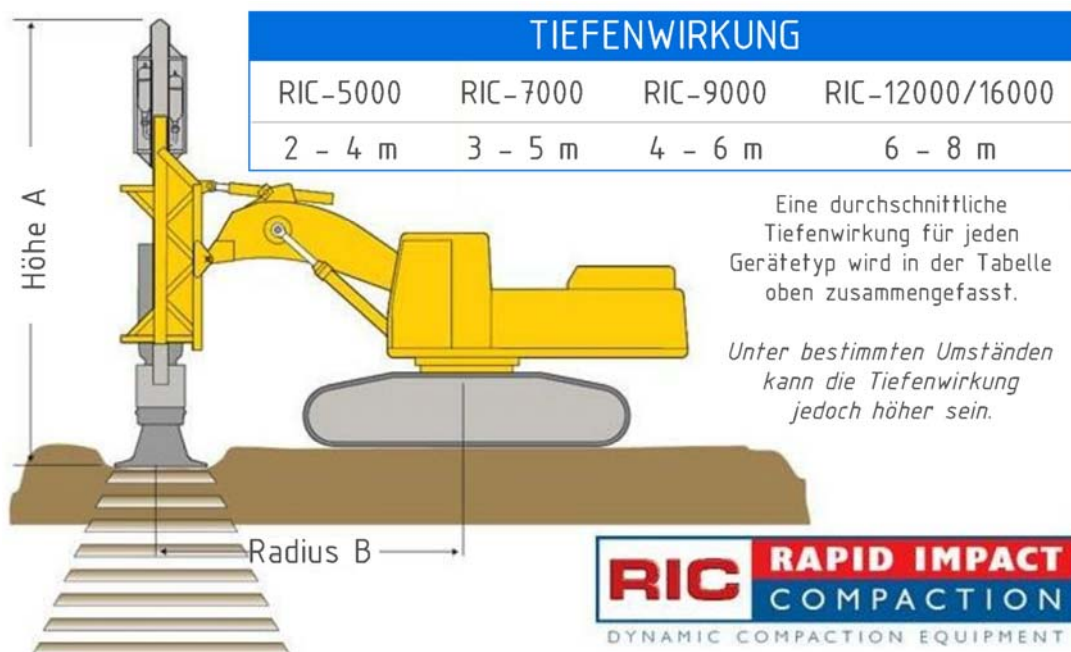


Abb. 23: Systemskizze des Impulsverdichters [13]

Tabelle 21: Abmessungen der verschiedenen Gerätetypen [13]

Gerätetyp	Abmessungen beim Betrieb		Abmessungen beim Transport			Herstellungsparameter		
	Höhe A	Radius B	Länge	Breite	Gewicht	Durchmesser Verdichtungsfuß	Typische Breite der Arbeitsstreifen	Typische Verdichtungs-raster
	[m]	[m]	[m]	[m]	[t]	[m]	[m]	[m]
RIC-5000	6.9	4.5	11.9	3.0	50	1.0	8	4.0
RIC-7000	7.5	5.0	12.9	3.5	63	1.5	9	4.5
RIC-9000	8.0	5.0	13.4	3.5	65	1.5	9	4.5
RIC-12000	8.1	5.4	13.4	4.2	89	1.6	10	5.0
RIC-16000	8.6	6.1	14.5	4.2	95	1.6	10	5.0

Wichtigere technische Parameter der verschiedenen Impulsverdichter werden in Tabelle 22 zusammengefasst.

Tabelle 22: Technische Daten von verschiedenen Impulsverdichtern [13]

Gerätetyp	Masse Fallgewicht [kg]	max. Energie [kJm]	Anzahl der Schläge [Schläge/min]	Betriebsdruck [bar]	Nennförderleistung [L/min]	Betriebsgewicht der Träger [t]
RIC-5000	5000	60	50	220	180-200	30-35
RIC-7000	7000	83	40-50	240	220-250	30-40
RIC-9000	9000	106	35-45	270	220-250	40-45
RIC-12000	12000	180	35-40	250	380-400	65-75
RIC-16000	16000	235	35-40	275	380-400	75-95

3.3.3 Trägergeräte

Die Verdichtungsvorrichtung wird in der Regel am Ausleger eines Raupenbaggers aufgebaut. Die RIC-Auslegerzylinder sind so ausgeführt, dass eine Montage an verschiedenen Trägermodelle ermöglicht wird. Das Betriebsgewicht des Trägers wird in Abhängigkeit von der Größe des hydraulischen Fallgewichtes gewählt. In Abb. 24 werden exemplarisch verschiedene Gerätekonfigurationen dargestellt. Eine Liste der häufig eingesetzten Trägergeräte wird in Tabelle 23 gezeigt.



Abb. 24: Verfügbare Impulsverdichter mit verschiedenen Trägergeräten [13, 46]
 Oben (von links nach rechts): RIC 5000 montiert auf Volvo EC290 in Papua-Neuguinea; RIC 7000 montiert auf CAT 345B in den USA; RIC 7000 montiert auf Daewoo DH450 in Großbritannien
 Unten (von links nach rechts): RIC 9000 montiert auf New Holland E485B in Österreich; RIC 9000 montiert auf CAT 345B in Südafrika; RIC 12000 montiert auf CAT 365B in Katar

Tabelle 23: Trägergeräte für den Impulsverdichter

Hersteller	Modell	Betriebsgewicht, [t]	Typ des Impulsverdichters
Catepillar (CAT)	345 B	43,00	RIC 7000, RIC 9000
Catepillar (CAT)	365 C	69,87	RIC 12000
Daewoo	DH450	44,50	RIC 7000
Hitachi	EX400	41,91	RIC 7000
Hitachi	EX450	46,70	RIC 9000
Hyundai	R480 LC-9	48,10 – 48,64	RIC 9000
Hyundai	R520 LC-9	51,00 – 51,54	RIC 9000
Kobelco	SK330 LC	34,70 – 35,30	RIC 5000
Kobelco	SK480 LC	48,50 – 49,00	RIC 9000
Komatsu	PC340 LC-7	32,96 – 33,91	RIC 5000
Komatsu	PC400 LC-7	42,40 – 43,30	RIC 7000
New Holland	E485B	50,30	RIC 9000
Volvo	EC290	29,30 – 30,30	RIC 5000
Volvo	EC460	45,70 – 47,20	RIC 9000

3.3.4 Maschinensteuerung

Zwecks Qualitätskontrolle wird auf dem Impulsverdichter ein automatisches Datenerfassungssystem zur Dokumentation von den Verdichtungsparametern installiert. Während des Verdichtungsvorgangs werden die Herstellungsparameter (Koordinaten des Verdichtungspunktes, Datum, Schlagzahl, Setzung letzter Schlag, Kratertiefe pro Verdichtungspunkt und Übergang, Gesamtkratertiefe pro Verdichtungspunkt, eingebrachte Verdichtungsenergie, erreichtes Abbruchkriterium und Setzung je Einzelschlag) in der Fahrerkabine aufgezeichnet und im Bordcomputer automatisch gespeichert (s. Abb. 25).



Abb. 25: Datenerfassungssysteme in der Fahrerkabine des Impulsverdichters [46]

Für die Messung der Setzungen je Einzelschlag wird auf dem Hammergerüst ein Messsystem mit Riemenantrieb (auf Abb. 26 mit rot gekennzeichnet) montiert. Für die Ermittlung der Verdichtungsenergie je Verdichtungspunkt und Übergang werden drei Magnetsensoren (auf Abb. 26 mit blau gekennzeichnet) auf der linken Seite des Stahlgerüsts integriert. Der Magnetsensor Nr. 3 gibt die Anzahl der Schläge und die Magnetsensoren 1 und 2 messen die Fallgeschwindigkeit der Schlaghaube.

Bei Vernachlässigung der Reibungsverluste berechnet sich die Auftreffgeschwindigkeit v bei freiem Fall gemäß der Beziehung

$$v = \sqrt{2gh} \quad (\text{Gl. 19}),$$

wo $g = 9,81 \text{ m/s}^2$ die Erdbeschleunigung und h die Fallhöhe ist. Aus Gleichung 19 lässt sich die exakte Fallhöhe h bestimmen:

$$h = \frac{v^2}{2g} \quad (\text{Gl. 20}),$$

Im freien Fall wird die potentielle Energie des Fallgewichtes in kinetische Energie umgewandelt, die beim Aufprall auf den Untergrund zur dynamischen Bodenverdichtung zur Verfügung steht. Bei Vernachlässigung der Verluste ergibt sie sich nach folgendem Zusammenhang:

$$E = m \times g \times h \times B \quad (\text{Gl. 21}),$$

wo m die Fallmasse und B die Anzahl der Schläge ist.

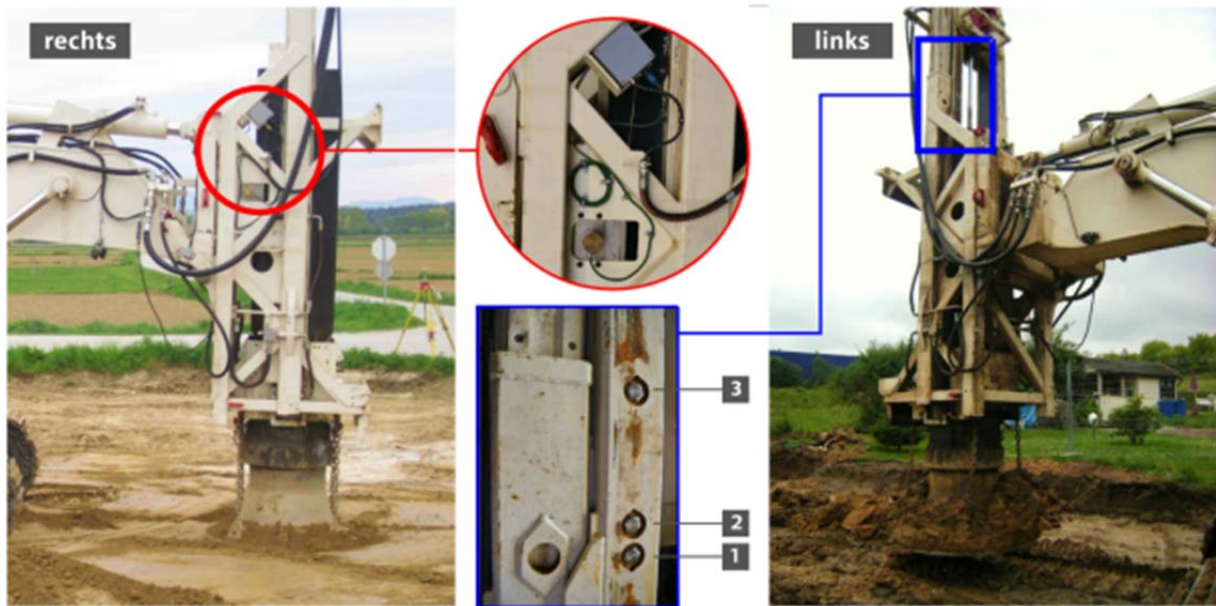


Abb. 26: Eingebaute Messsysteme am Stahlgerüst des hydraulischen Hammers

3.3.5 Transport des Impulsverdichters

Der Transport der Maschine von und zur Baustelle wird von Tiefladern übernommen.

Als eine Einheit lässt sich das Gerät transportieren, indem der Verdichtungsfuß entfernt und der hydraulische Hammer mit dem Ausleger in horizontaler Ruhestellung belassen wird. Nur ein paar Minuten nach dem Abladen kann die Maschine in Betrieb gesetzt werden (s. Abb. 27).



Abb. 27: Transport des Impulsverdichters als eine Einheit [13]

Bei Verkehrseinschränkungen und schlechte Zugänglichkeit des Standortes kann der Impulsverdichter in zwei Teilen transportiert werden. In diesem Fall wird der hydraulische Hammer mit dem Verdichtungsfuß und der Schlaghaube vom Trägergerät entfernt und beide Teile fahren getrennt nach der Baustelle. Dort werden diese ohne Hilfskräne zusammengesetzt (s. Abb. 28).



Abb. 28: Transport des Impulsverdichters in zwei Teilen [46]
 a) Schlaghammer mit Fallgewicht auf einem Tieflader geladen, b) Montage der Schlaghaube auf der Baustelle

3.4 Arbeitsweise

Der Impulsverdichter nutzt die Technologie des hydraulischen Schlaghammers aus, um den Untergrund mittels kontrollierter Schläge zu verdichten. Das Prinzip besteht darin, dass ein Fallgewicht mit einer definierten Masse (je nach Gerätetyp verschieden) mit relativ hoher Schlagfrequenz (in der Regel 40 bis 60 Schläge pro min) aus einer relativ geringen Höhe (<1,20 m) mehrmals auf die Schlaghaube des sog. Verdichtungsfußes fallengelassen wird [1, 9, 6].

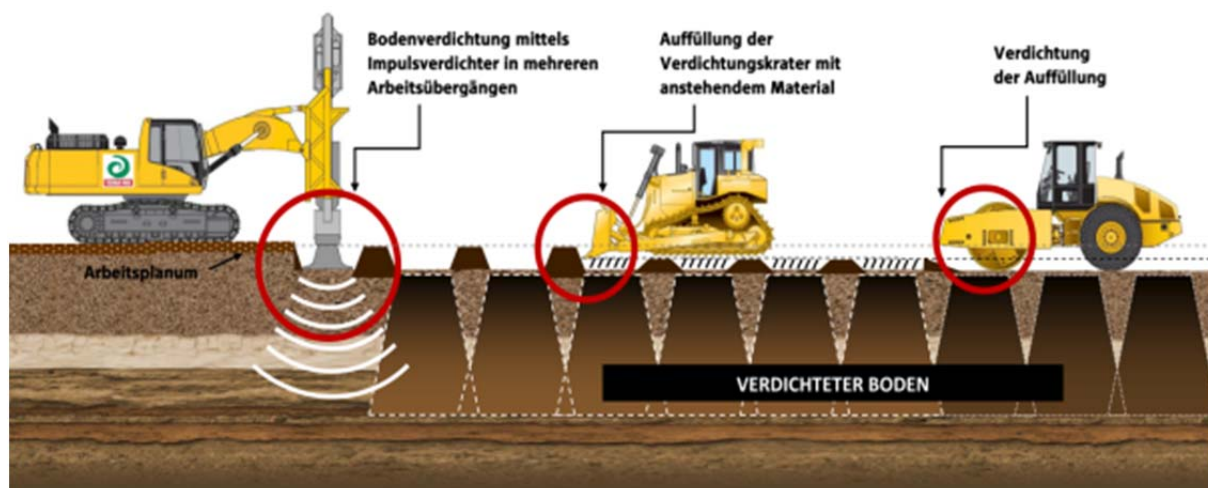


Abb. 29: Arbeitsweise bei der Impulsverdichtung [adaptiert nach [46]]

Die Abb. 29 veranschaulicht die Arbeitsweise bei der Impulsverdichtung. Zuerst wird der Verdichterfuß auf dem zu verdichtenden Punkt positioniert. Danach wird das Fallgewicht mittels hydraulischen Antriebs auf eine maximale Höhe von 1,20 m angehoben und fallengelassen. Der Verdichtungsfuß bleibt während des ganzen Verdichtungs Vorgangs in ständigem Kontakt mit dem zu verdichtenden Untergrund und ermöglicht auf diese Weise eine sichere und effiziente Energieeintragung in den Untergrund. Bei jedem Verdichtungsstoß des Fallgewichtes erfolgt eine lokale impulsartige Belastung des Untergrundes, wobei der Boden unter dem Verdichtungsfuß verdichtet wird. Der während des Verdichtungs Vorgangs entstandene Krater wird mit geeignetem Zugabematerial verfüllt und wiederum mit dem Impulsverdichter

verdichtet. Abschließend erfolgt nach jedem Verdichtungsübergang eine zusätzliche Oberflächenverdichtung, in der Regel mit einer Vibrationswalze [1, 6, 9].

Das Verhalten von nichtbindigen und bindigen Böden ist während der Impulsverdichtung unterschiedlich. Die Kombination von dynamischen Kräften (Stoßenergie) und Frequenz (Anzahl der Schläge / min) versetzt die einzelnen Körner der nichtbindigen, granularen Böden wie Kiese und Sande in Schwingungen, wodurch der Reibungswiderstand zwischen den Körnern reduziert wird. Folglich werden die im Boden enthaltenen Luft- und Wassereinschlüsse verdrängt, das Porenvolumen wird reduziert und die Lagerungsdichte erhöht. Mit zunehmender Schlagzahl der Verdichtungsstöße kommt es somit zu einer Pfropfenbildung (s. Abb 30.a). Bei jedem Übergang mit dem Impulsverdichter dringt der Pfropfen aus verdichtetem Boden ähnlich einem Pfahl tiefer in den Untergrund ein.

Im Gegensatz zu nichtbindigen Böden weisen bindige Böden ein komplexeres Verhalten während der Impulsverdichtung auf. Die Schlagarbeit des Impulsverdichters bewirkt eine Überwindung der Haftfestigkeit der einzelnen Bodenkörner zueinander, wodurch die echte Kohäsion und zusätzlich die Korn-zu-Korn Reibung verringert werden. Folglich werden die Luft- und Wasserporenräume reduziert [51]. Nach einer gewissen Anzahl von Verdichtungsstößen kommt es zu einer seitlichen Bodenverdrängung an der Oberfläche (s. Abb 30.b). Zur Verbesserung der Tragfähigkeit des Untergrundes wird der Krater bei bindigen Böden vor dem nächsten Übergang mit geeignetem granularem Material wie Kies oder Schotter verfüllt.

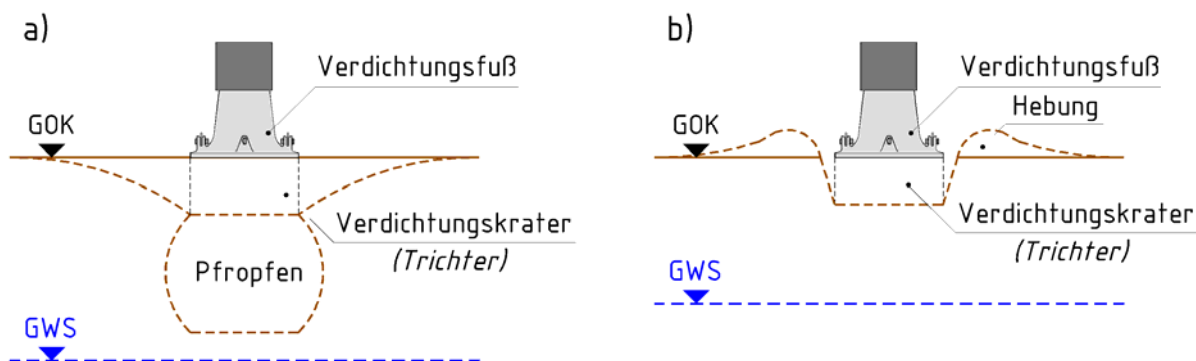


Abb. 30: Verhalten von nichtbindigen und bindigen Böden bei der Impulsverdichtung
a) Pfropfenbildung bei nichtbindigen Böden, b) Hebungen bei bindigen Böden

Weiters in wassergesättigten Böden kommt es mit steigender Schlagzahl der Verdichtungsstöße zu einer Erhöhung der Porenwasserdrücke. Nach einer gewissen Anzahl von Schlägen benötigt der verdichtete Boden eine Ruhepause vor dem nächsten Verdichtungsübergang zum Abbau der Porenwasserdrücke und zum Aufbau effektiver Spannungen.

Ähnlich wie bei der dynamischen Intensivverdichtung (DYNIV) erfolgt die Verdichtung in einem definierten Verdichtungs raster in einem oder mehreren Übergängen. Da die Anzahl der notwendigen Verdichtungspunkte nicht nur von der Bodenart sondern u.a. auch von den Bauwerkslasten abhängig ist, erfolgt generell eine Anpassung des Rasters unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen. Grundsätzlich lassen sich folgende drei Verdichtungs rastertypen unterscheiden (s. Abb. 31):

- Raster 1 mit einer linearen Abfolge und einem Arbeitsgang;
- Raster 2 mit einfachem Pilgerschritt und zwei Arbeitsgängen;
- Raster 3 mit doppeltem Pilgerschritt und drei Arbeitsgängen.

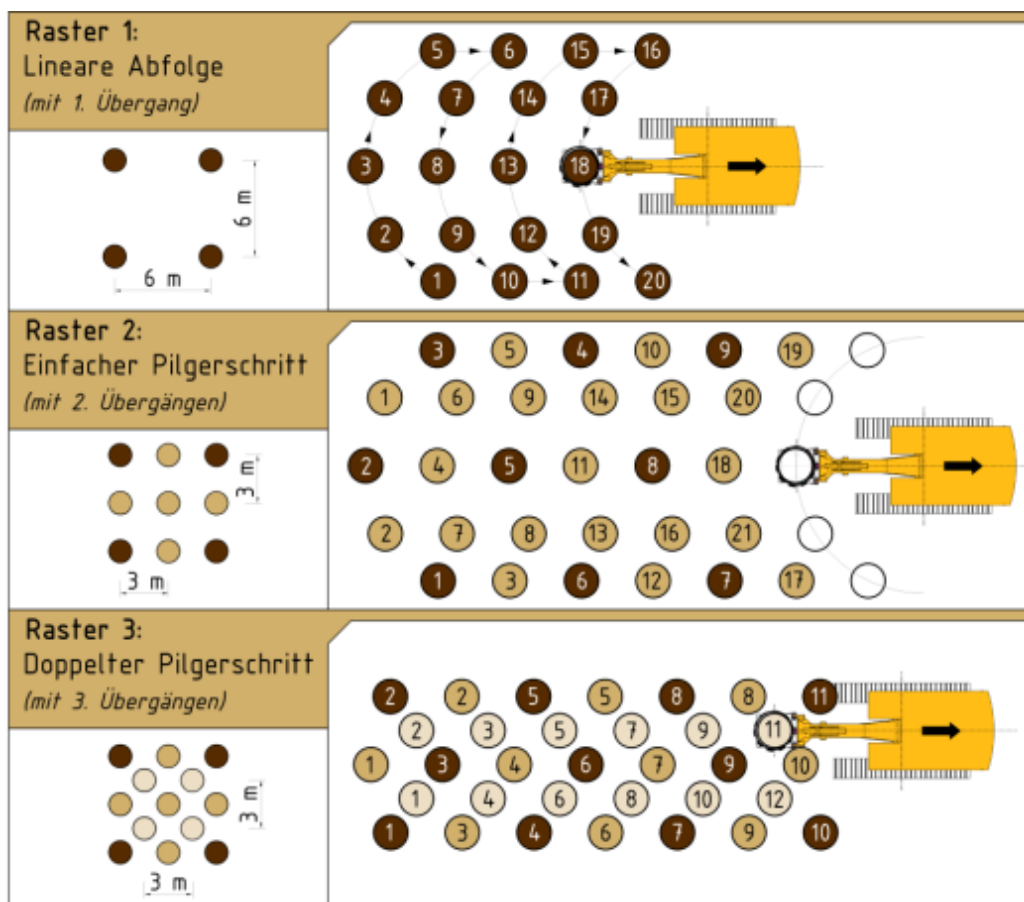


Abb. 31: Verdichtungs raster (adaptiert nach [4])

Da das Grundprinzip der Impulsverdichtung, wie bei der dynamischen Intensivverdichtung auf impulsartigen Belastungen beruht, ist der Vergleich beider Methoden hinsichtlich Verdichtungsenergie und Verdichtungsleistung sinnvoll.

Die derzeit verfügbaren Impulsverdichter ermöglichen bei der maximalen Fallhöhe von 1,2 m eine Verdichtungsenergie von 59 bis 188 kNm (s. Abb. 32 links), damit ist bei einer Schlagfrequenz von 40 bis 60 Schlägen pro Minute eine Verdichtungsleistung von 2,4 bis 11,3 MNm/min erzielbar.

Im Vergleich dazu wird bei der dynamischen Intensivverdichtung (DYNIV) ein schwereres Fallgewicht von einer größeren Höhe mit einer Schlagfrequenz von nur 1 bis 2 Stöße pro Minute fallen gelassen. Unter der Annahme, dass das Gewicht der Fallmasse von 10 bis 15 t und die Fallhöhe von 5 bis 15 m variiert, liegt die Verdichtungsenergie zwischen 490 und 2207 kNm (s. Abb. 32 rechts), was eine Verdichtungsleistung von 0,5 bis 4,4 MNm/min ergibt. Aus Abb. 32 ist ersichtlich, dass die Verdichtungsleistung bei DYNIV deutlich geringer als beim Impulsverdichter ist.

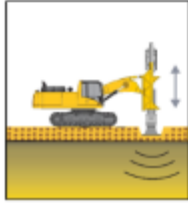
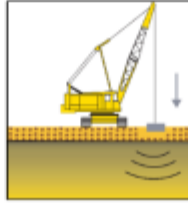
Impulsverdichtung (IMPV)		Dynamische Intensivverdichtung (DYNIV)	
	Schlagzahl:	40-60 /min	
	Fallmasse:	5,7,9,12 und 16 t	
	Fallhöhe:	1,2 m	
Verdichtungsleistung:		Verdichtungsleistung:	
2,35 - 11,30 MNm/min		0,49 - 4,41 MNm/min	
Energie:		Energie:	
E = 5 t x 9,81 m/s ² x 1,2 m = 58,860 kNm		E = 10 t x 9,81 m/s ² x 5 m = 490,500 kNm	
E = 7 t x 9,81 m/s ² x 1,2 m = 82,404 kNm		E = 15 t x 9,81 m/s ² x 15 m = 2207,250 kNm	
E = 9 t x 9,81 m/s ² x 1,2 m = 105,948 kNm			
E = 12 t x 9,81 m/s ² x 1,2 m = 141,264 kNm			
E = 16 t x 9,81 m/s ² x 1,2 m = 188,352 kNm			

Abb. 32: Vergleich der Verdichtungsleistung bei Impulsverdichtung und bei DYNIV (adaptiert nach [4])

3.5 Wellenausbreitung und Erschütterungswirkung

Bei der dynamischen Bodenverdichtung (IMPV, DYNIV, RDV, RSV) werden über den Untergrund Schwingungen in die Nachbarbebauung übertragen. Neben der Gefahr vor Bauwerksschäden, wie Gebäuderisse können die Erschütterungen auch erhebliche Belästigungen von Menschen verursachen. Die Größe der zu erwartenden Schäden hängt einerseits von der Erschütterung (Intensität, Dauer, Häufigkeit, Frequenzinhalt, etc.), andererseits vom Gebäude (Bautyp, Baumaterialien, Ausführungsqualität, Eigenfrequenzbereich, etc.) ab.

Die Beurteilung der Bauwerkserschütterungen erfolgt anhand von Messungen der Erschütterungsimmissionen. Bei Einhaltung bestimmter Grenzwerte, die in Regelwerken vorgeschrieben werden, kann die Erschütterungswirkung vermindert bzw. vermieden werden. Die entsprechenden Grenzwerte wurden in den einzelnen Ländern auf der Basis von zahlreichen Untersuchungen festgelegt. Unterschiede bei den verschiedenen Normen bestehen auch darin, dass unterschiedliche Referenzwerte als Intensitätskriterien der Erschütterung gewählt werden. In Tabelle 24 werden ausgewählte Regelungen zur Beurteilung der Erschütterungswirkung angeführt.

Tabelle 24: Regelwerke zur Beurteilung von Bauwerkserschütterungen

Land	Regelwerk	Ausgabe
Österreich	ÖNORM S 9020 – Bauwerkserschütterungen; Sprengerschütterungen und vergleichbare impulsförmige Immissionen.	1986
Deutschland	DIN 4150-3 – Erschütterungen im Bauwesen, Einwirkungen auf bauliche Anlagen	1999
Schweiz	SN 640 312 a – Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke	1992
Großbritannien	BS 7385 – Evaluation and measurement for vibration in buildings	1990
USA	ANSI S2.47 – Vibration of Buildings – Guidelines for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings	1990
ISO-Normen	ISO 4866 – Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effect on buildings	1990

In den meisten Ländern hat sich in den letzten Jahren die maximal gemessene Partikelschwinggeschwindigkeit als Beurteilungsgröße der Erschütterung etabliert. Da es sich hierbei um vektorielle Größen handelt, wird die Verwendung der zeitgleichen resultierenden Schwinggeschwindigkeit v_R vorgeschrieben, die aus den drei orthogonalen Komponenten v_x , v_y und v_z zu ermitteln ist [7]:

$$v_{R,max} = \sqrt{v_x^2(t) + v_y^2(t) + v_z^2(t)} \quad \text{in [mm/s]} \quad \text{(Gl.22),}$$

wo

- v_x Horizontalkomponente „parallel“ \hat{z} , in Richtung zur Erschütterungsquelle (Verdichtungsfuß), parallel zur Wirkungssachse;
- v_y Horizontalkomponente, normal dazu;
- v_z Vertikalkomponente.

In Abhängigkeit von Konstruktionsart und damit unterschiedlichem Verhalten gegenüber der Erschütterungseinwirkungen werden die Bauwerke gemäß ÖNORM S 9020 in vier Gebäudeklassen eingeteilt (s. *Tabelle 25*).

Tabelle 25: Richtwerte der zulässigen maximalen resultierenden Schwinggeschwindigkeit nach ÖNORM S 9020 [7]

Klasse	Gebäudetyp	Zulässige maximale resultierende Schwingschnelle $v_{R,max}$ [mm/s]		
		selten auftretende Erschütterungen [wöchentlich]	häufig auftretende Erschütterungen [täglich]	ständige Erschütterungen
I	Industrie- und Gewerbebauten: <ul style="list-style-type: none"> • Stockwerkrahmen (mit oder ohne Kran) mit tragender Konstruktion aus Stahl oder Stahlbeton • Wandscheibenbauten • Ingenieurmäßige Holzkonstruktionen 	30	24	12
II	Wohnbauten: <ul style="list-style-type: none"> • Stockwerkrahmen • Wandscheibenbauten • Gebäude mit Decken aus Ortbeton • Aufgehendes Mauerwerk aus Betonsteinen, Ziegeln mit Zement- oder Kalkmörtel 	20	16	8
III	Gebäude mit geringer Rahmensteifigkeit als bei I und II	10	8	4
IV	Besonders erschütterungsanfällige denkmalgeschützte Gebäude	5	4	2

Im Rahmen des o.g. Forschungsprojektes wurde die Wellenausbreitung und die Erschütterungswirkung bei der Impulsverdichtung mit Hilfe von numerischen Berechnungen und großmaßstäblichen experimentellen Untersuchungen erfasst. Die Auswertung der Ergebnisse der theoretischen Analyse und der Schwingungsmessungen erfolgte gemäß ÖNORM S 9020. Folglich wurden Abstandsgesetze ermittelt, die das Abklingen der durch den Verdichtungsvorgang indizierten maximalen resultierenden Schwinggeschwindigkeit an der Oberfläche mit zunehmendem Abstand zum Verdichtungspunkt angeben. In Abb. 33 sind die Ergebnisse der numerischen Simulationen dargestellt, die für drei Böden unterschiedlicher Steifigkeit durchgeführt wurden [2]:

- Boden geringer Steifigkeit – sandiger Schluff (saSi)
- Boden mittlerer Steifigkeit – schluffiger Feinsand (siFSa)
- Boden hoher Steifigkeit – sandiger Kies (saGr).

Die Sicherheitsabstände wurden für einen Impulsverdichter mit einer Fallmasse von 9 t ermittelt. Es ist ersichtlich, dass der Boden mit der geringsten Steifigkeit (sandiger Schluff) das ungünstigste Erschütterungsverhalten aufweist. Die Erschütterungen klingen umso schneller ab, je geringer das Querkontraktionsverhalten des Untergrundes ist. Dabei muss berücksichtigt werden, dass auch der Wassergehalt eine wesentliche Rolle spielt, da je höher dieser ist, desto größer ist die Querdehnzahl. Ferner ist zu erwähnen, dass mit zunehmender Verdichtung auch die Erschütterungswirkung verstärkt wird. Der Grund dafür ist, dass mit zunehmender Schlagzahl auch die Steifigkeit des Bodens zunimmt. Für Bauwerke der Gebäudeklasse III ergibt sich gemäß ÖNORM S 9020 Sicherheitsabstand von 21 bis 36 m zum Verdichtungspunkt [2].

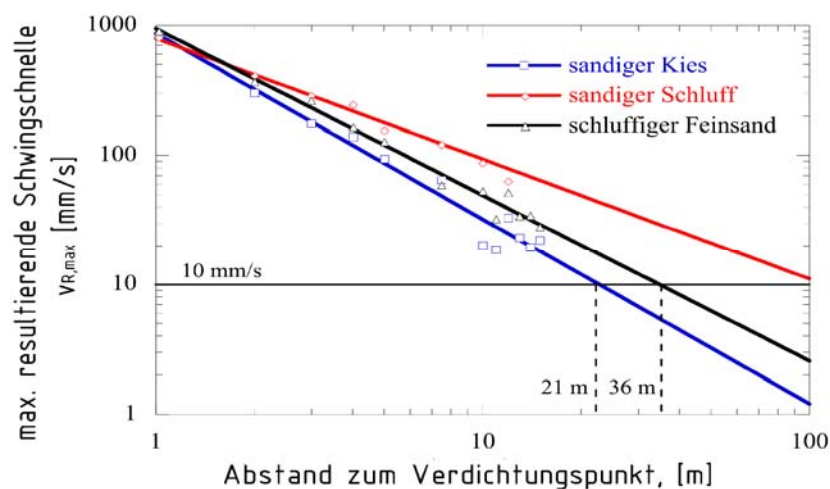


Abb. 33: Maximale resultierende Schwinggeschwindigkeit $v_{R,max}$ im Abstand vom Verdichtungsfuß – Numerisch ermittelte Abstandbeziehungen für drei unterschiedliche Böden bei der Impulsverdichtung mit einer Fallmasse von 9 t [2]

In Abb. 34 werden die aufgezeichneten Messergebnisse für eine Impulsverdichtung mit Fallmasse von 9 t zusammengefasst. Es wurden die niedrigsten Schwinggeschwindigkeiten bei der Verdichtung von locker gelagerten sandigen Kiesen gemessen. Die stärksten Erschütterungen treten bei der Impulsverdichtung von sehr dicht gelagerten sandigen Kiesen auf. Dazwischen liegen die Schwinggeschwindigkeiten infolge Verdichtung von sandigen Schluffen und kiesigen, schluffigen Sanden. Unter Berücksichtigung des zulässigen Grenzwerts der maximalen resultierenden Schwinggeschwindigkeit von 10 mm/s für Gebäudeklasse III ergeben sich in Abhängigkeit von den Untergrundverhältnissen Sicherheitsabstände zum Verdichtungsfuß von 11 bis 34 m [2].

In Abb. 35 ist der Vergleich der Erschütterungswirkung bei der Impulsverdichtung und bei der dynamischen Intensivverdichtung (DYNIV) dargestellt. Schwingungsmessungen haben gezeigt, dass in einem Abstand von 30 m zum Verdichtungspunkt die maximale Bodenschwinggeschwindigkeit zwischen 1 und 5 mm/s variiert, während bei der DYNIV in der gleichen Entfernung Schwinggeschwindigkeiten von rund 10 mm/s auftreten. Beim Impulsverdichter wurden Schwinggeschwindigkeiten von rund 10 mm/s bei 17 m gemessen [7]. Es ist eindeutig zu erkennen, dass die Bodenverdichtung mit dem Impulsverdichter kleinere Sicherheitsabstände zu Nachbarbebauung, als die Bodenverdichtung mit DYNIV erfordert. Dieser Vorteil der Impulsverdichtung ist besonders wichtig bei Bodenverbesserungsmaßnahmen im städtischen Bereich.

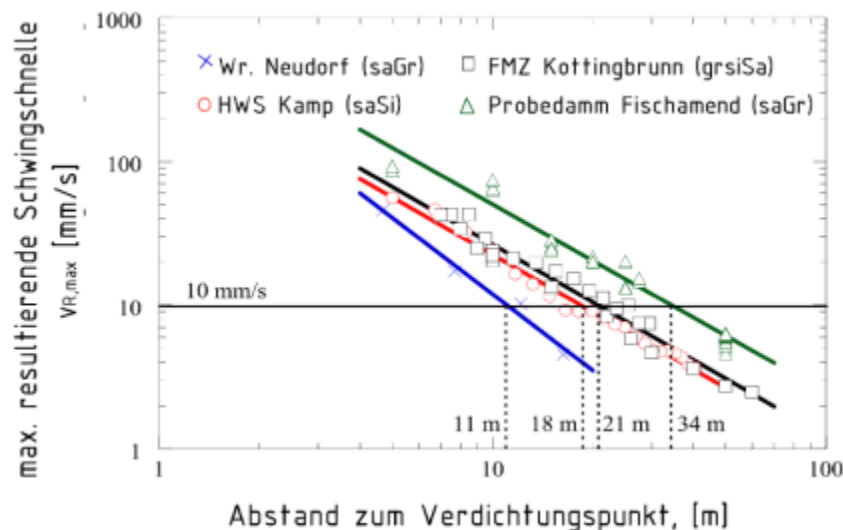


Abb. 34: Maximale resultierende Schwingschnelle $v_{R,max}$ im Abstand vom Verdichtungsfuß - Experimentell ermittelte Abstandbeziehungen für vier unterschiedliche Untergrundverhältnissen bei der Impulsverdichtung mit einer Fallmasse von 9 t [2]

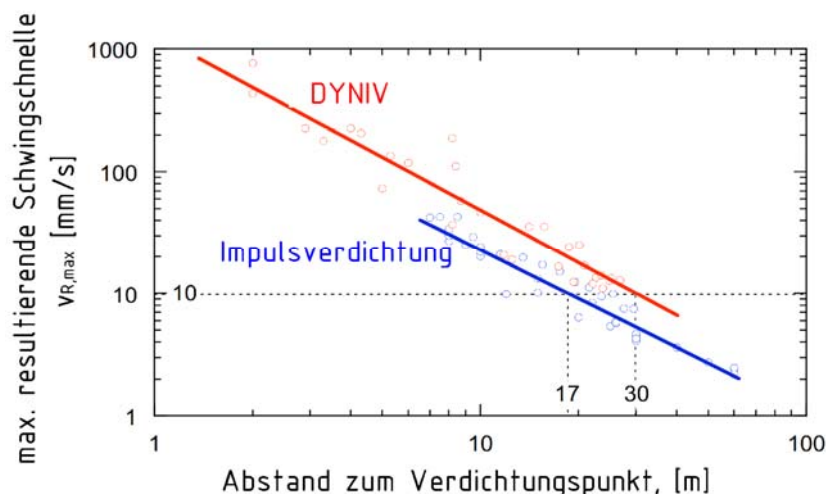


Abb. 35: Maximale resultierende Schwingschnelle $v_{R,max}$ im Abstand vom Verdichtungspunkt bei der Impulsverdichtung und bei der DYNIV [7]

Ähnliche Gegenüberstellung der Impulsverdichtung und der dynamischen Intensivverdichtung (DYNIV) wurde 2011 von Fa. Geopac Inc. in Kanada durchgeführt. Die Forschungsarbeit beruht auf Messungen der Erschütterungsimmissionen bei den Bodenverbesserungsmaßnahmen für die Erweiterung eines Flughafenhangars in Québec, wo beide Verdichtungsverfahren angewendet wurden. Die Ergebnisse der Feldmessungen werden in Abb. 36 zusammengestellt. Unter Berücksichtigung des geforderten Grenzwertes der maximalen resultierenden Schwinggeschwindigkeit von 20 mm/s (gemäß Building Code 2005) wird ein Sicherheitsabstand zur Nachbarbebauung von 10 m für die Impulsverdichtung und 20 m für die dynamische Intensivverdichtung ermittelt [29].

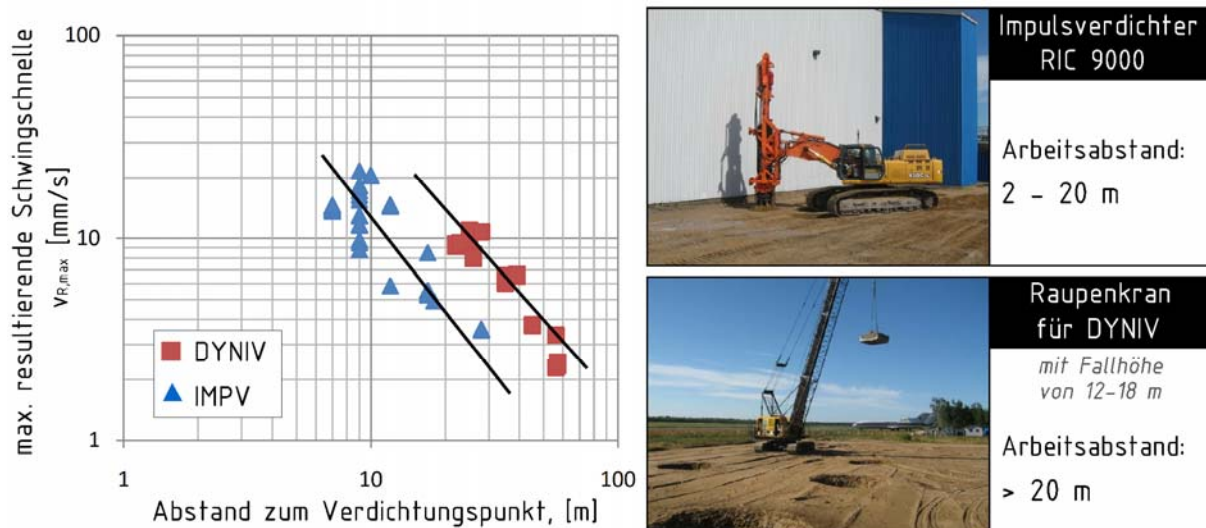


Abb. 36: Erschütterungen bei Impulsverdichtung und bei DYNIV (adaptiert nach [29])
 a) Maximale resultierende Schwingschnelle $v_{R,max}$ im Abstand vom Verdichtungspunkt
 b) Maximale resultierende Schwingschnelle $v_{R,max}$ in Abhängigkeit vom Frequenzbereich

3.6 Tiefenwirkung der Verdichtung

Die erste grundlagenorientierte Untersuchung der Verdichtungswirkung des Impulsverdichters wurde ebenfalls im Rahmen des Forschungsprojektes „Dynamische Bodenverdichtung mit dem Impulsverdichter“ durchgeführt. Anhand numerischen Simulationen mit dem Berechnungsprogramm ABAQUS wurde die Tiefenwirkung ermittelt, wobei als Beurteilungsmaß die äquivalenten plastischen Verzerrungen (PEEQ) im Boden herangezogen wurden. Auf Abb. 37 sind ausgewählte Ergebnisse der numerischen Analysen dargestellt.

Bei nichtbindigen Böden (sandige Kiese) mit geringer Querdehnzahl ist eine größere Verdichtungstiefe erkennbar. Bei gemischtkörnigen Böden (schluffige Feinsande) mit mittlerer Querdehnzahl tendiert die Verdichtung wieder in die Tiefe, jedoch mit zunehmender Schlagzahl beginnt eine seitliche Verdrängung an der Oberfläche. Die bindigen Böden (sandige Schluffe) mit hoher Querdehnzahl zwangsläufig nähern sich dem hydrostatischen Spannungszustand und besitzen daher grundsätzlich ein geringeres Verdichtungspotenzial. Bereits nach wenigen Schlägen ist eine verstärkte laterale Wirkung zu erkennen. Eine zusätzliche Verdichtung in größerer Tiefe passiert lediglich durch den tiefer in den Untergrund eindringenden Verdichtungskrater [2].

Im homogenen Untergrund breiten sich Bereiche konstanter äquivalenter plastischer Verzerrungen „zwiebelartig“ aus, d.h. der Boden wird sowohl nach unten als auch seitlich in einer ähnlichen Größenordnung verdichtet. Bei geschichtetem Untergrund ist das Verdichtungsverhalten hingegen wesentlich komplexer, da an der Schichtgrenze Wellenreflexionen und Wellenrefraktionen auftreten. In Abhängigkeit vom Schichtaufbau und Schichtstärke konnten bei den Simulationen unterschiedliche Verdichtungseffekte beobachtet werden. Für die praktische Anwendung ist allerdings die Schichtfolge „locker auf dicht“ bzw. „weich auf steif“ maßgebend. Durch die Wirkung der unten liegenden Schicht mit hoher Steifigkeit wird bei den Verdichtungsstößen ein höherer Widerstand aktiviert, der ähnlich einem „Hammer-Amboss-Effekt“ die Verdichtungswirkung in der oben liegenden Schicht mit geringerer Steifigkeit konzentriert [2].

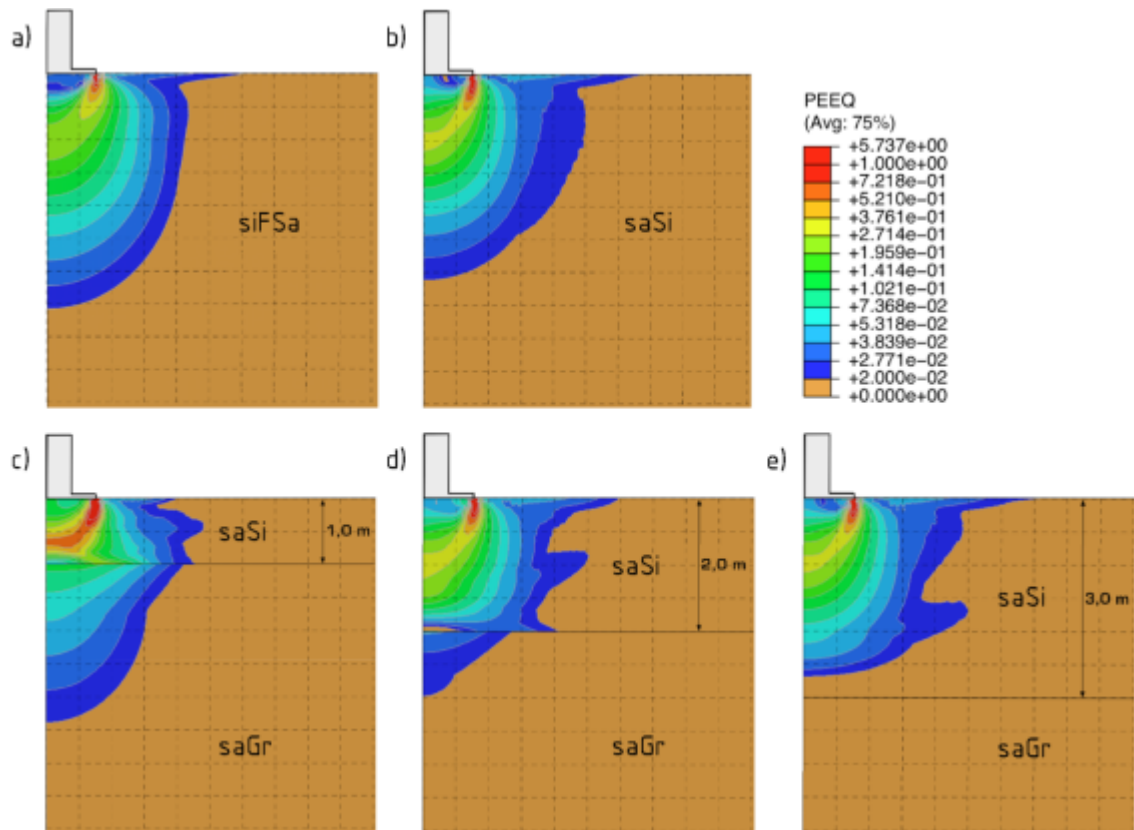


Abb. 37: Ausbreitung der äquivalenten plastischen Verzerrungen im Untergrund nach dem 1. Verdichtungsstoß [2]

- a) Homogener Untergrund. Schluffiger Feinsand.
 b) Homogener Untergrund. Sandiger Schluff.
 c) Geschichteter Untergrund. Sandiger Schluff auf sandigem Kies. Dicke der Deckschicht 1,0 m.
 d) Geschichteter Untergrund. Sandiger Schluff auf sandigem Kies. Dicke der Deckschicht 2,0 m.
 e) Geschichteter Untergrund. Sandiger Schluff auf sandigem Kies. Dicke der Deckschicht 3,0 m.

Je nach Bodenart wird bei den numerischen Simulationen eine Tiefenwirkung von mindestens 4,5 bis 5 m ermittelt, wobei die Verdichtungstiefe umso größer ist, je grobkörniger der Boden ist [2]. Die Ergebnisse entsprechen der Erfahrungen in der Baupraxis, einer maximal erreichbaren Verdichtungstiefe von etwa 4 bis 6 (7) m.

Tabelle 26: Tiefenwirkung der Impulsverdichtung in Abhängigkeit von der Bodenart [33]

Bodenart	Sande	schluffige Sande	sandige Schluffe	künstliche Auffüllung
Tiefenwirkung	6 m	4,5 m	3,5 – 4,5 m	3 – 5 m

3.7 Verdichtungskontrolle und Überwachung

Eine wesentliche Komponente der Qualitätskontrolle bei der Impulsverdichtung ist die laufende Dokumentation der Herstellungsparameter während des Verdichtungsprozesses. Sämtliche Parameter wie Punktnummer im Verdichtungsraaster und der jeweilige Übergang mit der dazu gehörigen Schlagzahl, Setzung je Schlag, Eindringtiefe etc. werden kontinuierlich aufgezeichnet und dokumentiert. Die Aufnahme dieser Parameter ermöglicht eine Bewertung der Arbeitsgänge. Mit der Aufzeichnung der Verfahrensparameter während der Verdichtung lässt sich der Verdichtungsprozess kontrollieren bzw. kann die Bestimmung der erforderlichen Verdichtungsübergänge ermöglicht werden.

Nach Beendigung der Verdichtungsarbeiten sind Untersuchungen notwendig, um die Verdichtungsarbeiten beurteilen zu können. In der Praxis kommen dabei vorwiegend Rammsondierungen und auch Drucksondierungen zum Einsatz, CBR- und Lastplattenversuche sind weniger geeignet, da damit, wie schon erwähnt, nur der oberflächennahe Bereich überprüft wird. Alternativ kann der Nachweis des Verdichtungserfolges auch mit Bohrlochrammsondierungen (BDP bzw. SPT) erfolgen, wie die Praxis in den USA und Kanada ist.

Zur Verdichtungskontrolle werden in der Regel Rammsondierungen vor und nach der Impulsverdichtung durchgeführt. Durch Vergleich der gemessenen Eindringwiderstände vor und nach der Verdichtung kann die Tiefenwirkung der Verdichtung erkannt werden. Die Bewertung soll sorgfältig erfolgen, da zahlreiche Faktoren die Messergebnisse beeinflussen können. Es muss berücksichtigt werden, dass in bindigen und gemischtkörnigen Böden unmittelbar nach der Impulsverdichtung kleinere Sondierwiderstände zufolge dem im Zuge der Verdichtung erhöhten Porenwasserdruck gemessen werden können. Diese bauen sich erst einige Zeit nach der Verdichtung ab. In diesen Fällen ist es daher zweckmäßig, die Rammsondierungen erst einige Tage nach den Verdichtungsarbeiten durchzuführen.













3.8 Anbieter

Die nachfolgenden zwei Tabellen geben einen Überblick aller Unternehmen, die derzeit mit der Impulsverdichtung in Europa und weltweit tätig sind.

Tabelle 27: Unternehmen, die in Europa im Bereich Impulsverdichtung tätig sind

Unternehmen		Land	Offizielle Seite
	BSP International Foundations Ltd.	UK	http://www.bsp-if.com
	Terra-Mix	Österreich, Deutschland, Bulgarien, Ungarn, Polen, Slowenien, Rumänien	http://www.terra-mix.com/
kein Logo	Richardson Piling	Niederlande	http://piling-solutions.com/
	Menard	Frankreich	http://www.menard-web.com/
	Keller Fondations Spéciales SAS	Frankreich	http://www.keller-france.com/
	Balfour Beatty Ground Engineering	UK	http://www.bbge.com
	Cofra	Niederlande	http://cofra.com

Tabelle 28: Unternehmen weltweit

Unternehmen	Land	Offizielle Seite
 GeoStructures Inc	USA	http://www.geostructures.com/
 Geopac Inc (Menard Group)	USA, Kanada	http://www.geopac.ca/
 Geosolv	Kanada	http://www.geosolv.ca
 Rapid Impact Compactors Ltd.	USA, Kanada	http://www.rapidimpact.ca/
 RIC Africa	Südafrika	http://www.ricsa.net/
 Malaysian Industrial	Malaysia	http://mig-asia.com
 Maquinaria Alfo	Mexiko	http://www.alfocom.mx/
 Rocha Construction	Kolumbien	http://www.rochagroup.com.co/
 HLT Equipamentos Especiais	Brasilien	http://www.hlt-eq.com.br
 Thyssen Krupp Steelcom	Australien	http://www.tk-steelcom.com.au
 Hayward Baker Inc. (Keller Group)	USA, Kanada, Mexiko	http://www.haywardbaker.com
 Farrell Design-Build Inc.	USA	http://www.farrellinc.com

4 Firma Terra-Mix - Vorgehensweise bei der Impulsverdichtung und Datenaufzeichnung

4.1 Firmenbeschreibung

Terra-Mix Bodenstabilisierungs-GmbH wurde 2001 von den drei Partnern und Geschäftsführern Johannes Fürpaß, Alois Kohler und Martin Müller in Wettmannstätten (West-Steiermark) gegründet. Die Firma begann ihre Tätigkeit im Bereich Bodenstabilisierung, Straßensanierung und Leitschienenbau und später erweiterte sein Leistungsangebot mit der Bodenverdichtungstechnologie Impulsverdichtung.

Terra-Mix adaptierte die Technologie des Impulsverdichters von der Fa. BSP International Foundations Ltd. und entwickelte sie weiter. Ein GPS-basiertes Vermessungssystem, ein Computersystem mit CAD-Software und eine Maschinensteuerung wurden im RIC 9000 vernetzt. Für Trägergerät des ersten RIC-Prototyps wurde ein Raupenbagger der Marke New Holland E485B mit einem Einsatzgewicht von rund 50 t und einem hydraulisch teleskopierbaren Unterwagen ausgewählt. Für die komplette Ausrüstung der Maschine wurde noch ein spezielles Gegengewicht für das Baggerheck gefertigt. Im September 2007 folgte der erste Auftrag für den Neubau eines Einkaufszentrums im Kottingbrunn (Niederösterreich), wo zur Gründung des Gebäudes Bodenverbesserungsmaßnahmen erforderlich wurden. Aufgrund der guten Erfahrungen und hohen Nachfrage wurden Niederlassungen von Terra-Mix in Deutschland, Bulgarien, Ungarn, Polen, Slowenien und Rumänien gegründet. Mittlerweile erweiterte Terra-Mix die technische Ausrüstung und hat heute sechs Impulsverdichter mit 9-t Fallgewicht im Einsatz:

- vier RIC 9000, aufgebaut auf dem E485B Raupenbagger von New Holland und
- zwei RIC 9000, aufgebaut auf einem R520 LC9 Raupenbagger von Hyundai.



Abb. 38: Der Impulsverdichter von Terra-Mix [18]

a) Impulsverdichter 1 und 2 mit Raupenbagger New Holland E485B als Trägergerät

b) Offizielle Übergabe von Maschine 3: Die drei Terra-Mix Geschäftsführer M. Müller, A. Kohler und J. Fürpass, mit Kohlenschein-Baumaschinenhändler W. Schwarz und H. Mlecka

4.2 Verdichtungsablauf mit dem Impulsverdichter

Im Regelfall sind folgende Baugeräte für die Durchführung der Impulsverdichtung erforderlich (s. Abb. 39):

- Impulsverdichter,
- Radlader mit mind. 1,5-m³-Schaufel,
- ggf. Grader bzw. Schubraupe für Feinplanum und
- Vibrationswalze (ca. 7 bis 12 t).

Bei dem Bodenverbesserungskonzept mit Impulsverdichtung in Kombination mit einer Bodenstabilisierung wird zusätzlich eine Bodenfräse mit vorzugsweise einer Fräsbreite von $B \geq 2$ m und einer Frästiefe von $T \geq 0,4$ m, einen Streuwagen für das Aufstreuen des Bindemittels und eventuell einen Wasserwagen zum Aufbringen von Wasser vor dem Aufstreuen des Bindemittels benötigt [46].



Abb. 39: Erforderliche Baugeräte für Impulsverdichtung [46]
a) Impulsverdichter; b) Radlader; c) Schubraupe und d) Vibrationswalze

Die Bodenverdichtung mit dem Impulsverdichter erfolgt nach einem exakt definierten Raster. Jeder einzelne Verdichtungspunkt wird in einem Aufteilungsplan unter seiner einzigartigen ID-Nummer dargestellt und anschließend in den Bordcomputer übertragen. Bei der Abstimmung der Rasterverteilung wird ein seitlicher Überstand des Verdichtungsbereiches von mind. 1 m (gemessen vom Umriss der Bodenplatte bis zur Außenkante des äußersten Verdichtungspunktes) empfohlen. Üblicherweise erfolgt die Impulsverdichtung nach einem der auf Abb. 40 Verdichtungs raster:

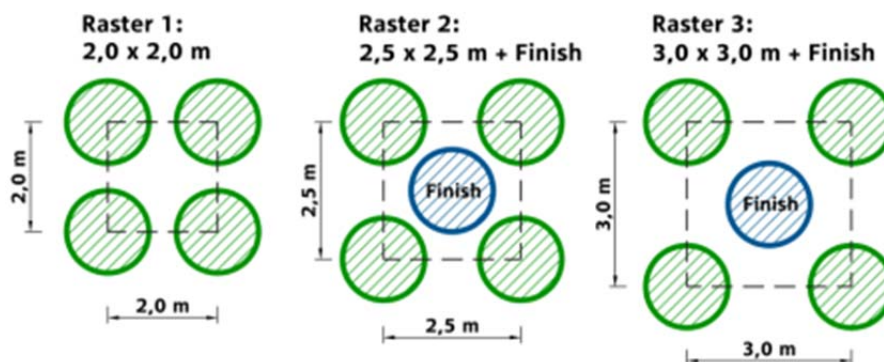


Abb. 40: Typische Verdichtungs raster für die Impulsverdichtung [adaptiert nach [46]]

Allerdings kann eine Anpassung des Rasters unter Berücksichtigung der örtlichen Randbedingungen erfolgen. So wird bei manchen Projekten die Fläche unter den Einzel- bzw. Streifenfundamenten nach einem dichteren Raster verdichtet und für die Verdichtung der Restfläche wird ein der auf Abb.40 dargestellten Raster gewählt.

Die Anpassung des Verdichtungsrasters und sämtlicher Verdichtungsparameter erfolgt im Zuge einer Probeverdichtung auf der Baustelle. Vor der eigentlichen Arbeitsdurchführung wird ein Probefeld hergestellt und dort gemeinsam mit dem zuständigen Geotechniker das Rastermaß, die optimale Fallhöhe und die erforderliche Anzahl der Übergänge festgelegt. Üblicherweise werden für die Impulsverdichtung folgende Herstellungsparameter definiert, beispielhaft werden dazu die meist verwendeten Geräte- und Herstellungsparameter angegeben:

- Fallgewicht: 9 t,
- Durchmesser des Verdichtungsfußes: 1,5 m,
- Fallhöhe der Fallmasse: $\leq 1,2$ m (vorzugsweise z.B. 1,0 m),
- Verdichtungsraster:
 - Grundraster: z.B. 2,5 x 2,5 m (1 bis 2 Übergänge)
 - Sekundärraster: z.B. 2,5 x 2,5 m, diagonal versetzt (1 Übergang).

Die Auswertung der Dokumentation aus der Probeverdichtung auf dem Kalibrierfeld erfolgt an Ort und Stelle und dient zur Ermittlung von Abbruchkriterien, die zur Qualitätssicherung der Impulsverdichtung herangezogen werden. Die Abbruchkriterien, die durch die Schlagzahl bzw. die Einsenkung des Verdichtungsfußes definiert sind, müssen durch den verantwortlichen Geotechniker beurteilt werden. Üblicherweise werden bei der Impulsverdichtung folgende Kriterien vorgeschrieben:

- Abbruchkriterium 1: Gesamtsetzung (Krater- bzw. Trichtertiefe) > 80 cm
Stop Code D (**D**eep),
- Abbruchkriterium 2: Schlagzahl pro Verdichtungspunkt > 50
Stop Code B (**B**lows),
- Abbruchkriterium 3: Setzung letzter Schlag $< (10 - 12)$ mm
Stop Code S (Final **S**et).

Aufgrund gerätetechnischer Bewegungseinschränkung ist in der Regel die Tiefe des nach jedem Übergang entstandenen Kraters (Abbruchkriterium 1) auf 80 cm begrenzt. Durch Modifikation des Anschlusses zwischen Ausleger und Hammer des sog. Dreieckanschlusses, mit dem der Anstellwinkel verändert werden kann, sind auch entsprechend größere Tiefen möglich. Diese sind jedoch nicht empfehlenswert, da dadurch das Auffüllen des Kraters mit Zugabematerial erschwert wird.

Bei Kratertiefen von z.B. festgelegten ≥ 45 cm erfolgt vorzugsweise ein weiterer Übergang mit dem Impulsverdichter, auch wenn die Abbruchkriterien erfüllt sind [9].

Anhand der Ergebnisse der Probeverdichtung im Probefeld wird der endgültige Arbeitsablauf für die Impulsverdichtung festgelegt. Folgendes Beispiel, das in Abb. 41 schematisch angegeben ist, beschreibt einen derartigen Arbeitsablauf:

- Abziehen der Humusschicht;
- Herstellen eines Arbeitsplanums auf einem definierten Niveau;
- Übergang mit dem Impulsverdichter auf den diagonal versetzten Punkten des Grundrasters *(auf Abb. 41 die Punkte mit der Beschriftung 1)*;
- Übergang mit dem Impulsverdichter auf den übrigen, ebenfalls diagonal versetzten Punkten des Grundrasters *(auf Abb. 41 die Punkte mit der Beschriftung 2)*;

- Verfüllen der Verdichtungskrater mit geeignetem Zugabematerial;
- Verdichtung mit der Vibrationswalze;
- ev. 2. Übergang mit dem Impulsverdichter auf den diagonal versetzten Punkten des Grundrasters (auf Abb. 41 die Punkte mit der Beschriftung 3);
- ev. 2. Übergang mit dem Impulsverdichter auf den übrigen, ebenfalls diagonal versetzten Punkten des Grundrasters (auf Abb. 41 die Punkte mit der Beschriftung 4);
- ev. Verfüllen der Verdichtungskrater mit dem vorgesehenen Zugabematerial;
- ev. Verdichtung mit der Vibrationswalze;
- Nachverdichtung mit dem Impulsverdichter („Finishen“) auf dem Sekundärraster (auf Abb. 41 die Punkte mit der Beschriftung 5);
- ggf. Verfüllen der Verdichtungskrater mit dem vorgesehenen Zugabematerial;
- Verdichtung mit der Vibrationswalze.

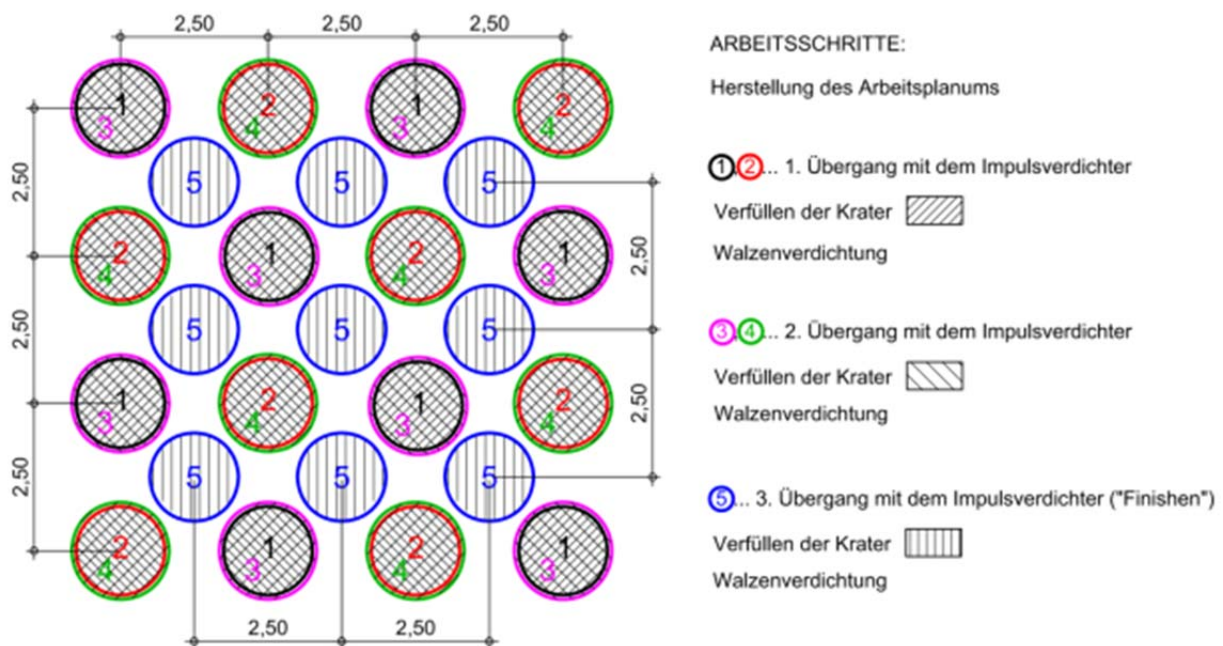


Abb. 41: Beispiel für eine Probeverdichtung auf dem Kalibrierfeld [21]



Abb. 42: Verdichtungskontrolle nach einer Impulsverdichtung [46]

a) Schwere Rammsonde (DPH), b) Mittelschwere Rammsonde (DPM) und c) Leichte Rammsonde (DPL)

Die Beurteilung der Verdichtungswirkung erfolgt üblicherweise durch Rammsondierungen, eventuell auch durch Drucksondierungen. Für bindige Bodenschichten wird vorrangig die leichte

Rammsonde (DPL) und die Drucksonde eingesetzt, für nichtbindige - in erster Linie die schwere Rammsonde (DPH). Die Anordnung und die Anzahl der Sondieransatzpunkte werden vom zuständigen Geotechniker gewählt. Die Bewertung der Tiefenwirkung erfolgt durch den Vergleich der Sondiererergebnisse vor und nach der Impulsverdichtung. Der endgültige Verdichtungserfolg wird vom Baugrundsachverständigen nach Interpretation der Messergebnisse beurteilt.

4.3 Dokumentation der Herstellungsparameter und Aufbau der firmeneigenen Datenbank

Das integrierte Datenerfassungssystem im Impulsverdichter ermöglicht eine automatische Dokumentation von den Verfahrensparametern, die in weiterer Folge zur Beurteilung der Untergrundeigenschaften bzw. als Entscheidungshilfe (Abbruchkriterien) für Beendigung der Verdichtung bei jedem Verdichtungspunkt herangezogen werden. Folgende Parameter werden während der Verdichtung in der Fahrerkabine automatisch aufgezeichnet und am Bordcomputer gespeichert:

- ID Nummer des Verdichtungspunktes im Verdichtungsraaster;
- GPS-Koordinaten des Verdichtungspunktes;
- Datum der Durchführung der Verdichtung;
- Anzahl der Schläge pro Verdichtungspunkt und Übergang (*Blow*);
- Setzung letzter Schlag pro Verdichtungspunkt und Übergang (*Final Set*);
- Gesamtsetzung (Kratertiefe) pro Verdichtungspunkt und Übergang (*Deep*);
- Eingebraachte Verdichtungsenergie pro Verdichtungspunkt und Übergang (*Energy*);
- Abbruchkriterium (*Stop Code*).

Die vom Datenspeicher des Impulsverdichters heruntergeladenen Verdichterdaten werden in Form einer Excel-Tabelle in der Firmendatenbank gespeichert, bearbeitet und folglich den Kunden bereitgestellt. In Abb. 43 wird eine Mustertabelle mit den Verdichterdaten beispielhaft dargestellt.

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
POINT-ID	POINT-DESCRIPT.	X	Y	DATE	BLO-WS	FIN.-SET	DEEP	DEEP-TOTAL	ENERGY	ST-CO	PASS	LAYER	1 2 3 4 5 6 7
1980042193		-16449,96	308338,39	13.08.2012	13	12	255	1853	87	5	3	IV EZF	66 30 22 18 16 16 14
1980042193		-16449,96	308338,39	13.08.2012	45	15	797	1853	294	D	2	IV EZF	45 27 22 20 20 20 19
1980042193		-16449,96	308338,39	10.08.2012	35	31	801	1853	173	D	1	IV EZF	38 23 22 21 20 20 19

Abb. 43: Tabellarische Darstellung der aufgezeichneten Verfahrensparameter [46]

1. **Point-ID** – Punktnummer
2. **Point Description** – Punktbeschreibung
3. und 4. **X, Y** – Koordinaten des Verdichtungspunktes
5. **Date** – Ausführungstag
6. **Blows** – Schlagzahl je Verdichtungspunkt im aktuellen Übergang
7. **Final Set** – Setzung letzter Schlag beim aktuellen Übergang, [mm]
8. **Deep** – Gesamtsetzung für den Verdichtungspunkt beim aktuellen Übergang, [mm]
9. **Deep Total** – Gesamtsetzung für den Verdichtungspunkt (Summe der Setzung aller bisherigen Übergänge, [mm])

10. **Energy** – eingebrachte Verdichtungsenergie für diesen Verdichtungspunkt beim Übergang, [tm] oder [Nm]
- *Masse Fallgewicht in t x Fallhöhe x Schlagzahl, [tm]*
 - *Masse Fallgewicht in kg x Fallhöhe x Fallbeschleunigung x Schlagzahl, [Nm]*
11. **Stop Code** – erreichtes Abbruchkriterium (D, B oder S)
12. **Pass** – Übergang Nr.
13. **Layer** – Layer des Verdichtungsrasters im CAD-Plan
14. **1 2 3 4 5 6 7 ...** – Verdichtungsstöße und die dazugehörige Setzung

Die Daten werden in CAD-Plänen dargestellt (*s. Abb. 44*). Es wird im Lageplan auf der linken Seite die Position der Verdichtungspunkte im Raster unter den einzigartigen ID-Nummern und die Lage der Ansatzpunkte der Rammsondierungen festgelegt. Der Lageplan auf der rechten Seite zeigt die erreichten Abbruchkriterien. Anhand unterschiedlich gefärbter Punkten, welche entweder die Kratertiefe bei jedem Verdichtungspunkt, oder die Setzung nach dem letzten Schlag oder die Schlagzahl abstufen, wird der Verdichtungsprozess flächendeckend visualisiert. Auf diese Weise lassen sich beispielsweise örtliche Inhomogenitäten des Untergrundes erkennen.

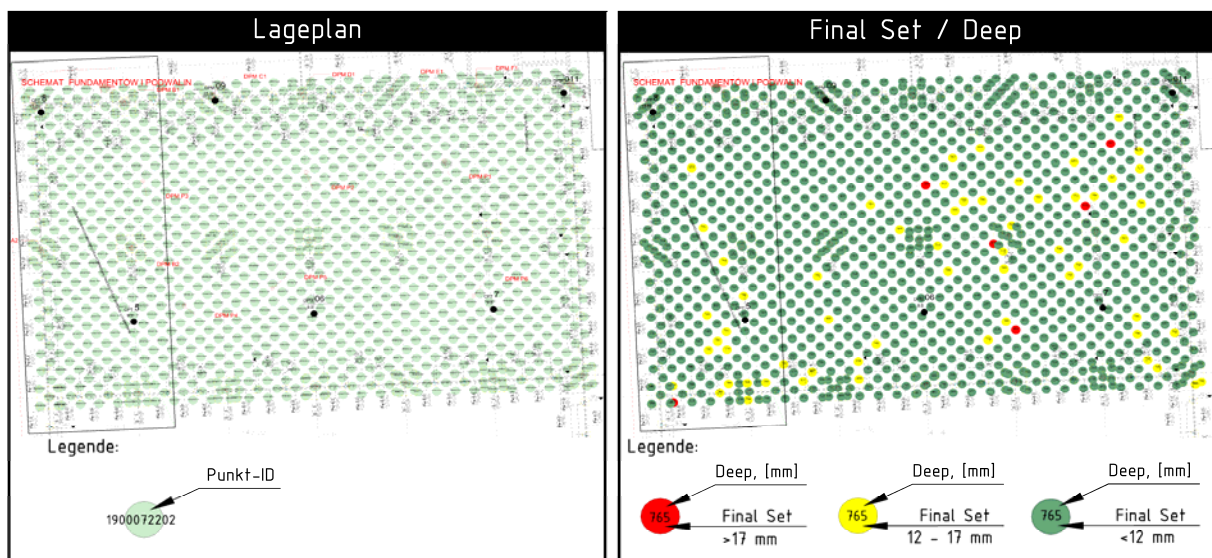


Abb. 44: Grafische Darstellung der Verdichterdaten [46]

Für jede Impulsverdichter-Baustelle werden sämtliche relevante Informationen wie die Verdichterdaten, die CAD-Pläne, Bodengutachten, geotechnische Schlussberichte etc. in der Firmendatenbank archiviert.

5 Auswertung der während der Verdichtung aufgezeichneten Messdaten

5.1 Vorgehensweise bei der Auswertung

Die archivierten Informationen von Fa. Terra-Mix in Form von:

- Bodengutachten,
- Berichten von Laboruntersuchungen,
- Tabellen mit den dokumentierten Verdichterdaten,
- Protokollen und Diagrammen der durchgeführten Rammsondierungen zur Verdichtungskontrolle,
- Lageplänen der Verdichtungsarbeiten und
- geotechnischen Schlussberichten,

bilden die Grundlage für die im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit durchgeführten Auswertung und Interpretation. Das zentrale Ziel der Diplomarbeit ist die Erarbeitung der Grundlagen einer strukturierten Auswertungsdatenbank. Diese soll Hilfe zur vorläufigen Bestimmung der Herstellungsparameter geben und somit eine Unterstützung für zukünftige Impulsverdichter-Baustellen leisten.

Der Schwerpunkt der Arbeit fällt auf die Zusammenführung der während des Verdichtungsprozesses aufgezeichneten Messdaten und der vorhandenen Baugrundinformation in einer gemeinsamen Auswertungsdatenbank. Ein weiterer wesentlicher Punkt ist die Ermittlung der Tiefenwirkung der Impulsverdichtung anhand von durchgeführten Sondierungen zur Verdichtungskontrolle.

Im Rahmen der Diplomarbeit wurden Projekte aus der Projektdatenbank ausgewählt, die folgende Kriterien erfüllen:

- möglichst homogener Untergrund;
- durchgeführte Untergrunderkundung und Probenentnahme (vorzugsweise direkte Erkundungsverfahren wie bspw. Schürfe und Bohrungen in Kombination mit Rammsondierungen);
- durchgeführte bodenphysikalische Untersuchungen zur Bestimmung der Kornverteilung, der Zustandsgrenzen, des Wassergehaltes usw.;
- durchgeführte Rammsondierungen vor und nach der Impulsverdichtung zur Verdichtungskontrolle;
- vorhandene Lagepläne der Bodenaufschlüsse, des Impulsverdichtungsrasters und der Ansatzpunkte der Rammsondierungen.

Anhand der oben genannten Kriterien wurden insgesamt 27 in der Firmendatenbank dokumentierte Projekte ausgewählt. Die Tabelle 29 zeigt die Liste der bearbeiteten Projekte.

Tabelle 29: Bei der Auswertung bearbeitete Projekte - Aufteilung der Projekte nach Unterkategorie

Kategorie	Projekt Nr.	Bauvorhaben	Untergrundverhältnisse
Kies	100394	Schenker Terminal Flughafen Klagenfurt, Österreich	sandiger, steiniger Kies
	100477	Wohnanlage Seefelderstrasse, Wien, Österreich	sandiger Kies (teilweise Feinsand)
	130164	Wohnanlage D13, Aspern, Seestadt, Wien, Österreich	Fein- bis Mittelkies-Feinsand-Gemisch (geringmächtiges Feinsand-Schluff-Gemisch)
Sand	100437	Seniorenwohnheim Bestensee, Deutschland	Mittelsand
	100971	Hochwasserschutzdamm Plock, Polen	Mittel- bis Feinsand (teilweise toniger Sand)
	110960	Testfeld A44n, Garzweiler, Deutschland	kiesiger, schluffiger Sand (teilweise schluffiger, sandiger Kies)
	120303	Neubau Stemeseder Seekirchen, Österreich	schluffiger Sand (teilweise sandiger, schluffiger Kies)
Schluff	100231	Übernahmehalle Nestelbach, Österreich	sandiger Schluff
	100923	Windpark Tortoman II, Rumänien	sandiger, toniger Schluff (Löss)
	120511	Coca Cola Edelstal, Österreich	feinsandiger Schluff
	120638	Somlo, Ungarn	sandiger Schluff
	120922	Möbelix Gleisdorf, Österreich	feinsandiger Schluff (teilweise Fein- bis Mittelkies)
	130018	Erd Mobis Halle, Ungarn	sandiger Schluff
	130050	Käsehof Alpenmilch – Lamprechtshausen, Österreich	kiesiger, sandiger Schluff (teilweise schluffiger Kies)
Auffüllung	100192	Logistikhalle Frauenaaurach, Deutschland	Auffüllung, (Mittel- bis Grobsand, schwach schluffiger Sand)
	100430	TÜV Service Center Heidenheim a.d. Brenz, Deutschland	Auffüllung (Schluff, Kalksteinbrüche, Kies)
	100590	Leichtathletikanlage Klagenfurt, Österreich	Auffüllung (mittel- bis grobkiesiger Sand, Betonbruchstücke)
	100991	Getränkhandel Weil am Rhein, Deutschland	Auffüllung (sandiger, schluffiger Kies, kiesiger Schluff, Ziegelbruch)
	110272	Autohaus Suzuki Nissan, Polen	Auffüllung (steiniger, sandiger Schluff, toniger Sand)
	110631	Mömax Villach, Österreich	Auffüllung (sandiger, kiesiger, steiniger Schluff, Kies, Sand)
	110686	Neubau FMZ Bad Griesbach, Deutschland	Auffüllung (schluffiger, sandiger Kies, sandiger Schluff, Hausmüll)
	110881	Produktionshalle Nova Trading, Polen	Auffüllung (Fein- bis Mittelsand, teilweise Schluff)
	110913	Logistikanlage Frochheim, Deutschland	Auffüllung (sandiger, kiesiger Ton und Schluff, darunter Sand)
	111016	S191 Verlegung Rippeln – Goppeln, Deutschland	Auffüllung (kiesiger Sand, feinsandiger Schluff)
	120046	Scarabeus Käfer, Parsdorf, Deutschland	Auffüllung (sandiger, schluffiger Kies, Bauschutt, Ziegelreste)
	120398	Neubau Blankstahladjustage Deuchendorf, Österreich	Auffüllung (sandiger, kiesiger Schluff, sandiger, schluffiger Kies)
	120661	FMZ Mürzzuschlag, Österreich	Auffüllung (sandiger, schluffiger, steiniger Kies, sandiger Schluff)

Damit die Analyse der Verdichterdaten und der Tiefenwirkung vergleichbare Ergebnisse aufweisen kann, wurden die ausgewählten Projekte nach ähnlichen Untergrundverhältnissen klassifiziert. Da die Impulsverdichtung vorwiegend in nichtbindigen Böden bzw. unter bestimmten Voraussetzungen auch bei bindigen und gemischtkörnigen Böden zur Anwendung kommt, wurden die Projekte zu einer der folgenden vier Untergrundkategorien zugeordnet:

- **Kies** (Gr) – weit gestufte Kies-Sand-Gemische (GW) und Kies-Schluff-Gemische (GU)
- **Sand** (Sa) – eng bzw. weit gestufte Sand-Kies-Gemische (SE bzw. SW) und Sand-Schluff-Gemische (SU)
- **Schluff** (Si) – mittelplastische Schluffe (UM) und Kies- bzw. Sand-Schluff-Gemische mit Schluffanteil über 15% (GU* bzw. SU*)
- **künstliche Auffüllung** (Mg) – unter mechanischer Einwirkung entstandene Schüttungen aus umgelagerten natürlichen Böden und/oder Fremdstoffen anthropogener Herkunft.

Die Aufteilung der ausgewählten Projekte nach den oben definierten Untergrundkategorien ist in Tabelle 29 angeführt.

5.2 Aufbau der im Zuge der Auswertung entwickelten Struktur zur Aufbereitung und Auswertung der Projektdaten

Die verfügbare Information aus der Firmendatenbank für jedes Projekt wurde in einem CAD-Plan und in einer Excel-Datei zusammengefasst.

Für jedes Projekt wurde ein CAD-Plan erstellt, der die folgenden vier Lagepläne in einem gemeinsamen Lageplan zusammenfasst:

- Lageplan des Bauvorhabens,
- Lageplan der Bodenaufschlüsse (aus dem Bodengutachten),
- Lageplan des Verdichtungsrasters mit ID-Nummern der Verdichtungspunkte,
- Lageplan mit Position der durchgeführten Rammsondierungen zur Verdichtungskontrolle.

Es wurde angenommen, dass in einem Umkreis von 5 m um die direkten Bodenaufschlüsse die Untergrundverhältnisse homogen sind. Zur klaren Trennung dieser Bereiche wurden die Kreise mit einem Radius von 5 m auf den CAD-Plänen schraffiert. Bei der Erstellung der Pläne werden folgende Symbole verwendet:

	Kernbohrung		Point-ID
	Rammsondierung		Point-ID in 5 m Umkreis um die Bodenaufschlüsse
	Baggerschürf		Fläche in 5 m Umkreis um die direkten Bodenaufschlüsse
	Rammsondierung vor und nach IMPV		Fläche in 5 m Umkreis um die indirekten Bodenaufschlüsse
	Rammsondierung vor IMPV		
	Rammsondierung nach IMPV		
	Plattendruckversuch nach IMPV		

Ein Beispiel-Lageplan ist der Abb. 45 zu entnehmen.



Abb. 45: Lageplan zur Darstellung des Verdichtungsrasters und der Bodenaufschlüsse

Für jedes ausgewählte Projekt wurde eine eigene Excel-Datei erstellt, wo alle relevanten Informationen über die Baustelle, die durchgeführten Bodenverbesserungsarbeiten, Untergrundverhältnisse, Ergebnisse aller durchgeführten Rammsondierungen vor und nach der Verdichtung und die während der Impulsverdichtung aufgezeichneten Herstellungparameter zusammengefasst wurden. Folgend wird der Aufbau der im Zuge der Datenaufzeichnung entwickelten Excel-Datei ausführlich beschrieben:

- **Tabellenblatt 1: Projektbezeichnung und allgemeine Projektinformationen**

Das erste Tabellenblatt enthält allgemeine Informationen über das Bauvorhaben, die durchgeführte Bodengrunderkundung, Eckdaten zu den Bodenverbesserungsarbeiten und die durchgeführten Untersuchungen zur Verdichtungskontrolle. In der nachfolgenden Abb. 46 wird die Struktur des Tabellenblattes 1 angegeben. Die einzelnen Teilbereiche des Tabellenblattes sind mit Zahlen von 1 bis 9 vermerkt:

1. allgemeine Angaben über das Bauprojekt wie Projektnummer, gewählte Untergrundkategorie, Bauvorhaben, Land, Auftraggeber, Bodengutachtenersteller, geotechnische Überwachung etc.;
2. Leistungsumfang;
3. Ausführungszeitraum;
4. Art und Anzahl der durchgeführten direkten Baugrundaufschlüsse;
5. Art und Anzahl der durchgeführten indirekten Baugrundaufschlüsse;
6. Liste der durchgeführten Laboruntersuchungen;
7. Eckdaten der Bodenverbesserungsarbeiten;
8. Art und Anzahl der durchgeführten Rammsondierungen zur Verdichtungskontrolle;
9. eventuelle weitere durchgeführte Verdichtungskontrollen.

Projektbezeichnung						
1	100437	Kategorie:	Sand (Sa)	LEISTUNGSUMFANG		2
		Bauvorhaben:	Neubau eines Seniorenzentrums, Bestensee	Fläche, [m ²]	SF, [l/m]	
		Land:	Deutschland	2280	-	-
		Auftraggeber:	Berliner Stadtmission	ZEITRAUM		3
		Geotechnik:	AnalyTech GmbH	Anfang	Ende	
		5. Nov. 2010	3. Dez. 2010			
Geotechnische Untersuchungen						
Untergründerkundung:						
4	Direkte geotechnische Aufschlussmethoden		Indirekte geotechnische Aufschlussmethoden			5
	Schürfe	Bohrungen	Rammsondierungen	Drucksondierungen		
	-	7/7 RKS	2/2 DPH	-		
Bodenphysikalische Laborversuche:						
6	Nr.	Bezeichnung	Anzahl	Bodenproben		
	1	Bestimmung der Kornverteilung nach DIN 18123	3	SP 2.3, SP 3.3, SP 6.3		
	2	Bestimmung der Betonaggressivität	1	WP 1 am SP 6		
Bodenverbesserungsarbeiten und Verdichtungskontrolle						
Bodenverbesserungsarbeiten:						
7	Verfahren:	IMPV	Verdichtungskontrolle:			8
	Bodenart:	csa lsa MSa	Rammsondierungen			
	Verdichtungsfuß:	1,5 m	vor IMPV	nach IMPV	vor/nach IMPV	
	Verdichtungs raster:	1,8 x 1,8 m	-	4 DPH	2 DPH	
	Verdichtungs punkte:	1057	Drucksondierungen		Lastplattenversuch	
max. Übergänge:	5	-	-	-	9	

Abb. 46: Tabellenblatt 1 der Auswertungsdatei – Allgemeine Projektinformationen

▪ Tabellenblatt 2: Bodenklassifizierung und Ergebnisse der Laborversuche

Auf dem zweiten Tabellenblatt werden die Angaben zu der Bodenklassifizierung aus dem vorhandenen Bodengutachten zusammengefasst. Sämtliche Informationen wie z.B. Bodenart und vorgegebene Bodenkennwerte werden tabellarisch für jede angetroffene Bodenschicht angezeigt.

▪ Tabellenblatt 3: Bodenaufschlüsse

Hier werden die Ergebnisse aller direkten Bodenaufschlüsse im Bereich der Impulsverdichtung aufgezählt. Abb. 47 zeigt eine Vorlage für ein tabellarisch dargestelltes Bodenprofil. Der obere Teil der Tabelle beinhaltet allgemeine Angaben sowie Art der Erkundungsmethode, Bezeichnung des Aufschlusses im Bodengutachten und im CAD-Plan, Entnahmetiefe und Verdichtungs punkte im Umkreis von 5 m. Im unteren Teil wird das Bodenprofil in tabellarischer Form mit 5 cm Genauigkeit zusammengestellt, wobei die einzelnen Spalten folgende Informationen über die angetroffenen Bodenschichten liefern:

1. entnommene Bodenproben mit Benennung und Entnahmetiefe;
2. angetroffener Grundwasserspiegel;
3. Tiefe u. GOK;
4. vereinfachte zeichnerische Darstellung des Bodenprofils nach ÖNORM B 4400-1;
5. Zustand der angetroffenen Bodenschicht (Lagerungsdichte bei nichtbindigen bzw. Konsistenz bei bindigen Böden);

6. Mächtigkeit der Schicht;
7. Bodengruppe nach DIN 18196 *(falls bekannt)*;
8. Kurzzeichen nach EN ISO 14688-2;
9. Beschreibung der angetroffenen Bodenschicht aus dem Bodengutachten.

SP 1				Art: Rammkernsondierung				
				Entnahmetiefe: 8.0 m				
Stationierung: (Verdichtungsunkte in 5 m Umkreis)				314944, 314945, 314946, 314948, 314949, 314950, 314951, 314954, 314956, 214957, 317097, 317128, 317142, 317143, 317148, 317151, 317154, 317156, 317844, 317846, 318233, 318235, 318237				
				Datum: 13. Nov. 2009				
Bodenproben	GWS	Tiefe	Profil	Zustand	Stärke	Bodengruppe DIN 18 196	Kurzzeichen EN ISO 14688-2	Bezeichnung
SP 1.1 (0.00 - 0.40)	▽ 1.10	0.00	Mu		0.40	OH	Mu, fsacsa'hMSa	Mittelsand, feinsandig, schwach grobsandig, humos, Mutterboden, dunkelbraun bis braun, Wurzelreste, vereinzelt Kiesel, erdfeucht, leicht zu bohren, OH (Grob-/gemischtkörnige Boden, humos), kalkfrei
		0.10	Mu					
		0.20	Mu					
		0.30	Mu					
		0.40	Mu					
SP 1.2 (0.40 - 1.10)	▽ 1.10	0.50			0.70	SE	fsacsaMSa	Mittelsand, feinsandig, schwach grobsandig bis grob-sandig, Sand, grau, GWS bei 1.1 m u. GOK, vereinzelt Kiesel, erdfeucht, leicht zu bohren bis ma ig schwer zu bohren, SE (Sand, enggestuft), kalkfrei
		0.60						
		0.70						
		0.80						
		0.90						
		1.00						
		1.10						
		1.20						
...			
1	2	3	4	5	6	7	8	9

Abb. 47: Darstellung der Bodenprofile in tabellarischer Form in der Auswertungsdatei

Tabellenblatt 4: Rammsondierungen zur Untergrunderkundung

Auf dem vierten Tabellenblatt der Auswertungsdatei werden die Ergebnisse von allen Rammsondierungen angegeben, die vor der Impulsverdichtung im Rahmen der Untergrunderkundung durchgeführt wurden. Lageplan des Sondieransatzpunktes, Rammprotokoll und -Diagramm, sowie das Bohrprofil in der Nähe der Sondierung werden analog zur auf Abb. 48 gezeigten Vorlage angezeigt.

Der obere Teil des Tabellenblattes liefert sämtliche Informationen über das Bohr- und Sondierprofil, wie z.B. Art der Erkundungsmethode zur Aufnahme des Bodenprofils bzw. Art der eingesetzten Rammsonde, Abteuftiefe, Position, Ausführungsdatum, sowie Abstand zwischen den beiden Profilen.

Im unteren Teil werden die Ergebnisse der Rammsondierung über die Tiefe neben dem Bodenprofil dargestellt.

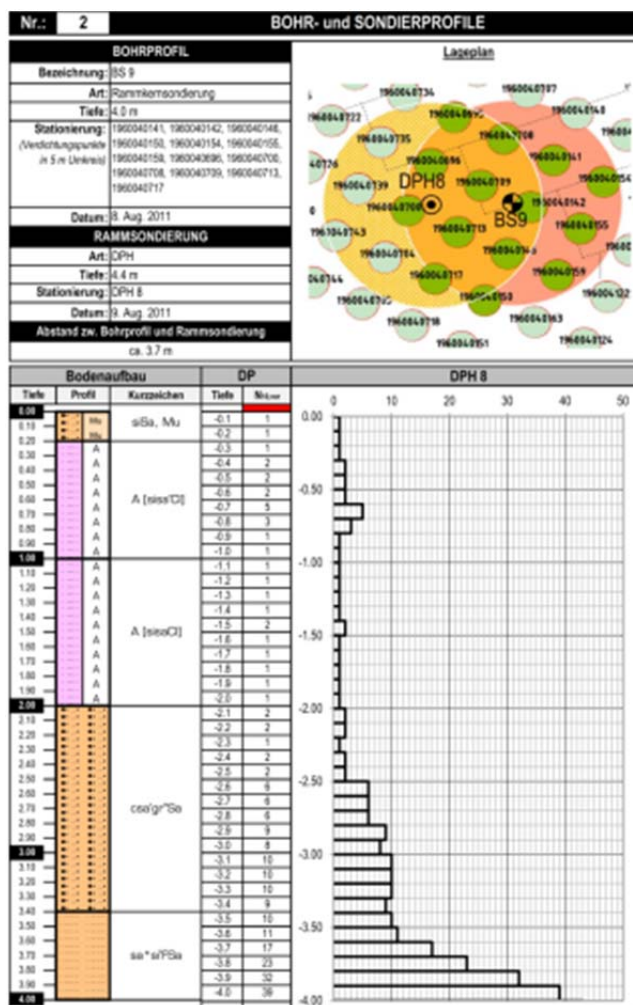


Abb. 48: Aufbereitung der Messergebnisse von Rammsondierungen in der Auswertungsdatei

Tabellenblatt 5: Rammsondierungen nach der Impulsverdichtung zur Verdichtungskontrolle

Die Ergebnisse von allen Rammsondierungen, die zur Verdichtungskontrolle vor und nach der Impulsverdichtung durchgeführt wurden, sind auf einem separaten Tabellenblatt in der Auswertungsdatei zusammengeführt. Als Beispiel wird hierzu das rechts angegebene Tabellenblatt angeführt (s. Abb. 49).

Zur Erfassung der Tiefenwirkung werden auf dem Diagramm die Ergebnisse beider Rammsondierungen aufgetragen, wobei mit Rot die Eindringwiderstände der Sonde vor und mit Grün nach der Impulsverdichtung gekennzeichnet werden. Die blaue Linie bezeichnet den Verbesserungsfaktor VF_{IMPV} , der sich aus dem Verhältnis der gemessenen Schlagzahlen nach und vor der Impulsverdichtung ergibt:

$$VF_{IMPV} = \frac{N_{10,nach}}{N_{10,vor}} \quad [-] \quad (Gl.23).$$

$N_{10,vor}$ – Schlagzahlen vor der Impulsverdichtung
 $N_{10,nach}$ – Schlagzahlen nach der Impulsverdichtung

Die Verbesserungsfaktoren werden in zwei Spalten neben den gemessenen Eindringwiderständen zahlenmäßig angegeben, wobei die erste Spalte die Verbesserungsfaktoren je 10 cm Tiefe und die zweite deren Mittelwert je 1 m Tiefe angeben.

Die Notwendigkeit der Einführung des Verbesserungsfaktors als Hilfsparameter zur Ermittlung der Tiefenwirkung geht davon aus, dass oft die Verdichtungskontrolle mit verschiedenen Rammsonden (DPL, DPL-5, DPM und DPH) durchgeführt wurde. Die gemessenen Eindringwiderstände N_{10} sind dabei nicht direkt miteinander vergleichbar, da jeder Sondentyp über unterschiedliche Spitzenquerschnitt und Rammbarmsse verfügt.

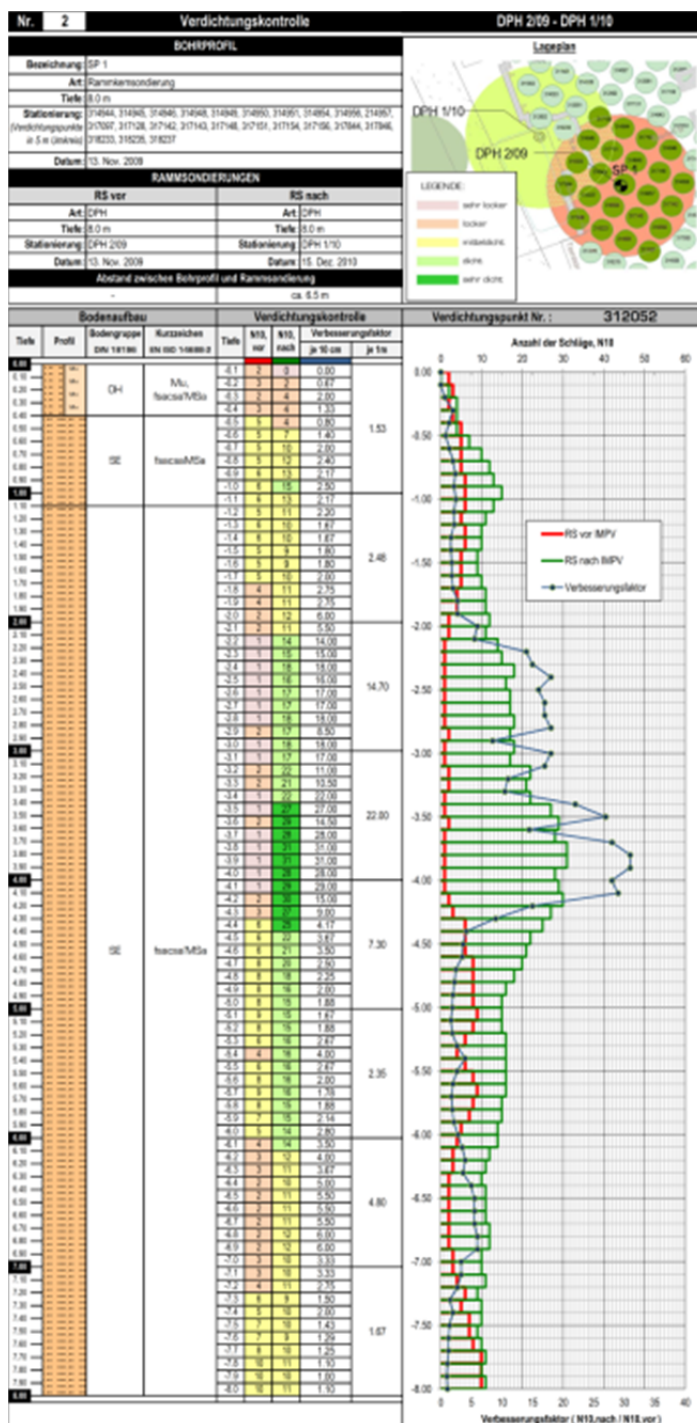


Abb. 49: Erfassung der Ergebnisse von Rammsondierungen vor und nach der Impulsverdichtung zur Verdichtungskontrolle

Die Bewertung des Verbesserungsfaktors erfolgt im Rahmen dieser Arbeit nach folgenden subjektiven Grenzen:

- $VF_{IMPV} < 1$
Die gemessenen Schlagzahlen N_{10} nach der Impulsverdichtung sind kleiner als diese vor der Impulsverdichtung, d.h. Auflockerung.
- $VF_{IMPV} = 1 \div 2$
Die gemessenen Schlagzahlen N_{10} nach der Impulsverdichtung sind maximal 2-fach größer als diese vor der Impulsverdichtung, d.h. keine bzw. geringe Erhöhung der Lagerungsdichte.
- $VF_{IMPV} > 2$
Die gemessenen Schlagzahlen N_{10} nach der Impulsverdichtung sind mehr als 2-fach größer als diese vor der Impulsverdichtung, d.h. deutliche Erhöhung der Lagerungsdichte.

Die Rammsondierergebnisse (jeweils vor und nach der Impulsverdichtung) werden in der Excel-Datei ausgewertet. Die Auswertung der gemessenen Schlagzahlen N_{10} erfolgt nach den empirischen Zusammenhängen zwischen den Eindringwiderständen der Rammsonde und der Lagerungsdichte des Bodens, die in Tabelle 12 angegeben sind. Für die bestimmten Lagerungsdichten werden verschiedene Farben zugeordnet (s. Tabelle 30).

Tabelle 30: Empirische Zusammenhänge zwischen der Lagerungsdichte bei nichtbindigen bzw. Konsistenz bei bindigen Böden und der Schlagzahl N_{10} der leichten (DPL), mittelschweren (DPM) und schweren Rammsonde (DPH) [39, 14]

Lagerungsdichte		DPH	DPM	DPL	Konsistenz bindiger Böden	DPH	DPM	DPL
Farbe	Bezeichnung	N_{10H}	N_{10M}	N_{10L}		N_{10H}	N_{10M}	N_{10L}
	sehr locker	0 - 1	0 - 4	0 - 6	breiig	0 - 2	0 - 3	0 - 3
	locker	1 - 4	4 - 11	6 - 10	weich	2 - 5	3 - 8	3 - 10
	mitteldicht	4 - 13	11 - 26	10 - 50	steif	5 - 9	8 - 14	10 - 17
	dicht	13 - 24	26 - 44	50 - 64	halbfest	9 - 17	14 - 28	17 - 37
	sehr dicht	> 24	> 44	> 64	fest	> 17	> 28	> 37

- **Tabellenblatt 6: Darstellung der während der Impulsverdichtung aufgezeichneten Verfahrensparameter**

Auf dem 6. Tabellenblatt der Auswertungsdatei werden die während der Impulsverdichtung aufgezeichneten Messdaten dargestellt. Eine Vorlage der Tabelle mit den Verdichtungsparametern ist der Abb. 50 zu entnehmen.

POINT-ID	BLOWS	FINAL SET	DEEP	DEEP TOTAL	ENERGY	STOPCODE	PASS	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
								10										
311861	30	21	814	2211	3188348	D	1	36	40	36	34	32	31	30	31	30	30	28
311861	40	13	792	2211	4049862	D	2	47	58	37	30	29	27	25	23	22	21	20
311861	30	12	605	2211	3099960	D	3	54	46	35	30	27	24	24	21	21	20	20
311862	33	19	806	2186	3531502	D	1	76	41	37	31	31	29	26	25	25	25	23
311862	50	11	787	2186	5116896	B	2	64	41	31	27	25	22	20	19	18	17	17
311862	32	11	593	2186	3346563	D	3	81	42	32	28	24	22	20	18	18	17	17

Abb. 50: Erfassung der Verdichtungsparameter in der Auswertungsdatei

Die im Impulsverdichter integrierten Messeinrichtungen messen automatisch für jeden Verdichtungspunkt und Übergang die Schlagzahl, die Einsenkung der Lastplatte des Verdichtungsfußes nach jedem Schlag und die Fallhöhe. Je Verdichtungspunkt ergibt die Summe aller Setzungen die Kratertiefe (Deep) für den jeweiligen Übergang und die Summe der Kratertiefen für alle Übergänge - die Gesamttrichtertiefe (Deep Total). Diese Parameter werden in der Tabelle in mm angegeben.

Die gemessene Fallhöhe wird in der Tabelle nicht explizit angegeben. Sie dient zur Bestimmung der Verdichtungsenergie pro Verdichtungspunkt und Übergang. Die Energie wird dabei nach einer der folgenden zwei Formeln berechnet:

$$E = m^t \times h \times B \quad [tm] \quad (\text{Gl. 24}),$$

oder

$$E = m^{kg} \times g \times h \times B \quad [Nm] \quad (\text{Gl. 25}).$$

E – Verdichtungsenergie.
 m^t – Masse des Fallgewichtes in Tonnen, [t],
 m^{kg} – Masse des Fallgewichtes in Kilogramm, [kg],
g – Erdbeschleunigung ($g = 9,81 \text{ m/s}^2$),
h – Fallhöhe, [m],
B – Schlagzahl, [-].

Um die Kompatibilität der Messdaten zu gewährleisten, wurde die Verdichtungsenergie bei der Auswertung in Nm umgerechnet.

Es muss berücksichtigt werden, dass eventuelle Fehler bei der messtechnischen Bestimmung der Fallhöhe zur unzulässig hohen Ungenauigkeiten bei der Ermittlung der Verdichtungsenergie führen. Diese Fehler können die Auswertung erheblich verfälschen. Daher werden nur Werte, die eine Fallhöhe zwischen 0,25 und 1,20 m aufweisen, bei der Datenauswertung berücksichtigt.

▪ **Tabellenblatt 7: Auswertung der während der Impulsverdichtung aufgezeichneten Verdichtungsparameter**

Auf diesem Tabellenblatt werden die Verdichtungsparameter für das ganze Baufeld grafisch ausgewertet. Die in Abb. 51 dargestellte Vorlage enthält insgesamt 7 Auswertungsdiagramme, die nachfolgend erklärt werden:

1. *Mittelwerte der Verdichtungsparameter je Übergang*

Hierzu werden je Übergang die Mittelwerte der Verdichtungsparameter Schlagzahl, Setzung letzter Schlag, Kratertiefe, Verdichtungsenergie und Fallhöhe angegeben.

2. *Prozentueller Anteil der notwendigen Übergänge zur Verdichtung*

Das Balkendiagramm gibt an, bei welchem Anteil aller Verdichtungspunkte nach dem jeweiligen Übergang die erforderliche Verdichtung erzielt wurde.

3. *Prozentueller Anteil der angetroffenen Abbruchkriterien*

Das Kreisdiagramm gibt Auskunft über den prozentuellen Anteil der angetroffenen Abbruchkriterien während der Impulsverdichtung. Da die Abbruchkriterien für jedes Projekt auf die örtlich vorgefundenen Untergrundverhältnisse (Bodenaufbau, Grundwasserverhältnisse) und baulichen Randbedingungen optimal angepasst wurden, sind diese für jede Baustelle

unterschiedlich. Nach der Auswertung der einzelnen Projekte werden daher Grenzbereiche erfasst und die typischen Abbruchkriterien für die ganze Untergrundkategorie ermittelt.

4. *Eingebrachte durchschnittliche Verdichtungsenergie*

Die Summe der Energie, die in den Boden durch die impulsartig aufeinanderfolgenden Schläge des hydraulischen Hammers eingebracht wird, ergibt die Gesamtverdichtungsenergie je Punkt und Übergang. Sie wird vereinfacht aus der Schlagzahl und aus der Fallhöhe ermittelt. Da die Fallhöhe auf 1,20 m begrenzt ist und während des jeweiligen Arbeitsgangs nahezu konstant bleibt, hängt die Größe der gesamten eingebrachten Verdichtungsenergie zum großen Teil nur von der Schlagzahl ab. Somit entstehen während der Impulsverdichtung erhebliche Energieunterschiede zwischen den einzelnen Verdichtungspunkten, da die einzelnen Verdichtungspunkte mit unterschiedlicher Schlagzahl bearbeitet wurden. Somit wird die Richtigkeit der ermittelten mittleren Verdichtungsenergien beeinflusst. Es erwies sich daher als zweckmäßig, in der Auswertung und der nachfolgenden Gegenüberstellung nach Untergrundkategorien die Verdichtungsenergie auf die Setzung unter dem Verdichtungsfuß zu beziehen und in kNm/mm oder kJ/mm anzugeben. Auf dem Diagramm wird der Verlauf der durchschnittlichen bezogenen Verdichtungsenergie in den einzelnen Übergängen aufgezeichnet.

5. *Schlagzahl-Setzungskurven pro Übergang*

Die Kurven zeigen den Verlauf des Mittelwertes der Setzung mit steigender Anzahl der Verdichtungsstöße. Schlagzahl-Setzungskurven für Übergänge, bei denen weniger als 5 % aller Verdichtungspunkte bearbeitet wurden, werden in den Diagrammen nicht aufgezeichnet.

6. *Setzung letzter Schlag*

Dem Diagramm ist die durchschnittliche Setzung letzter Schlag je Übergang zu entnehmen.




7. *Kratertiefe*

Das Diagramm gibt Auskunft über die durchschnittliche Tiefe des entstandenen Kraters unter dem Verdichtungsfuß.

8. *Ermittlung der Tiefenwirkung*

Da bei vielen Projekten die Verdichtungskontrolle mit verschiedenen Rammsondentypen (DPH, DPM und DPL) durchgeführt wurde, wird zur Ermittlung der Tiefenwirkung der Verdichtung das Verhältnis der Sondierergebnisse vor zu nach der Impulsverdichtung herangezogen. Dabei wird ein Auswertungsdiagramm erstellt, auf dessen Abszisse die Verbesserungsfaktoren von allen durchgeführten Rammsondierungen und auf dessen Ordinate die dazugehörige Tiefe in m angegeben sind. Die rote Kurve bezeichnet die mittleren Verbesserungsfaktoren je 10 cm Tiefe. Auf dem Diagramm werden die einzelnen Grenzbereiche des Verbesserungsfaktors mit Hilfe folgender Farbskala gekennzeichnet:

Tabelle 31: Legende zur Bewertung des Verbesserungsfaktors

Farbe	VF_{IMPV}	Bezeichnung
	< 1	Auflockerung
	1 - 2	keine bzw. geringe Verbesserung
	≥ 2	deutliche Verbesserung

Die anhand Verbesserungsfaktoren ermittelte Tiefenwirkung der Impulsverdichtung muss jedoch aus bodenmechanischer Sicht kritisch betrachtet werden, da eine 2-fache Erhöhung der Eindringwiderstände der Rammsonde keine Garantie für eine erfolgreiche Verdichtung ist.

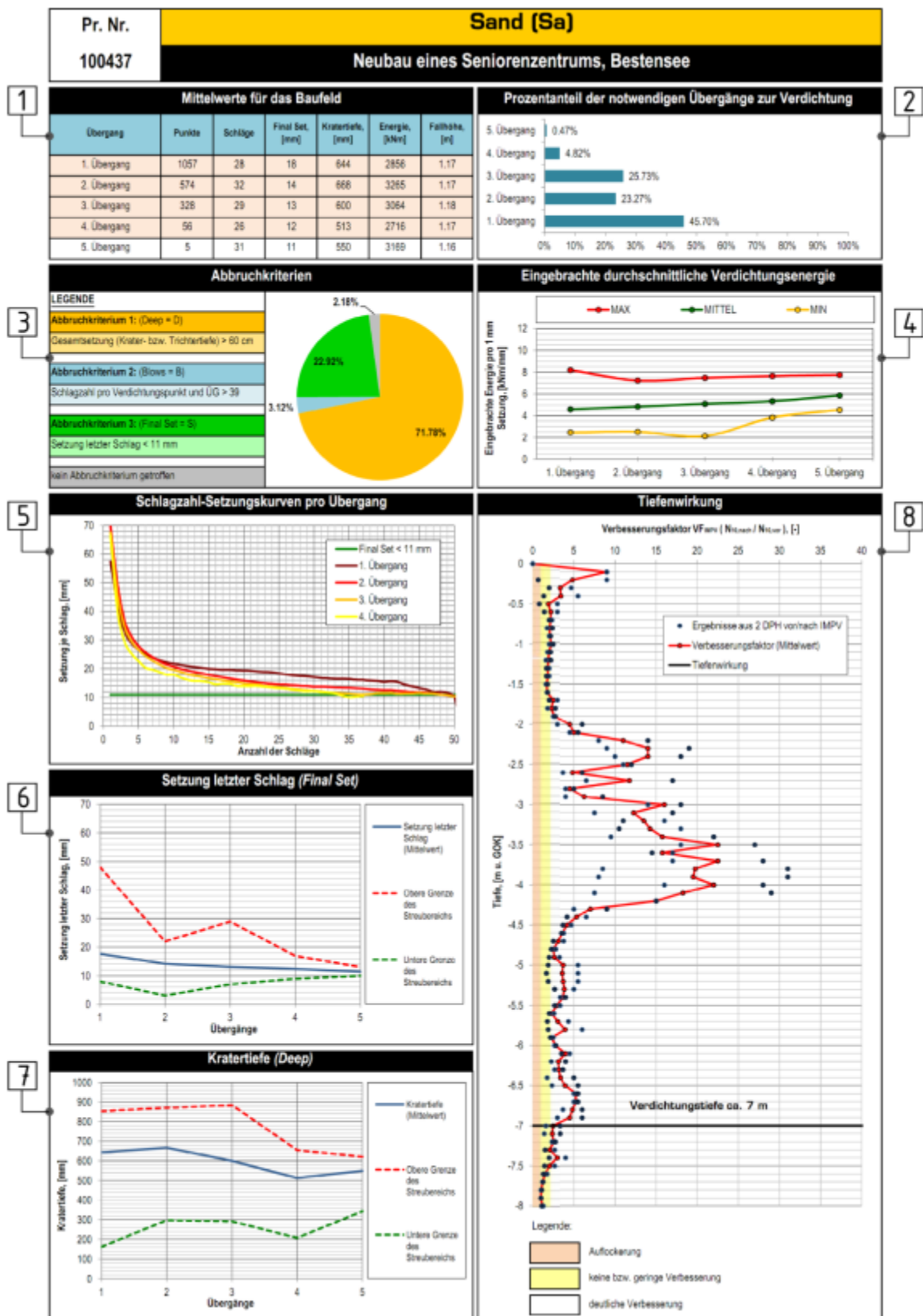


Abb. 51: Beispiel für Tabellenblatt 7 – Auswertung der während der Impulsverdichtung aufgezeichneten Verdichtungsparameter

5.3 Auswertung der Projektdaten nach Untergrundkategorien

Um das charakteristische Verhalten von den Böden der vier definierten Untergrundkategorien („Kies“, „Sand“, „Schluff“ und „künstliche Auffüllung“) bei der Impulsverdichtung anhand der Projektdaten erkennen zu können, wurden die Auswertungsergebnisse der einzelnen Projekte je Untergrundkategorie zusammengeführt und verglichen. Es wurde versucht bei der gesamtheitlichen Betrachtung der ausgewerteten Projektdaten untergrundtypische Verfahrensparameter zu finden. Es wurden folgende Verfahrensparameter für die Untergrundkategorien bestimmt:

1. Anzahl der notwendigen Übergänge zur erfolgreichen Verdichtung
2. Durchschnittlich angetroffene Abbruchkriterien
3. Durchschnittliche Verdichtungsenergie bezogen auf die Setzung
4. Durchschnittliche Schlagzahl-Setzungsverläufe
5. Durchschnittliche Kratertiefe
6. Durchschnittliche Setzung letzter Schlag
7. Durchschnittliche Tiefenwirkung

Die Ergebnisse der Auswertung der Projektdaten je Untergrundkategorie werden in den nachfolgenden Unterkapiteln ausführlich beschrieben und interpretiert.

5.3.1 Ergebnisse der Auswertung der Projektdaten der Untergrundkategorie „Kies“

Bei der Einteilung der Projekte in die Untergrundkategorien konnten von 27 ausgewählten Projekten 3 eindeutig zur Kategorie *Kies (Gr)* zugeordnet werden. Aufgrund der geringen Anzahl an Projekten also sind die Ergebnisse der Auswertung mit relativ großen Ungenauigkeiten behaftet. Dennoch lassen sich Aussagen über das Verhalten von diesen Böden bei der Impulsverdichtung formulieren.

Folgend wird die Untergrundsituation bei den 3 betrachteten Projekten gemäß den Bodengutachten vorgestellt.

- *PNr. 100394 – BV Hangar III, Schenker Terminal, Flughafen Klagenfurt, Österreich*

In den Bodenaufschlüssen wurden locker gelagerte sandige, steinige Kiese angetroffen, die von einer geringmächtigen Anschüttung aus dem gleichen Bodengemisch mit Fremdstoffanteilen (Ziegelreste, Betonbrüche ehemaliger Fundamente) überlagert wurden.

- *PNr. 100477 – BV Wohnanlage Seefelderstrasse, Wien, Österreich*

Unter dem Mutterboden befinden sich geringmächtige Aulehme und Ausande in Form von schwach tonigen, feinsandigen Schluffen bis schluffigen Feinsanden von weicher bis steifer – Konsistenz bzw. lockerer Lagerung. Darunter wurden locker bis mitteldicht gelagerte sandige Fein- bis Grobkiese angetroffen.

- *PNr. 130164 – BV Wohnanlage D13, Aspern, Seestadt, Wien, Österreich*

Die Mutterbodenschicht im Projektareal wurde von einem Feinsand-Schluff-Gemisch unterlagert. Darunter wurde eine quartäre Kiesschicht angetroffen, die sich aus schwach

schluffigen bis schluffigen Mittel- bis Grobkiesen bzw. Fein- bis Mittelkiesen zusammensetzt. Im Zuge der Bodenverbesserungsarbeiten wurde die Kiesschicht unter der 4 m tief liegenden Baugrubensohle verdichtet.

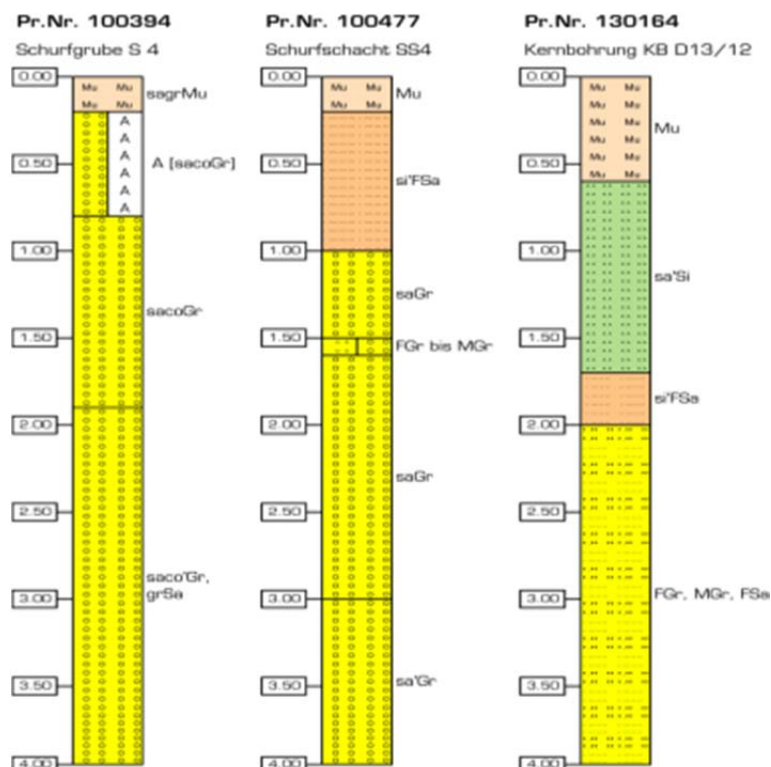


Abb. 52: Ausgewählte Bodenprofile der Untergrundkategorie „Kies“

Tabelle 32: Leistungsumfang und Verdichtungsraaster für die Untergrundkategorie „Kies“

Anzahl der Projekte	Anzahl der Verdichtungsunkte
3	1898

Leistungsumfang		
Fläche [m ²]	SF ¹⁾ [lfm]	EF ²⁾ [Stück]
5636	-	230

Verdichtungsraaster
2,0 x 2,0 m 2,5 x 2,5 m 3,0 x 3,0 m EF

Anmerkung:

¹⁾ Streifenfundamente

²⁾ Einzelfundamente

In Abb. 52 werden ausgewählte Bodenprofile für die o.g. drei Projekte dargestellt. Die Bodenprofile aller durchgeführten Bodenaufschlüsse im Bereich der Verdichtungsfläche sind auf der CD-ROM in der jeweiligen Auswertungsdatei zu finden. In Tabelle 32 werden der Gesamtleistungsumfang, die verwendeten Verdichtungsraaster und die Anzahl aller Verdichtungsunkte für die Impulsverdichtung der Projektareale angeführt.

Die im Zuge der Datenauswertung ermittelten Mittelwerte der aufgezeichneten Verdichtungsparameter bei den drei bearbeiteten Projekten sind in der nachfolgenden Tabelle 33 angegeben, wobei die schraffierten Zeilen in der vorliegenden Auswertung betrachtete Übergänge bezeichnen. Als solche gelten Übergänge, in denen eine Impulsverdichtung mehr als 1 % aller Verdichtungsunkte erfolgte.

Tabelle 33: Mittelwerte der Verdichtungsparameter für die Untergrundkategorie „Kies“

Übergang Nr.	Anzahl der Verdichtungsunkte	Durchschnittliche Anzahl der Verdichtungsstöße [-]	Mittelwert der Setzung letzter Schlag, [mm]	Durchschnittliche Kratertiefe, [mm]	Mittelwert der eingebrachten Energie, [kNm]	Mittelwert der Fallhöhe aller Verdichtungsstöße, [m]
1. ÜG	1898	29	8	444	2687	1.06
2. ÜG	404	17	7	226	1639	1.03
3. ÜG	9	36	7	351	3518	1.09
4. ÜG	2	31	12	517	2316	0.78

• Anzahl der Übergänge

Bei 99,53% aller Verdichtungspunkte wurde der erforderliche Verdichtungsgrad mit zwei Übergängen der Impulsverdichters erreicht. Wichtig ist zu bemerken, dass die Mehrheit der Verdichtungspunkte (78,71%) bereits nach dem ersten Übergang erfolgreich verdichtet werden konnte.

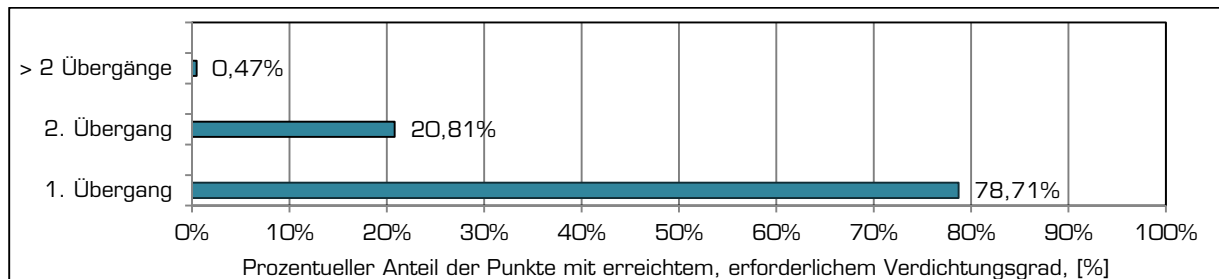


Abb. 53: Anzahl der notwendigen Übergänge zur erfolgreichen Verdichtung bei der Untergrundkategorie „Kies“

• Abbruchkriterien

Im nachfolgenden Kreisdiagramm (s. Abb. 54) werden die Ergebnisse aus der Analyse der Abbruchkriterien dargestellt. Bei den meisten Verdichtungspunkten – 83% – wurde am häufigsten das Abbruchkriterium 3, Setzung letzter Schlag, angetroffen. Das zweithäufigste Abbruchkriterium war die Begrenzung der Schlagzahl mit 6%. Am seltensten wurde das erste Abbruchkriterium, die Begrenzung der Kratertiefe, getroffen. Bei etwa 10% aller Verdichtungspunkte wurde kein Abbruchkriterium angegeben.

Abbruchkriterium 1:	(Deep = D)
Gesamtsetzung (Krater- bzw. Trichtertiefe)	
Abbruchkriterium 2:	(Blows = B)
Schlagzahl pro Verdichtungspunkt und Übergang	
Abbruchkriterium 3:	(Final Set = S)
Setzung letzter Schlag	
kein Abbruchkriterium angegeben	

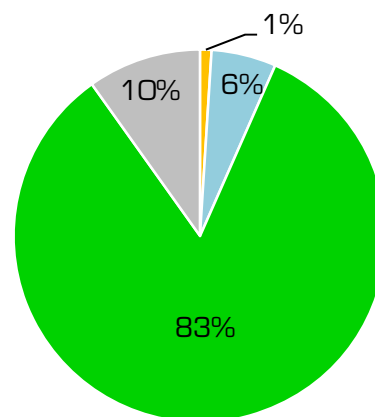


Abb. 54: Durchschnittlich angetroffene Abbruchkriterien bei der Untergrundkategorie „Kies“

• Verdichtungsenergie

Das vorliegende Diagramm gibt Auskunft über die Verdichtungsenergie während der Impulsverdichtung. Beim ersten Übergang war durchschnittlich ca. 6,79 kJ Energie für jede 1 mm Setzung notwendig, beim zweiten Übergang 7,46 kJ. Der Grund dafür ist, dass je dichter der Boden infolge der Verdichtung wird, desto mehr Energie wird benötigt, um das restliche Porenvolumen zu verringern.

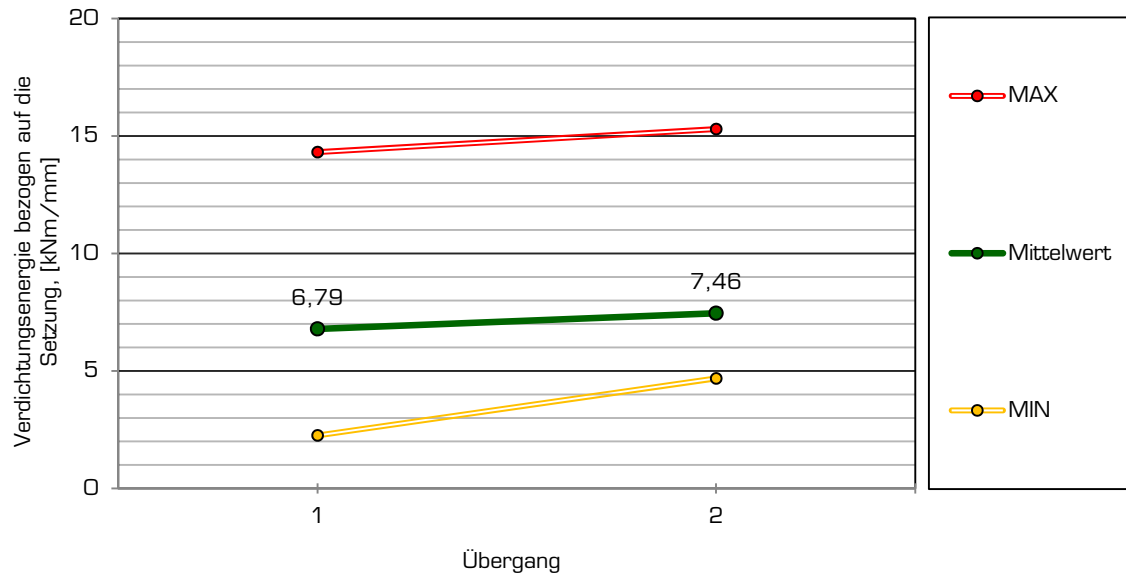


Abb.55: Durchschnittliche bezogene Verdichtungsenergie bei der Untergrundkategorie „Kies“

• Schlagzahl-Setzungsverlauf

Der Schlagzahl-Setzungsverlauf zeigt die Größe der Setzung unter dem Verdichtungsfuß mit steigender Schlagzahl der Verdichtungsstöße.

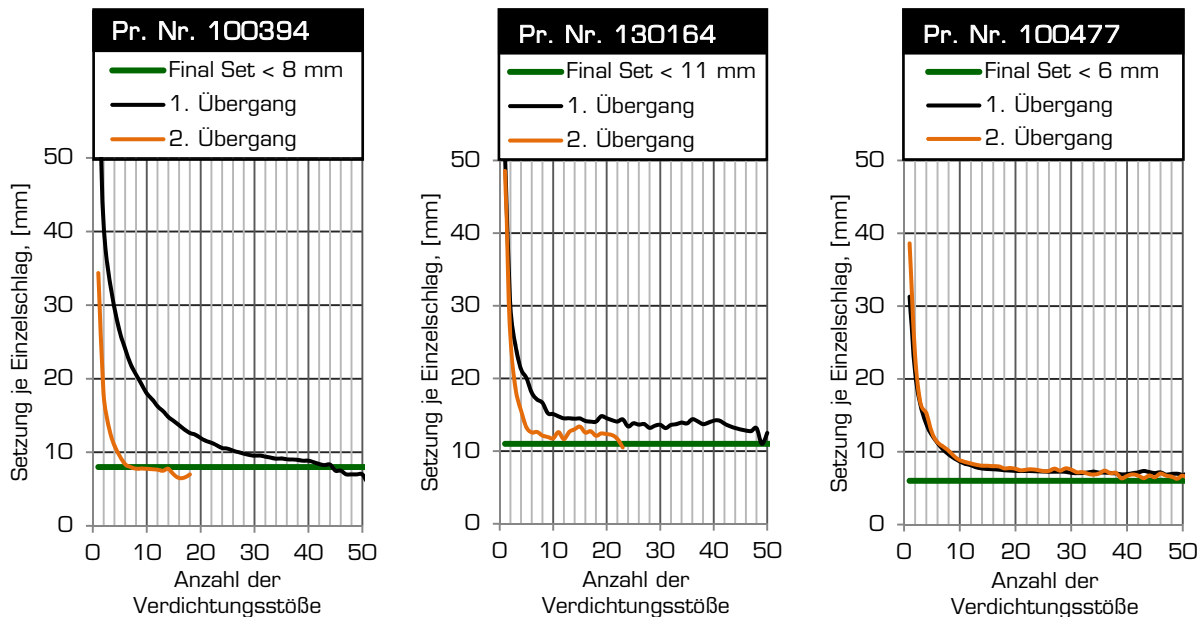


Abb.56: Schlagzahl-Setzungskurven für alle Projekte der Untergrundkategorie „Kies“

In Abb. 56 sind die Setzungskurven für alle drei Projekte der Untergrundkategorie „Kies“ angegeben. Die Impulsverdichtung bei Projekt Nr. 100394 und Projekt Nr. 130164 erfolgte in zwei Übergängen. Bei dem ersten Projekt verlaufen die Setzungskurven relativ gleichmäßig, beim zweiten viel ungleichmäßiger.

Beim Projekt (PNr.100477) waren vier Übergänge mit dem Impulsverdichter durchgeführt, wobei die letzten zwei Übergänge bei weniger als 1 % aller Punkte erfolgten. Wie aus dem

Setzungsdiagramm ersichtlich ist, überlappen sich die Kurven der einzelnen Übergänge in größeren Bereichen.

Die relativ großen Setzungen nach den ersten Schlägen des zweiten Überganges sind auf Wiederverfüllung der Verdichtungskrater zurückzuführen.

Abb. 57 zeigt die durchschnittlichen Schlagzahl-Setzungskurven für die Untergrundkategorie „Kies“. Es sind die Mittelwerte der Setzungen dargestellt. Die obere und die untere Grenze der Streubereiche wurden ebenfalls angeführt.

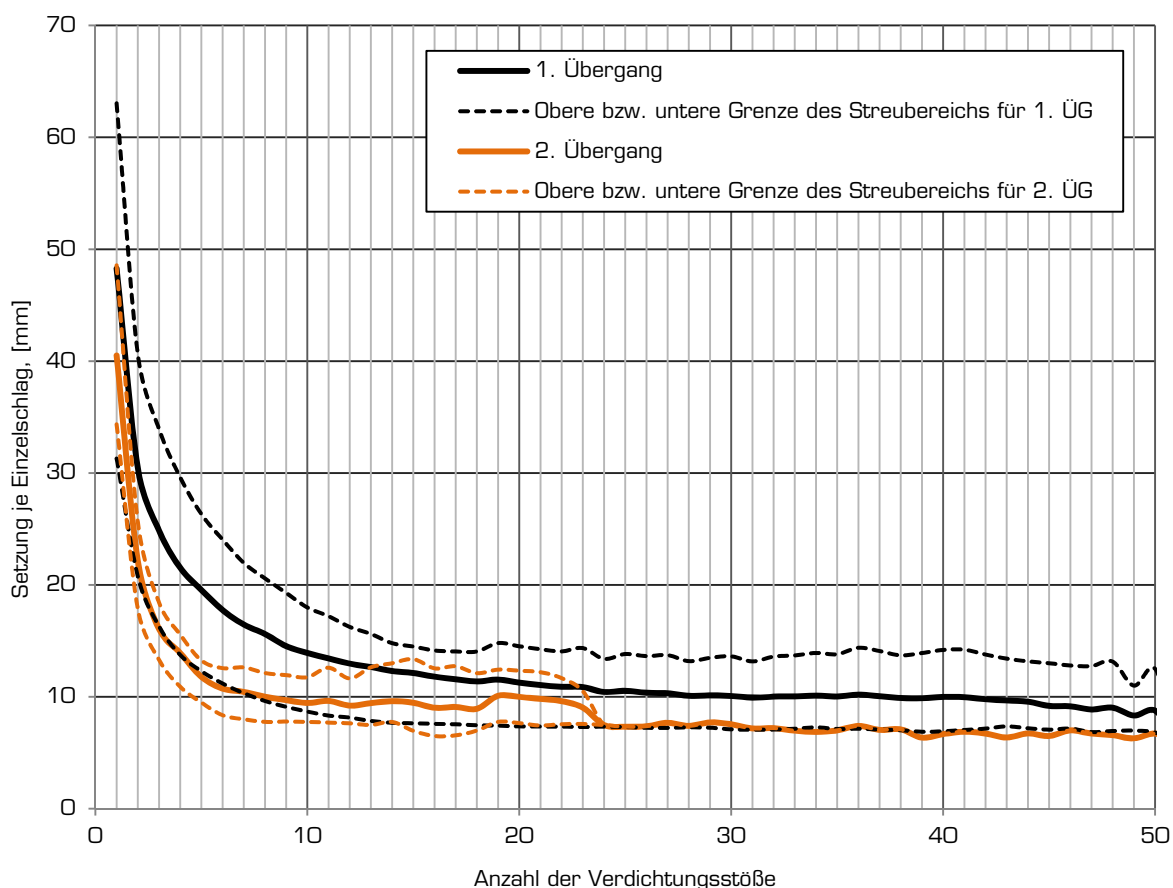


Abb.57: Durchschnittliche Schlagzahl-Setzungskurven für die Untergrundkategorie „Kies“

Es ist auf dem Diagramm ersichtlich, dass bis etwa zum 10. Verdichtungsstoß die Kurven in der Regel steil verlaufen und danach zu einem bestimmten Setzungswert sich asymptotisch nähern. Der Sprung in der durchschnittliche Setzungskurve des zweiten Übergangs zwischen dem 10. und 24. Stoß ist mit den Hoch- und Tiefpunkten der unregelmäßigen Schlagzahl-Setzungskurve von Projekt Nr. 130164 an der gleichen Stelle zu erklären.

Die auf Abb. 58 und Abb. 59 dargestellten Diagramme veranschaulichen die Änderung der Kratertiefe bzw. der Setzung letzter Schlag. Es wird auch die obere und untere Grenze des Streubereichs dargestellt.

Der Mittelwert der Kratertiefe nach dem ersten bzw. zweiten Übergang hat sich von 444 mm auf 226 mm verringert. Eine Abnahme der Setzung letzter Schlag hat sich ebenfalls ergeben. Die durchschnittliche Einsenkung des Verdichtungsfußes beim letzten Schlag hat sich von 8 mm nach dem ersten Übergang auf 7 mm reduziert.

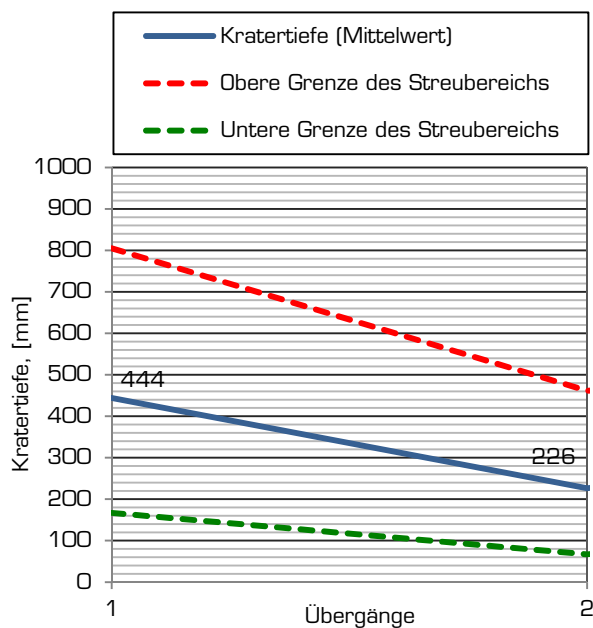


Abb.58: Durchschnittliche Kratertiefe bei der Untergrundkategorie „Kies“

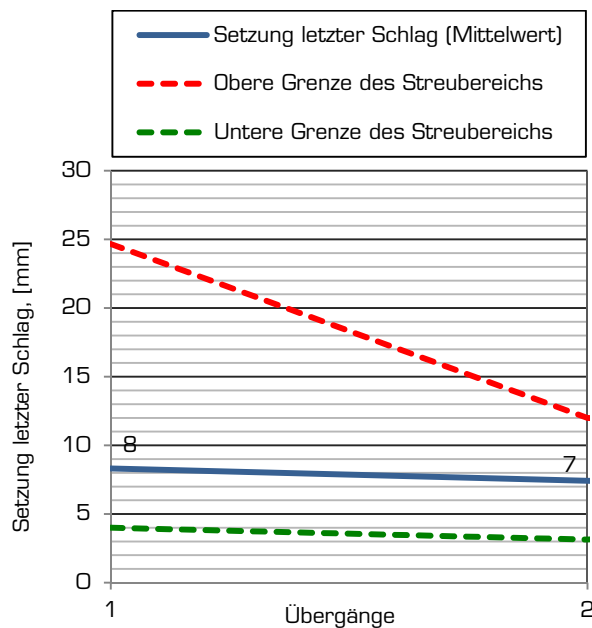


Abb.59: Durchschnittliche „Setzung letzter Schlag“ bei der Untergrundkategorie „Kies“

• Tiefenwirkung

Anhand der verfügbaren Messergebnissen der durchgeführten Rammsondierungen zur Verdichtungskontrolle lässt sich die Tiefenwirkung der Impulsverdichtung erst beim Projekt Nr.100394 ableiten. Im Diagramm in Abb. 60 ist die Ermittlung der Tiefenwirkung der Impulsverdichtung für dieses Projekt dargestellt, Beim Projekt Nr. 100477 lässt sich keine Verdichtungstiefe anhand der Sondierergebnisse ableiten, es sind die Verbesserungsfaktoren im oberen Bereich dargestellt.

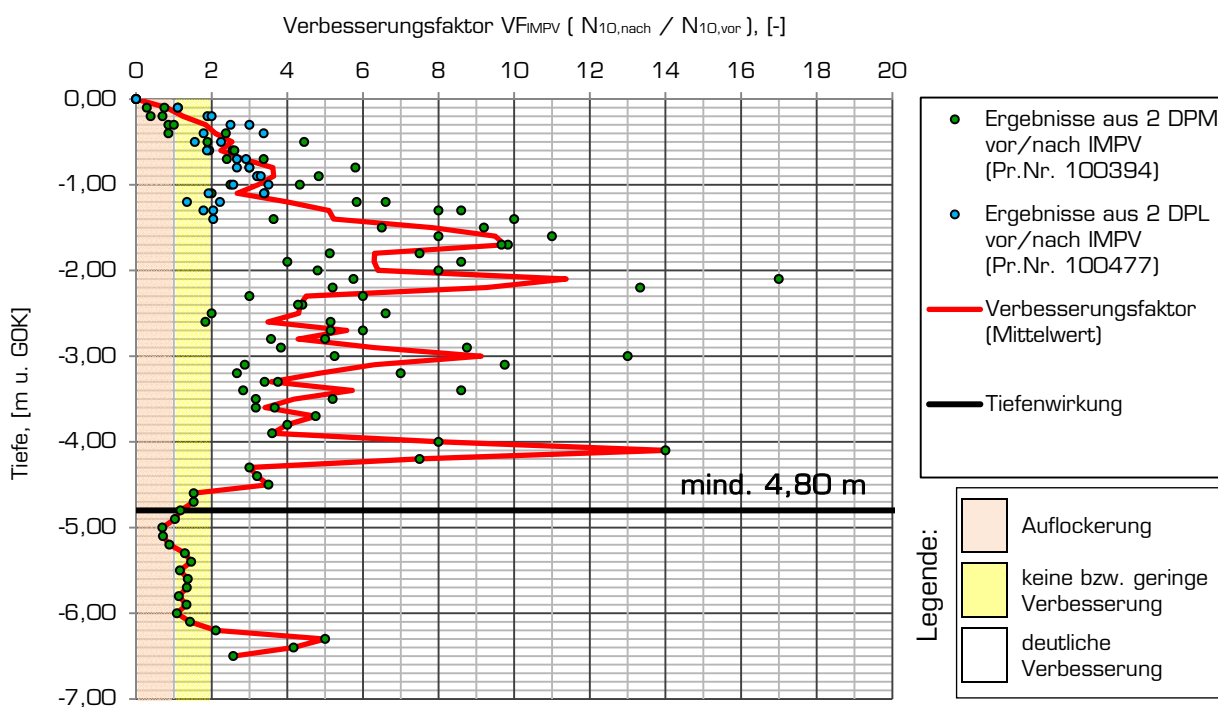


Abb.60: Ermittlung der Tiefenwirkung der Verdichtung bei der Untergrundkategorie „Kies“ mit Hilfe von Rammsondierungen

Es ist eindeutig erkennbar, dass die erreichte Verdichtungstiefe mindestens 4,8 m beträgt. Unter diesem Bereich können Verbesserungsfaktoren kleiner als 1 ermittelt werden. Jedoch ist beim Vergleich mit den exakten Messwerten (s. Abb. 61 – Nr. 1 DPM 82813) festzustellen, dass die gemessenen Schlagzahlen im Tiefenbereich von 4,0 bis 6,5 m eine dichte und z.T. sehr dichte Lagerung aufweisen. Eine allgemein gültige Aussage über die Tiefenwirkung für die Untergrundkategorie „Kies“ kann anhand der vorhandenen Messergebnisse nicht formuliert werden.

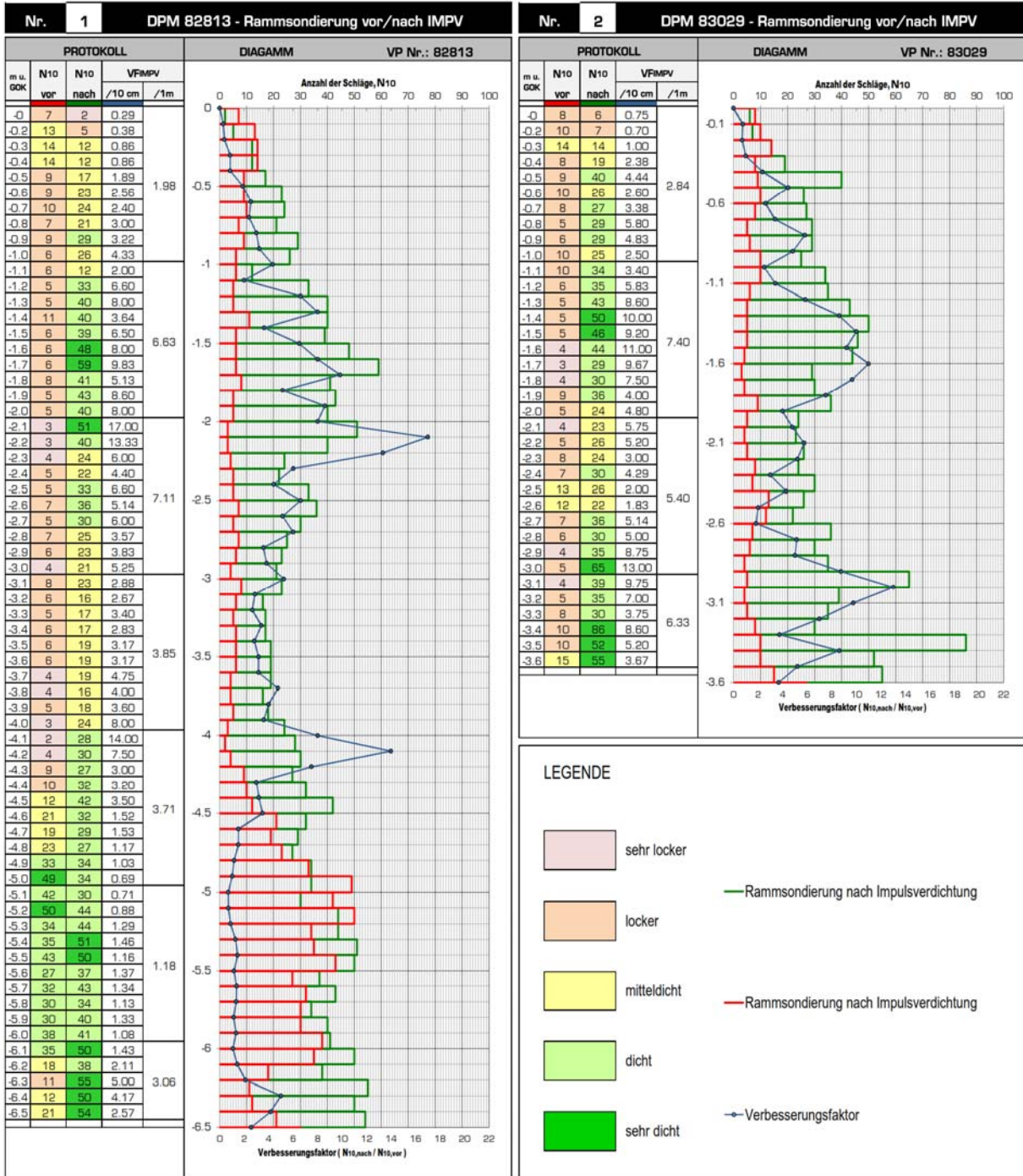


Abb.61: Ergebnisse der Rammsondierungen vor und nach der Impulsverdichtung beim Projekt Nr. 100394

5.3.2 Ergebnisse der Auswertung der Projektdaten der Untergrundkategorie „Sand“

Bei 4 von 27 Projekten wurde der Untergrund im Bereich der Verdichtungsfläche entweder als weit bzw. eng gestufte Sande (SW bzw. SE) oder als Sand-Schluff-Gemische (SU) klassifiziert und somit zur Untergrundkategorie *Sand (Sa)* zugeordnet. Ähnlich wie bei der Untergrundkategorie „Kies“ sind aufgrund der geringen Anzahl an Projekten die ermittelten Kurven mit relativ großen Ungenauigkeiten behaftet. Allerdings ist es möglich anhand der erstellten Auswertungsdiagramme Aussagen über die Untergrundkategorie zu formulieren.

Die verdichteten Bereiche weisen folgende Untergrundbeschaffenheit auf:

- *PNr. 100437 – BV Neubau eines Seniorenzentrums in Bestensee, Deutschland*

Unter der Mutterbodenschicht wurde locker bis sehr locker gelagerte Gemenge aus z.T. sehr enggestuften Fein-, Mittel- und Grobsanden in wechselnder Korngewichtung angetroffen. Genaue Angaben über die bodenphysikalischen Kennwerte sind in der Auswertungsdatei des Projektes auf der CD-ROM zu finden.

- *PNr. 100971 – BV Hochwasserschutzdamm Kepa Polska am Weichsel, Plock, Polen*

In den Bodenaufschlüssen wurden sehr locker bis locker und z.T. mitteldicht gelagerte enggestufte Mittel- und Feinsande erkundet. In manchen Bodenprofilen wurden geringmächtige Schichten aus sandigem Schluff und schluffigem, teilweise tonigem Sand getroffen.

- *PNr. 110960 – Verdichtungsversuche auf dem Testfeld A44n in Garzweiler, Deutschland*

Auf dem Testfeld A44n des Tagebaues Garzweiler wurden 2012 Versuche zur Ermittlung der Verdichtungswirkung von einer schweren Vibrationswalze mit Polygonbandage, einem Impulsverdichter und einem Tiefrüttler durchgeführt. Die betroffenen Böden im Projektareal wurden als schluffige, kiesige Sande und teilweise als schluffige, sandige Kiese klassifiziert.

- *PNr. 120303 – Neubau Produktionshalle mit Büro, Stemester Seekirchen am Wellersee, Österreich*

Unterhalb des Mutterbodens wurden sehr schwach schluffige bis stark schluffige, schwach kiesige bis kiesige, sehr schwach steinige Sande in vorwiegend lockerer Lagerung aufgeschlossen. Eine ca. 1 m mächtige Zwischenschicht aus sehr schwach tonigen, sandigen bis stark sandigen, sehr schwach kiesigen bis kiesigen Schluffen in vorwiegend weicher und teilweise breiiger Konsistenz wurde bei allen Bodenprofilen festgestellt.

In der nachfolgenden Abb. 62 werden ausgewählte Bodenprofile für jedes Projekt aus dem jeweiligen Bodengutachten angeführt. Die Bodenprofile aller Bodenaufschlüsse im Bereich der Verdichtungsfläche sind auf der CD-ROM in der jeweiligen Auswertungsdatei zu finden. Angaben über den Gesamtleistungsumfang, die verwendeten Verdichtungs raster und die Anzahl aller Verdichtungspunkte sind in Tabelle 34 zusammengestellt.

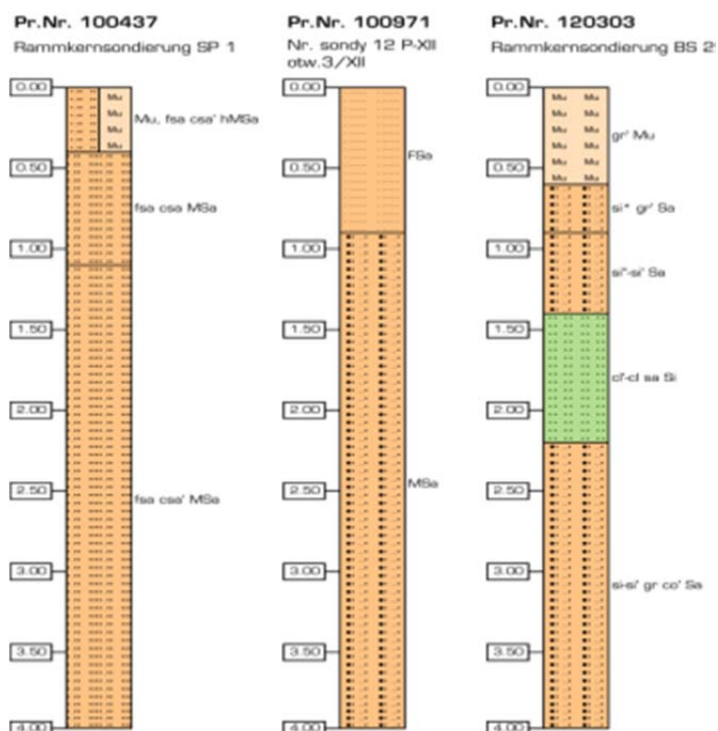


Abb. 62: Ausgewählte Bodenprofile der Unterkategorie „Sand“

Tabelle 34: Leistungsumfang und Verdichtungsraaster für die Unterkategorie „Sand“

Anzahl der Projekte	Anzahl der Verdichtungspunkte
4	8807

Leistungsumfang		
Fläche [m ²]	SF ¹⁾ [lfm]	EF ²⁾ [Stück]
2630	5540	36

Verdichtungsraaster
1,8 x 1,8 m 3,0 x 3,0 m SF + EF

Anmerkung:

¹⁾ Streifenfundamente

²⁾ Einzelfundamente

Die im Zuge der Datenauswertung ermittelten Mittelwerte der Verdichtungsparameter sind in der Tabelle 35 angegeben, wobei die schraffierten Zeilen die bei der Auswertung betrachteten Übergänge bezeichnen. Als solche gelten Übergänge, in denen eine Impulsverdichtung bei mehr als 1 % aller Verdichtungspunkte erfolgt.

Tabelle 35: Mittelwerte der Verdichtungsparameter für die Unterkategorie „Sand“

Übergang Nr.	Anzahl der Verdichtungspunkte	Durchschnittliche Anzahl der Verdichtungsstöße [-]	Mittelwert der Setzung letzter Schlag, [mm]	Durchschnittliche Kratertiefe, [mm]	Mittelwert der eingebrachten Energie, [kJm]	Mittelwert der Fallhöhe aller Verdichtungsstöße, [m]
1. ÜG	1350	28	18	614	1856	0.77
2. ÜG	767	38	12	611	2887	0.82
3. ÜG	415	32	10	476	3031	0.99
4. ÜG	85	26	10	369	2407	0.94
5. ÜG	8	24	9	306	2381	0.98

• Anzahl der Übergänge

Das Diagramm auf Abb. 63 zeigt den durchschnittlichen Anteil der bearbeiteten Verdichtungspunkte in den einzelnen Übergängen für die Unterkategorie „Sand“. Es ist ersichtlich, dass zur erforderlichen Verdichtung bei den meisten Fällen 4 Arbeitsgänge mit dem Impulsverdichter notwendig waren. Nach dem ersten Übergang wurde bei 43,19 % aller Punkte der erforderliche Verdichtungsgrad (eine der drei Abbruchkriterien) erreicht. Für ca. je ein Viertel der Verdichtungspunkte wurde die erforderliche Verdichtung nach den

nachfolgenden zwei Übergängen erreicht. Der 4. Übergang erfolgte bei 5,70 % der Verdichtungspunkte und erst bei 0,59 % war ein 5. Übergang mit dem Impulsverdichter notwendig.

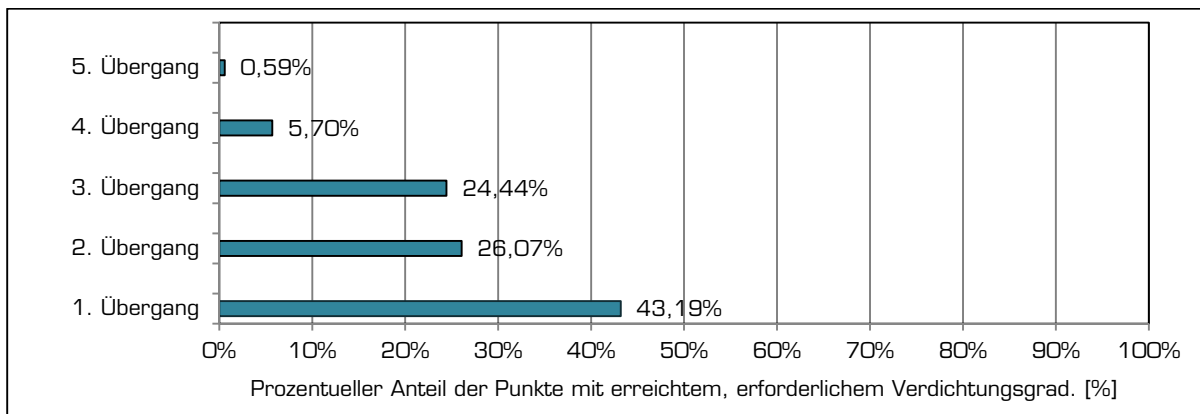


Abb. 63: Anzahl der notwendigen Übergänge zur erfolgreichen Verdichtung bei der Untergrundkategorie „Sand“

• Abbruchkriterien

Die Ergebnisse der Auswertung der Abbruchkriterien für die Untergrundkategorie „Sand“ werden im nachfolgenden Kreisdiagramm gezeigt (s. Abb. 64).

Abbruchkriterium 1:	(Deep = D)
Gesamtsetzung (Krater- bzw. Trichtertiefe)	
Abbruchkriterium 2:	(Blows = B)
Schlagzahl pro Verdichtungspunkt und Übergang	
Abbruchkriterium 3:	(Final Set = S)
Setzung letzter Schlag	
kein Abbruchkriterium angegeben	

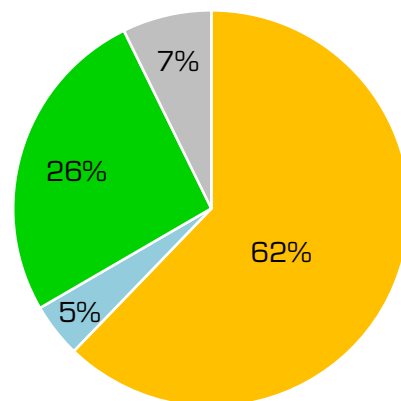


Abb. 64: Durchschnittlich angetroffene Abbruchkriterien bei der Untergrundkategorie „Sand“

Bei der Impulsverdichtung von Sand wurde am häufigsten das erste Abbruchkriterium „Gesamtsetzung“ getroffen. Das zweithäufigste Kriterium ist die Begrenzung der Setzung letzter Schlag mit 26 %. Nur bei 5 % aller Punkte wurde das zweite Abbruchkriterium getroffen, bei dem die maximal zulässige Schlagzahl pro Verdichtungspunkt und Übergang erreicht wurde. Bei 7 % aller Verdichtungspunkte wurde kein Abbruchkriterium angegeben.

• Verdichtungsenergie

Das Diagramm in Abb. 65 zeigt den Verlauf der durchschnittlichen eingebrachten Verdichtungsenergie mit steigender Anzahl der Übergänge bei den Projekten der Untergrundkategorie „Sand“.

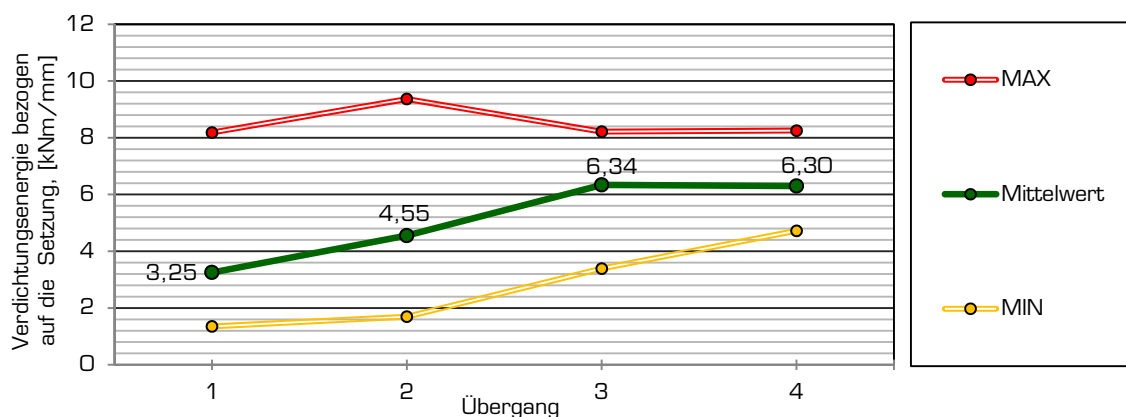


Abb. 65: Durchschnittliche bezogene Verdichtungsenergie bei der Untergrundkategorie „Sand“

Auf dem Diagramm ist es deutlich zu erkennen, dass die Verdichtungsenergie mit steigender Anzahl der Übergänge zunimmt. Beim ersten Übergang wurde durchschnittlich etwa 3,25 kJ Verdichtungsenergie für jede 1 mm Setzung eingebracht. Im nachfolgenden zweiten Übergang erhöhte sie sich auf 4,55 kJ und im dritten auf 6,34 kJ. Ab dem vierten Übergang ist die durchschnittliche Verdichtungsenergie nahezu konstant.

• Schlagzahl-Setzungsverlauf

Die Kurve stellt grafisch den Schlagzahl-Setzungsverlauf bei den einzelnen Übergängen dar. In Abb. 66 sind die mittleren Schlagzahl-Setzungskurven aus sämtlichen Projektdaten der Untergrundkategorie „Sand“ gebildet. Auf dem Diagramm werden zusätzlich auch die oberen und unteren Grenzen der Streubereiche aufgezeichnet.

Die Setzungskurven verlaufen bei allen Übergängen nahezu gleichmäßig. Die relativ großen Setzungen nach den ersten Verdichtungsstößen beim jeweiligen Übergang sind darauf zurückzuführen, dass nach jedem Übergang die Krater mit Zugabematerial verfüllt wurden.

Der Verlauf der Schlagzahl-Setzungskurven ist in den einzelnen Übergängen relativ ähnlich. Sie verlaufen etwa bis zum 10. Verdichtungsstoß steil, danach nähern sie sich asymptotisch zu einem bestimmten Setzungswert.

Die nachfolgenden zwei Diagramme (s. Abb. 67 und Abb. 68) veranschaulichen die Änderung der durchschnittlichen Kratertiefe bzw. der durchschnittliche Setzung letzter Schlag mit zunehmender Anzahl der Übergänge.

Eine Änderung der Gesamtsetzung unter dem Verdichtungsfuß ist nach dem ersten und zweiten Übergang kaum bemerkbar. Die Tiefe des entstandenen Kraters beträgt 614 mm bzw. 611 mm. Erst nach dem dritten und vierten Übergang ist eine wesentliche Abnahme der Kratertiefe (um 135 mm bzw. um 107 mm) zu erkennen. Aus dem Diagramm lässt sich feststellen, dass mit steigender Anzahl der Übergänge nicht nur die relative mittlere Kratertiefe abnimmt, sondern auch der Streubereich sich verkleinert.

Eine Abnahme der Setzung letzter Schlag ist ebenso erkennbar. Die durchschnittliche Einsenkung des Verdichtungsfußes beim letzten Verdichtungsstoß hat sich von 18 mm nach dem ersten Übergang auf 12 mm nach dem zweiten und auf 10 mm nach dem dritten und vierten reduziert.

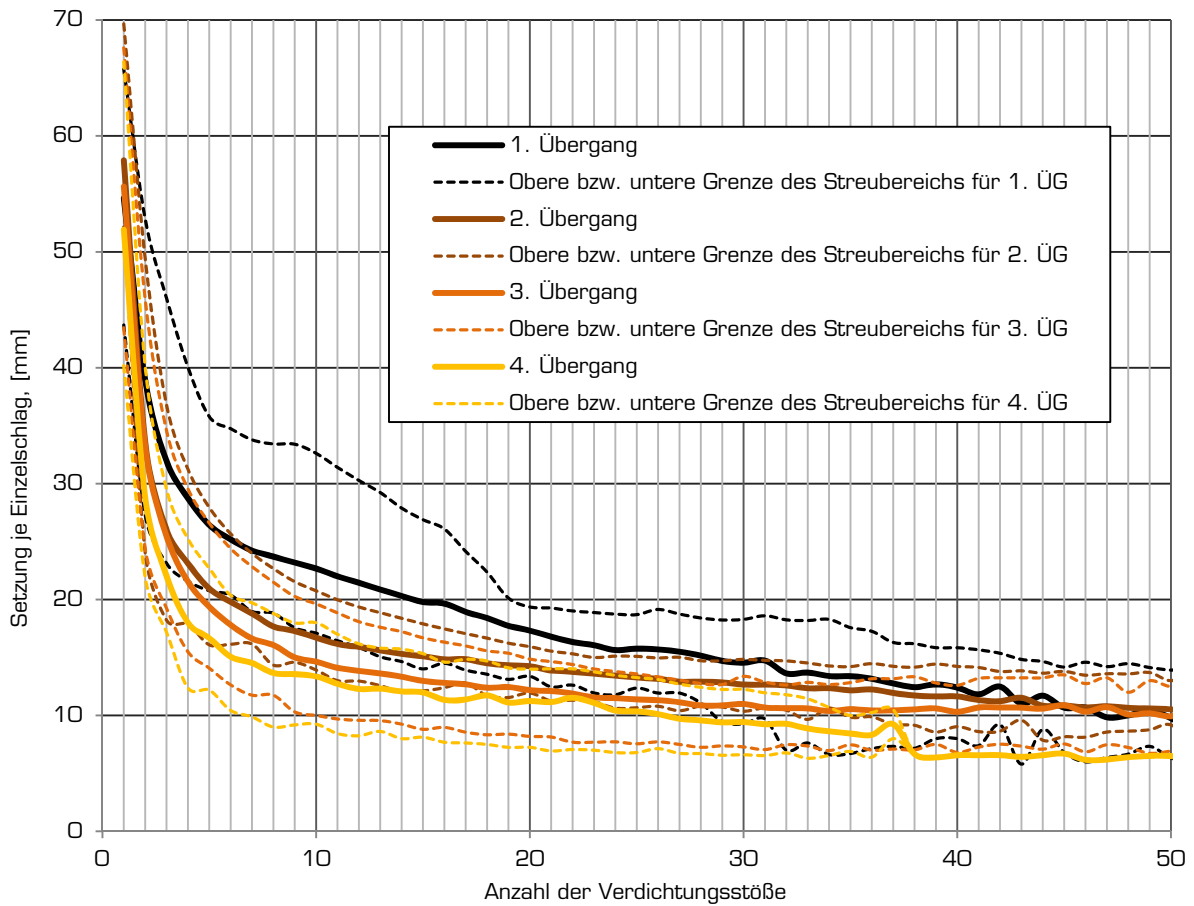


Abb. 66: Durchschnittliche Schlagzahl-Setzungskurven für die Untergrundkategorie „Sand“

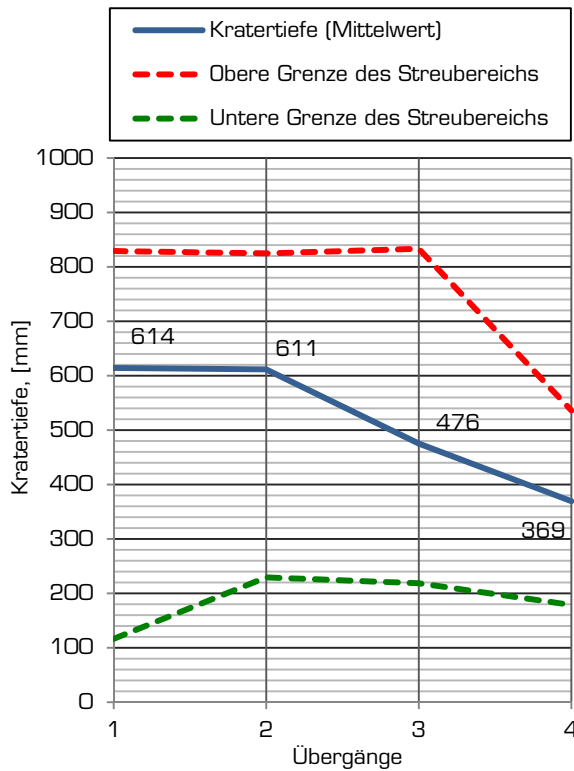


Abb. 67: Durchschnittliche Kratertiefe bei der Untergrundkategorie „Sand“

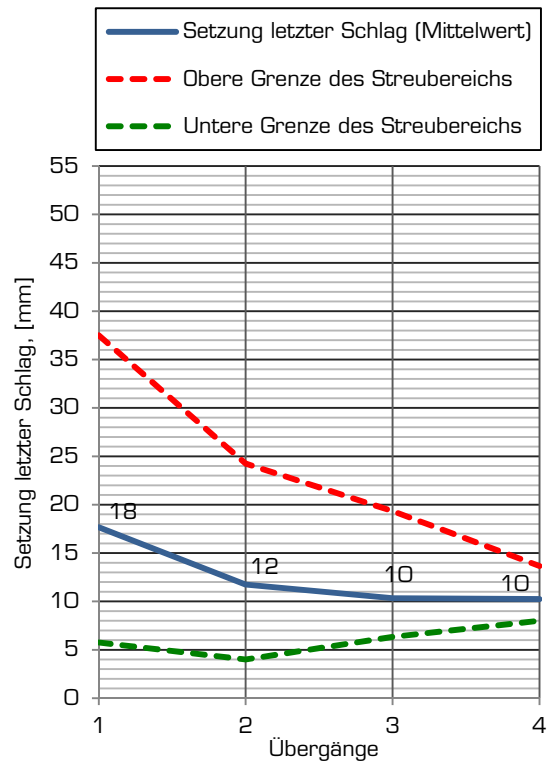


Abb. 68: Durchschnittliche „Setzung letzter Schlag“ bei der Untergrundkategorie „Sand“

• Tiefenwirkung

In Abb. 69 ist die Ermittlung der Tiefenwirkung mit Hilfe der Verbesserungsfaktoren für die Untergrundkategorie „Sand“ und in Abb. 70 sind Messergebnissen von ausgewählten Rammsondierungen grafisch dargestellt.

Die Tiefenwirkung beim Projekt Nr. 100437 beträgt ca. 7,2 m. Dabei ist eine deutliche Zunahme der Lagerungsdichte im Tiefenbereich von ca. 2 bis 6 m zu erkennen. Nach der Impulsverdichtung der anstehenden lockeren und z.T. mitteldichten Sande wurde im betreffenden Bereich eine dichte Lagerung festgestellt. Die Verdichtungstiefe beim Projekt Nr. 100971 ist deutlich kleiner und beträgt etwa 4,6 m. Ein wesentlicher Verdichtungszuwachs ist auch bei Projekt Nr. 110960 in einer Tiefe von etwa 5,6 m zu erkennen. Die Tiefenwirkung könnte für Projekt Nr. 120303 nicht abgeleitet werden. Zur Verdichtungskontrolle wurde nur eine Sondierung durchgeführt, die in einer Tiefe von 4,3 m abgebrochen wurde, da bei einer längeren Rammstrecke alle gemessenen Schlagzahlen N_{10} eine dichte Lagerung aufwiesen. Somit ist die Änderung der Eindringwiderstände der Rammsonde im unteren Tiefenbereich unbekannt.

Die mittlere Verdichtungstiefe für die Untergrundkategorie „Sand“ kann auf Basis der ausgewerteten Daten in einer Tiefe von 4,7 m angenommen werden. Eine allgemeingültige Aussage über die Tiefenwirkung kann anhand der Messergebnisse der vier betrachteten Projekte nicht getroffen werden.

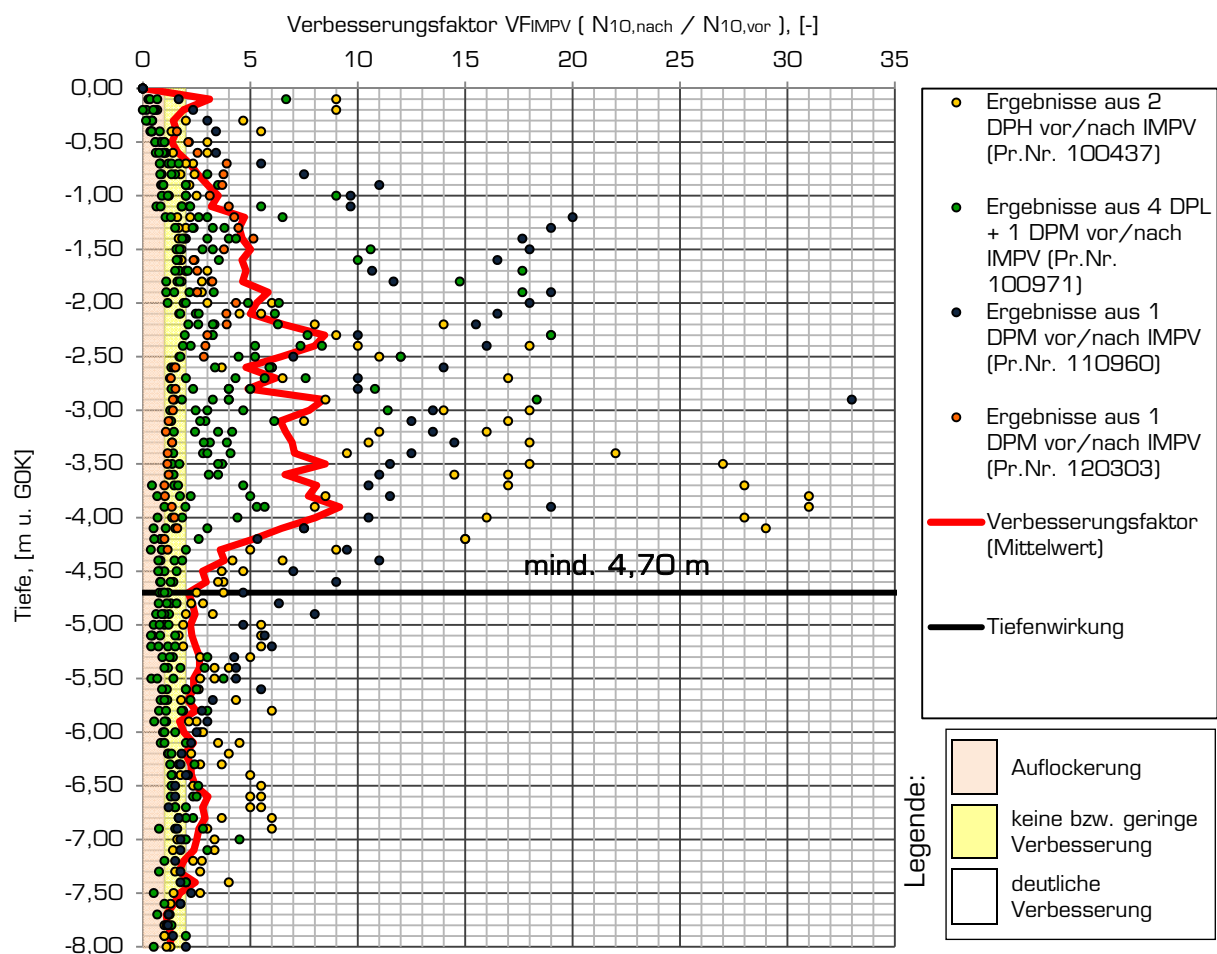


Abb.69: Ermittlung der Tiefenwirkung bei der Untergrundkategorie „Sand“ mit Hilfe von Rammsondierungen

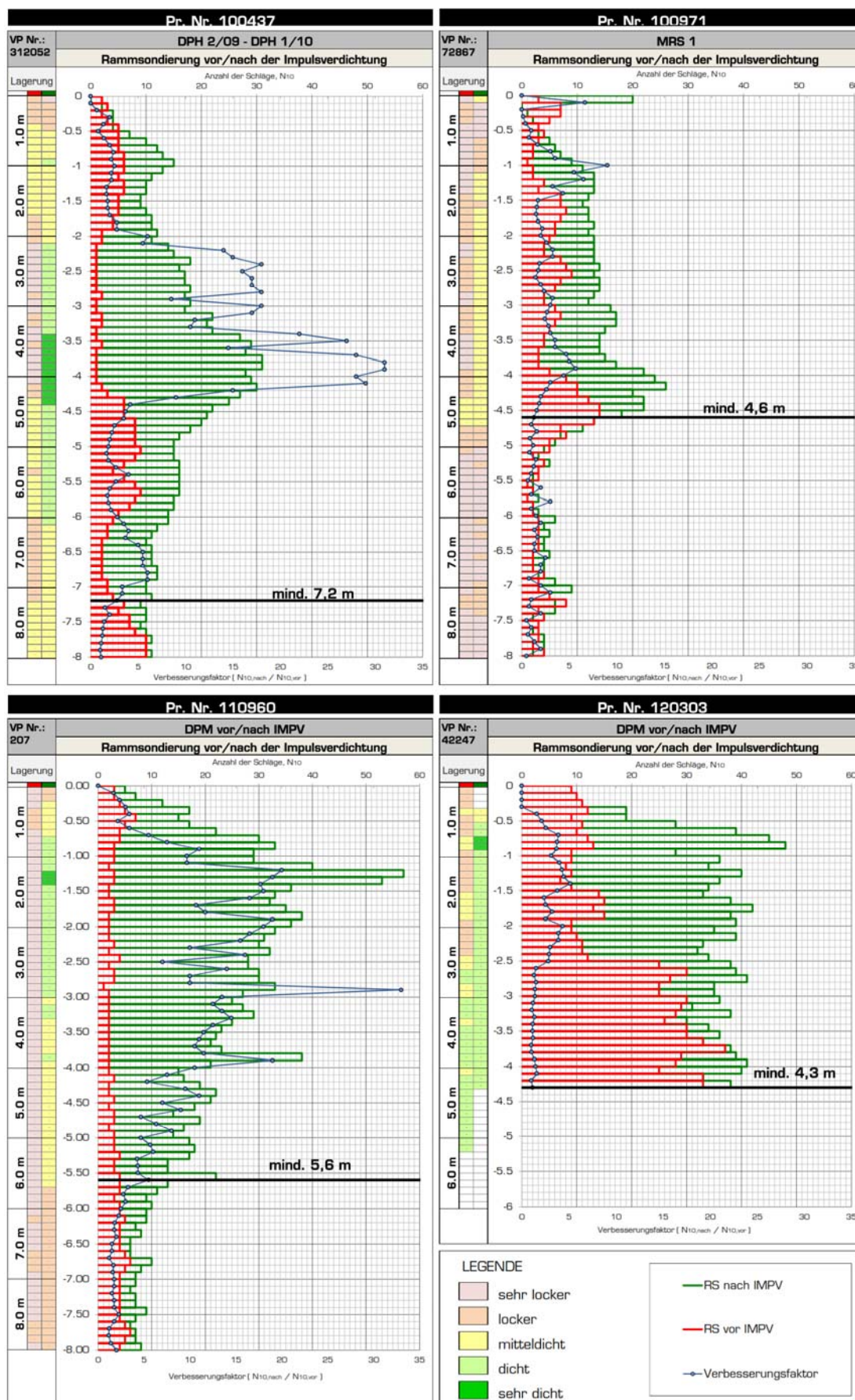


Abb. 70: Ausgewählte Rammsondierungen der Untergrundkategorie „Sand“

5.3.3 Ergebnisse der Auswertung der Projektdaten der Untergrundkategorie „Schluff“

Insgesamt 7 von den 27 ausgewählten Projekten lassen sich zur Untergrundkategorie *Schluff (Si)* zuordnen. Auf Basis der nachfolgenden Auswertungsergebnisse können allgemeine Aussagen über das Verhalten von den untersuchten Böden bei der Impulsverdichtung getroffen werden.

Es wurden die Daten der folgenden 7 Projekte ausgewertet:

- *PNr. 100231 – BV Neubau einer Lagerhalle in Nestelbach, Österreich*

Zur Erkundung der Untergrundverhältnisse wurden Rammsondierungen im Feld und bodenphysikalische Untersuchungen im Labor durchgeführt. Es wird festgestellt, dass der anstehende Boden ein toniger, sandiger Schluff mit weicher Konsistenz ist.

- *PNr. 100923 – BV Windpark Tortoman II, Tortoman, Constanța, Rumänien*

Gemäß den bereitgestellten Auszügen aus dem Bodengutachten wurde im Projektareal Löss (sandiger, toniger Schluff) unterschiedlicher Konsistenz aufgeschlossen.

- *PNr. 120511 – BV Zubau Coca Cola, Edelstal, Österreich*

Unter der unterschiedlich mächtigen Mutterbodenschicht wurden in allen Aufschlüssen schwach feinsandige, bis stark feinsandige Schluffe mit überwiegendem Grobschluffanteil vorgefunden. Die Konsistenz reichte von weich bis steif.

- *PNr. 120638 – Somlo, Somlóvásárhely, Ungarn*

Anhand der 5 durchgeführten Drucksondierungen zur Untergrunderkundung lässt sich der anstehende Boden als sandiger, toniger Schluff von weicher bis steifer Konsistenz klassifizieren.

- *PNr. 120922 – BV Möbelix, Gleisdorf, Österreich*

Unterhalb des Mutterbodens wurden Auelehme in Form von sandigen bis stark sandigen, vereinzelt schwach kiesigen, z.T. organische Schluffe der Bodengruppe UM in vorwiegend weicher Konsistenz angetroffen. Unterlagert wurden sie von einer lockeren bis mitteldichten Flussschotterschicht aus sandigen bis stark sandigen, teilweise schwach schluffigen bis steinigen Kiesen.

- *PNr. 130018 – BV The Mobis Hall, Érd, Ungarn*

Die betroffenen Böden im Projektareal wurden als sandige Schluffe klassifiziert. Darunter wurden ab einer Tiefe von ca. 5 m mittelplastische Tone aufgeschlossen.

- *PNr. 130050 – BV Käsehof Alpenmilch, Lamprechtshausen, Österreich*

In den Bodenaufschlüssen wurde Verwitterungslehm in Form von weichen tonigen, sandigen, teilweise schwach kiesigen, vereinzelt schwach steinigen bis blockigen Schluffen erkundet. Darunter wurden schluffige Kiese bis kiesige Schluffe in lockerer Lagerung bzw. in weicher Konsistenz angetroffen.

In Abb. 71 sind ausgewählte Bodenprofile gemäß dem jeweiligen Bodengutachten dargestellt. Die Bodenprofile aller durchgeführten Bodenaufschlüsse im Bereich der Verdichtungsfläche sind auf der CD-ROM in der jeweiligen Auswertungsdatei zu finden.

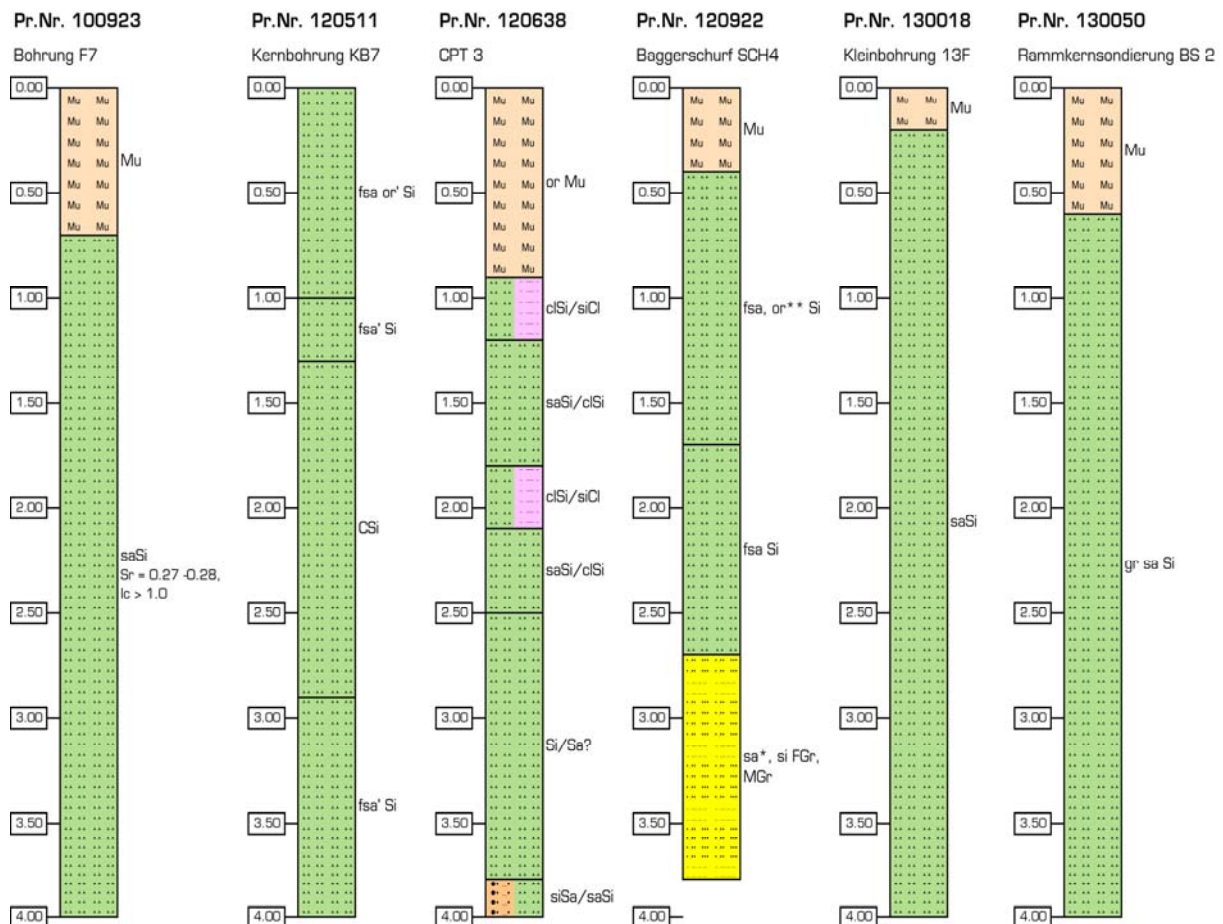


Abb. 71: Ausgewählte Bodenprofile der Untergrundkategorie „Schluff“

In Tabelle 36 werden der Gesamtleistungsumfang, die verwendeten Verdichtungsrastrer und die Anzahl aller Verdichtungspunkte für die Impulsverdichtung der Projektareale angeführt.

Tabelle 36: Leistungsumfang und Verdichtungsrastrer für die Untergrundkategorie „Schluff“

Anzahl der Projekte	Anzahl der Verdichtungspunkte	Leistungsumfang			Verdichtungsrastrer
		Fläche [m ²]	SF ¹⁾ [lfm]	EF ²⁾ [Stück]	
7	5218	24461	246	140	2.0 x 2.0 m 2.4 x 2.4 m 2.5 x 2.5 m 3.0 x 3.0 m SF + EF

Anmerkung:

- 1) Streifenfundamente
2) Einzelfundamente

Die im Zuge der Projektauswertung ermittelten Mittelwerte der Verdichtungsparameter sind in der Tabelle 37 angegeben, wobei die schraffierten Zeilen bei der Auswertung betrachtete Übergänge bezeichnen.

Es ist wichtig anzumerken, dass bei jedem Projekt nach der Impulsverdichtung eine oberflächennahe Bodenstabilisierung erfolgte. Diese Kombination, ist als Hybridgründung bekannt (s. Kap. 3.2).

Tabelle 37: Mittelwerte der Verdichtungsparameter für die Untergrundkategorie „Schluff“

Übergang Nr.	Anzahl der Verdichtungs- punkte	Durch- schnittliche Anzahl der Verdichtungs- stöße [-]	Mittelwert der Setzung letzter Schlag, [mm]	Durch- schnittliche Kratertiefe, [mm]	Mittelwert der eingebrachten Energie, [kJ/m]	Mittelwert der Fallhöhe aller Verdichtungs- stöße, [m]
1. ÜG	5218	28	21	660	2307	0.91
2. ÜG	3791	25	14	485	1736	0.86
3. ÜG	878	24	14	469	1663	0.80
4. ÜG	104	26	12	455	1918	0.82
5. ÜG	46	19	13	361	1134	0.66
6. ÜG	6	17	11	341	823	0.45
7. ÜG	1	32	10	562	2335	0.83

• Anzahl der Übergänge

Das Diagramm auf Abb. 72 zeigt den durchschnittlichen Prozentanteil der bearbeiteten Verdichtungspunkte in den einzelnen Übergängen für die Untergrundkategorie „Schluff“. Bei 99,12 % aller Verdichtungspunkte reichen vier Übergänge mit dem Impulsverdichter zur Erzielung der erforderlichen Verdichtung. Bei 83,18 % aller Verdichtungspunkte erfolgte die Verdichtung in zwei Übergänge. Mit einem Arbeitsgang konnten etwa 27,35 % der Verdichtungspunkte vollständig verdichtet werden. Nach dem 3. und 4. Übergang wurde die erforderliche Verdichtung bei 14,83 % bzw. bei 1,11 % der Verdichtungspunkte erreicht. Bei etwa 0,88 % aller Verdichtungspunkte waren mehr als vier Übergänge notwendig.

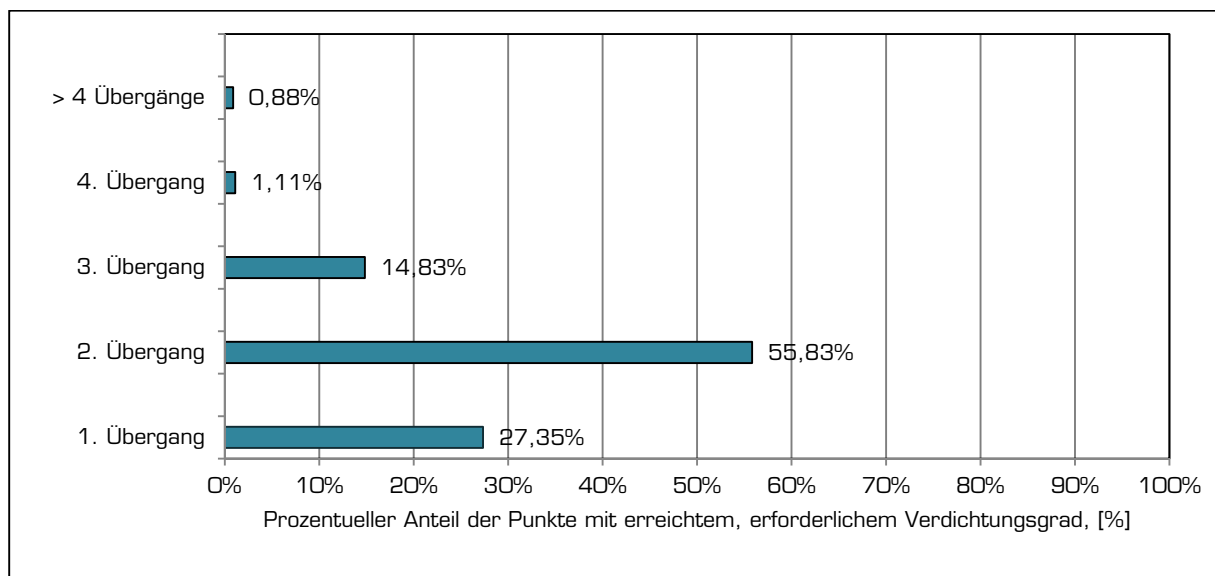


Abb. 72: Anzahl der notwendigen Übergänge zur erfolgreichen Verdichtung bei der Untergrundkategorie „Schluff“

• Abbruchkriterien

Die durchschnittlich angetroffenen Abbruchkriterien für die Untergrundkategorie „Schluff“ werden in Abb. 73 grafisch dargestellt. Auf dem Diagramm ist deutlich zu erkennen, dass das am häufigsten getroffene Abbruchkriterium bei der Impulsverdichtung von Schluff die Begrenzung der Kratertiefe ist. Bei etwa 43% aller Verdichtungspunkte wurde die Impulsverdichtung beim jeweiligen Übergang aufgrund des Überschreitens der zulässigen Gesamtsetzung abgebrochen. Mit 27 % ist die Begrenzung der minimalen Setzung unter dem Verdichtungsfuß, der s.g. Setzung letzter Schlag, das zweithäufigste Abbruchkriterium. Beim gleichen Prozentanteil, d.h. bei mehr als einem Viertel der Verdichtungspunkte wurde kein Abbruchkriterium getroffen. Nur bei 3 % aller Verdichtungspunkte wurde die Impulsverdichtung beim jeweiligen Übergang wegen der erhöhten Anzahl der Schläge abgebrochen.

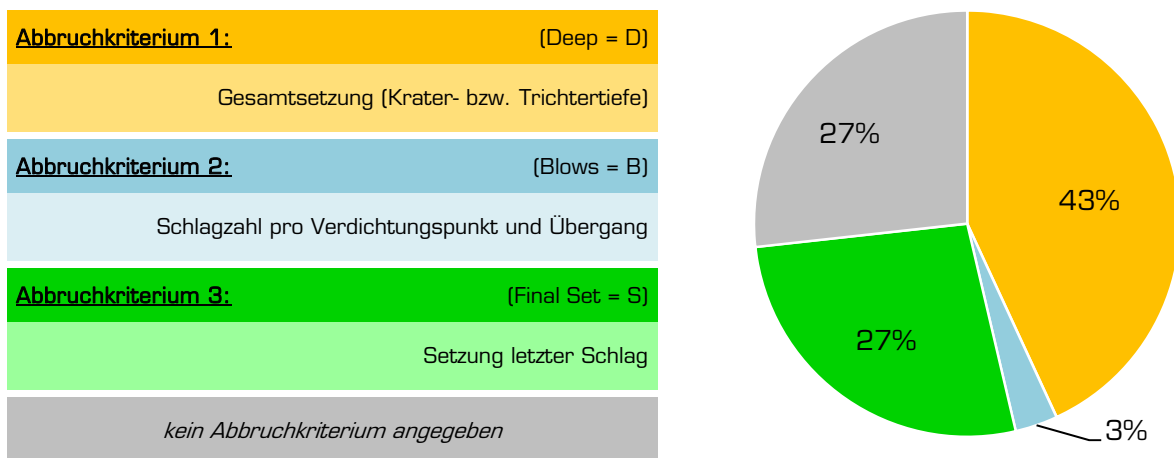


Abb. 73: Durchschnittlich angetroffene Abbruchkriterien bei der Untergrundkategorie „Schluff“

• Verdichtungsenergie

Das Diagramm in Abb. 74 veranschaulicht den Verlauf der eingebrachten Verdichtungsenergie mit steigender Anzahl der Übergänge.

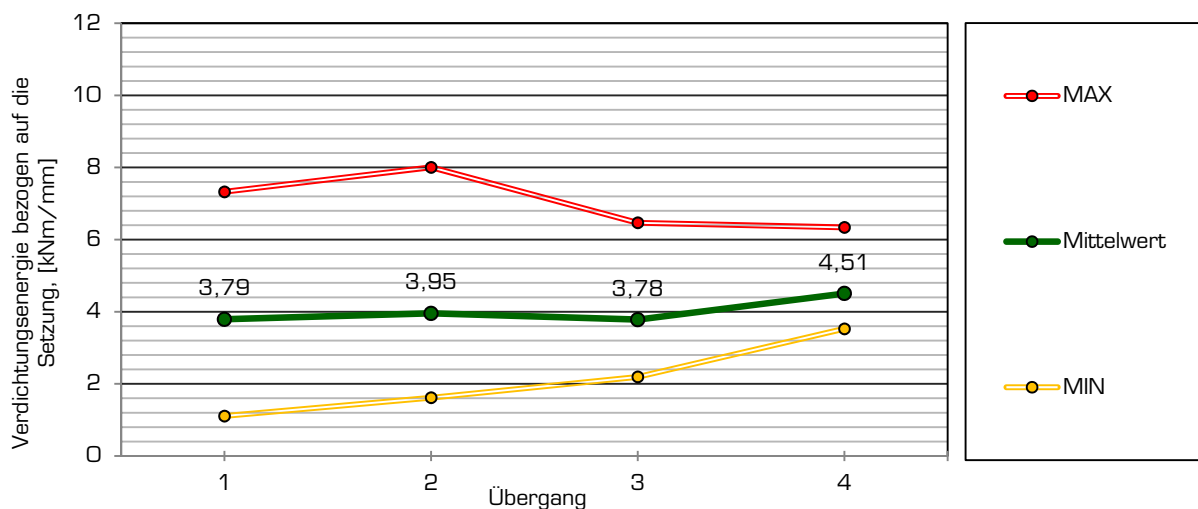


Abb. 74: Durchschnittliche bezogene Verdichtungsenergie bei der Untergrundkategorie „Schluff“

Beim ersten Übergang wurde durchschnittlich 3,79 kJ Energie für jede 1 mm Setzung eingebracht. Beim zweiten und dritten Übergang betrug die eingebrachte Energie 3,95 kJ bzw. 3,78 kJ. Es lässt sich also erkennen, dass die Verdichtungsenergie für die ersten drei Übergänge nahezu konstant bleibt. Ein Anstieg der notwendigen Verdichtungsenergie ist erst beim vierten Übergang sichtbar. Hier war für jede 1 mm Eindringung des Verdichtungsfußes durchschnittlich 4,51 kJ Energie notwendig. Aus dem Diagramm ist ferner zu erkennen, dass mit steigender Anzahl der Übergänge der Streubereich kleiner wird.

- **Schlagzahl-Setzungsverlauf**

In Abb. 75 sind die gemittelten Schlagzahl-Setzungsverläufe für die Untergrundkategorie „Schluff“ angegeben.

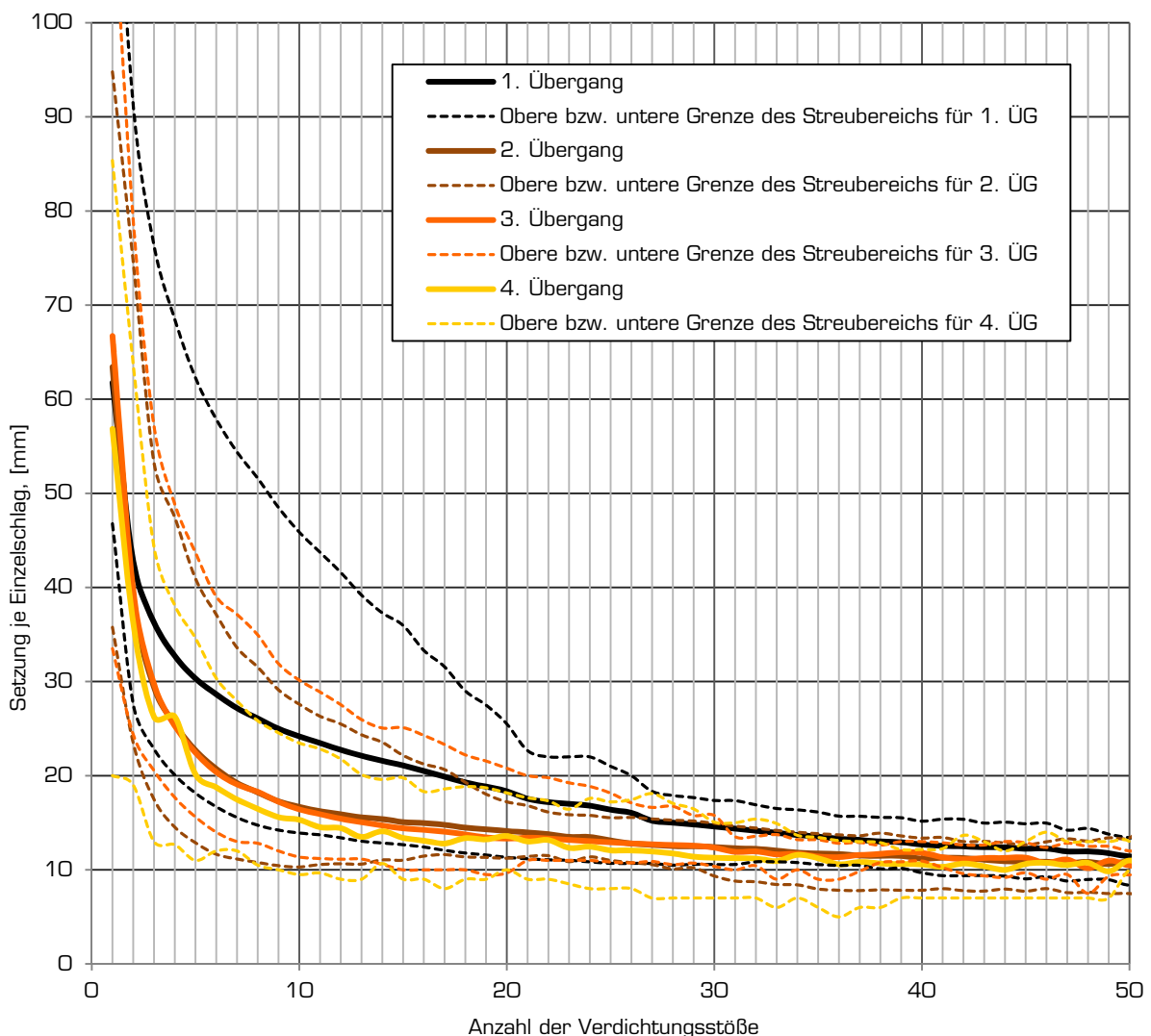


Abb. 75: Durchschnittliche Schlagzahl-Setzungskurven für die Untergrundkategorie „Schluff“

Beim ersten Übergang nehmen die Setzungen unter dem Verdichtungsfuß mit steigender Anzahl der Verdichtungsstöße stetig ab, nach dem 40. Schlag nähern sie sich asymptotisch zu einem bestimmten Setzungswert. Zwischen dem 1 und 20 Verdichtungsstoß zeigt sich - vor allem beim ersten - ein breiter Streubereich der Setzungskurven, der auf die unterschiedliche Verdichtbarkeit der untersuchten Böden zurückzuführen ist.

Die Setzungen bei den nachfolgenden Übergängen sind deutlich kleiner. Sie sind nur bei den ersten Verdichtungsstößen relativ groß, da nach jedem Übergang die Krater mit losem Zugabematerial verfüllt wurden. Die Schlagzahl-Setzungskurven für den 2. und 3. Übergang sind nahezu identisch und sie überlappen sich in größeren Bereichen. Die beim 4. Übergang gemessenen Setzungen sind kleiner als diese, die bei den letzten zwei Arbeitsgängen eingetreten sind. Die Setzungskurven der letzten drei Übergänge nähern sich bereits ab dem 30. Verdichtungsstoß zu einem bestimmten Grenzwert der Setzungen asymptotisch. Es lässt sich also feststellen, dass ab diesem Verdichtungsstoß keine wesentliche Verdichtung mehr stattfindet, sondern eher eine seitliche Verdrängung des Bodens.

Die nachfolgenden Diagramme (Abb. 76 und Abb. 77) stellen grafisch die Änderung der Kratertiefe bzw. der Setzung letzter Schlag mit steigender Anzahl der Übergänge dar.

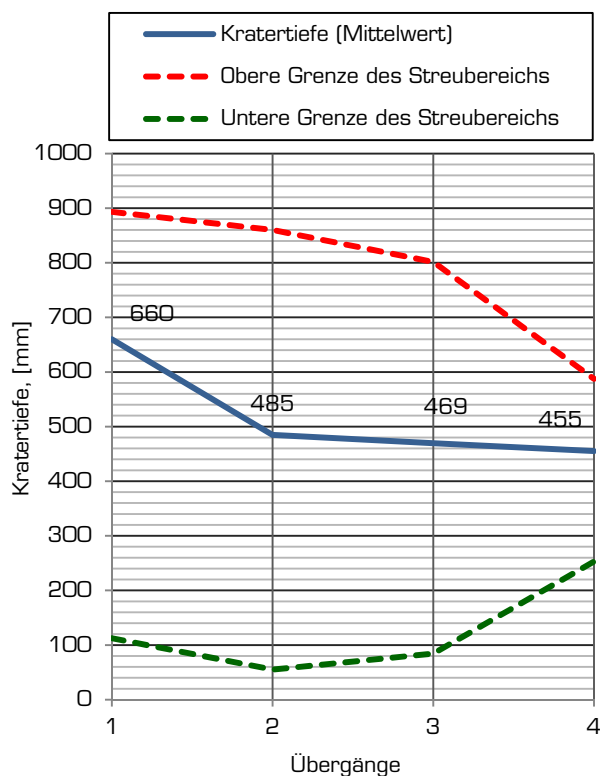


Abb. 76: Durchschnittliche Kratertiefe bei der Untergrundkategorie „Schluff“

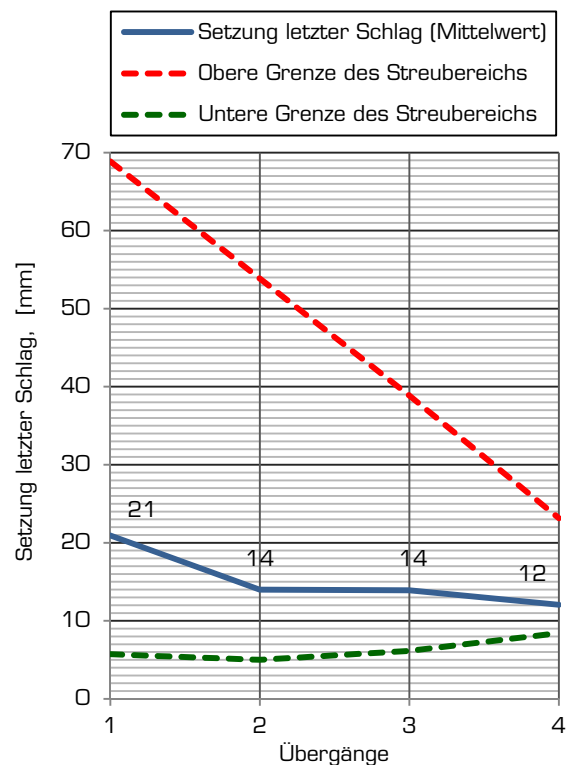


Abb. 77: Durchschnittliche „Setzung letzter Schlag“ bei der Untergrundkategorie „Schluff“

Auf dem linken Diagramm ist zu erkennen, dass die mittlere Kratertiefe allmählich abnimmt, aber bedeutende Änderung ist nach dem zweiten Übergang kaum bemerkbar.

Aus dem rechten Diagramm wird ersichtlich, dass sich die Einsenkung des Verdichtungsfußes von 21 mm nach dem ersten Übergang auf 14 mm nach dem zweiten verringert hat. Beim dritten Übergang bleibt die Setzung letzter Schlag auf 14 mm konstant und beim nachfolgenden vierten Übergang erfolgte noch eine Verringerung der im Mittel eingetretenen Setzung letzter Schlag um 2 mm.

Ferner lässt sich eine Tendenz zur Verkleinerung des Streubereichs der minimalen und maximalen Gesamtsetzung bzw. der minimalen und maximalen Setzung letzter Schlag mit steigender Anzahl der Übergänge erkennen. Diese spricht für eine Homogenisierung des Untergrundes infolge der Impulsverdichtung.

- **Tiefenwirkung**

In Abb. 78 sind Messergebnissen von ausgewählten Rammsondierungen grafisch dargestellt. Das erste Diagramm stellt die mit der mittelschweren Rammsonde (DPM) im Projektareal von PNr. 100231 gemessenen Schlagzahlen N_{10} vor, unmittelbar und 14 Tage nach der Impulsverdichtung grafisch dar. Daraus ist ein deutlicher Anstieg der Schlagzahlen N_{10} bis in eine Tiefe von etwa 2,5 m zu erkennen. Der mögliche Grund dafür ist der im Zuge der Verdichtung erhöhte Porenwasserdruck, der sich erst einige Zeit nach der Verdichtung abbaut.

Zur Untersuchung der Tiefenwirkung beim Projekt Nr. 100923 wurden je Windkraftanlage 2 leichte Rammsondierungen (DPL) vor und 6 nach der Impulsverdichtung durchgeführt. Das in Abb. 79 gezeigte Diagramm stellt die Messergebnisse für eine Anlage dar. Daraus kann eine Verdichtungstiefe von ca. 3,2 m abgeleitet werden.

Dem dritten Diagramm sind die Eindringwiderstände der leichte Rammsonde (DPL) vor, unmittelbar und 5 Tage nach der Impulsverdichtung im Projektareal von PNr. 120638 zu entnehmen. Ein Anstieg der Schlagzahlen N_{10} ist in einer Tiefe bis ca. 3,0 m zu erkennen.

Die mit der mittelschweren Rammsonde ermittelten Schlagzahlen N_{10} vor und nach der Impulsverdichtung für das Projekt Nr. 130018 weisen auf eine Bodenverbesserung bis einer Tiefe von mindestens 3,8 m unter der Geländeoberkante hin. Dabei ist ein deutlicher Zuwachs der Schlagzahlen im Tiefenbereich von 0,5 m bis 1,1 m zu erkennen.

Die Tiefenwirkung bei den Projekten Nr. 120922 und Nr. 130050 kann nicht abgeleitet werden. In beiden Projektarealen wurden vereinzelt Bereiche mit stark bindigen Böden wie Ton (Projekt Nr. 120922) oder mit schwach bis sehr schwach organischen Beimengungen (Projekt Nr. 130050) vorgefunden. Nach der Impulsverdichtung wurde in diesen Bereichen entweder eine geringfügige Zunahme der Schlagzahlen oder praktisch keine Veränderung festgestellt. Jedoch war ober- und unterhalb der Schwachzonen ein deutlicher Zuwachs der Schlagzahlen erkennbar.

In Abb. 79 wird die mittlere Tiefenwirkung der Impulsverdichtung bei der Untergrundkategorie „Schluff“ grafisch dargestellt. Auf dem Diagramm werden alle zur Verdichtungskontrolle durchgeführten Rammsondierungen aus allen Projekten der Untergrundkategorie aufgezeigt. Auf Basis der ausgewerteten Daten kann die mittlere Verdichtungstiefe in einer Tiefe von ca. 3,5 m angenommen werden. Jedoch ist bei manchen Projekten ein Anstieg der Schlagzahlen N_{10} auch in größeren Tiefen zu erkennen.

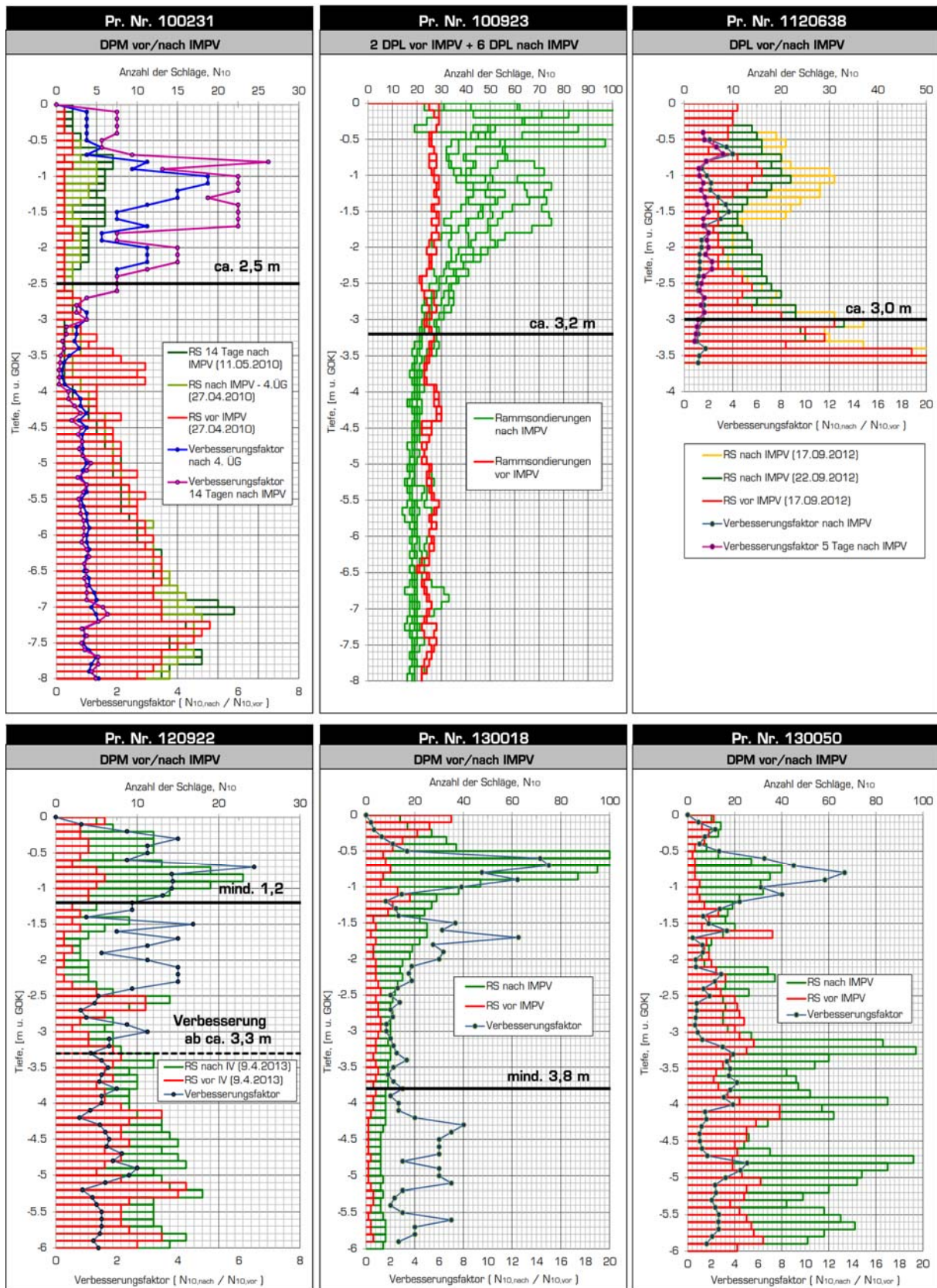


Abb. 78: Ausgewählte Rammsondierungen der Untergrundkategorie „Schluff“

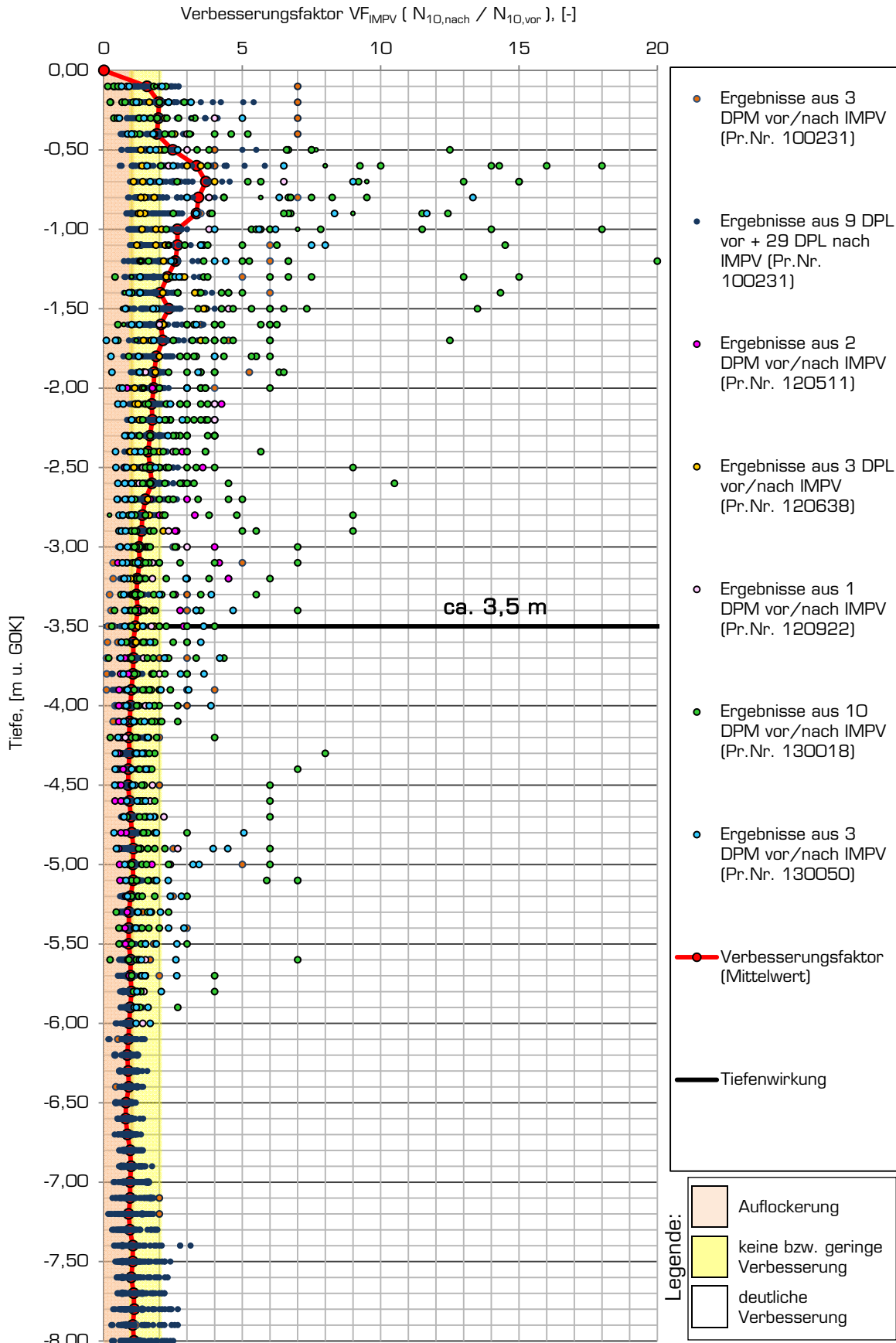


Abb. 79: Ermittlung der Tiefenwirkung der Verdichtung bei der Untergrundkategorie „Schluff“ mit Hilfe von Rammsondierungen

5.3.4 Ergebnisse der Auswertung der Projektdaten der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“

Etwa die Hälfte der zur Analyse ausgewählten Projekte (13 von 27) konnte zur Untergrundkategorie *künstliche Auffüllung (Mg)* zugeordnet werden. In Abb. 80 werden ausgewählte Bodenprofile zum jeden Projekt anhand der Bodengutachten grafisch dargestellt. Die Ergebnisse aller durchgeführten direkten und indirekten Bodenaufschlüsse im Bereich der Verdichtungsfläche sind auf der CD-ROM in der jeweiligen Auswertungsdatei zu finden. Im Folgenden wird der Bodenaufbau je nach Projekt kurz beschrieben:

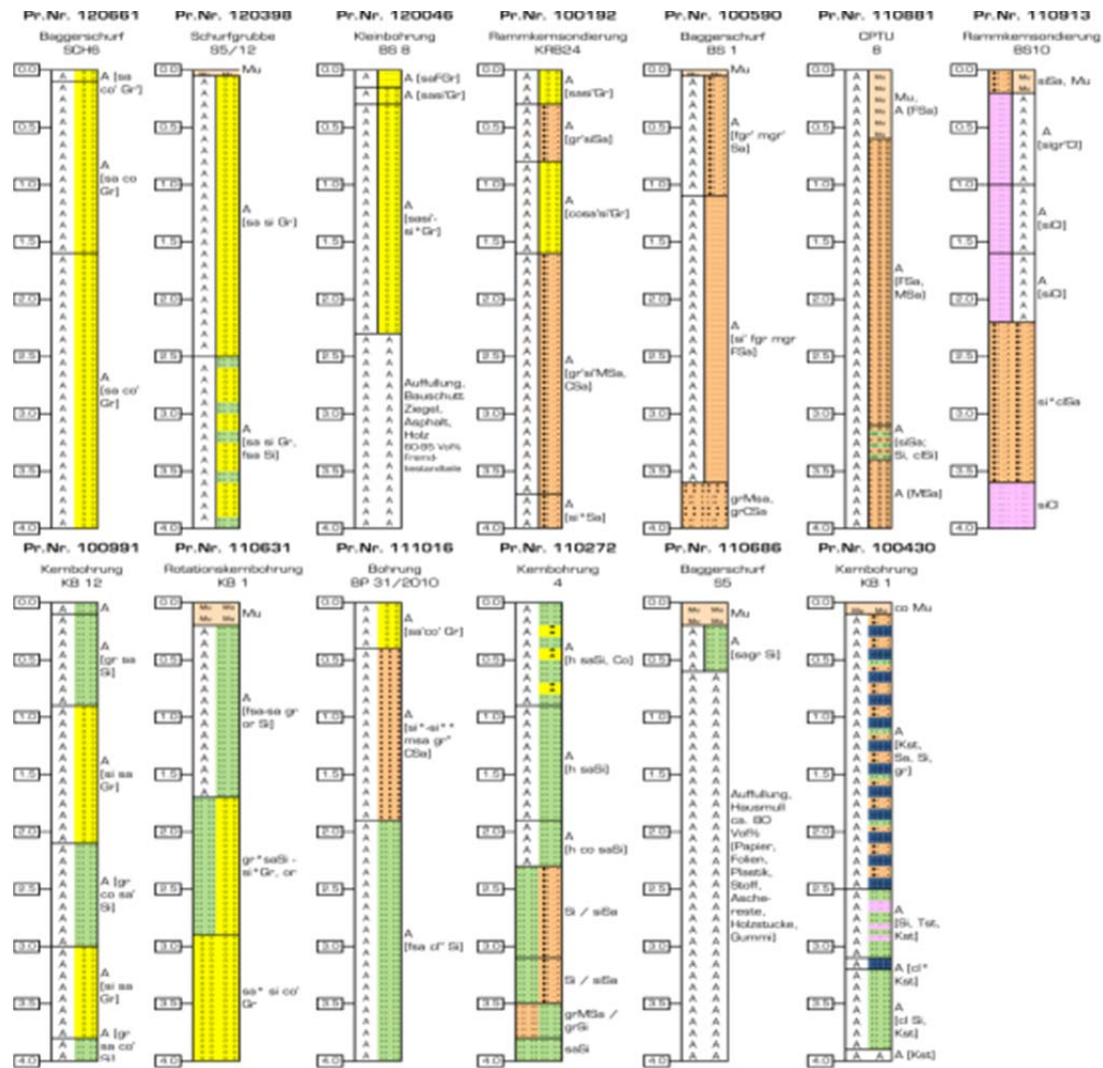


Abb. 80: Ausgewählte Bodenprofile der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“

- *PNr. 100192 – BV Neubau einer Logistikanlage im Industriepark Frauenaaurach, Erlangen, Deutschland*

In allen Bodenaufschlüssen wurden sehr inhomogene, locker bis mitteldicht gelagerte Auffüllungen, die aus grob-, gemischt- und feinkörnigen Böden mit Überwiegen des Sandanteils bestehen, vorgefunden. Sie enthalten größtenteils „nur geringe Anteile (< 10 %) Fremdbestandteile wie Betonbruch, Ziegelsplitt, Pflastersteine, Plastik, Schlacke, Glas, Asche u.a.“ Darunter wurde in einer Tiefe von etwa 3,8 bis 6,5 m bzw. von 7,4 bis 9,5 m Sandsteinkeuper angetroffen.

- *PNr. 100430 – BV Neubau eines TÜV-Service-Centers, Heidenheim an der Brenz, Deutschland*

Unter der Mutterbodenschicht liegen etwa 2,5 bis 4,5 m mächtige künstliche Auffüllungen aus „überwiegend Kalksteinbruchstücken, Kalksteinschotter, Steinen, Schluff und Ton mit eingelagerten Ziegelresten und Kiesen“, deren Feinanteil überwiegend eine steife Konsistenz aufwies. Die Auffüllungen überlagern bindige Aulehme in Form von weichem bis halbfestem tonig-sandigem Schluff. Die tiefste erkundete Schicht besteht aus mitteldicht gelagerten schluffigen, tonigen Kiesen.

- *PNr. 100590 – BV Leichtathletikanlage Südring, Klagenfurt, Österreich*

Unterhalb des Mutterbodens wurden künstliche Auffüllungen aus gemischtkörnigen Böden mit Überwiegen des Sandanteils erkundet. Sie enthalten wenig „Kies- und vereinzelt Ziegelsplitter (< 2 %) und stellenweise auch Betonbruchstücke“. Die Auffüllungen wurden von gemischtkörnigen Böden, bestehend aus einem „weitgestuften Korngemisch aus stark sandigem Kies bzw. stark kiesigem Sand und von feinkörnigen Böden“, bestehend aus einem „enggestuften Korngemisch aus fein- bis mittelkiesigem, teilweise schluffigem Sand“, unterlagert. Die zur Ermittlung der Lagerungsverhältnisse durchgeführten Sondierungen mit der schweren Rammsonde wiesen eine sehr lockere bis lockere Lagerung auf.

- *PNr. 100991 – BV Neubau einer DRK-Rettungswache, Weil am Rhein – Haltingen, Deutschland*

Die durchgeführten Untersuchungen haben festgestellt, dass im überwiegenden Teil des Grundstückes bis in eine Tiefe von ca. 22 m unter GOK künstliche Auffüllungen vorhanden sind, die im Wesentlichen aus „sandigem, schluffigem Kies und sandigem, kiesigem, schwach steinigem Schluff sowie aus Bauschutt (große Betonblöcke, Straßenaufbruch, Ziegelbruch, Metall-, Stahlbeton-, Holz- und Kunststoffreste, Eisen- und Blechreste u.a.)“ zusammengesetzt sind. Gemäß den Ergebnissen der Rammsondierungen ist die inhomogene Auffüllung überwiegend locker, bereichsweise mitteldicht bis dicht gelagert.

- *PNr. 110272 – BV Autohaus Nissan-Suzuki, Gliwice, Polen*

Gemäß dem Bodengutachten wurden im Projektareal bis in einer Tiefe von ca. 2,30 m künstliche Auffüllungen, bestehend aus steinigen, sandigen Schluffen und tonigen Sanden, aufgeschlossen. Darunter wurden sandige Schluffe und teilweise kiesiger Mittelsand angetroffen.

- *PNr. 110631 – BV Mömax, Villach, Österreich*

Im Projektareal stehen unterhalb einer geringmächtigen Mutterbodenschicht künstliche Auffüllungen an, die vorwiegen als „schwach sandige bis sandige, schwach kiesige bis stark kiesige, teils steinige Schluffe“ in vorwiegend weicher bis steifer Konsistenz zu klassifizieren sind. Sie sind zum Großteil durch „schwach organische Beimengungen“ charakterisiert und enthalten Ziegelreste und Betonbruchstücke.

- *PNr. 110686 – BV Fachmarktzentrum, Bad Griesbach, Deutschland*

Das geplante Bauvorhaben befindet sich auf der Altdeponie Weghof der Stadt Bad Griesbach. Im Bereich der Altablagerungen wurden in den Bodenaufschlüssen inhomogene anthropogene Auffüllungen mit einer Mächtigkeit von max. 5 bis 6 m vorgefunden. Sie setzen sich aus „sandigen bis stark sandigen, schwach kiesigen Schluffen, sowie aus Hausmüll- und Bauresten“ zusammen, wobei die Hausmüllanteile in eine kiesige bis sandige bis schluffige Matrix eingelagert sind. Die Altablagerungen enthalten „Ziegel- und Betonbruch, Plastik-, Metall-, Gummi-, Glas-, Styropor- sowie organische Reste“ in wechselnden Mengenanteilen.

- *PNr. 110881 – BV Produktionshalle Nova Trading, Torun, Polen*

Zur Ermittlung der Untergrundverhältnisse wurden drei Drucksondierungen (CPTU) und drei mittelschwere Rammsondierungen (DPM) durchgeführt. Gemäß dem Bodengutachten wurde der anstehende Boden in Tiefe von etwa 5,4 m als künstliche Auffüllung aus Grob-, Mittel- und Feinsand mit vereinzelt Schluffbeimengungen klassifiziert.

- *PNr. 110913 – BV Logistikanlage in Gewerbegebiet Rittigfeld, Forchheim, Deutschland*

Unterhalb des Mutterbodens wurden ca. 2 bis 3 m mächtige künstliche Auffüllungen in Form von „weichen bis steifen sandigen Schluffen und Tonen“ angetroffen. Unterlagert wurden sie von mittel- bis grobkörnigen, schwach kiesigen Sanden. Darunter liegen Feuerletten, die als schluffige Tone mit steifer bis halbfester Konsistenz zu klassifizieren sind.

- *PNr. 111016 – BV S 191n – Verlegung nördlich Rippien-Goppeln, Deutschland*

In den Bodenaufschlüssen wurden Auffüllungen aus „stark schluffigen bis sehr stark schluffigen, schwach kiesigen Sanden und feinsandigen Schluffen“ in einer Mächtigkeit von ca. 4 m vorgefunden. Unter dieser Schicht stehen „feinsandige, tonige bis stark tonige Schluffe“ an.

- *PNr. 120046 – BV Neubau eines Gebäudes für Einzelhandel, Parsdorf, Deutschland*

Bis in Tiefen zwischen 8,1 – 9,8 m unter der Geländeoberkante wurden künstliche Auffüllung, bestehend neben sandigem, schwach schluffigem Kies hauptsächlich aus „Bauschutt mit Ziegel, Beton, Mörtelresten, Holz, Asche, Glas, Bewehrungseisen und Asphalt“, erbohrt. Gemäß den Ergebnissen der Rammsondierungen wies die Auffüllung eine lockere bis mitteldichte Lagerung auf.

- *PNr. 120398 – BV Neubau Blankstahladjustage Halle 72, Kapfenberg, Österreich*

Unter der geringmächtigen Mutterbodenschicht wurden künstliche Auffüllungen generell aus Bodenaushubmaterial mit örtlichen Einlagerungen von Bauschutt aufgeschlossen. Das Spektrum der Auffüllungen reicht von „feinsandigen, schwach kiesigen Schluffen bis hin zu sandigen, schwach schluffigen, teilweise schwach steinigen Kiesen“. Die Konsistenz bzw. Lagerungsdichte ist weich bzw. locker. Die Auffüllungen wurden vom locker bis mitteldicht gelagerten Schotter, der als „sandigen bis schwach sandigen, teilweise gering steinigen bis steinigen Kiesen“ zu klassifizieren ist, unterlagert.

- PNr. 120661 – BV Neubau eines Fachmarktcenters, Mürzzuschlag, Österreich

Das Projektareal befindet sich auf einer ehemaligen Sandgrube, die wieder verfüllt wurde. Bei der Auffüllung handelt es sich um „sandige bis schwach sandige, schwach kiesige, tonige Schluffe in weicher bis steifer Konsistenz bzw. sandige, teilweise sehr schwach bis schwach schluffige Kiese, Steine und Blöcke in lockerer bis mitteldichter Lagerung“. Im Auffüllungsbereich wurden in den Aufschlüssen auch Bauschutt-, Hausmüll- und Asphaltreste angetroffen. Darunter wurden Niederterrassenschotter, der als „schwach bis stark schluffige, sandige, schwach steinige bis steinige und vereinzelt mit Blöcken versetzte Kiese in lockerer bis dichter Lagerung“ zu klassifizieren sind, erkundet.

Der Gesamtleistungsumfang der Impulsverdichtung für die oben erläuterten Projekte, sowie die Gesamtanzahl der Verdichtungspunkte und die verwendeten Verdichtungsrastrer werden in der nachfolgenden Tabelle 38 zusammengefasst.

Tabelle 38: Leistungsumfang und Verdichtungsrastrer für die Unterkategorie „künstliche Auffüllung“

Anzahl der Projekte	Anzahl der Verdichtungspunkte	Leistungsumfang			Verdichtungsrastrer
		Fläche [m ²]	SF ¹⁾ [lfm]	EF ²⁾ [Stück]	
13	9592	45766	658	315	2.0 x 2.0 m 2.5 x 2.5 m + SF/EF 3.0 x 3.0 m

Anmerkung:
¹⁾ Streifenfundamente
²⁾ Einzelfundamente

Die durchschnittlichen Werte der Verfahrensparameter der ausgewählten Projekte sind in Tabelle 39 angegeben. Herstellungsparameter wie Schlagzahl, Kratertiefe, Setzung letzter Schlag, Verdichtungsenergie und Fallhöhe werden für jeden ausgeführten Übergang separat angeführt.

Tabelle 39: Mittelwerte der Verdichtungsparameter für die Unterkategorie „künstliche Auffüllung“

Übergang Nr.	Anzahl der Verdichtungspunkte	Durchschnittliche Anzahl der Verdichtungsstöße [-]	Mittelwert der Setzung letzter Schlag, [mm]	Durchschnittliche Kratertiefe, [mm]	Mittelwert der eingebrachten Energie, [kJ/m]	Mittelwert der Fallhöhe aller Verdichtungsstöße, [m]
1. ÜG	9592	30	18	638	2475	0.90
2. ÜG	4719	32	15	606	2593	0.89
3. ÜG	2856	27	13	499	1990	0.83
4. ÜG	879	30	12	504	2220	0.78
5. ÜG	389	26	12	441	1843	0.79
6. ÜG	207	29	13	558	1927	0.75
7. ÜG	94	27	14	527	1674	0.69
8. ÜG	47	30	12	499	2109	0.82
9. ÜG	33	30	9	408	2157	0.91
10. ÜG	9	37	9	500	2351	0.92
11. ÜG	5	30	8	409	2216	0.92
12. ÜG	1	13	7	150	903	0.79

• Anzahl der Übergänge

Das Diagramm auf Abb. 81 zeigt den durchschnittlichen Prozentanteil der bearbeiteten Verdichtungspunkte in den einzelnen Übergängen für die Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“. Bei 99,02 % aller Verdichtungspunkte sind sechs Übergänge mit dem Impulsverdichter zur Erzielung der erforderlichen Verdichtung notwendig. Bei 90,83 % der Verdichtungspunkte erfolgte die Verdichtung in drei Übergänge. Mit einem Übergang konnten etwa 50,80 % der Punkte vollständig verdichtet werden. Bei knapp 1 % aller Verdichtungspunkte waren mehr als sechs Übergänge notwendig.

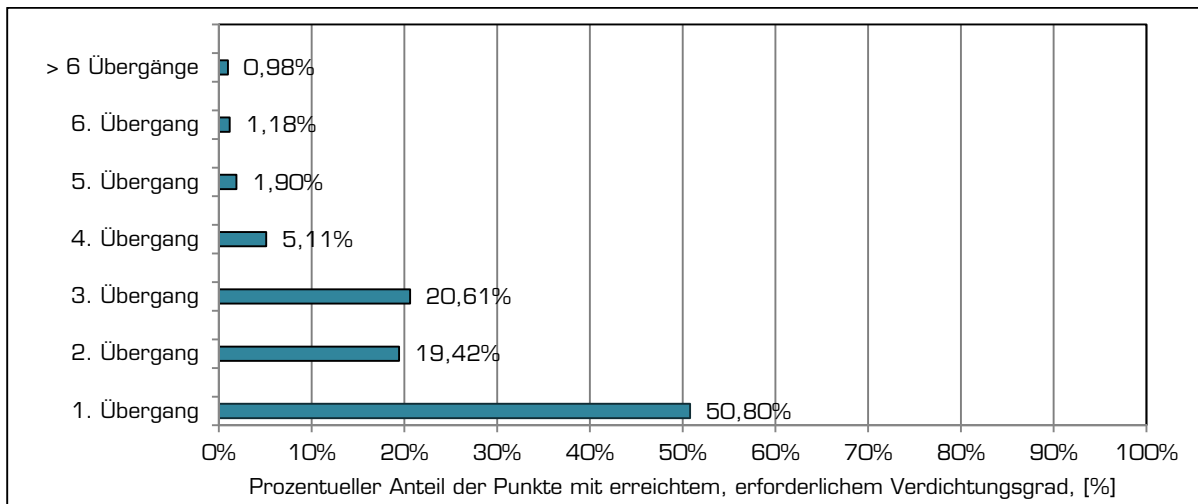


Abb. 81: Anzahl der notwendigen Übergänge zur erfolgreichen Verdichtung bei der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“

• Abbruchkriterien

Die Ergebnisse der Auswertung der Abbruchkriterien für die Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“ werden in Abb. 82 grafisch dargestellt.

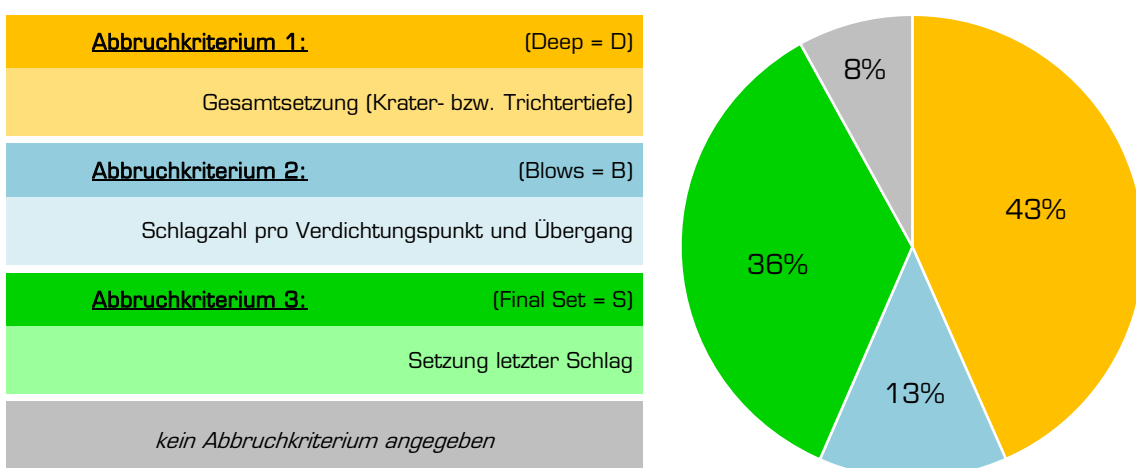


Abb. 82: Durchschnittlich angetroffene Abbruchkriterien bei der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“

Bei der Impulsverdichtung von künstlichen Auffüllungen wurde am häufigsten das erste Abbruchkriterium „Gesamtsetzung“ getroffen. Die vorgegebene Kratertiefe wurde dabei bei 43% aller Verdichtungspunkte überschritten. Das zweithäufigste Kriterium ist die Begrenzung

der Setzung letzter Schlag mit 36%. Bei 13% aller Verdichtungspunkte wurde die Impulsverdichtung beim jeweiligen Übergang wegen der hohen Anzahl der Schläge (Abbruchkriterium 2) abgebrochen. Bei 8% aller Verdichtungspunkte wurde kein Abbruchkriterium angegeben.

- **Verdichtungsenergie**

Das auf Abb. 83 dargestellte Diagramm veranschaulicht den Verlauf der eingebrachten Verdichtungsenergie mit steigender Anzahl der Übergänge bei der Impulsverdichtung von künstlichen Auffüllungen.

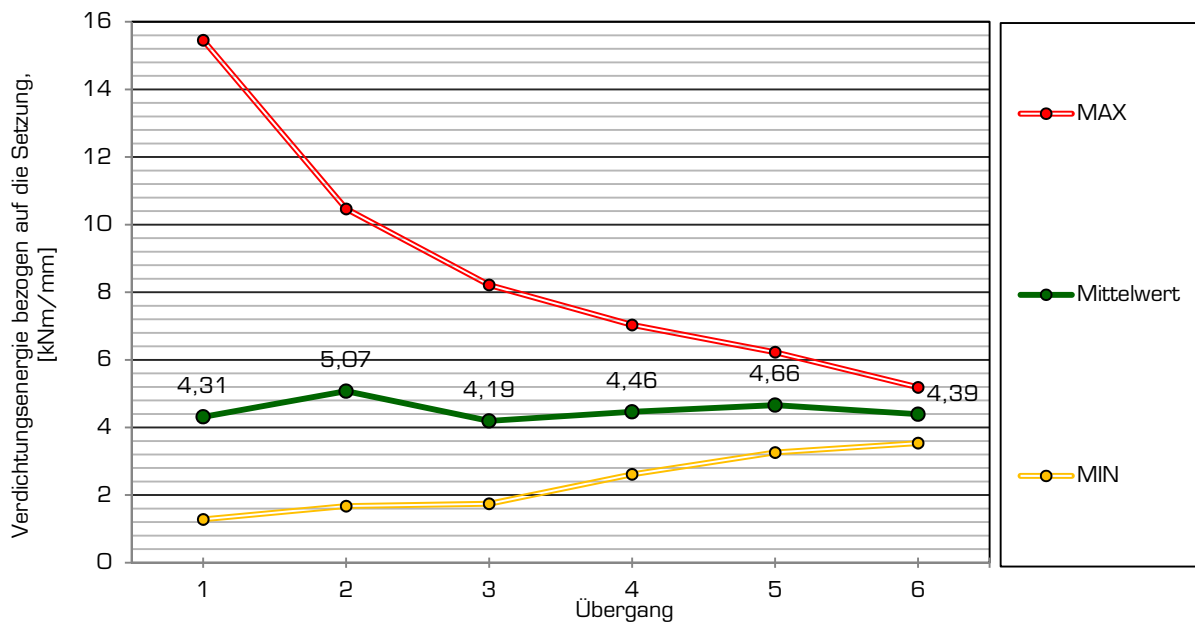


Abb. 83: Durchschnittliche bezogene Verdichtungsenergie bei der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“

Aus dem Diagramm ist zu erkennen, dass mit steigender Anzahl der Übergänge die minimal benötigte Verdichtungsenergie stetig zunimmt und der Streubereich schmaler wird. Die Kurve der durchschnittlichen eingebrachten Verdichtungsenergie verläuft jedoch aufgrund der Heterogenität der künstlichen Auffüllungen in Bezug auf Bodenarten, Bauschutt- und Hausmüllreste nicht mäßig.

- **Schlagzahl-Setzungsverlauf**

In Abb. 84 sind die durchschnittlichen Schlagzahl-Setzungskurven für die Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“ angegeben. Sie stellen grafisch den Setzungsverlauf unter dem Verdichtungsfuß bei dem jeweiligen Übergang dar. Bei jedem Übergang nehmen die Setzungen unter dem Verdichtungsfuß mit steigender Anzahl der Verdichtungsstöße stetig ab. Wie aus dem Diagramm ersichtlich ist, verlaufen die Schlagzahl-Setzungskurven ähnlich. Die kleinen Sprünge im Kurvenverlauf weisen auf Lücken im Datenbestand hin und könnten durch Erhöhung der Anzahl der analysierten Projekte ausgeglichen werden. Es ist zu bemerken, dass bei jedem nachfolgenden Übergang die Setzungen unter dem Verdichtungsfuß immer kleiner werden, was für eine Vorwegnahme der Setzungen im Untergrund spricht.

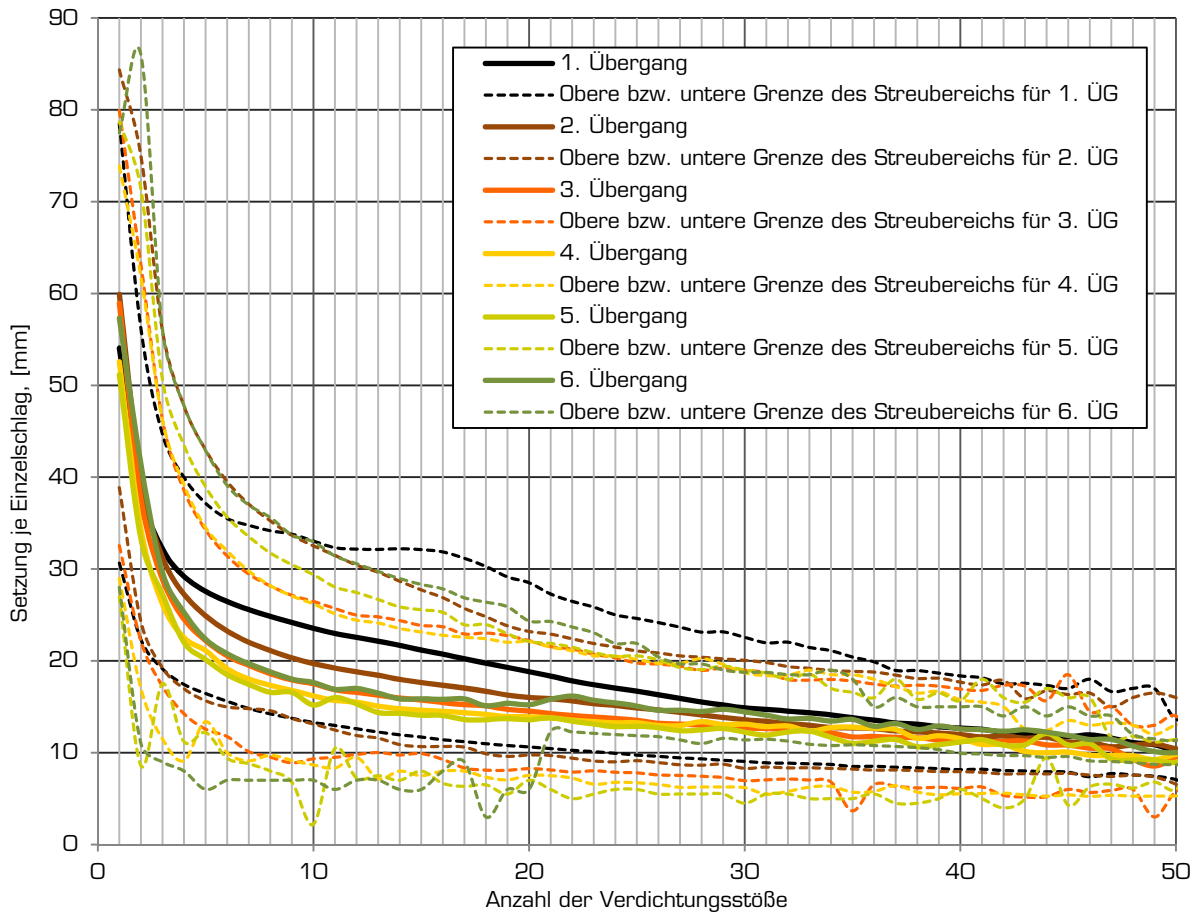


Abb. 84: Durchschnittliche Schlagzahl-Setzungskurven für die Unterkategorie „künstliche Auffüllung“

Die nachfolgenden zwei Diagramme (Abb. 85 und Abb. 86) stellen die Änderung der Kratertiefe bzw. der Setzung letzter Schlag mit steigender Anzahl der Übergänge grafisch dar.

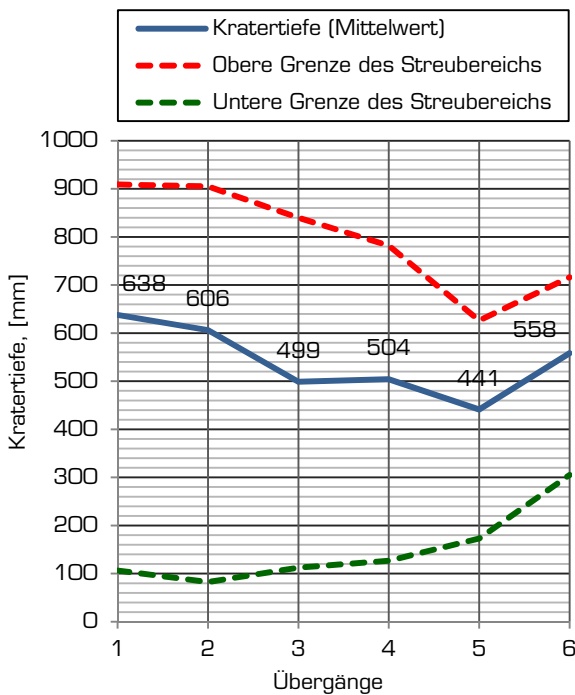


Abb. 85: Durchschnittliche Kratertiefe bei der Unterkategorie „künstliche Auffüllung“

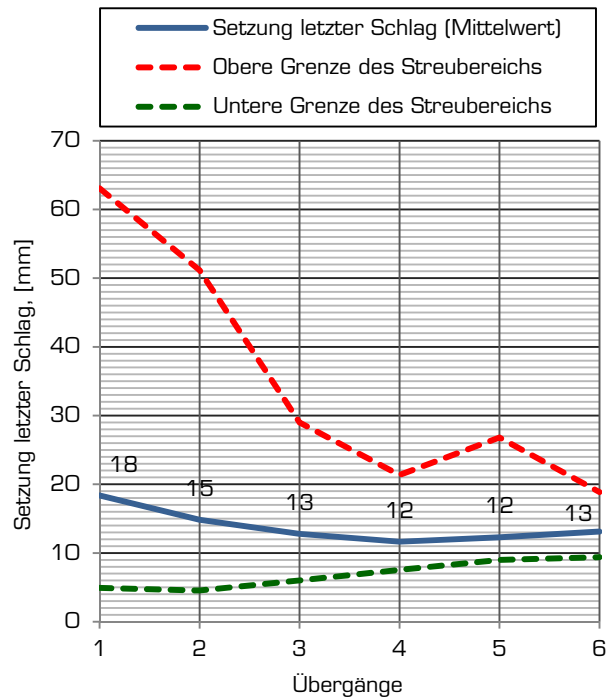


Abb. 86: Durchschnittliche „Setzung letzter Schlag“ bei der Unterkategorie „künstliche Auffüllung“

Aus dem linken Diagramm (*s. Abb. 85*) ist sichtbar, dass die relative mittlere Kratertiefe mit steigender Anzahl der Übergänge allmählich abnimmt. Die mittlere Tiefe des Kraters nach dem 1. Übergang betrug ca. 638 mm und 606 mm bzw. 499 mm nach dem 2. und 3. Übergang. Nach dem 4. Übergang bleibt die durchschnittliche Kratertiefe nahezu konstant auf 50 cm.

Aus dem rechten Diagramm (*s. Abb. 86*) wird ersichtlich, dass sich die Einsenkung des Verdichtungsfußes beim letzten Schlag des Impulsverdichters allmählich abnimmt. Und zwar verringerte sie sich von 18 mm nach dem ersten Übergang auf 15 mm nach dem zweiten bzw. auf 13 nach dem dritten und blieb bei nachfolgenden zwei Übergängen, vierten und fünften, bei 12 mm konstant. Auch hier lässt sich die Tendenz zur Verkleinerung des Streubereichs der Setzungen mit steigender Anzahl der Übergänge erkennen, die für eine Homogenisierung des Untergrundes infolge der Impulsverdichtung spricht.

• Tiefenwirkung

In Abb. 87 wird die mittlere Tiefenwirkung der Impulsverdichtung bei der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“ grafisch dargestellt. Es ist auf dem Diagramm erkennbar, dass die durchschnittliche Verdichtungstiefe ca. 4,5 m beträgt. Darunter können mittlere Verbesserungsfaktoren von 1 bis 2 ermittelt werden. Es werden nachfolgend ausgewählte Rammsondierungen, die zur Verdichtungskontrolle vor und nach der Impulsverdichtung im Rahmen der bearbeiteten Projekte durchgeführt wurden, in Abb. 88 angezeigt.

Das erste Diagramm stellt die mit der schweren Rammsonde (DPH) im Projektareal von Projekt Nr. 100430 ermittelten Schlagzahlen N_{10} vor und nach der Impulsverdichtung grafisch dar. Daraus ist eine deutliche Verbesserung des Bodens bis in eine Tiefe von ca. 4,8 m zu erkennen. Beim Projekt Nr. 110913 lässt sich feststellen, dass die Verdichtungstiefe mindestens 3,6 m beträgt. Zur Untersuchung der Tiefenwirkung wurden beim Projekt Nr. 120398 schwere Rammsondierungen (DPH) vor und nach der Impulsverdichtung durchgeführt. Ein deutlicher Anstieg der gemessenen Schlagzahlen N_{10} ist in einer Tiefe von ca. 2,2 m zu erkennen. Infolge der Verdichtung nahmen auch die Eindringwiderstände im Tiefenbereich von 3,4 bis 4,0 m zu. Die leichten Rammsondierungen im Areal vom Projekt Nr. 110686 weisen auf eine Verdichtungstiefe von rund 6 m hin, wobei die wesentliche Zunahme der Schlagzahlen bis 2,8 m reicht. Beim Projekt Nr. 111016 ergibt sich aus dem Vergleich der Eindringwiderstände der leichten Rammsonde vor und nach der Impulsverdichtung eine Verdichtungstiefe von etwa 6 m. In diesem Fall ist aber eine Zunahme der Schlagzahlen N_{10} im Tiefenbereich von 2,6 bis 6 m festzustellen. Die mit der mittelschweren Rammsonde ermittelten Schlagzahlen N_{10} beim Projekt Nr. 120661 weisen auf eine Verdichtung bis zu einer Tiefe von ca. 2,6 m unter der Geländeoberkante hin. Die Tiefenwirkung der Impulsverdichtung wurde bei PNr. 100590 mit mittelschweren Rammsondierungen kontrolliert. Aus dem Vergleich der Eindringwiderstände der Rammsonde kann eine Verdichtungstiefe von etwa 3,7 m ermittelt werden. Nach der Verdichtung weisen die anstehenden künstlichen Auffüllungen eine mitteldichte bzw. dichte Lagerung auf. Dem Projekt Nr. 100991 zugehörigen Diagramm sind die Eindringwiderstände der schweren Rammsonde (DPH) vor, unmittelbar nach und 3 Tage nach der Impulsverdichtung zu entnehmen. Nach der Liegezeit ist ein wesentlicher Anstieg der Lagerungsdichte feststellbar. Es kann eine Verdichtungstiefe von mindestens 1,9 m ermittelt werden. Zur Überprüfung der Tiefenwirkung beim Projekt Nr. 110881 wurden mittelschwere Rammsondierungen durchgeführt. Es ist aus dem Diagramm zu erkennen, dass die Verdichtungstiefe mindestens 4 m betrug.

Die mittlere Tiefenwirkung des Impulsverdichters beträgt bei Projekten der Unterkategorie „künstliche Auffüllung“ ca. 4,6 m. Diese Verdichtungstiefe ist jedoch aufgrund der Heterogenität der künstlichen Auffüllungen und der relativ geringen Anzahl an ausgewerteten Projekten mit Ungenauigkeit behaftet. In Abhängigkeit von der Zusammensetzung der künstlichen Auffüllungen und deren Mächtigkeit kann die Tiefenwirkung der Impulsverdichtung von den ermittelten Werten abweichen.

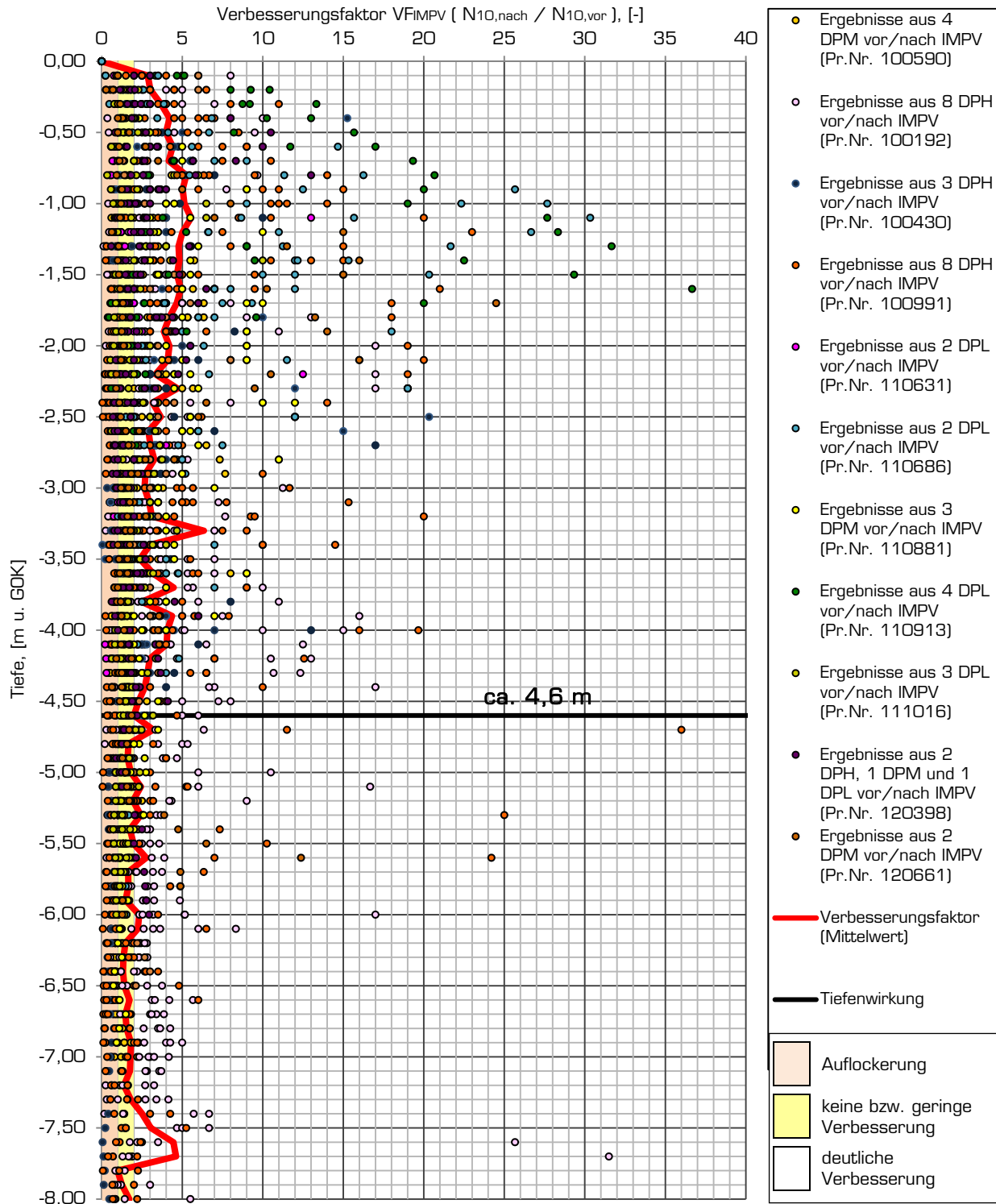


Abb.87: Ermittlung der Tiefenwirkung der Verdichtung bei der Unterkategorie „künstliche Auffüllung“ mit Hilfe von Rammsondierungen

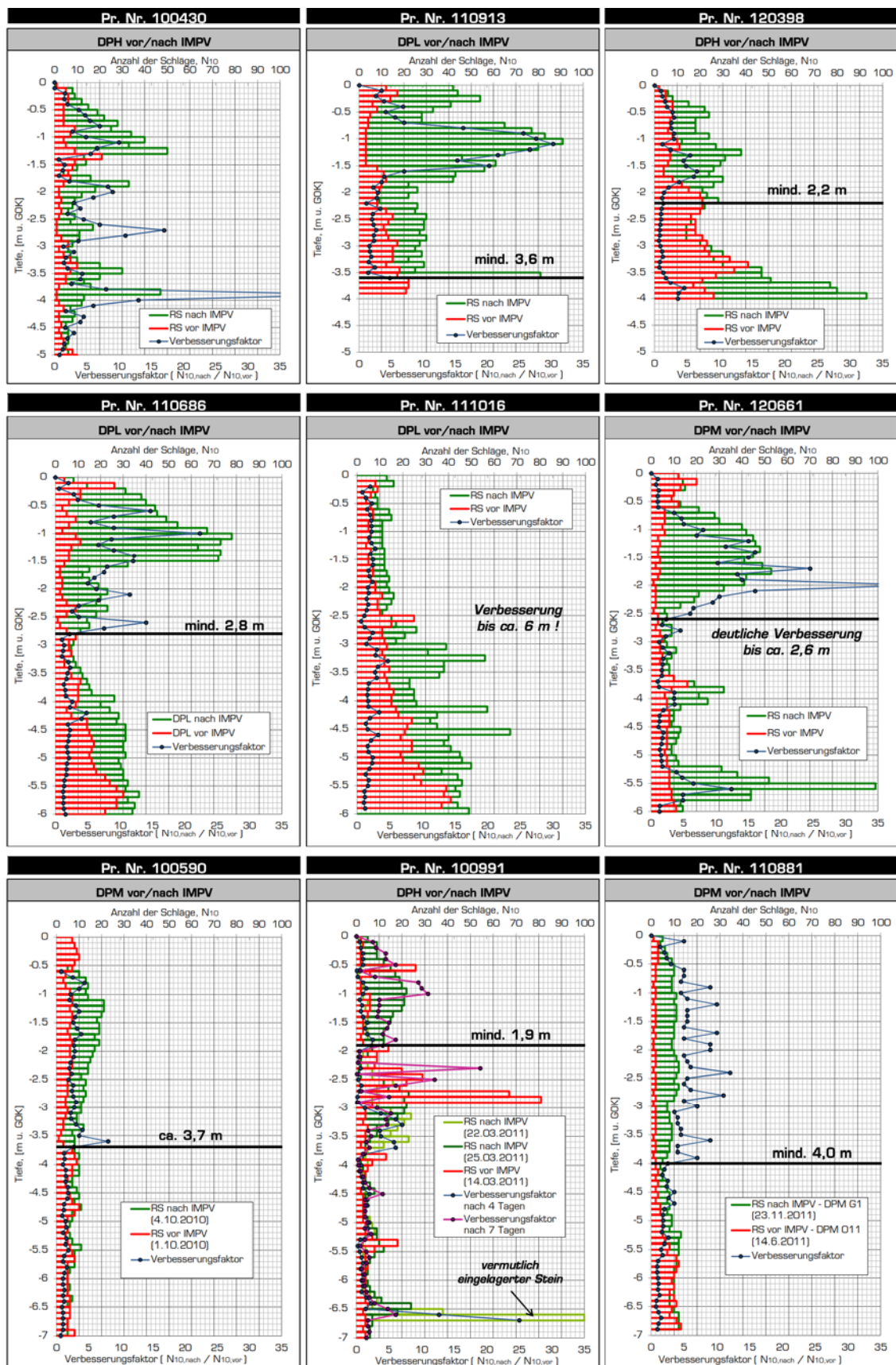


Abb. 88: Ausgewählte Rammsondierungen zur Verdichtungskontrolle der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“

6 Gegenüberstellung und Interpretation der Ergebnisse

Die Ergebnisse der Auswertung sowie die daraus abgeleiteten Empfehlungen für die Kalkulation der Bodenverbesserungsarbeiten mittels Impulsverdichter werden im vorliegenden Kapitel zusammengefasst.

6.1.1 Anzahl der Übergänge

Die Anzahl der erforderlichen Übergänge hängt von der Beschaffenheit des zu verdichtenden Bodens ab. In der nachfolgenden Abb. 89 werden für die vier definierten Untergrundkategorien die zur Verdichtung notwendigen Übergänge dargestellt.

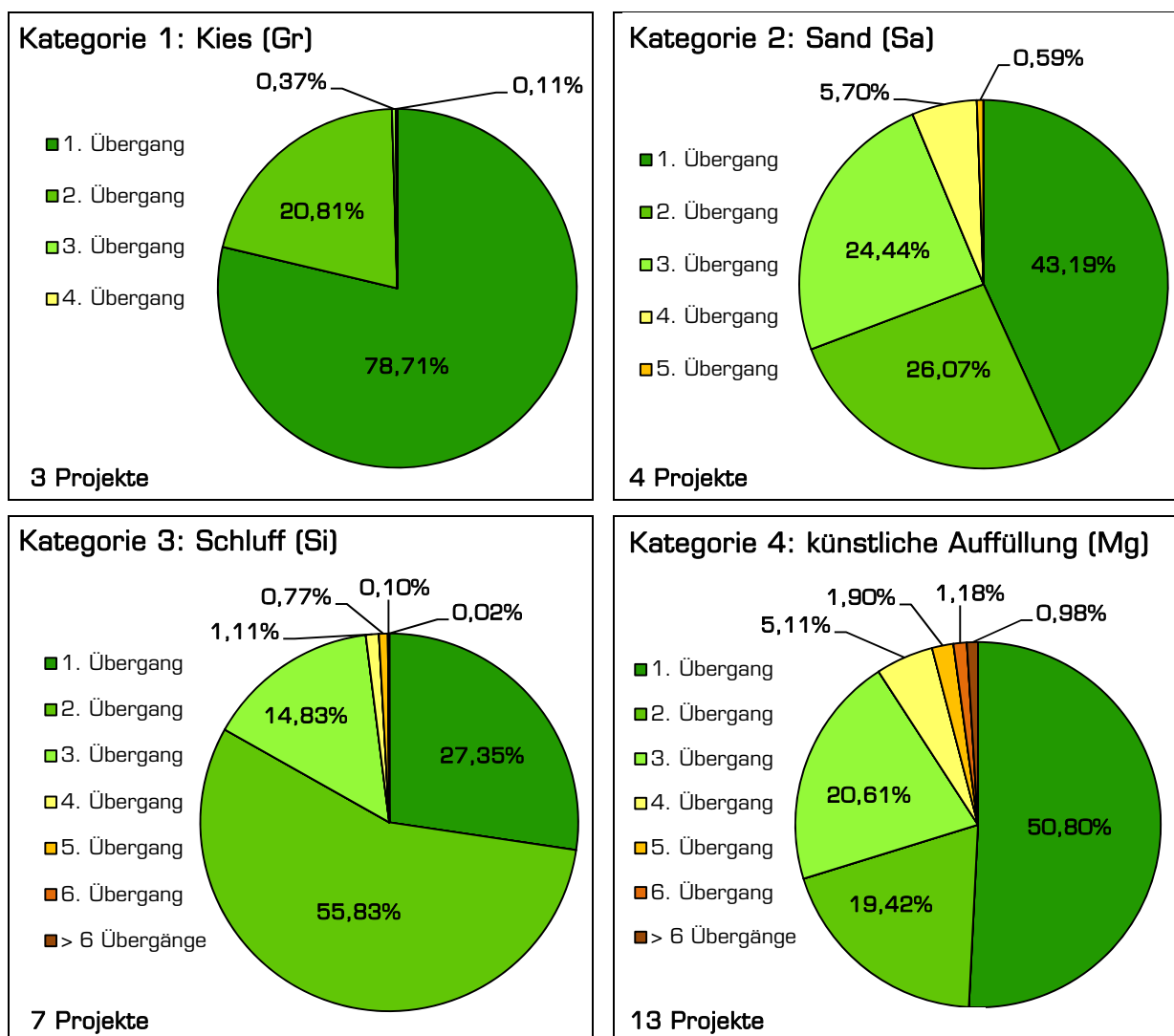


Abb. 89: Gegenüberstellung der notwendigen Übergänge zur Verdichtung in den vier Untergrundkategorien

Es lassen sich aus den Diagrammen folgende Erkenntnisse ableiten:

- Zur Verdichtung von Kiesen sind deutlich weniger Übergänge notwendig als zur Verdichtung von Sanden, Schluffen und künstlichen Auffüllungen.
- Die Impulsverdichtung läuft bei natürlich anstehenden Böden schneller, als bei künstlichen Auffüllungen ab.

- Je feinkörniger und inhomogener ein Boden ist, desto mehr Übergänge sind erforderlich, um die gewünschte Verdichtung zu erreichen.
- Je Untergrundkategorie kann zur vorläufigen Bestimmung der Dauer der Bodenverbesserungsarbeiten mit dem Impulsverdichter folgende Anzahl an erforderlichen Übergängen angegeben werden:
 - Untergrundkategorie 1: Kiese – 1 bis 2 Übergänge;
 - Untergrundkategorie 2: Sande – 2 bis 4 Übergänge;
 - Untergrundkategorie 3: Schluffe – 3 bis 4 Übergänge;
 - Untergrundkategorie 4: künstliche Auffüllungen – 3 bis 6 Übergänge.

6.1.2 Abbruchkriterien

Die Abbruchkriterien für jede Untergrundkategorie werden in Abb. 90 grafisch gegenübergestellt.

- **Abbruchkriterium 1: Kratertiefe (Deep)**

Bei der Gegenüberstellung der Ergebnisse wurde festgestellt, dass mit Ausnahme der Untergrundkategorie „Kies“ das erste Abbruchkriterium „Gesamtsetzung“ bei allen anderen Untergrundkategorien am häufigsten erreicht wurde. Prozentuell ist sein Anteil in der Untergrundkategorie „Sand“ mit 63 % am höchsten.

- **Abbruchkriterium 2: Schlagzahl (Blows)**

Das zweite Abbruchkriterium ist das Erreichen einer gewissen Schlagzahl (in der Regel 40 bis 50 Schläge) je Verdichtungspunkt und Übergang. Ab dieser Schlagzahl wurde die Verdichtung nicht mehr effektiv, die weiteren Setzungen unter dem Verdichtungsfuß ergeben sich nur noch aus einer seitlichen Verdrängung des Bodenmaterials.

Von allen definierten Abbruchkriterien hat das zweite Abbruchkriterium die geringste Auftretenshäufigkeit. Wie erwartet wurde es am häufigsten bei der Impulsverdichtung von künstlichen Auffüllungen getroffen. Die Fremdbestandteile der Auffüllungen wie z.B. Betonbruch-, Ziegelbruch-, Plastikreste, etc. erschweren die Verdichtung und daher in der Regel mehr Schläge und Übergänge notwendig sind.

- **Abbruchkriterium 3: Setzung letzter Schlag (Final Set)**

Das dritte Abbruchkriterium bezeichnet das Erreichen eines bestimmten Grenzwertes der Setzung je Einzelschlag. Die zulässige „Setzung letzter Schlag“ wird für jede neue Baustelle in Abhängigkeit von den exakten Untergrundverhältnissen und den örtlichen Randbedingungen an Setzungen und Setzungsdifferenzen gemeinsam mit dem zuständigen Geotechniker beurteilt. Der Wert dieser Grenzsetzung variiert daher für die verschiedenen Projekte zwischen 6 und 18 mm.

Aus den Diagrammen ist zu erkennen, dass ausgenommen Untergrundkategorie „Kies“ das dritte Abbruchkriterium das zweithäufigste Abbruchkriterium darstellt. Es ist nicht unerwartet, dass das Abbruchkriterium „Setzung letzter Schlag“ am häufigsten bei der Untergrundkategorie „Kies“ getroffen wurde, da die Impulsverdichtung von Kiesen in der Regel schneller abläuft und somit es früher zu kleinen Setzungen unter dem Verdichtungsfuß kommt.

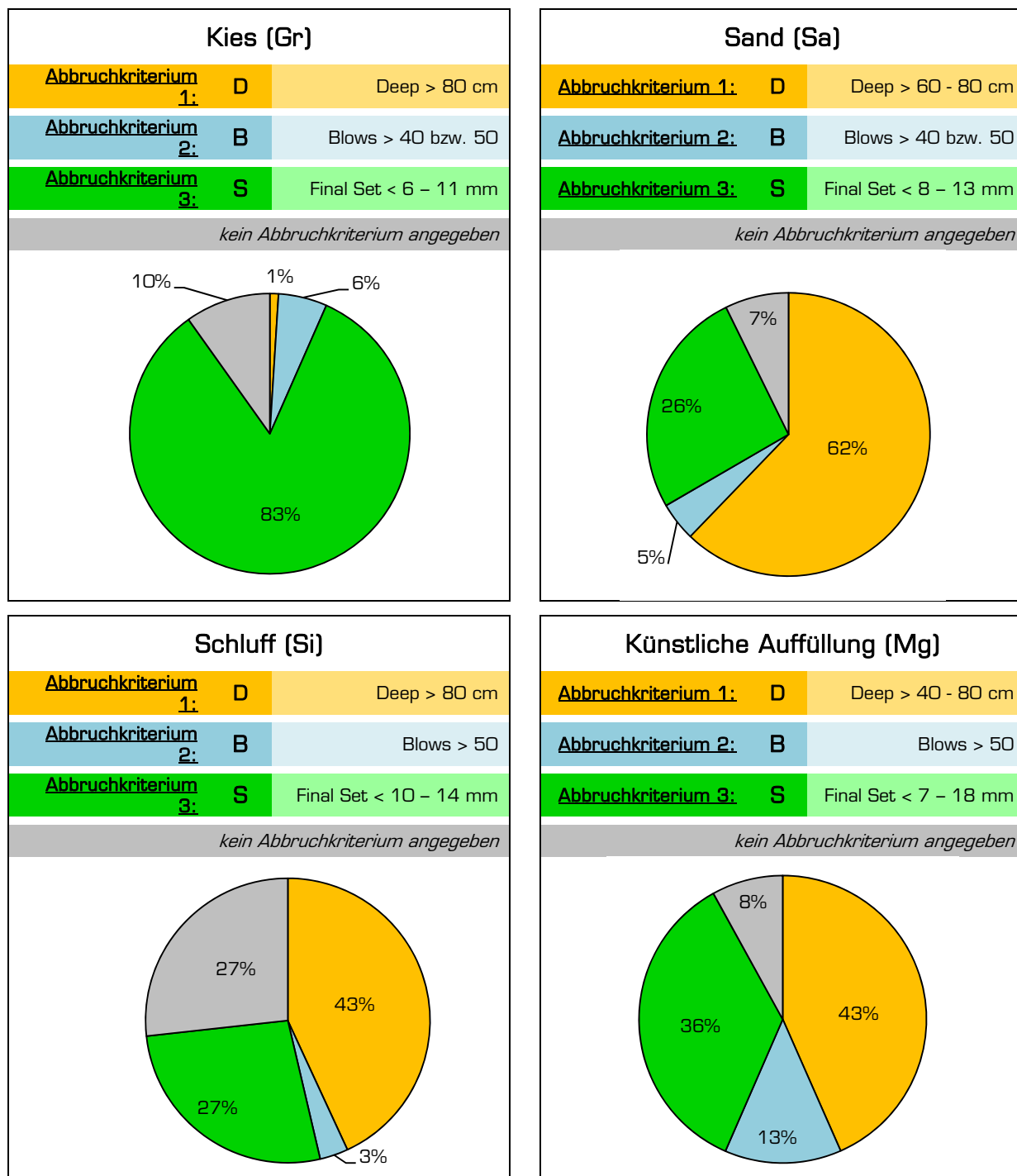


Abb.90: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Abbruchkriterien in den vier Untergrundkategorien

6.1.3 Verdichtungsenergie

In Abb. 91 werden die Mittelwerte der durchschnittlichen bezogenen Verdichtungsenergie je 1 mm Setzung und Übergang angegeben. Zur Gegenüberstellung wird die durchschnittliche bezogene Verdichtungsenergie der vier Untergrundkategorien auf einem Diagramm grafisch dargestellt.

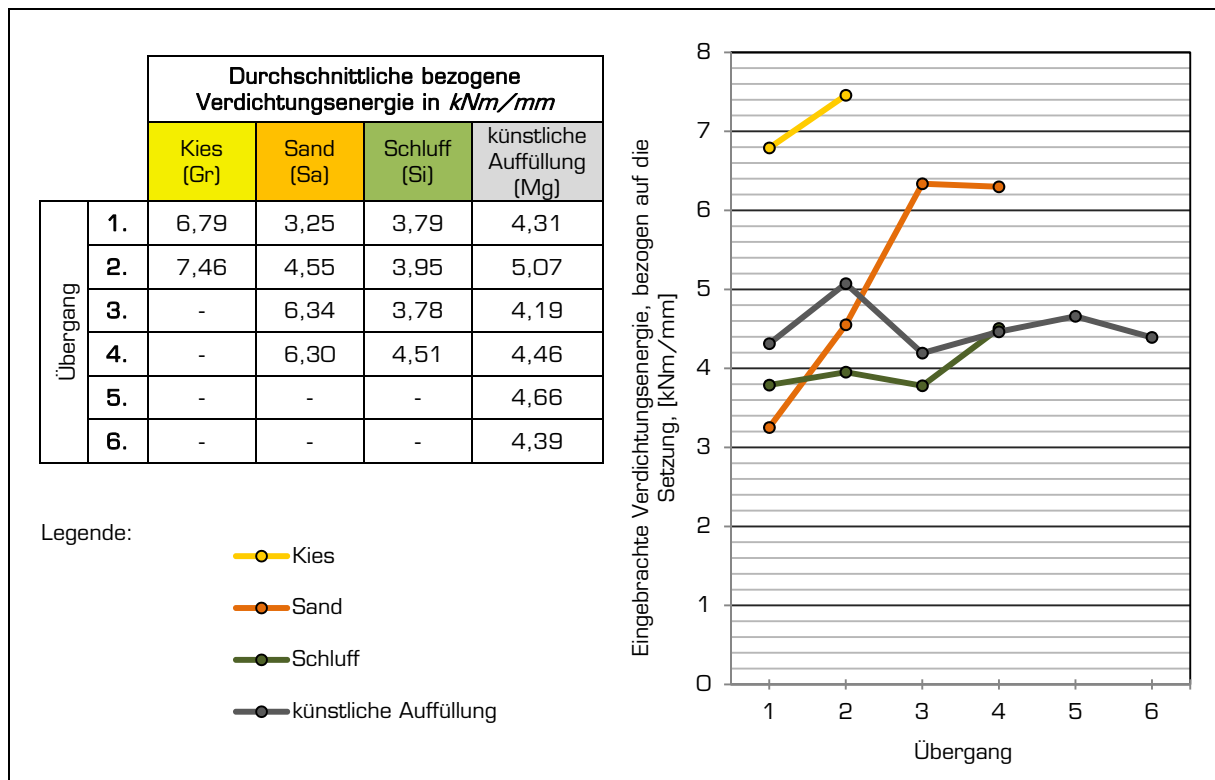


Abb. 91: Gegenüberstellung der durchschnittlichen bezogenen Verdichtungsenergie in den vier Untergrundkategorien

Es ist ersichtlich, dass die auf die Setzung bezogene Verdichtungsenergie sich mit zunehmender Anzahl der Übergänge erhöht. Diese Tendenz lässt sich am besten bei der Impulsverdichtung von grobkörnigen Böden wie Kiesen und Sanden erkennen. Die Verdichtungsenergie für Kies ist betragsmäßig höher als für die anderen Böden. Obwohl die Anzahl der Verdichtungsstöße bei dieser Untergrundkategorie zwar kleiner als bei den anderen drei Untergrundkategorien ist, ergibt sich wegen der in der Regel niedrigen Kratertiefe eine höhere bezogene Verdichtungsenergie. Bei der Verdichtung von künstlichen Auffüllungen und Schluffen ist generell wieder eine Zunahme des Verdichtungsaufwandes feststellbar, die allerdings verhältnismäßig gering ist. Der Grund für den stetigen Anstieg der Verdichtungsenergie ist die Tatsache, dass mit zunehmender Anzahl der Übergänge der Boden dichter wird und daher zur weiteren Verdichtung mehr Energie benötigt wird.

6.1.4 Setzungsverlauf

Die impulsartigen Verdichtungsstöße führen zur Verringerung des Porenvolumens und damit zur Setzungen des Verdichtungsfußes. Die Reduzierung des Porenvolumens läuft bei nichtbindigen Böden in der Regel schneller, als bei bindigen Böden ab. Daher werden bei der Impulsverdichtung von Kiesen und Sanden weniger Übergänge zur Erzielung des erforderlichen Verdichtungsgrades benötigt.

Die Setzungen nehmen ab einer bestimmten Anzahl der Schläge kaum mehr zu. Aus dem Schlagzahl-Setzungsverlauf kann somit ein Grenzwert bestimmt und eine optimale Schlagzahl pro Übergang abgeleitet werden. Im Rahmen der Auswertung wurden die Schlagzahl-Setzungsverläufe nach Untergrundkategorien ermittelt. Die Ergebnisse werden in Abb. 92

grafisch dargestellt. Alle kleinen Sprünge im Kurvenverlauf sind auf Schwankungen der erhobenen Daten zurückzuführen und können mit zunehmender Anzahl der analysierten Projekte ausgeglichen werden.

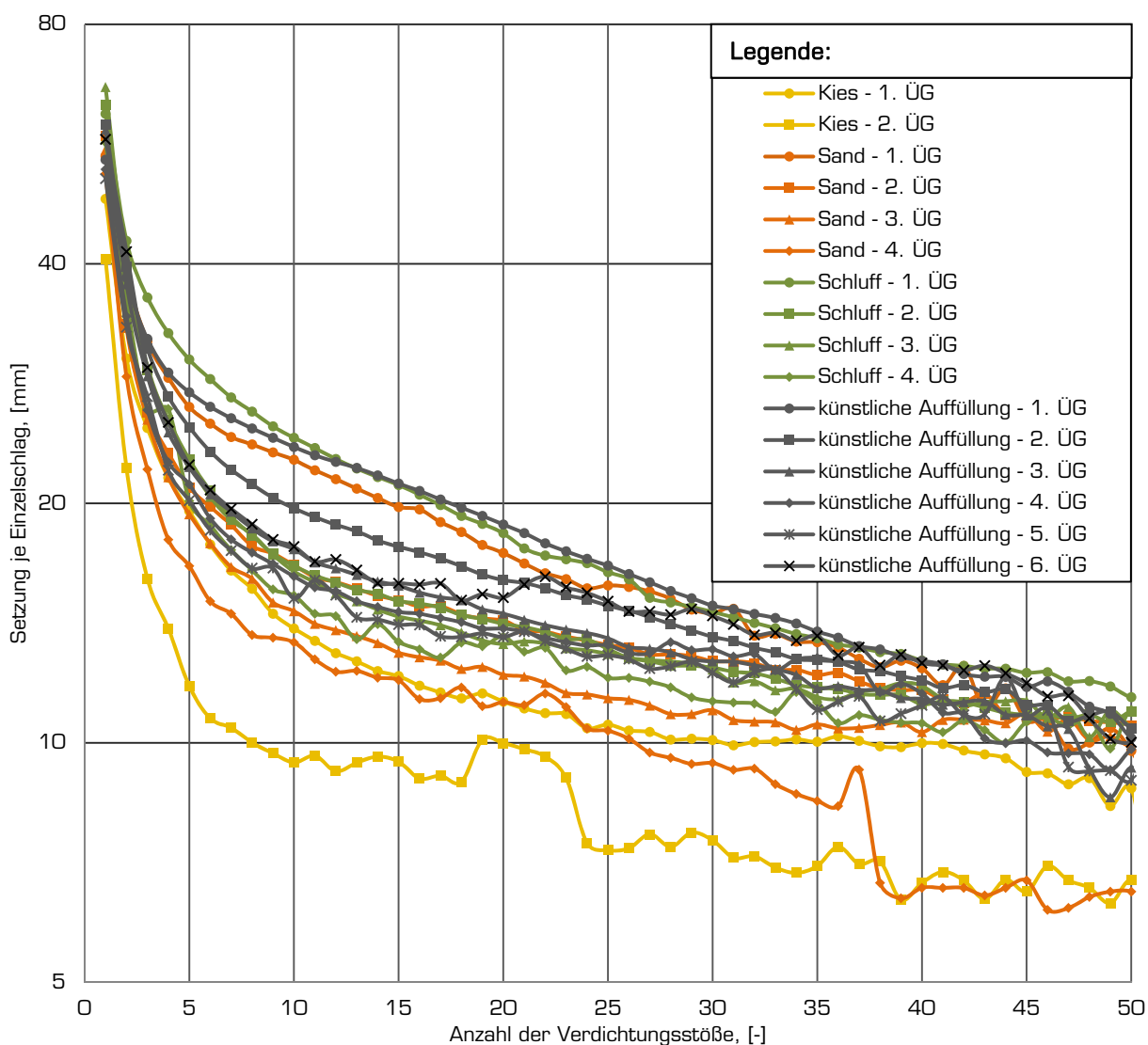


Abb. 92: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Schlagzahl-Setzungskurven bis zum 4. Übergang in den vier Untergrundkategorien

Aus dem Vergleich der Form der Schlagzahl-Setzungskurven können Aussagen über das Verdichtungsverhalten der einzelnen Untergrundkategorien getroffen werden. Es ist deutlich erkennbar, dass die Schlagzahl-Setzungskurve der Untergrundkategorie „Kies“ steiler als die anderen Setzungskurven verläuft und unter ihnen liegt. Demzufolge kann festgestellt werden, dass Kiese sich am schnellsten verdichten lassen. Die Schlagzahl-Setzungskurve der Untergrundkategorie „Sand“ verläuft verhältnismäßig auch steil, liegt aber oberhalb dieser der Untergrundkategorie „Kies“. Daher sind bei der Impulsverdichtung von Sanden in der Regel mehr Übergänge zur Erzielung des erforderlichen Verdichtungsgrades notwendig. Die Schlagzahl-Setzungskurven der Untergrundkategorien „Schluff“ und „künstliche Auffüllung“ verlaufen flacher als diese der anderen zwei Untergrundkategorien. Der Grund dafür ist, dass in den ersten Übergängen ziemlich große Setzungen mit jedem Verdichtungsstoß einhergehen und daher mehr Übergänge mit dem Impulsverdichter erforderlich sind.

Da der erzielbare Verdichtungsgrad beschränkt ist, nehmen die Setzungen unter dem Verdichtungsfuß sowohl in nichtbindigen, als auch in bindigen Böden ab einer bestimmten Schlagzahl kaum mehr zu. Die kleinen zusätzlichen plastischen Deformationen unter dem Verdichtungsfuß ergeben sich nur noch aus einer Verdrängung des Bodenmaterials.

Die optimale Schlagzahl, bei der der Boden immer noch verdichtet und nicht verdrängt wird, kann also mit Hilfe der Diagramme der durchschnittlichen Schlagzahl-Setzungskurven abgelesen werden. Je nach Untergrundkategorie ergibt sich die folgende etwaige Anzahl der Verdichtungsstöße pro Punkt und Übergang:

- Untergrundkategorie 1: Kies – ca. 30 Schläge;
- Untergrundkategorie 2: Sand – ca. 45 Schläge;
- Untergrundkategorie 3: Schluff – 30 bis 40 Schläge;
- Untergrundkategorie 4: künstliche Auffüllung – ca. 50 Schläge.

Weiters muss angemerkt werden, dass in feinkörnigen und bindigen wassergesättigten Böden sich mit steigender Anzahl der Verdichtungsstöße Porenwasserüberdruck aufbauen kann. Um eine effektive Verdichtung erzielen zu können, sind nach einer vorgegebenen Schlagzahl Liegephasen notwendig zum Abbau der Porenwasserdrücke.

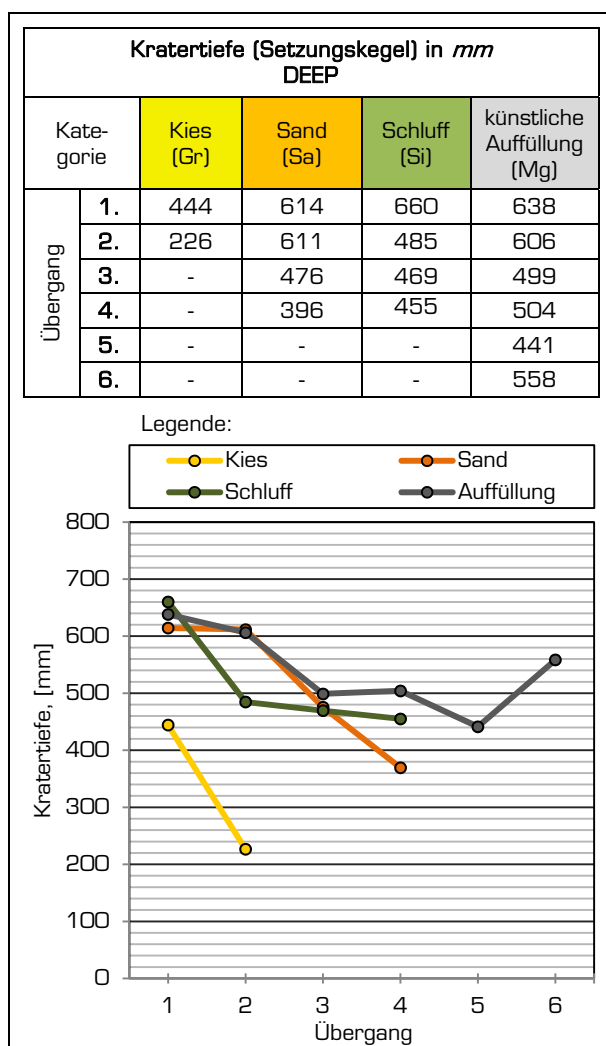


Abb.93: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Kratertiefe (Deep) in den vier Untergrundkategorien

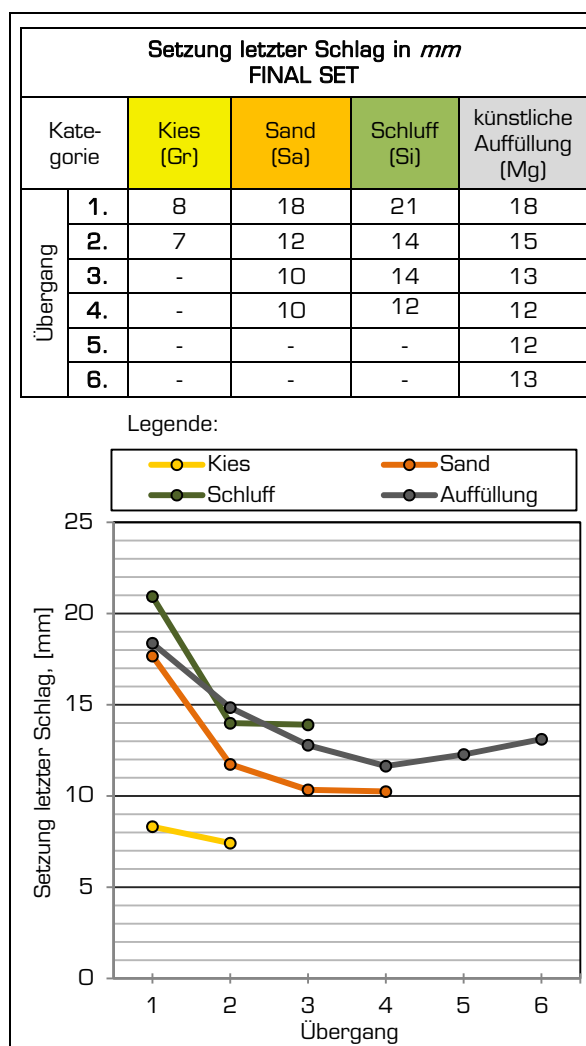


Abb.94: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Setzung letzter Schlag (Final Set) in den vier Untergrundkategorien

Die Diagramme (s. Abb. 93 und Abb. 94) stellen die durchschnittlichen Kratertiefen und Setzungen letzter Schlag für die vier Unterkategorieen gegenüber. Die Kratertiefe ergibt sich dabei aus der Summe aller Setzungen beim jeweiligen Übergang. Die so entstandenen Krater werden mit geeignetem Zugabematerial aufgefüllt. Falls die etwaige Kratertiefe vorab bekannt ist, kann das Volumen des Verfüllmaterials bestimmt werden. Somit könnten die in Unterkategorieen unterteilten durchschnittlichen Kratertiefen bei der Kalkulation von Projekten mit ähnlichen Untergrundverhältnissen herangezogen werden.

Die tiefsten Krater sind in der Regel bei der Impulsverdichtung von künstlichen Auffüllungen entstanden. Dementsprechend ist hier der Verbrauch an Verfüllmaterial am größten. Die kleinsten Kratertiefen bzw. das kleinste Volumen zum Auffüllen ergeben sich für die Unterkategorie „Kies“.

Bei allen Unterkategorieen kommt es mit steigender Anzahl der Übergänge zu einer stetigen Reduzierung der Setzungen letzter Schlag. Es lässt sich also feststellen, dass durch die Impulsverdichtung die Setzungsempfindlichkeit des Baugrundes vermindert wird.

6.1.5 Tiefenwirkung

Zur Bestimmung der durchschnittlichen Tiefenwirkung wurden die vor und nach der Impulsverdichtung durchgeführten Rammsondierungen herangezogen. Da verschiedene Rammsondentypen verwendet wurden, wurde der Vergleich der Rammsondierungen vor und nach der Impulsverdichtung für die Ermittlung der Verdichtungstiefe verwendet. Für jedes bearbeitete Projekt wurde die Tiefenwirkung der Impulsverdichtung ermittelt. Anhand der Analyse der dokumentierten Verdichtungskontrollen wurde je Unterkategorie eine Kurve der mittleren Verbesserungsfaktoren erstellt, die in weiterer Folge zur Ermittlung der mittleren Verdichtungstiefen herangezogen wurde. Die Ergebnisse werden im nachfolgenden Diagramm (s. Abb. 95) gegenübergestellt.

Aus dem Diagramm wird ersichtlich, dass die Tiefenwirkung der Impulsverdichtung umso größer ist, je grobkörniger der Böden ist. Demzufolge ist in Kiesen und Sanden generell eine größere Verdichtungstiefe erreichbar, als bei bindigen Böden.

Je Unterkategorie können die folgenden etwaigen durchschnittlichen Verdichtungstiefen aus dem Diagramm abgelesen werden:

- Unterkategorie 1: Kies – ca. 4,8 m;
- Unterkategorie 2: Sand – ca. 4,7 m;
- Unterkategorie 3: Schluff – ca. 3,5 m;
- Unterkategorie 4: künstliche Auffüllung – ca. 4,6 m.

Es ergibt sich eine mittlere Tiefenwirkung für die Impulsverdichtung von 3,5 bis etwa 5 m. In Einzelfällen sind in Abhängigkeit von den Untergrundverhältnissen auch Verdichtungstiefen bis sogar 7 m erreichbar.

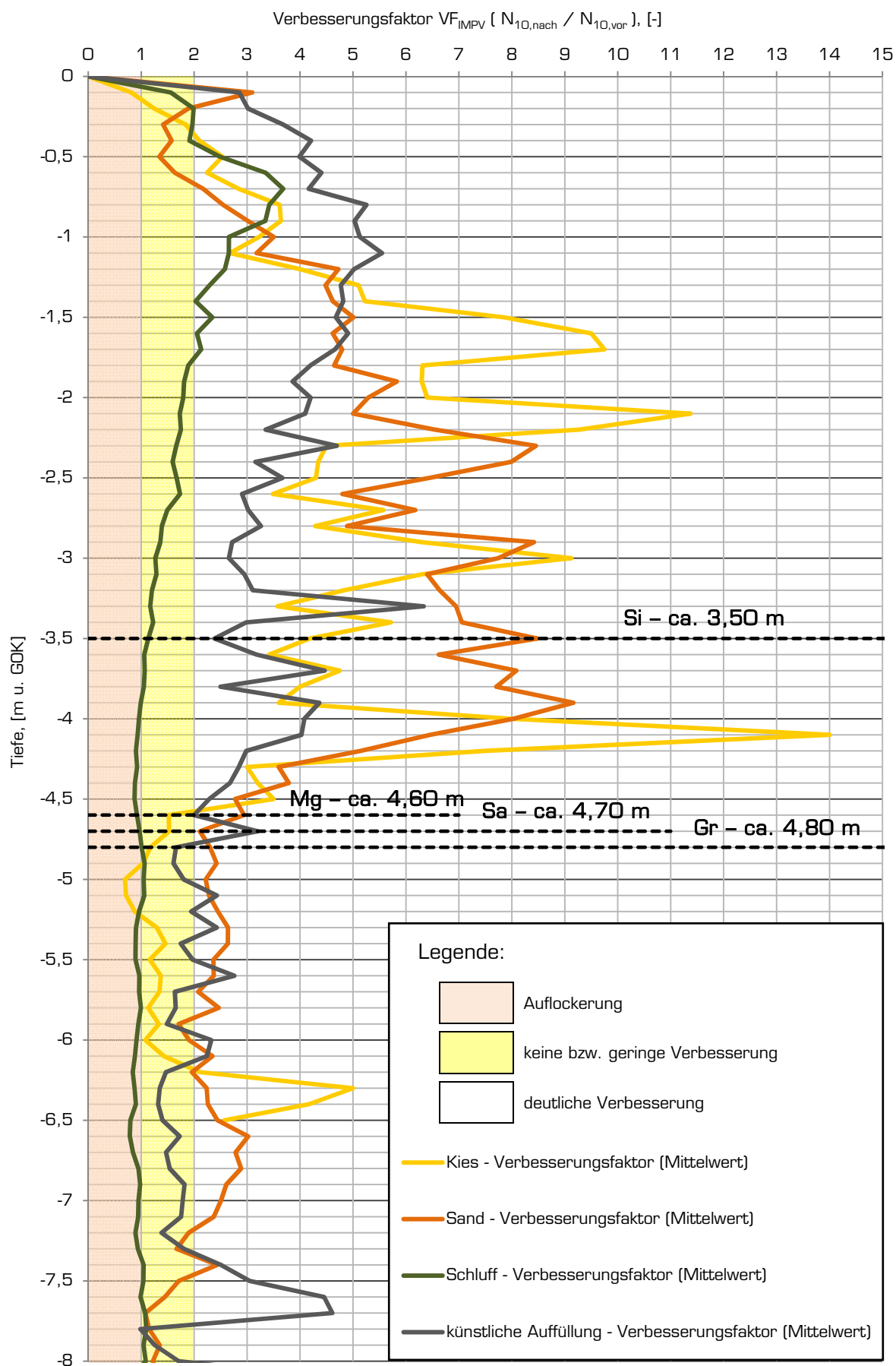


Abb.95: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Tiefenwirkung der Impulsverdichtung in den vier Untergrundkategorien

7 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die Impulsverdichtung ist ein Bodenverbesserungsverfahren, die in den letzten 20 Jahren weltweit erfolgreich eingesetzt werden konnte. Das Grundprinzip besteht in der Übertragung von impulsartigen Belastungen der Oberfläche des zu verbessernden Bodens mit Hilfe einer Fallmasse.

Im Rahmen der gegenständlichen Diplomarbeit, die in Kooperation mit Fa. Terra-Mix abgewickelt wurde, wurden die während der Impulsverdichtung dokumentierten Messdaten aus ausgeführten Projekten analysiert, um Zusammenhänge zwischen den Verfahrensparametern und den Untergrundverhältnissen zu finden. Das Ziel der Datenauswertung war die Grundlagen einer Auswertungsdatenbank zu erarbeiten, die der Firma Terra-Mix bei der weiteren Datensammlung, Datenauswertung und auf Basis der ausgewerteten Projektdaten in der Angebotsphase bei der Kalkulation und Kostenrechnung unterstützen kann. Die Struktur der hier vorgestellten Datenbank ermöglicht außerdem die Erstellung von Protokollen über den durchgeführten Verdichtungsarbeiten, die den Kunden zur Verfügung gestellt werden könnten.

Die Auswertung der aufgezeichneten Herstellungsparameter nach Untergrundkategorien lieferte neue Erkenntnisse über das Verhalten des Bodens bei der Impulsverdichtung. Die Erkenntnisse der vorliegenden Diplomarbeit bestätigen, dass mit dem Impulsverdichter in erster Linie nichtbindige Böden effektiv verdichtbar sind.

Aus der Interpretation der während der Verdichtung aufgezeichneten Messdaten lassen sich folgende Schlussfolgerungen ziehen:

- Zur Verdichtung natürlich anstehender Böden sind generell weniger Verdichtungsübergänge mit dem Impulsverdichter notwendig, als zur Verdichtung von künstlichen Auffüllungen.
- Zur Verdichtung grobkörniger Böden wie Kies und Sand sind deutlich weniger Verdichtungsübergänge notwendig, als zur Verdichtung von feinkörnigen Böden wie Schluff.
- Je feinkörniger und inhomogener ein Boden ist, desto mehr Übergänge sind erforderlich, um die gewünschte Verdichtung zu erreichen.
- Die zur erfolgreichen Verdichtung notwendige Anzahl der Übergänge lässt sich anhand der Auswertung für jede definierte Untergrundkategorie bestimmen.
- Aus den Schlagzahl-Setzungskurven lässt sich die sinnvolle Anzahl der Schläge je Untergrundkategorie ableiten.
- In Abhängigkeit von der Untergrundkategorie liegt die optimale Schlagzahl zwischen 30 und 50 Schlägen. Ab dieser Schlagzahl nehmen die Setzungen unter dem Verdichtungsfuß kaum mehr zu.
- Das Volumen des notwendigen Verfüllmaterials, mit dem die Verdichtungskrater aufgefüllt werden, ist bei der Verdichtung von künstlichen Auffüllungen am größten.
- Mit steigender Anzahl der Übergänge kommt es zu einer stetigen Reduzierung der Setzung letzter Schlag.
- Die Verkleinerung der Streubereiche der Schlagzahl-Setzungskurven, sowie der Kratertiefe und der Setzung letzter Schlag ist ein Hinweis auf die Homogenisierung des Untergrundes.

- Die notwendige Verdichtungsenergie erhöht sich mit zunehmender Anzahl der Übergänge.
- Die bezogene Verdichtungsenergie ist am größten bei Unterkategorie „Kies“.
- Je nach Unterkategorie liegt die Tiefenwirkung der Impulsverdichtung im Bereich von 3,5 bis 4,8 m. In Einzelfällen sind in Abhängigkeit von den Untergrundverhältnissen auch Verdichtungstiefen bis sogar 7 m erreichbar.
- Die Verdichtungstiefe ist bei nichtbindigen Böden (Kiese und Sande) größer als bei bindigen Böden (Schluffe). Bei der Impulsverdichtung von künstlichen Auffüllungen kann in Abhängigkeit von der Zusammensetzung, der Lagerungsdichte und den Grundwasserverhältnissen stark variierende Tiefenwirkung ermittelt werden, die bei den untersuchten Projekten im Mittel 4,6 m beträgt.
- Ausgenommen Unterkategorie „Kies“ ist das am häufigsten getroffene Abbruchkriterium bei der Impulsverdichtung die Begrenzung der Kratertiefe (1. Abbruchkriterium). Das zweithäufigste Abbruchkriterium bezeichnet das Erreichen eines bestimmten Grenzwertes der Setzung je Einzelschlag (3. Abbruchkriterium). Das Abbruchkriterium 2. „Anzahl der Schläge“ hat bei allen Unterkategorien die geringste Auftretenshäufigkeit.

Im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit konnte die Veränderung der bodenphysikalischen Parameter zufolge der Impulsverdichtung nicht bestimmt werden. In den Bodengutachten und geotechnischen Berichten werden die Bodenparameter nur vor der Verdichtung angegeben. Feld- und Laboruntersuchungen zur Bestimmung des Reibungswinkels, der Kohäsion und des Verformungsmoduls werden nach der Impulsverdichtung nicht durchgeführt. Ihre Bestimmung durch Korrelationen zu den Eindringwiderständen der Rammsonde ist mit großen Ungenauigkeiten behaftet.

8 Ausblick

Dank der im Rahmen der gegenständlichen Diplomarbeit erarbeiteten Auswertungsdatenbank und auf Basis der von der Firma Terra-Mix bereitgestellten Messdaten wurden Zusammenhänge zwischen den Verfahrensparameter der Impulsverdichtung und den Untergrundverhältnissen gefunden. Zur Bekräftigung der beobachteten Tendenzen wäre eine weitere Datensammlung und die ausführliche Auswertung weiterer Projektdaten erforderlich. Es empfiehlt sich die Daten von weiteren Projekten in der Auswertungsdatenbank zu sammeln, um die Zuverlässigkeit und Richtigkeit der gefundenen Zusammenhänge zu erhöhen.

Der in der Datenbank zur Ermittlung der Tiefenwirkung angeführte Verbesserungsfaktor als Verhältniswert der Sondierergebnisse nach der Verdichtung zu diesen vorher könnte zukünftig die Aussagekraft der Verdichtungskontrolle mittels Rammsondierungen erhöhen. Falls genügend Daten gesammelt und ausgewertet werden, könnte man in der Zukunft typische Werte der Verbesserungsfaktoren für die einzelnen Untergrundkategorien angeben.

Denkbar ist die Ermittlung der Veränderung der bodenphysikalischen Parameter wie des Reibungswinkels, der Kohäsion, des Steifemoduls etc. Da ihre Ableitung durch Korrelationen zu den Eindringwiderständen der Rammsonde unbefriedigend ist, empfiehlt sich zukünftig diese mit Hilfe von Laboruntersuchungen vor und nach der Impulsverdichtung zu bestimmen. Die erarbeitete Auswertungsdatei ermöglicht die Analyse bestimmter Teile des verdichteten Bereiches. Durch die Gegenüberstellung der Verfahrensparameter mit den versuchstechnisch bestimmten Parametern, wäre es möglich Zusammenhänge zwischen den bodenphysikalischen Parametern und Verfahrensparameter zu erkennen.

Eine mögliche zukünftige Weiterentwicklung der Auswertungsdatenbank wäre die Unterteilung der im Rahmen der vorliegenden Diplomarbeit definierten vier Untergrundkategorien in weitere Unterkategorien. Die Abb. 96 veranschaulicht eine mögliche Unterteilung der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllungen“.

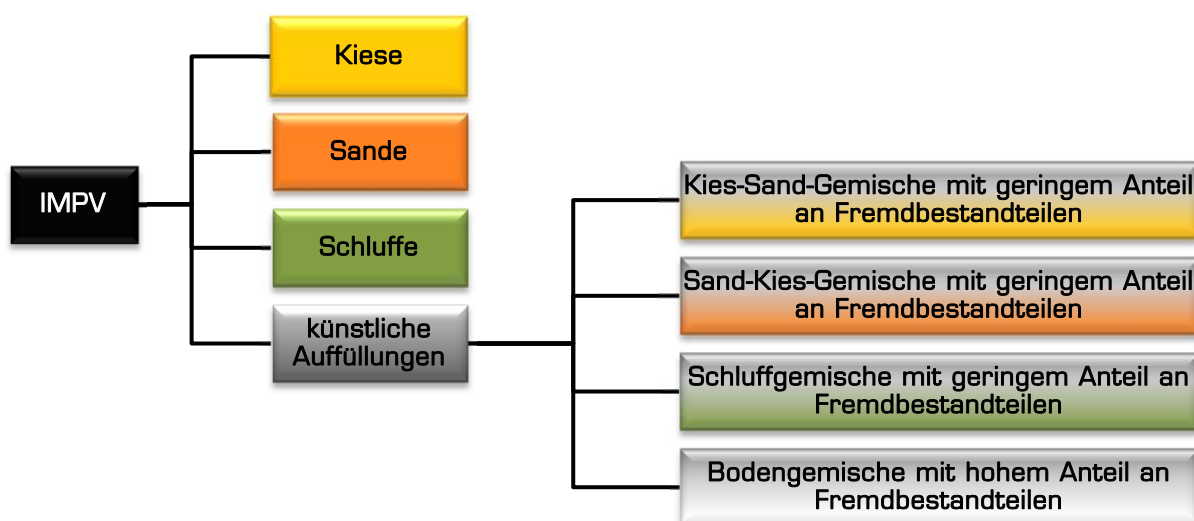


Abb.96: Mögliche Unterteilung der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“ in 4 Unterkategorien

Anhang A. Auswertung der Verdichterdaten nach Untergrundkategorien



Abbruchkriterien (Stop Code)

Legende: kein Abbruchkriterium getroffen

Abbruchkriterium 1: (Deep = D) Gesamsetzung (Krater- bzw. Trichterlefe)

Abbruchkriterium 2: (Blows = B) Schlagzahl pro Verdichtungs- und Übergang

Abbruchkriterium 3: (Final Set = S) Setzung letzter Schlag

Kies (Gr)

Stop Code 1: D Deep > 80 cm
Stop Code 2: B Blows > 40 - 50 Schläge
Stop Code 3: S Final Set < 6 - 11 mm

9.9%
1.0%
5.6%
83.5%

Sand (Sa)

Stop Code 1: D Deep > 60 - 80 cm
Stop Code 2: B Blows > 40 - 50 Schläge
Stop Code 3: S Final Set < 8 - 13 mm

7.3%
28.1%
4.4%
62.2%

Anzahl der Verdichtungsstöße

Übergang

Schluff (Si)

Stop Code 1: D Deep > 80 cm
Stop Code 2: B Blows > 50 Schläge
Stop Code 3: S Final Set < 10 - 14 mm

26.8%
26.8%
3.2%
43.1%

künstliche Auffüllung (Mg)

Stop Code 1: D Deep > 40 - 80 cm
Stop Code 2: B Blows > 50 Schläge
Stop Code 3: S Final Set < 7 - 18 mm

8.0%
35.4%
13.1%
43.4%

Durchschnittliche Fallhöhe

Übergang

Abb.97: Auswertung der Verdichterdaten nach Untergrundkategorien – Formblatt 1/3

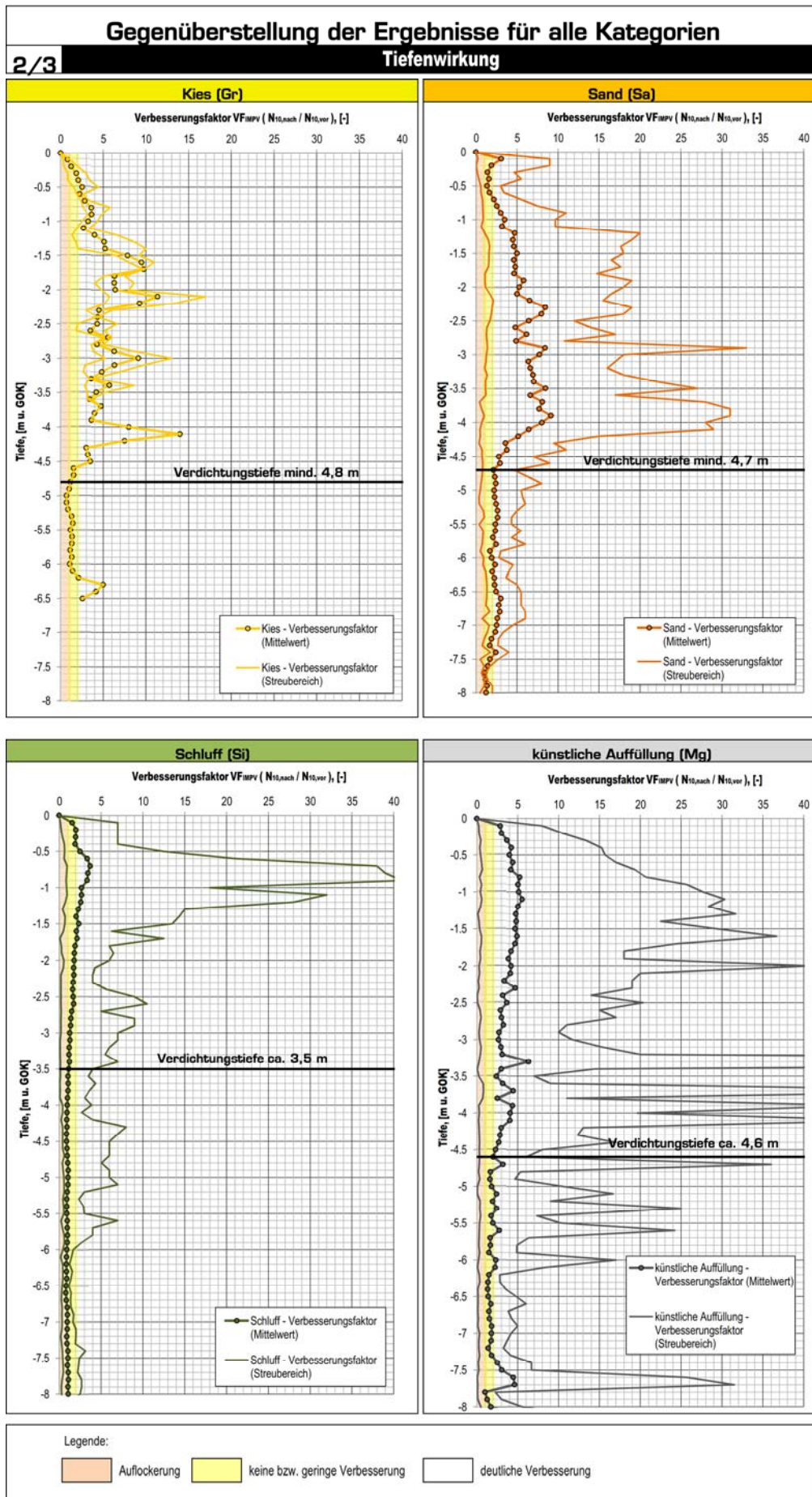
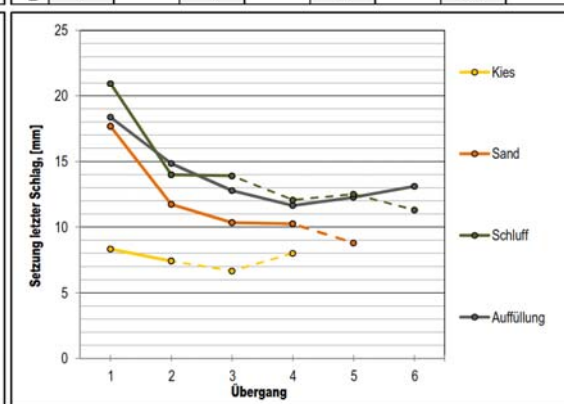
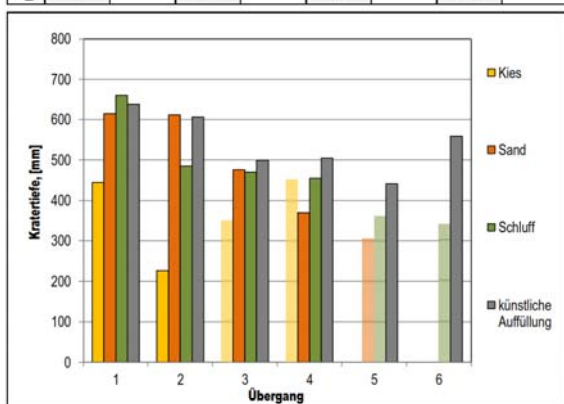


Abb.98: Auswertung der Verdichterdaten nach Unterkategorien – Formblatt 2/3

Gegenüberstellung der Ergebnisse für alle Kategorien

3/3 Schlagzahl-Setzungskurven, Kratertiefe, Setzung letzter Schlag

Kratertiefe (Deep)								Setzung letzter Schlag (Final Set)							
Kies (Gr)		Sand (Sa)		Schluff (Si)		künstliche Auffüllung (Mg)		Kies (Gr)		Sand (Sa)		Schluff (Si)		künstliche Auffüllung (Mg)	
Projekte Punkte	Deep [mm]	Projekte Punkte	Deep [mm]	Projekte Punkte	Deep [mm]	Projekte Punkte	Deep [mm]	Projekte Punkte	Final Set [mm]	Projekte Punkte	Final Set [mm]	Projekte Punkte	Final Set [mm]	Projekte Punkte	Final Set [mm]
3 von 3 1898	444	4 von 4 1350	614	7 von 7 5218	660	13 von 13 9592	638	3 von 3 1898	8	4 von 4 1350	18	7 von 7 5218	21	13 von 13 9592	18
3 von 3 404	226	4 von 4 767	611	7 von 7 3791	485	13 von 13 4719	606	3 von 3 404	7	4 von 4 767	12	7 von 7 3791	14	13 von 13 4719	15
1 von 3 9	-	3 von 4 415	476	7 von 7 878	469	13 von 13 2856	499	1 von 3 9	-	3 von 4 415	10	7 von 7 878	14	13 von 13 2856	13
1 von 3 2	-	3 von 4 85	369	7 von 7 104	455	11 von 13 879	504	1 von 3 2	-	3 von 4 85	10	7 von 7 104	12	11 von 13 879	12
0 von 3 0	-	3 von 4 8	-	4 von 7 46	-	11 von 13 389	441	0 von 3 0	-	3 von 4 8	-	4 von 7 46	-	11 von 13 389	12
0 von 3 0	-	0 von 4 0	-	2 von 7 6	-	8 von 13 207	558	0 von 3 0	-	0 von 4 0	-	2 von 7 6	-	8 von 13 207	13



Schlagzahl-Setzungskurven

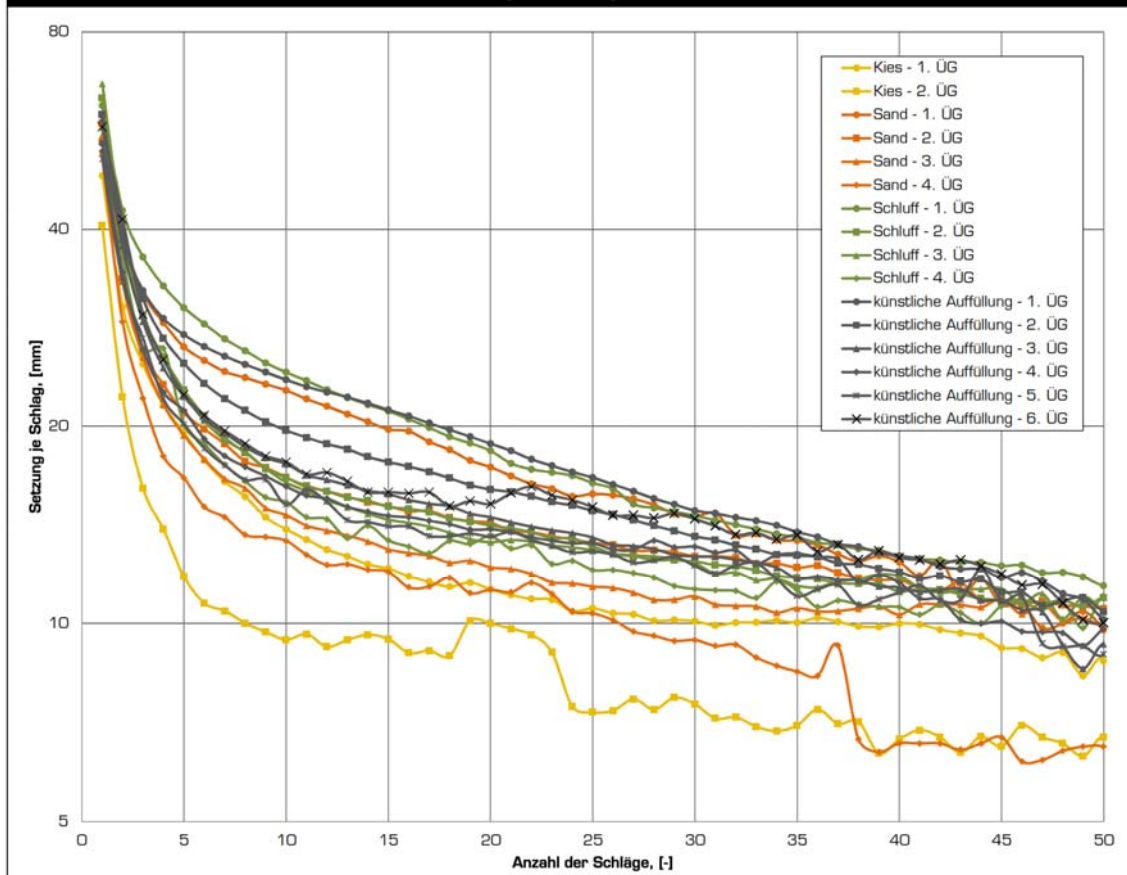


Abb.99: Auswertung der Verdichtungsdaten nach Untergrundkategorien – Formblatt 3/3

Anhang B. Untergrundkategorie 1: Kies

B 1. Zusammenfassung der Ergebnisse aller Projekte

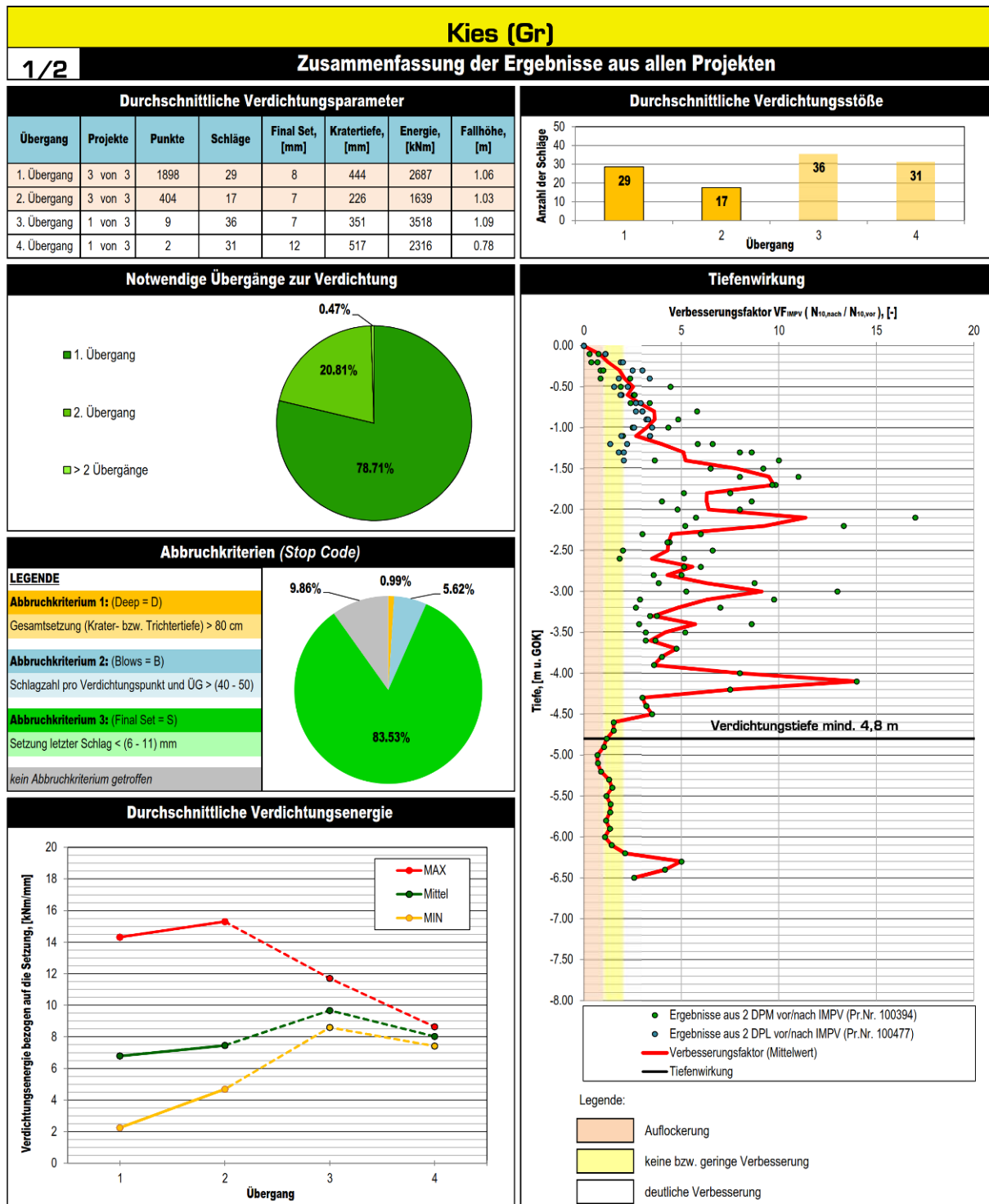


Abb. 100: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 1 – Kies – Formblatt 1/2

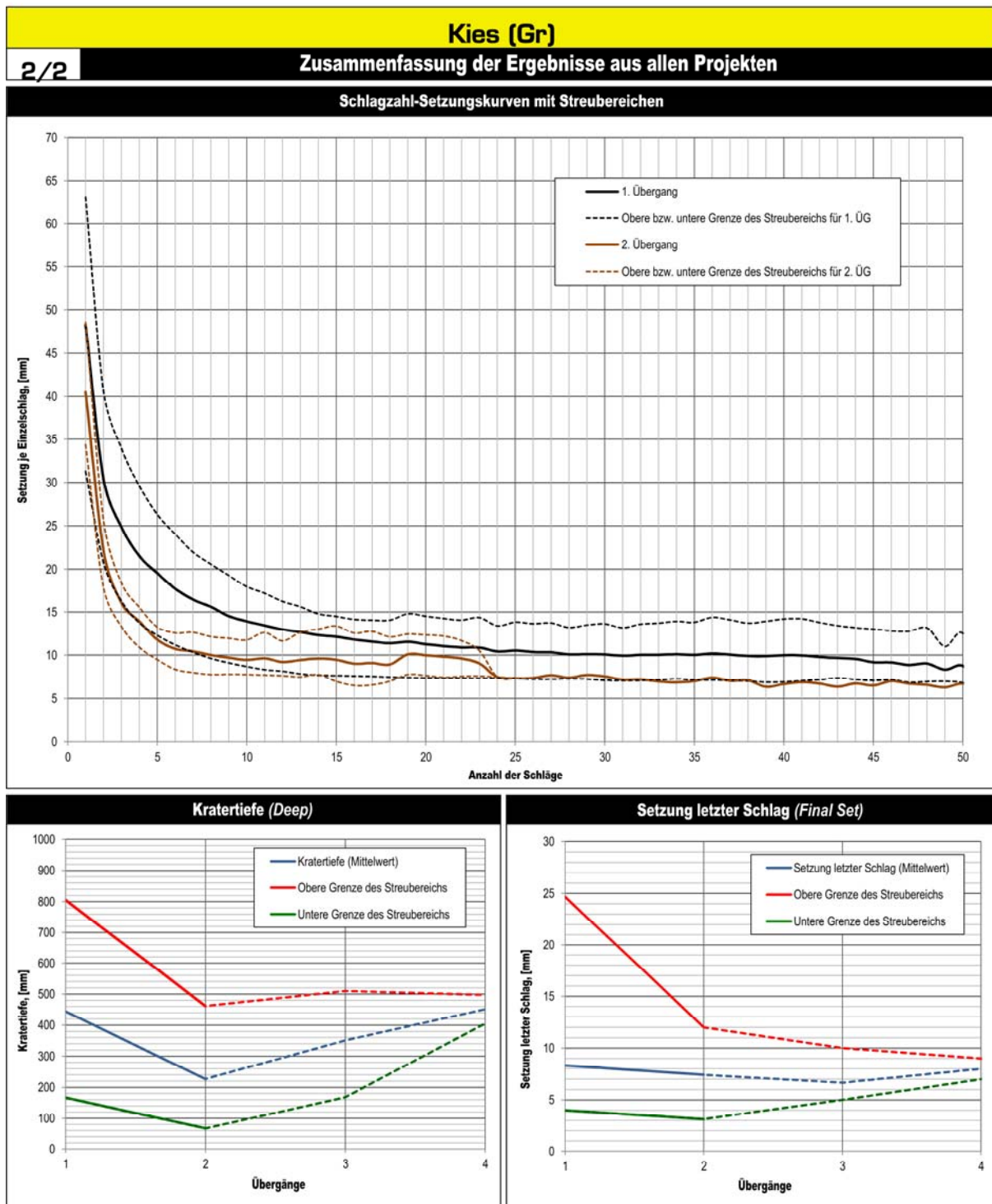


Abb. 101: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 1 – Kies – Formblatt 2/2

B 2. Ausgewertete Verfahrensparameter je Einzelprojekt

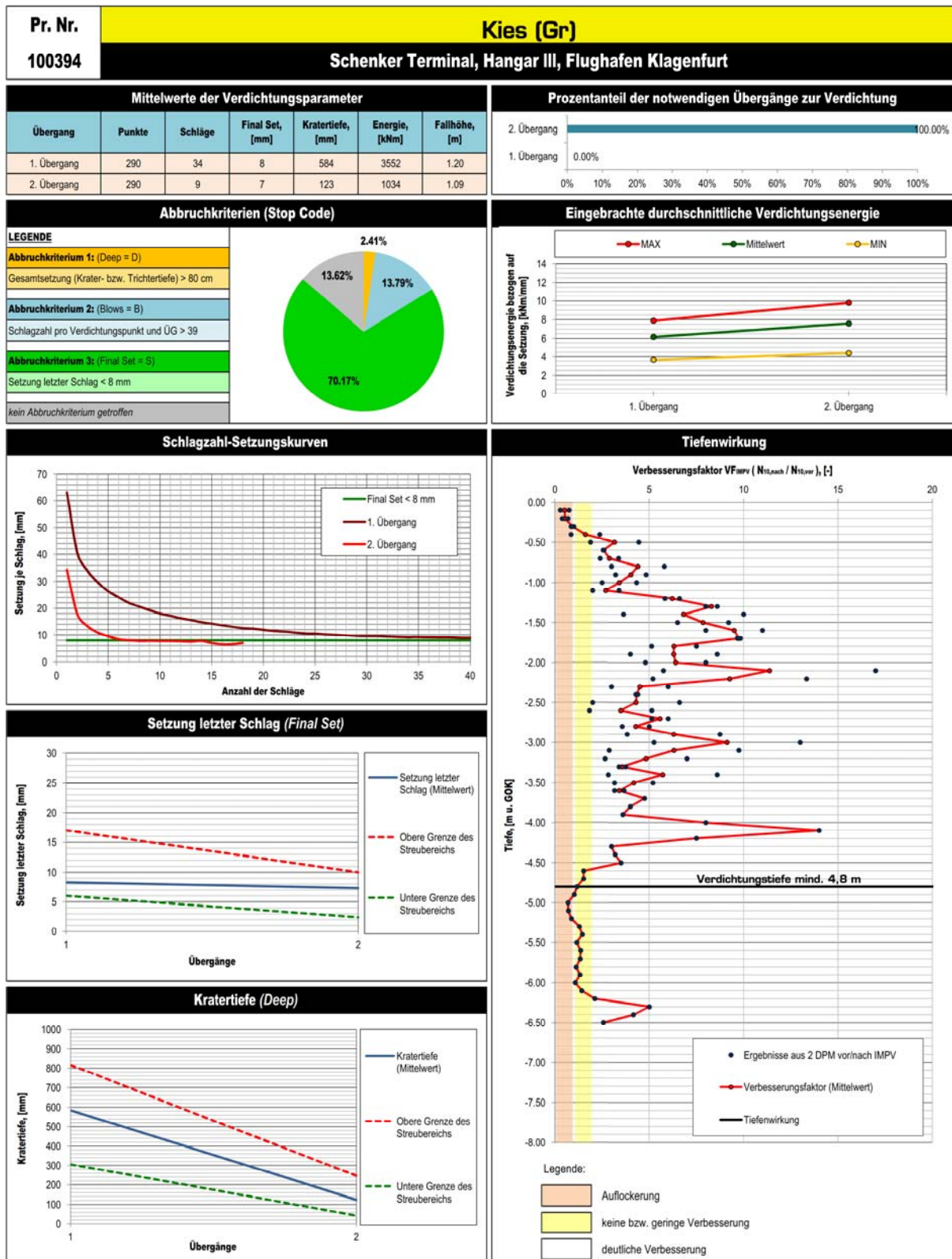


Abb. 102: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100394

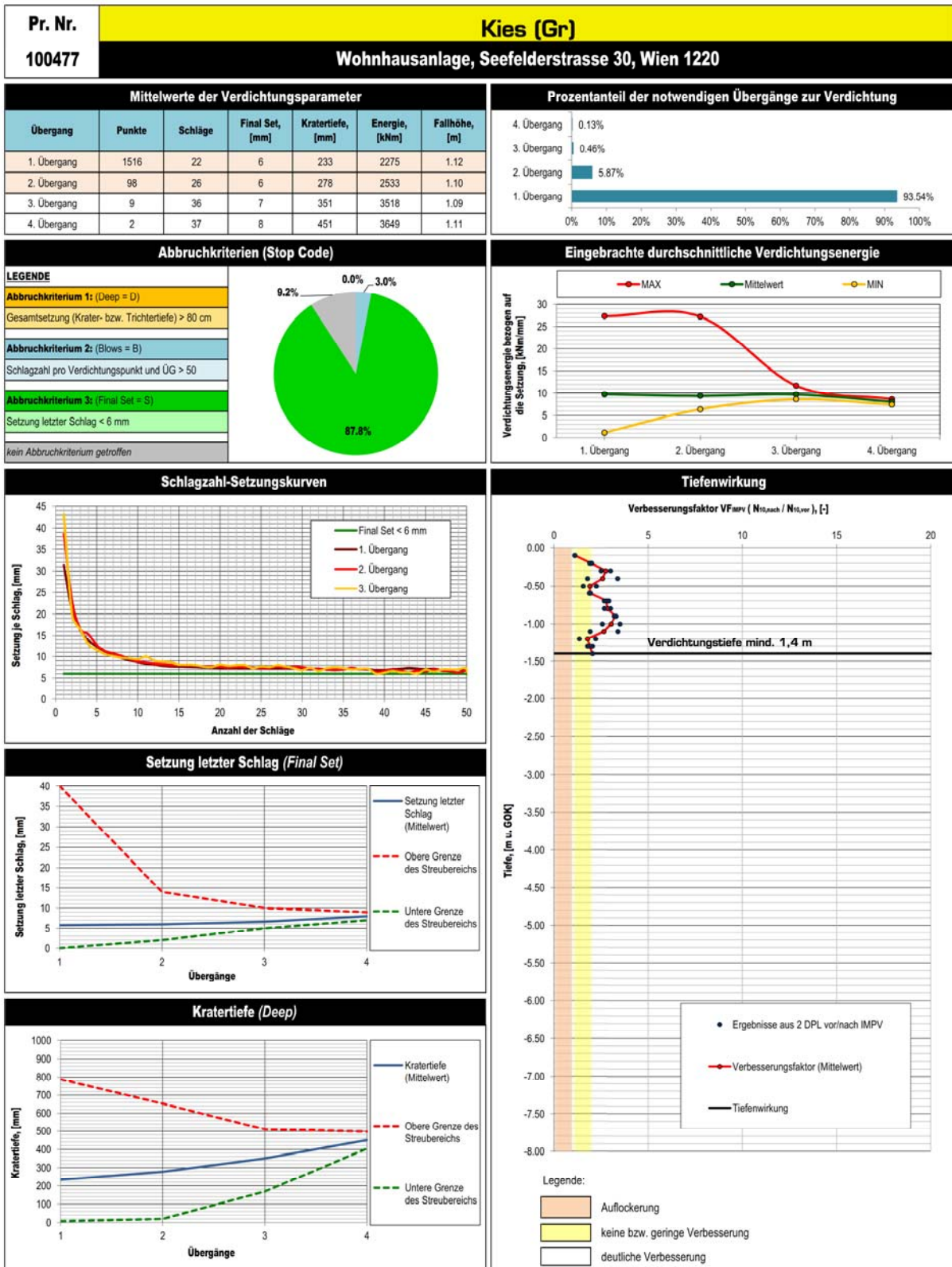


Abb. 103: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100477

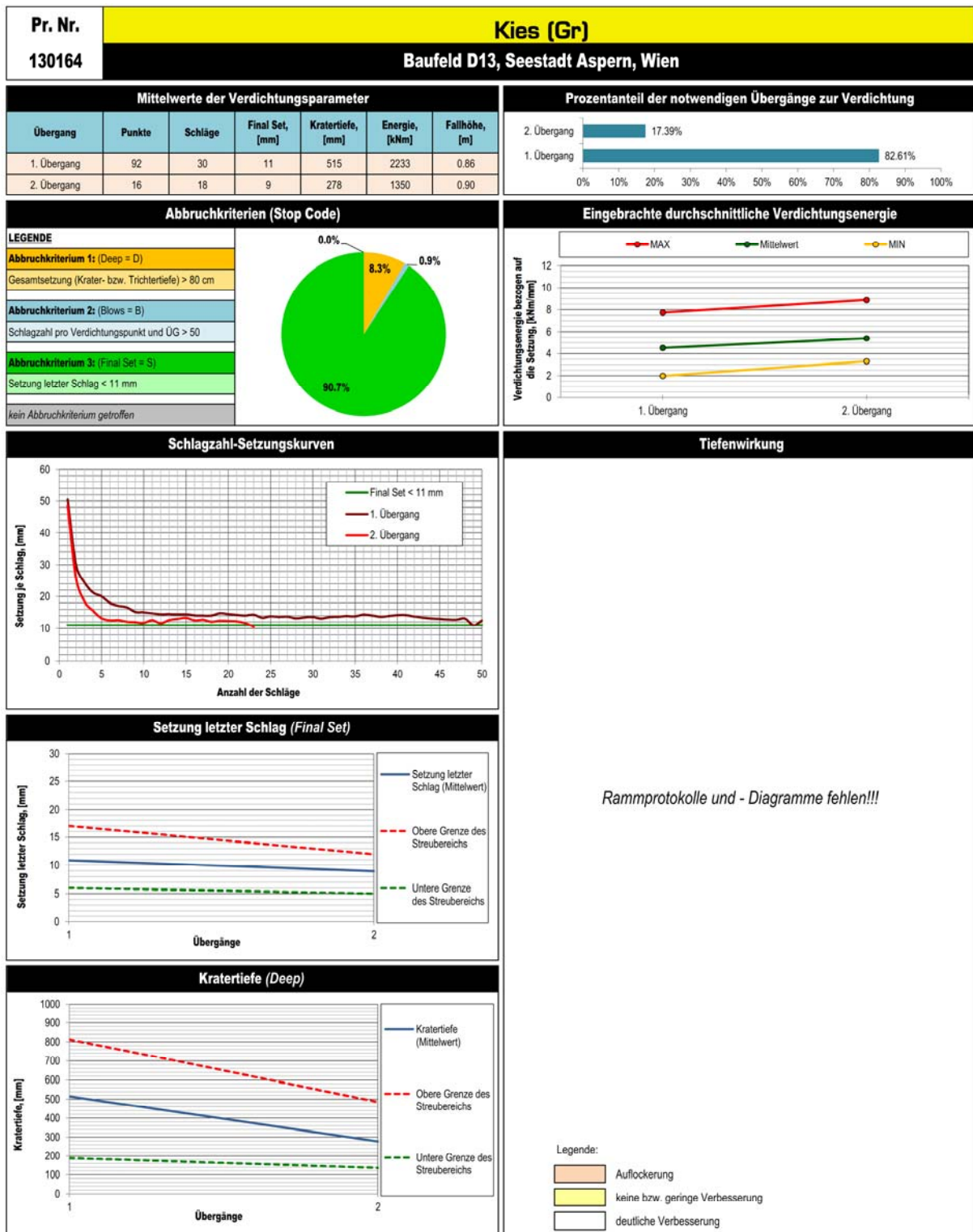


Abb. 104: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 130164

Anhang C. Untergrundkategorie 2: Sand

C 1. Zusammenfassung der Ergebnisse aller Projekte

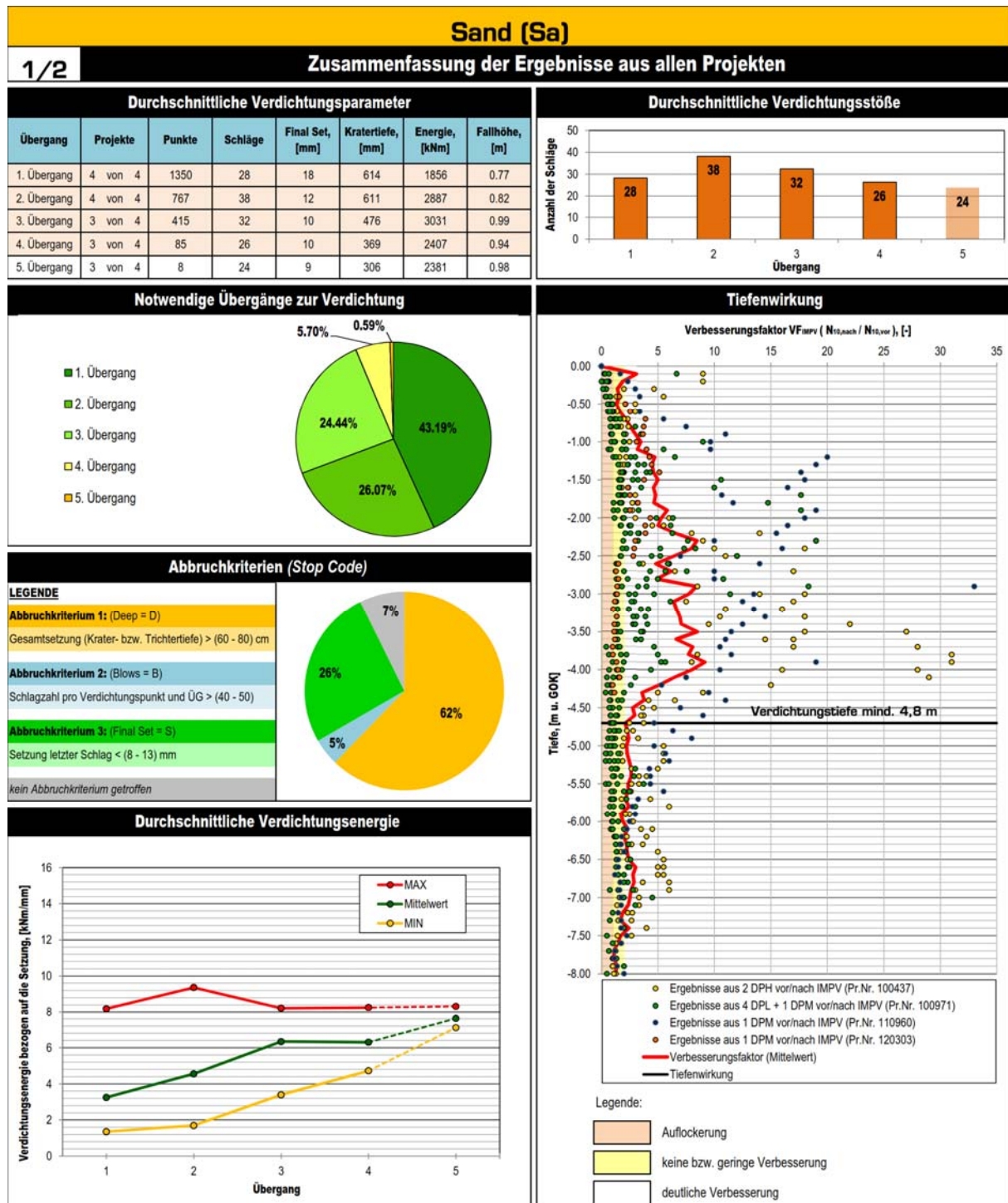


Abb. 105: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 2 – Sand – Formblatt 1/2

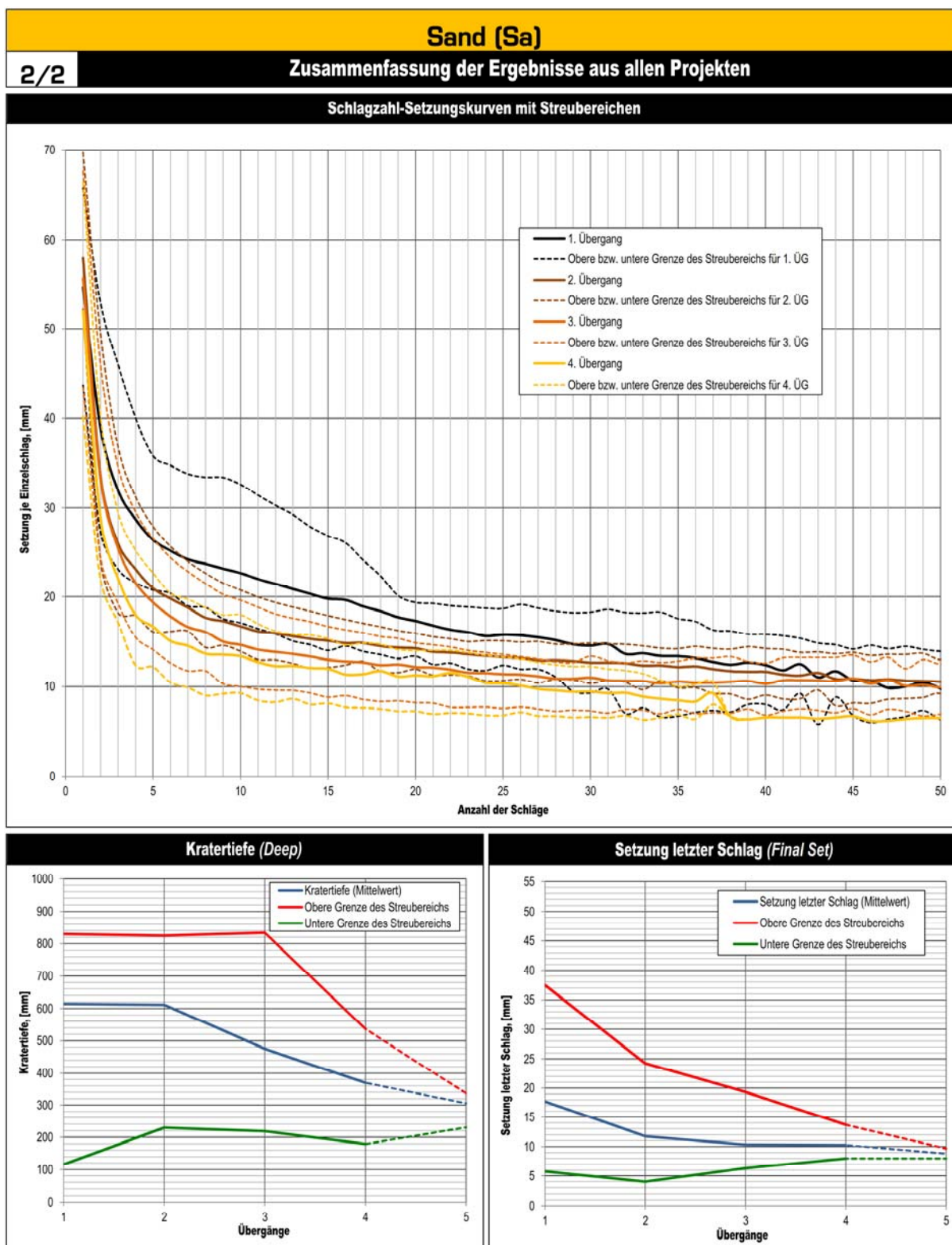


Abb. 106: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 2 – Sand – Formblatt 2/2

C 2. Ausgewertete Verfahrensparameter je Einzelprojekt

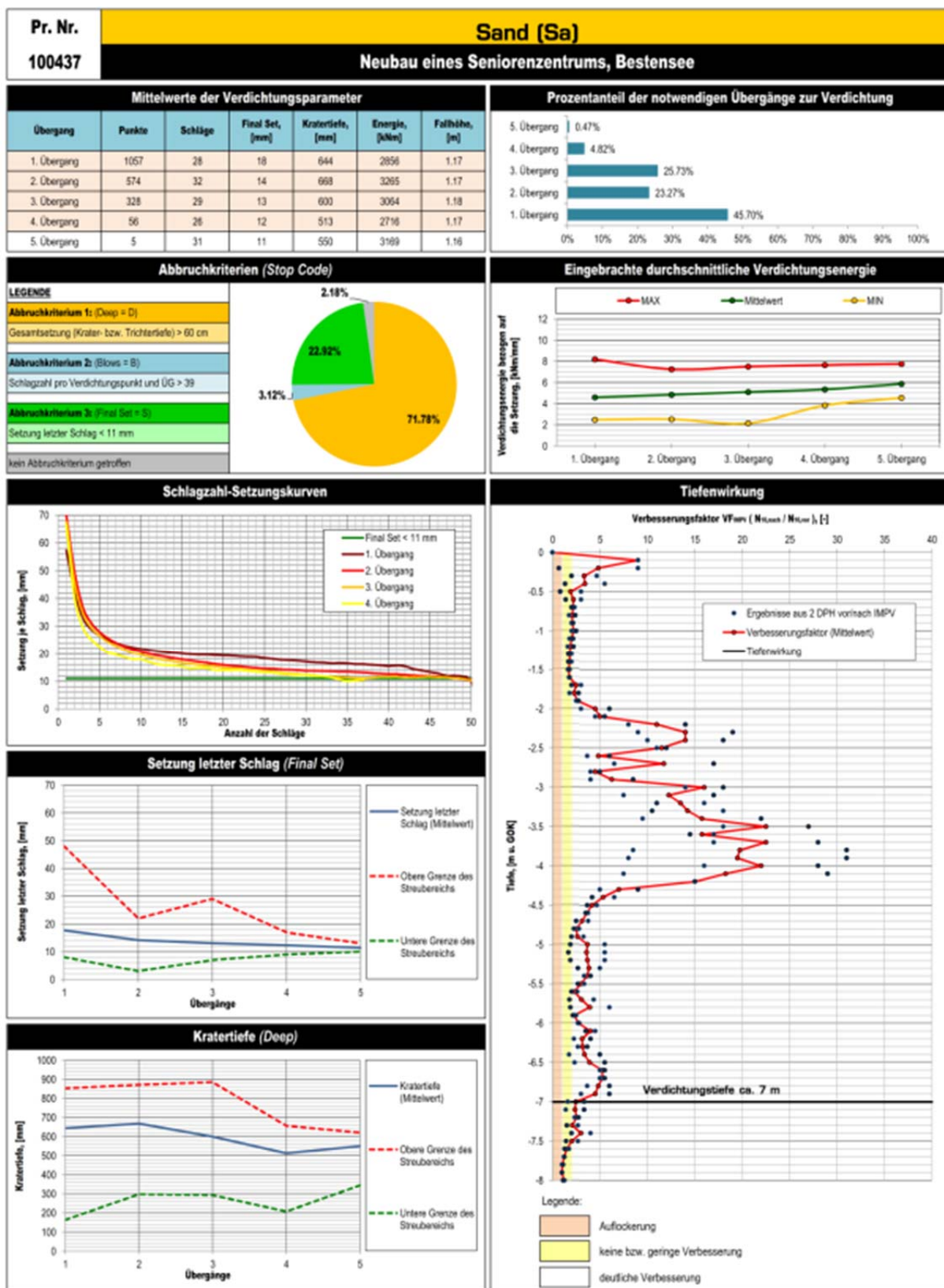


Abb. 107: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100437

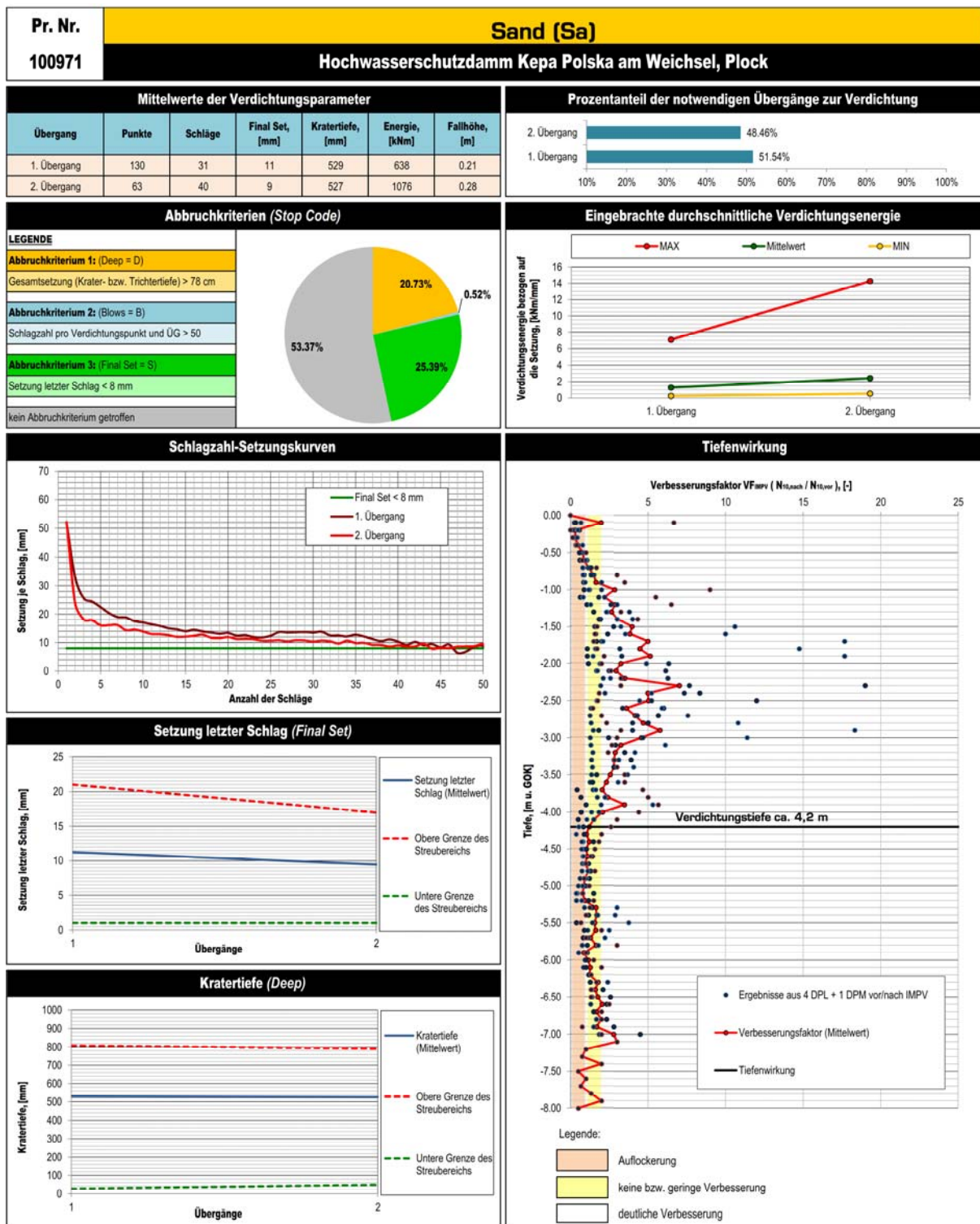


Abb. 108: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100971

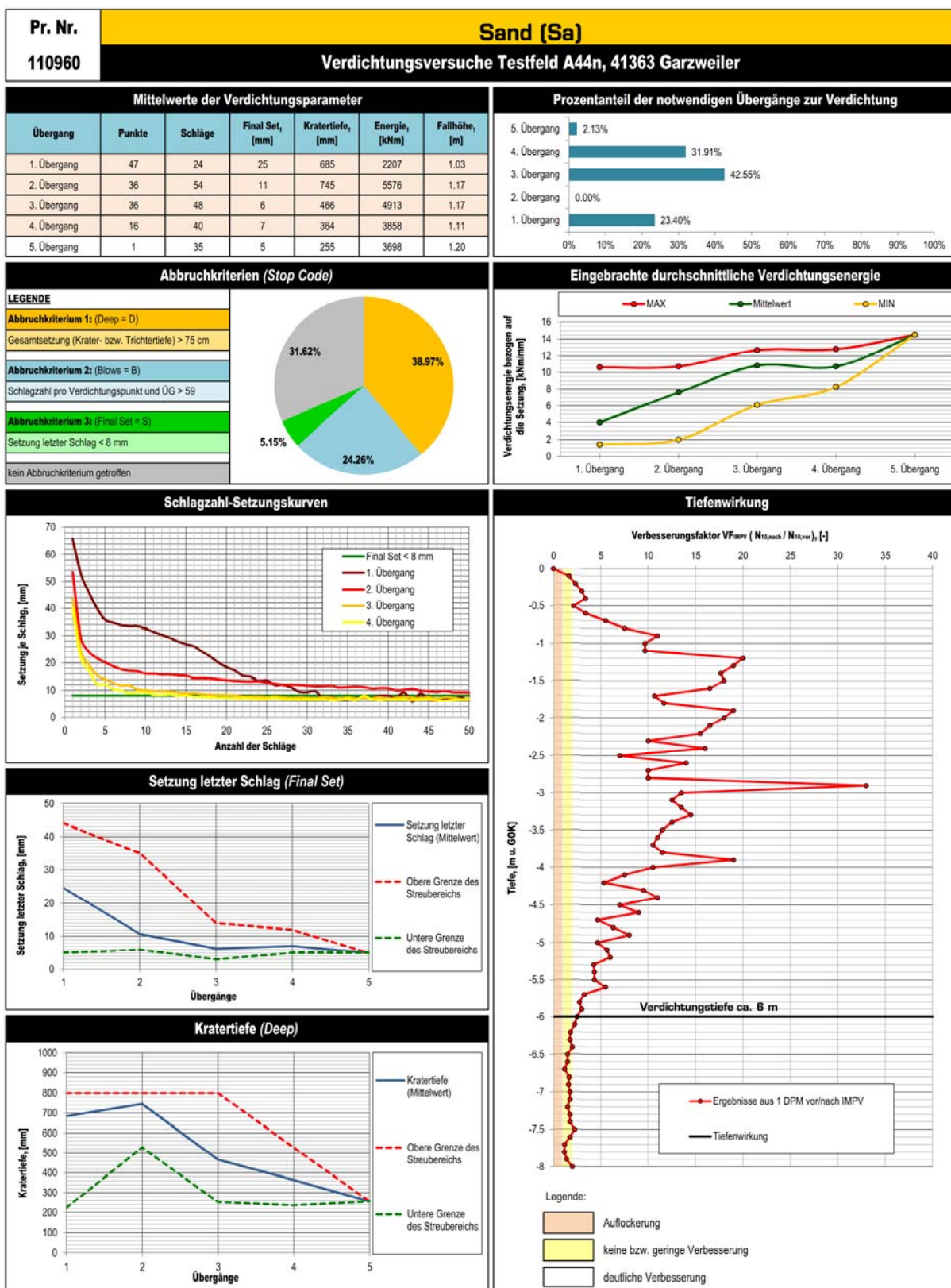


Abb. 109: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 110960

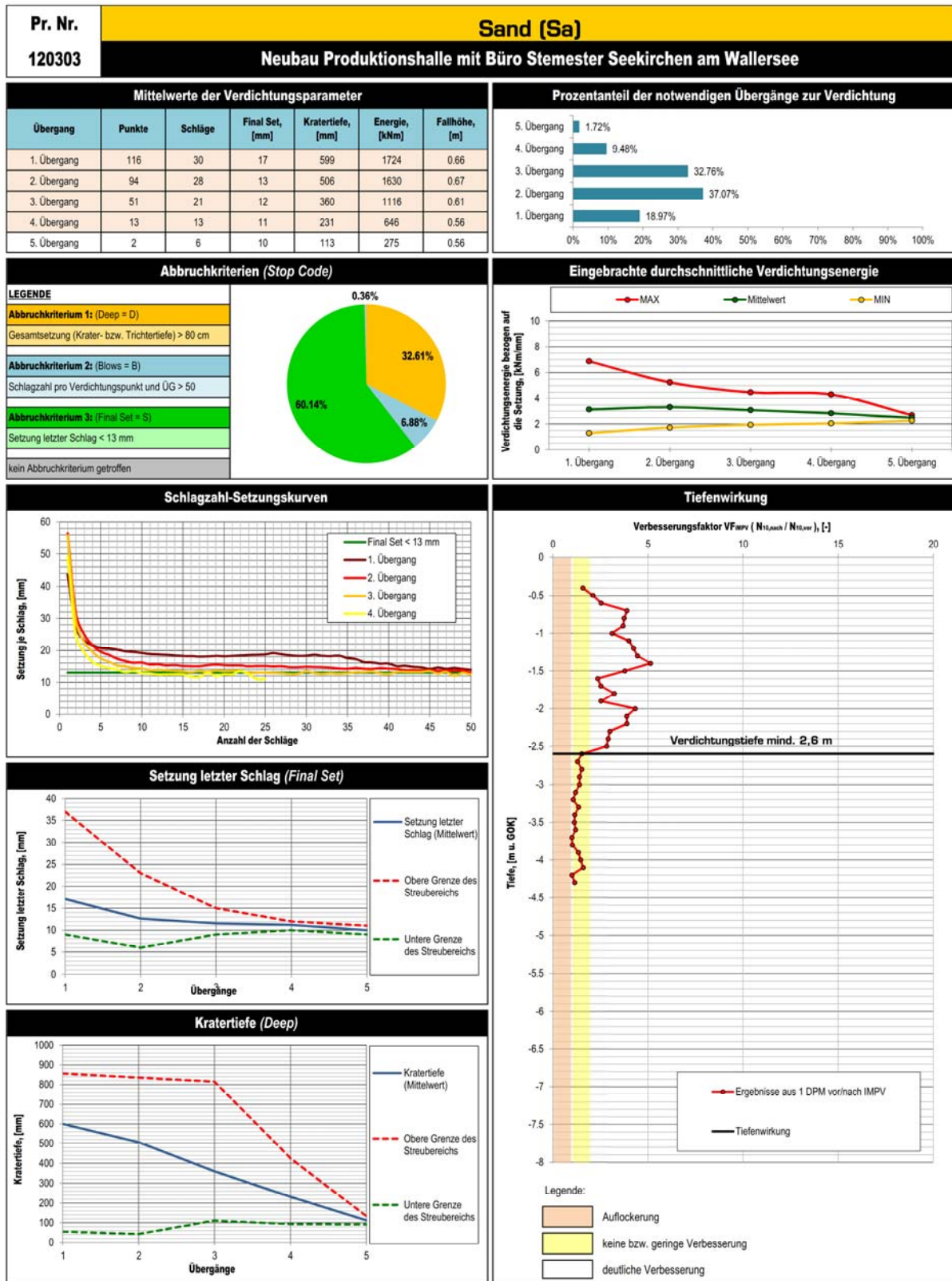
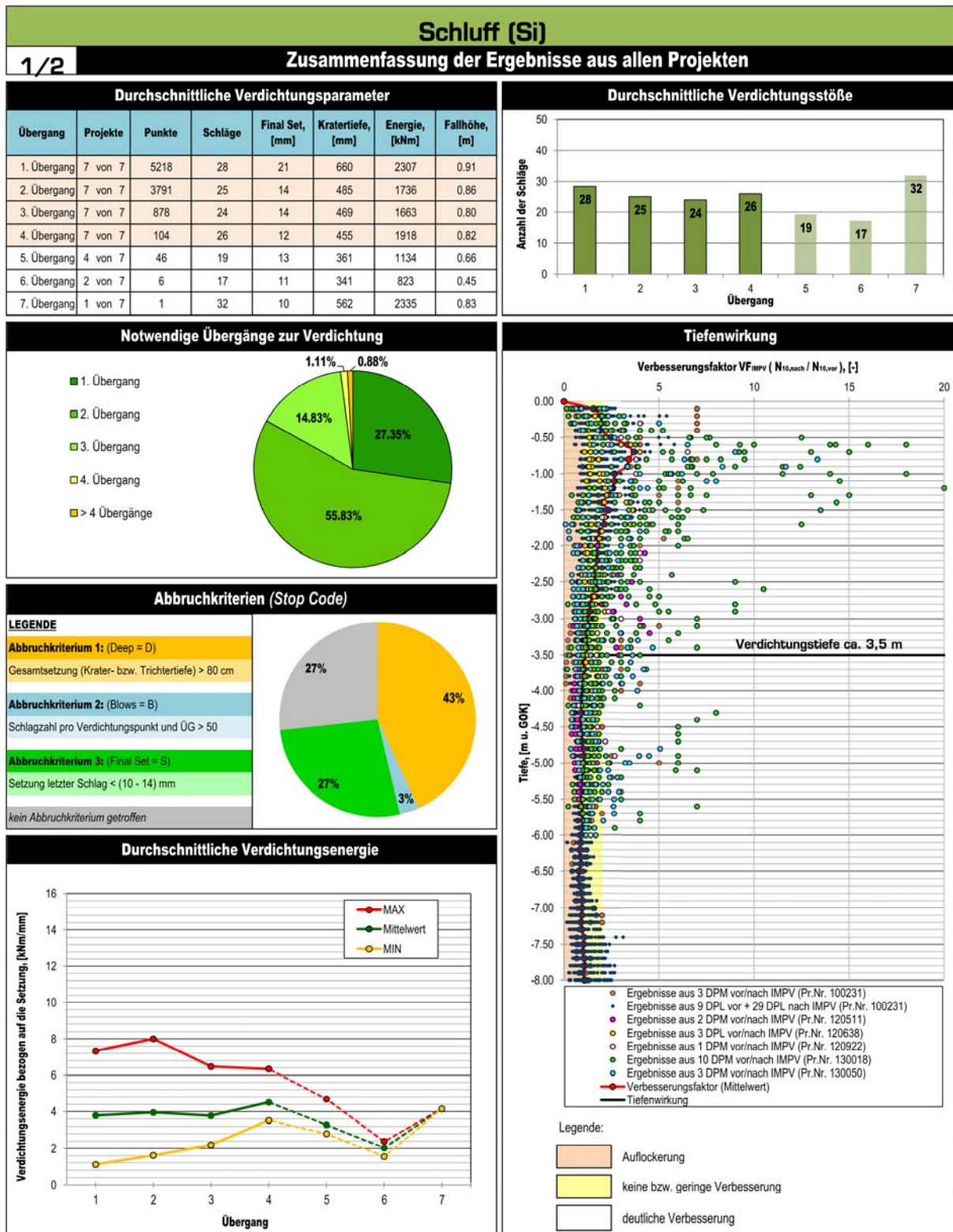


Abb. 110: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 120303

Anhang D. Untergrundkategorie 3: Schluff

D 1. Zusammenfassung der Ergebnisse aller Projekte



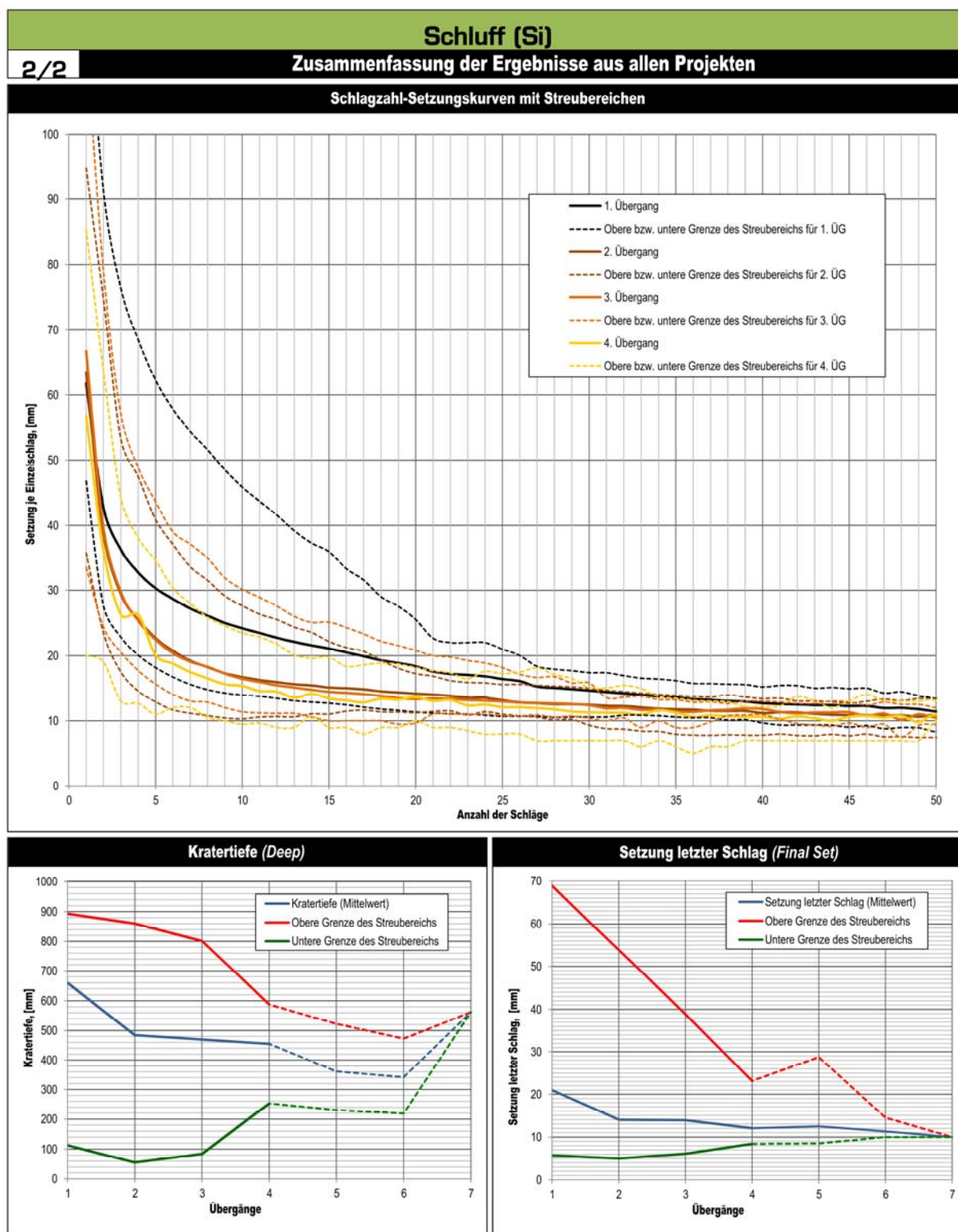


Abb. 112: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 3 – Schluff – Formblatt 2/2

D 2. Ausgewertete Verfahrensparameter je Einzelprojekt

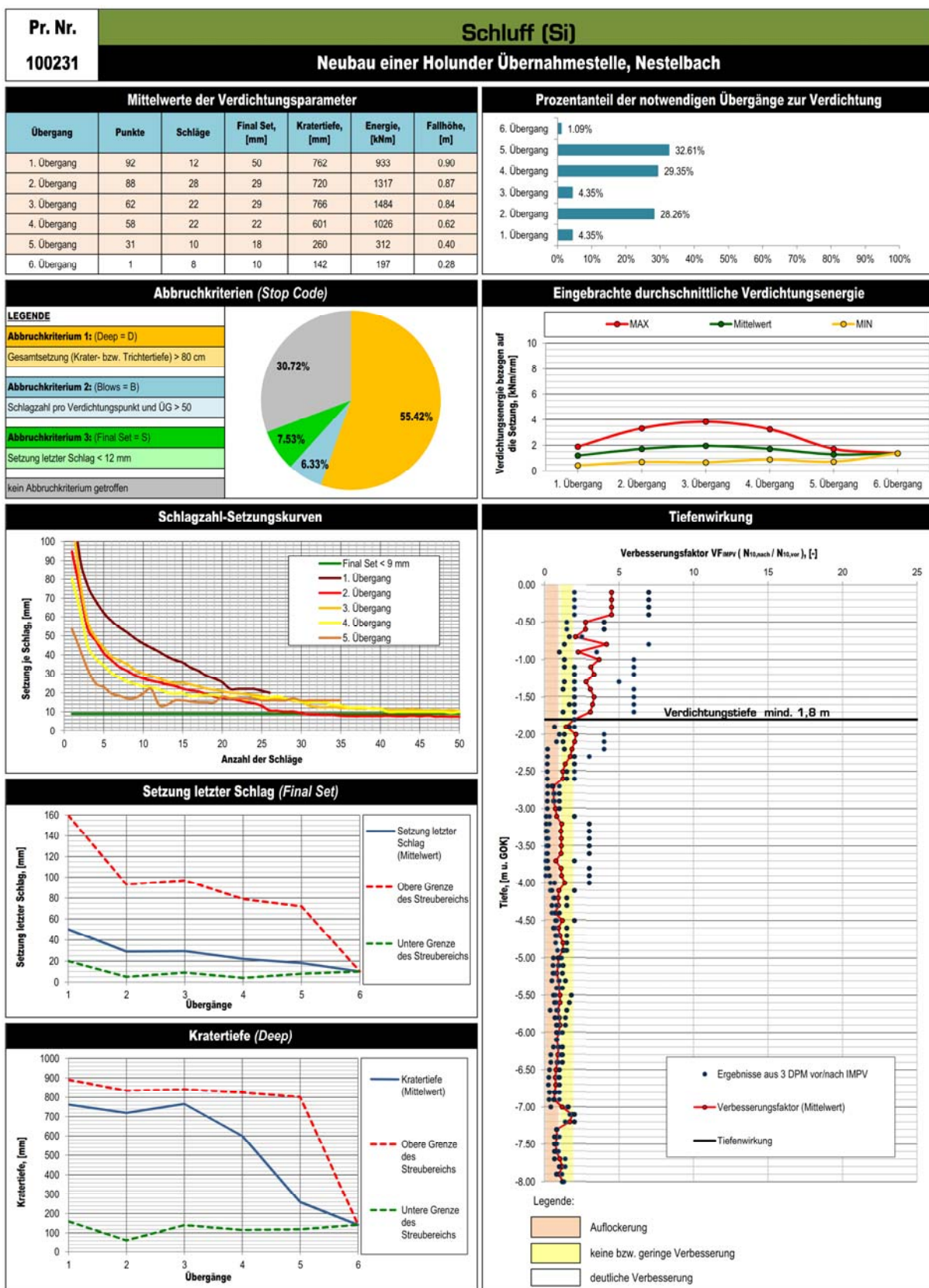


Abb. 113: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100231

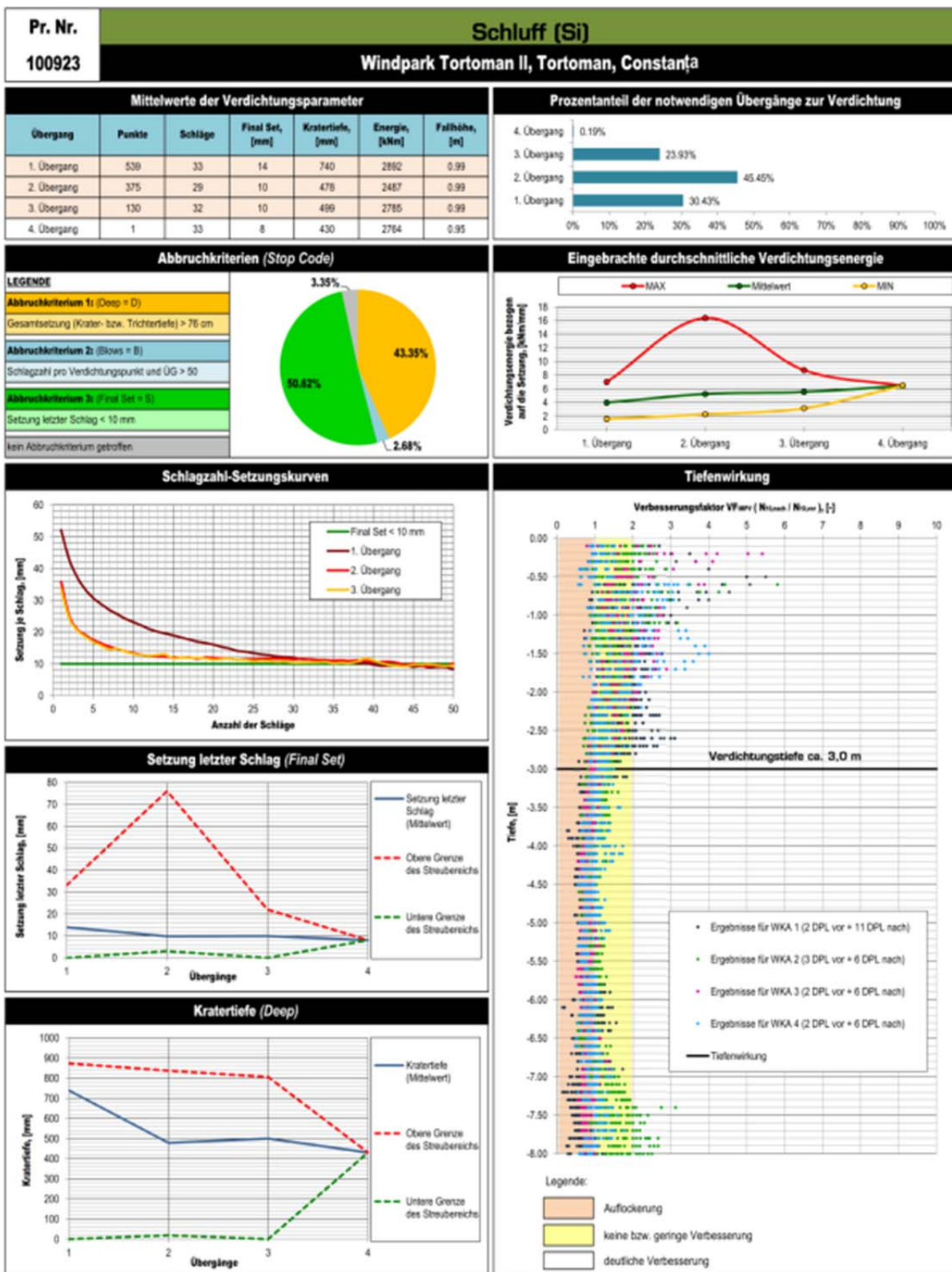


Abb. 114: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100923

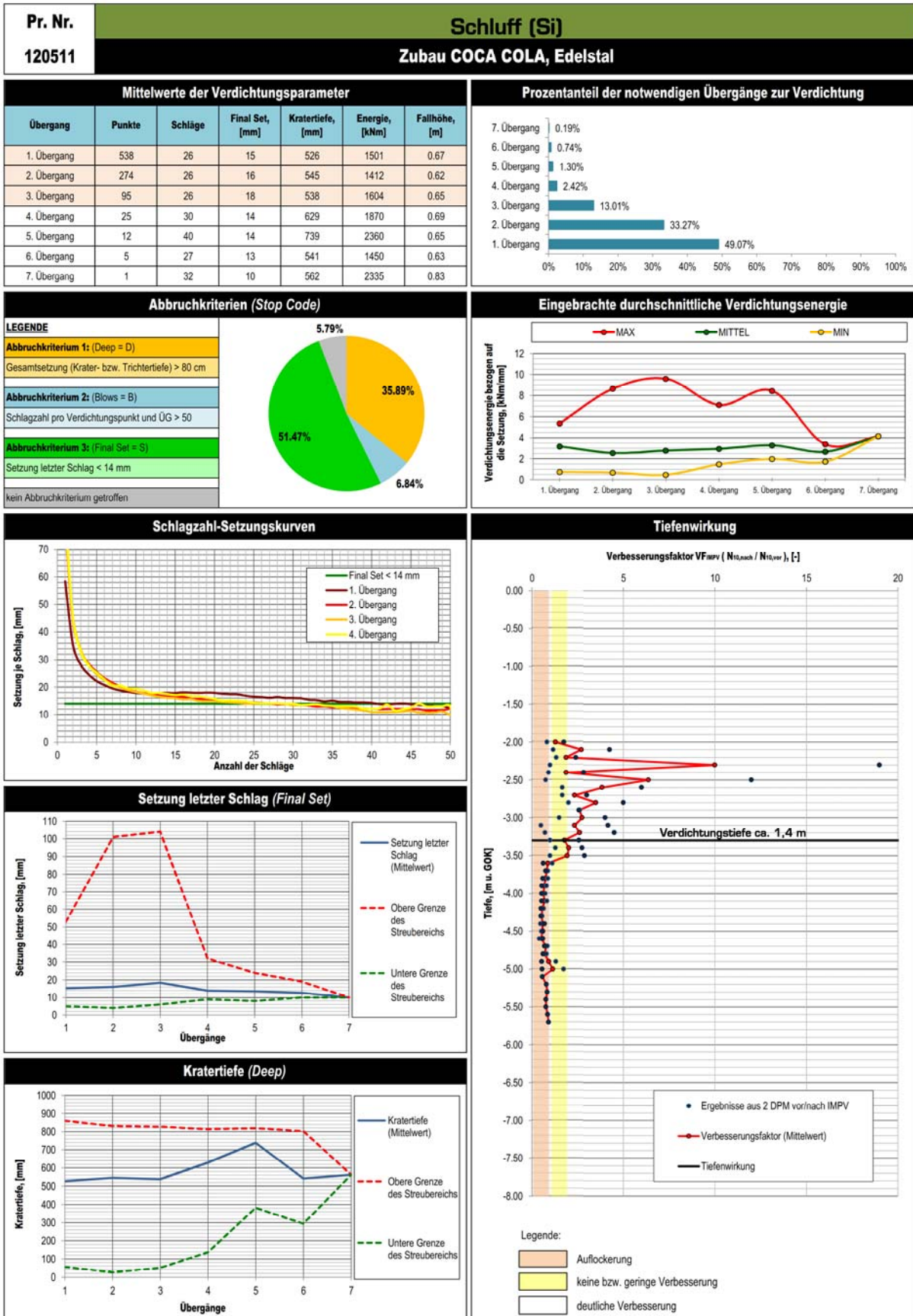


Abb. 115: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 120511

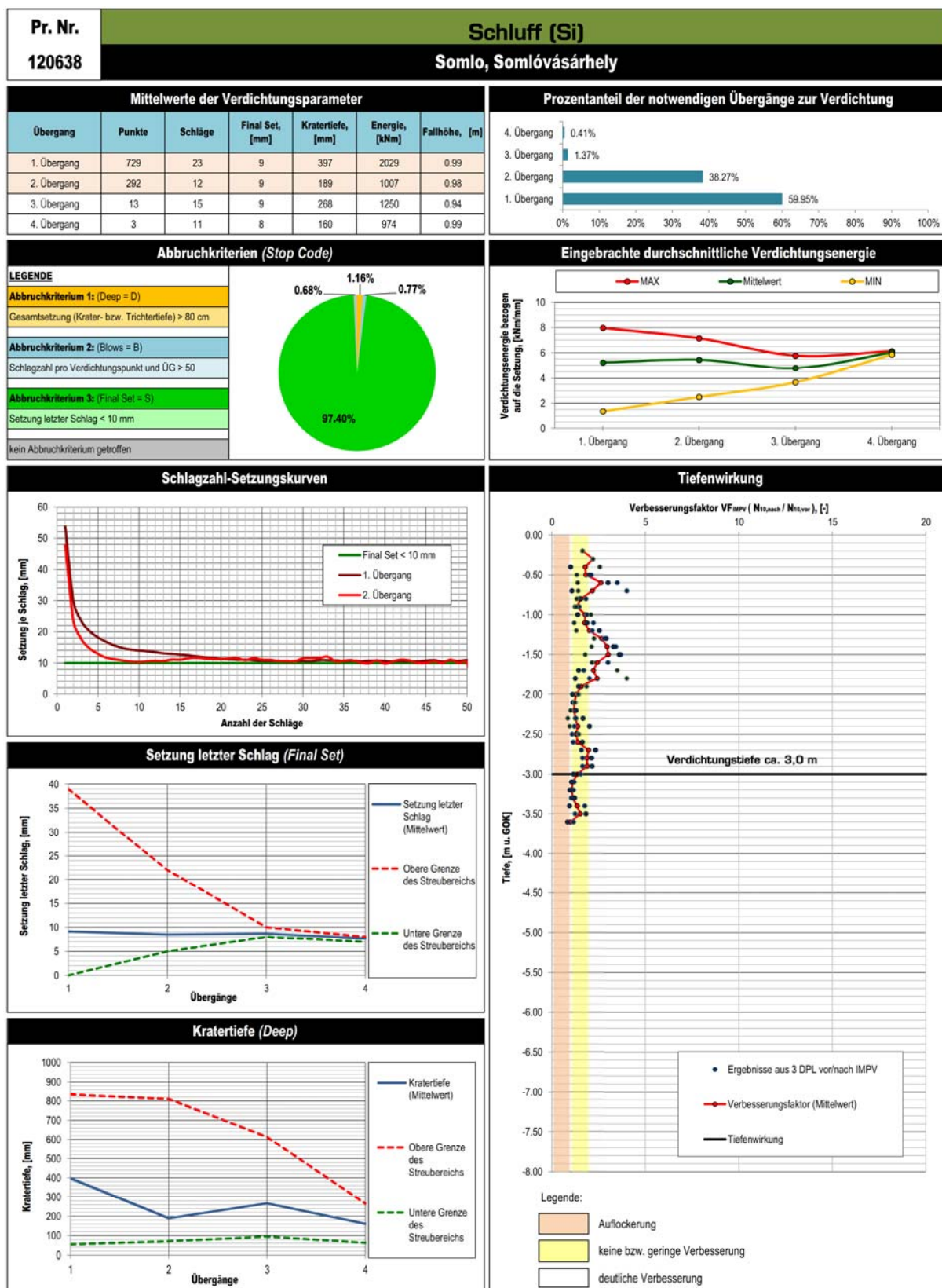


Abb. 116: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 120638

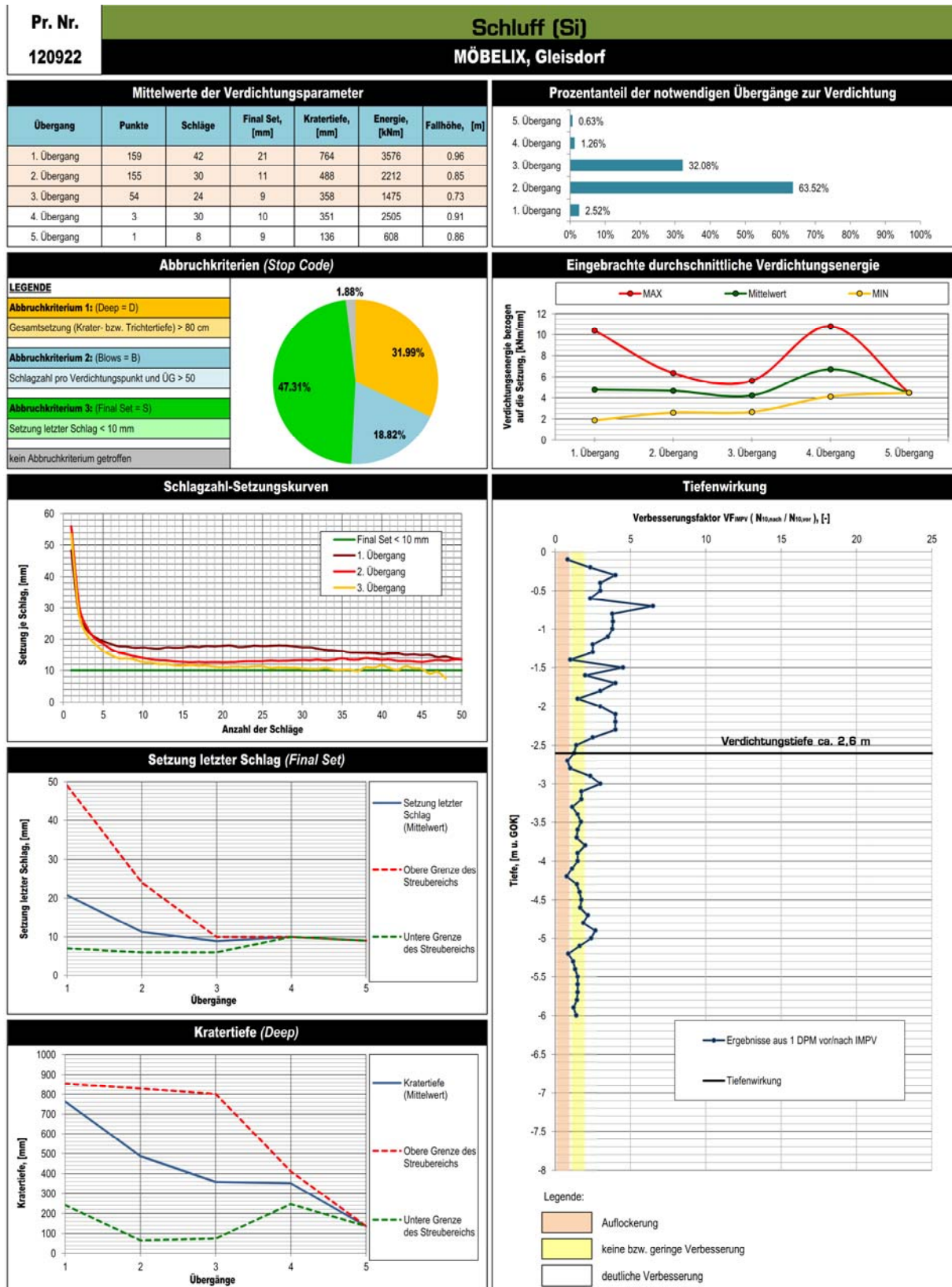


Abb. 117: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 120922

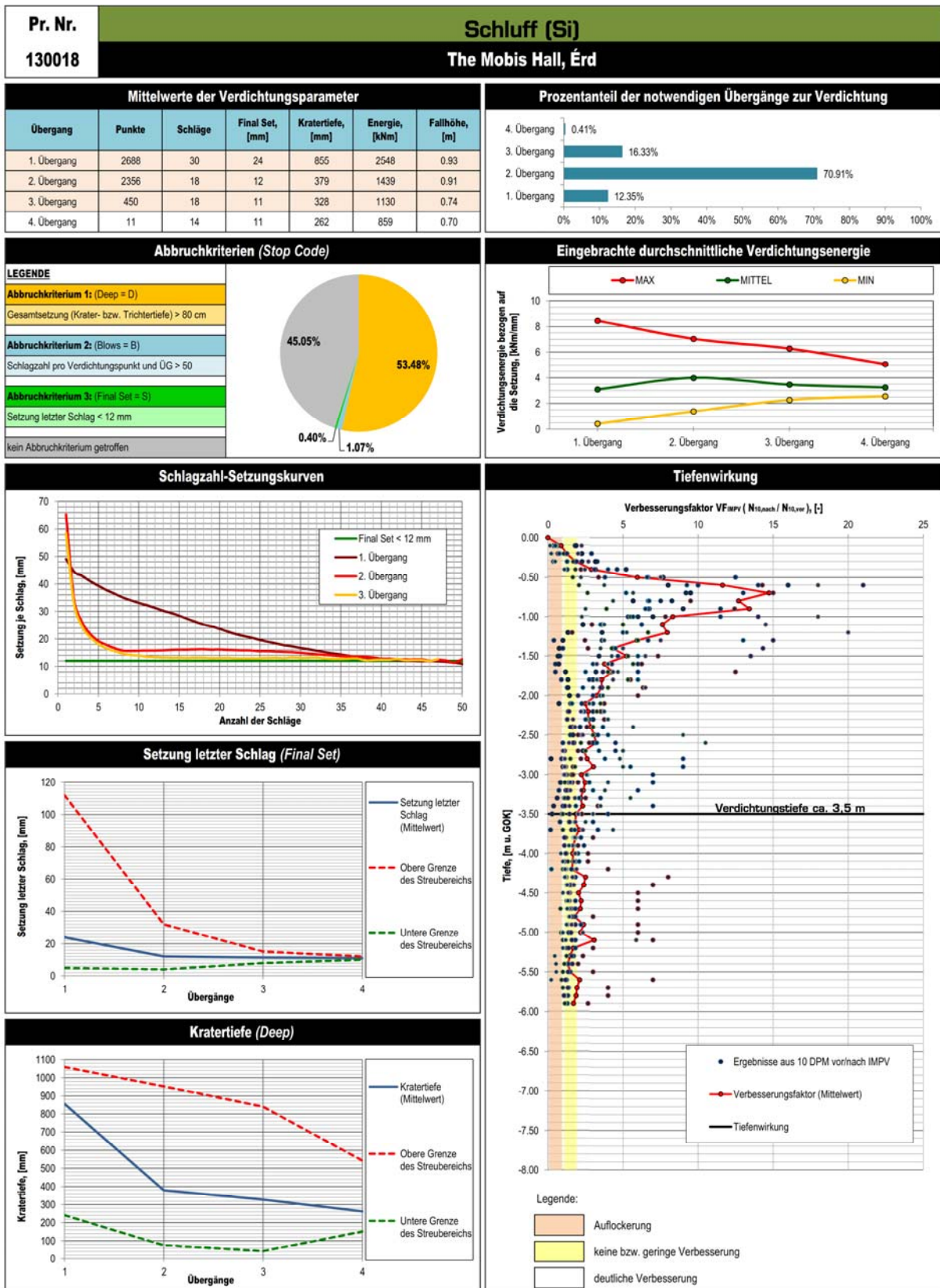


Abb. 118: Ausgewertete Verdichtungsdaten für Projekt Nr. 130018

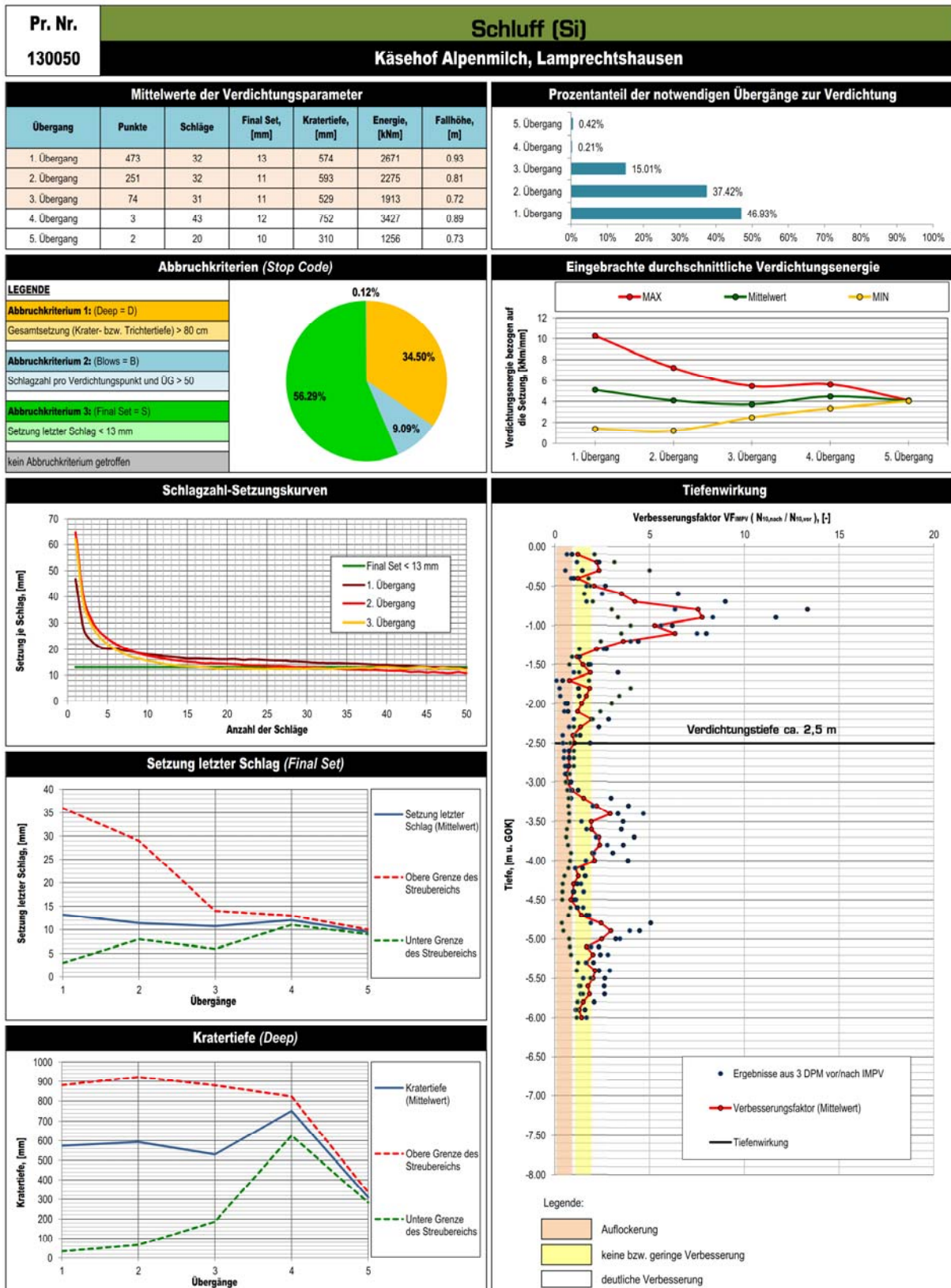


Abb. 119: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 130050

Anhang E. Untergrundkategorie 4: Künstliche Auffüllung

E 1. Zusammenfassung der Ergebnisse aller Projekte

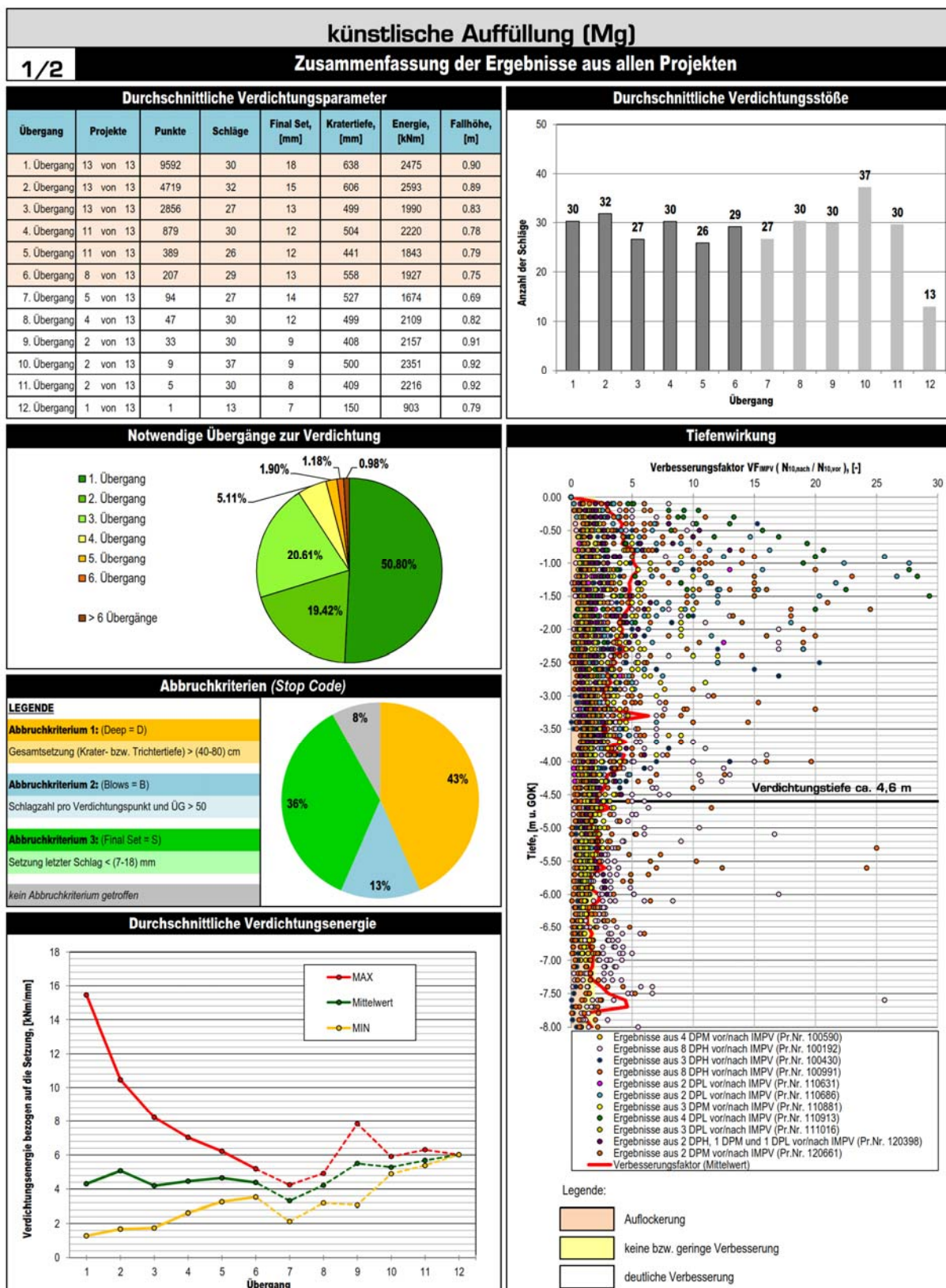


Abb. 120: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 4 – künstliche Auffüllung – Formblatt 1/2

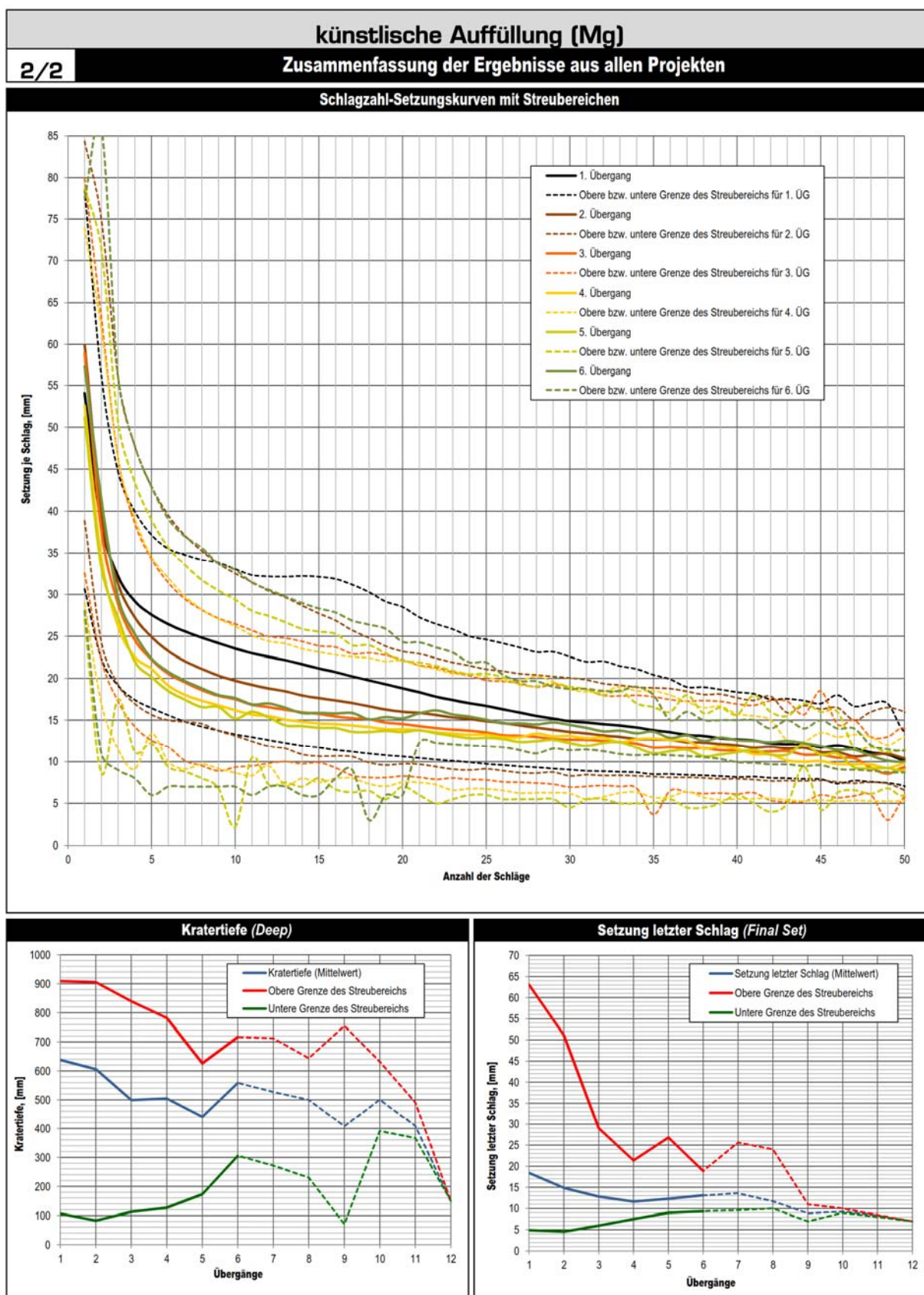
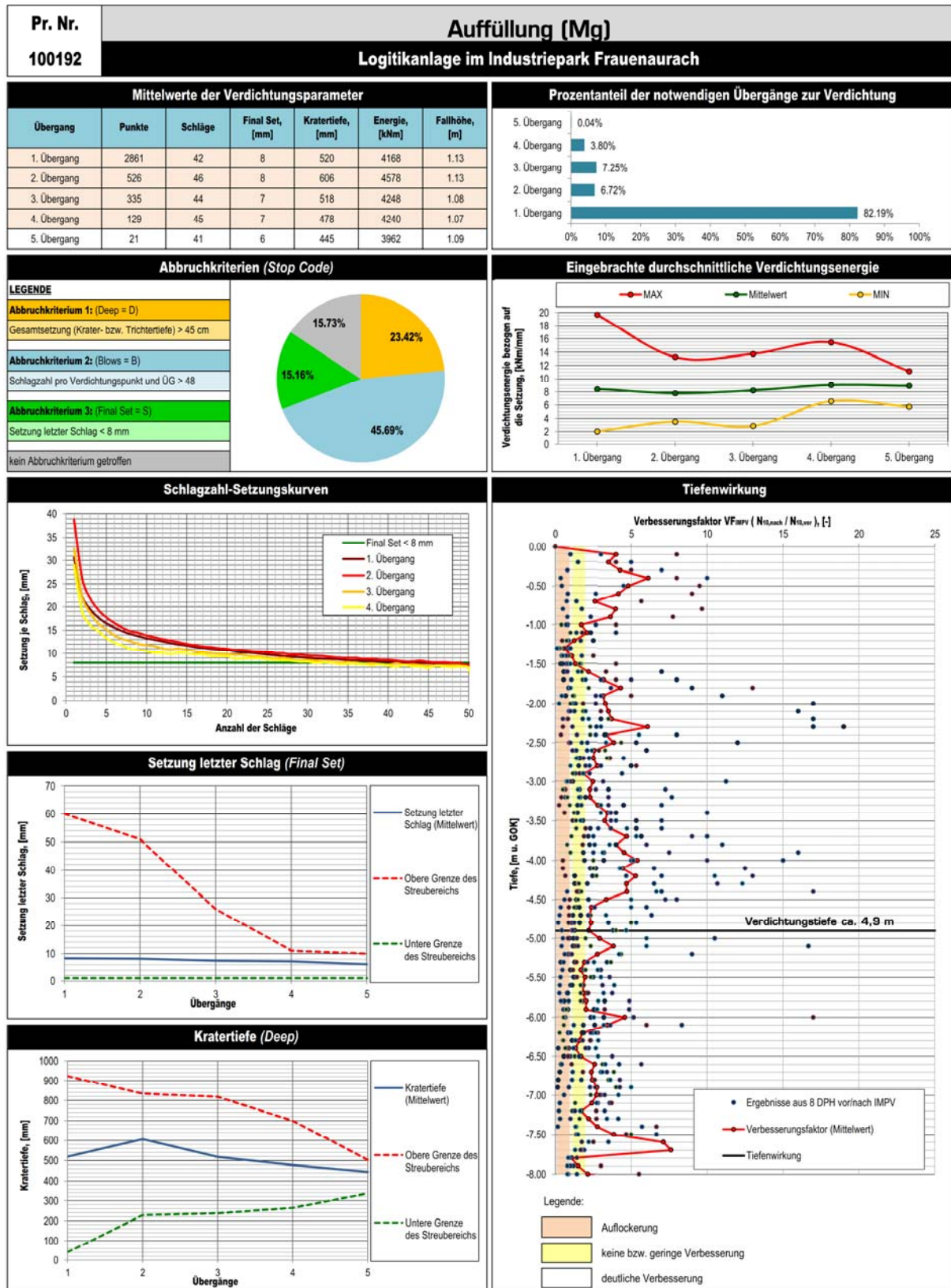


Abb. 121: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 4 – künstliche Auffüllung – Formblatt 2/2

E 2. Ausgewertete Verdichterdaten Verfahrensparameter je Einzelprojekt



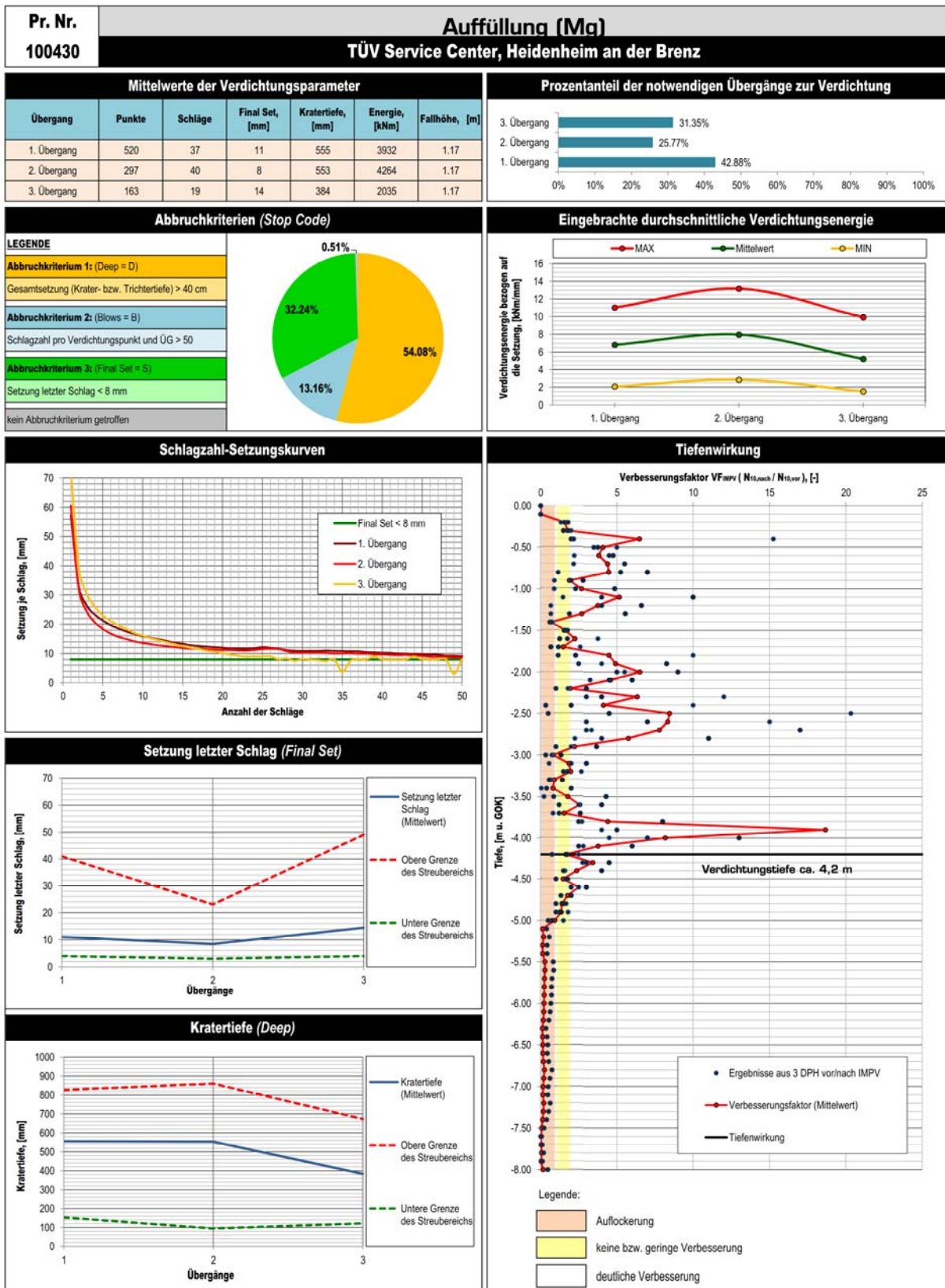


Abb. 123: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100430

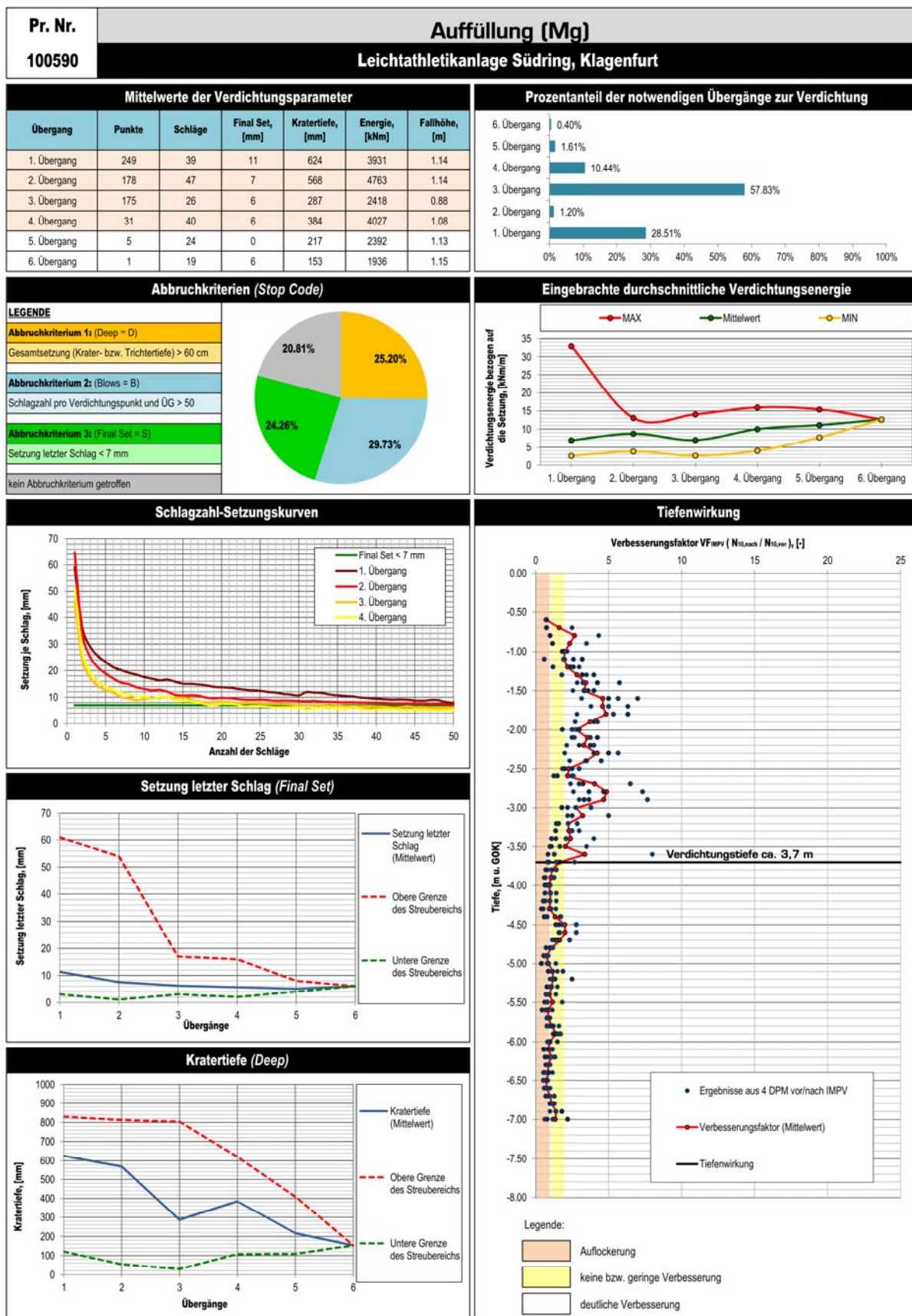


Abb. 124: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100590

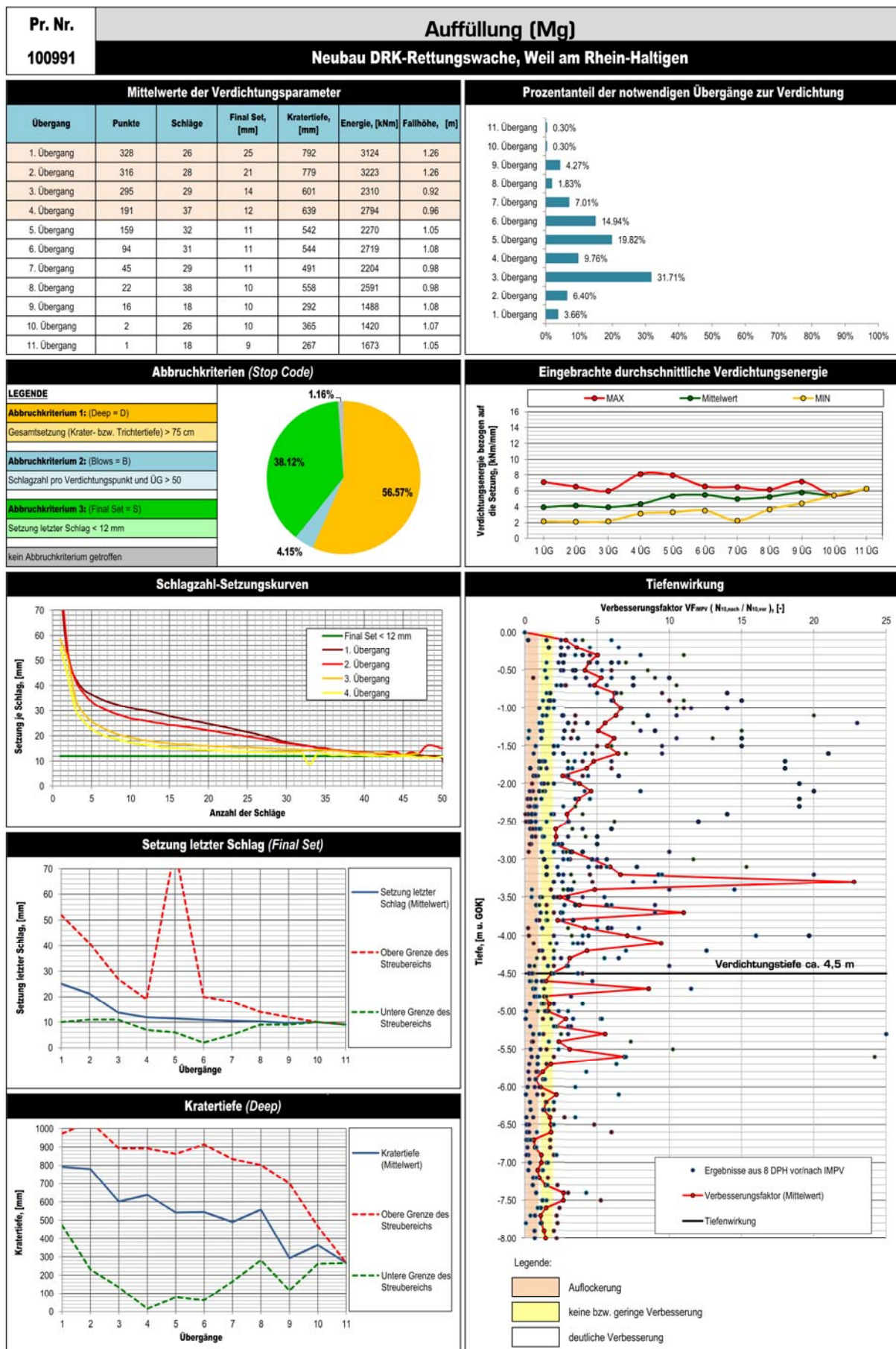


Abb. 125: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100991

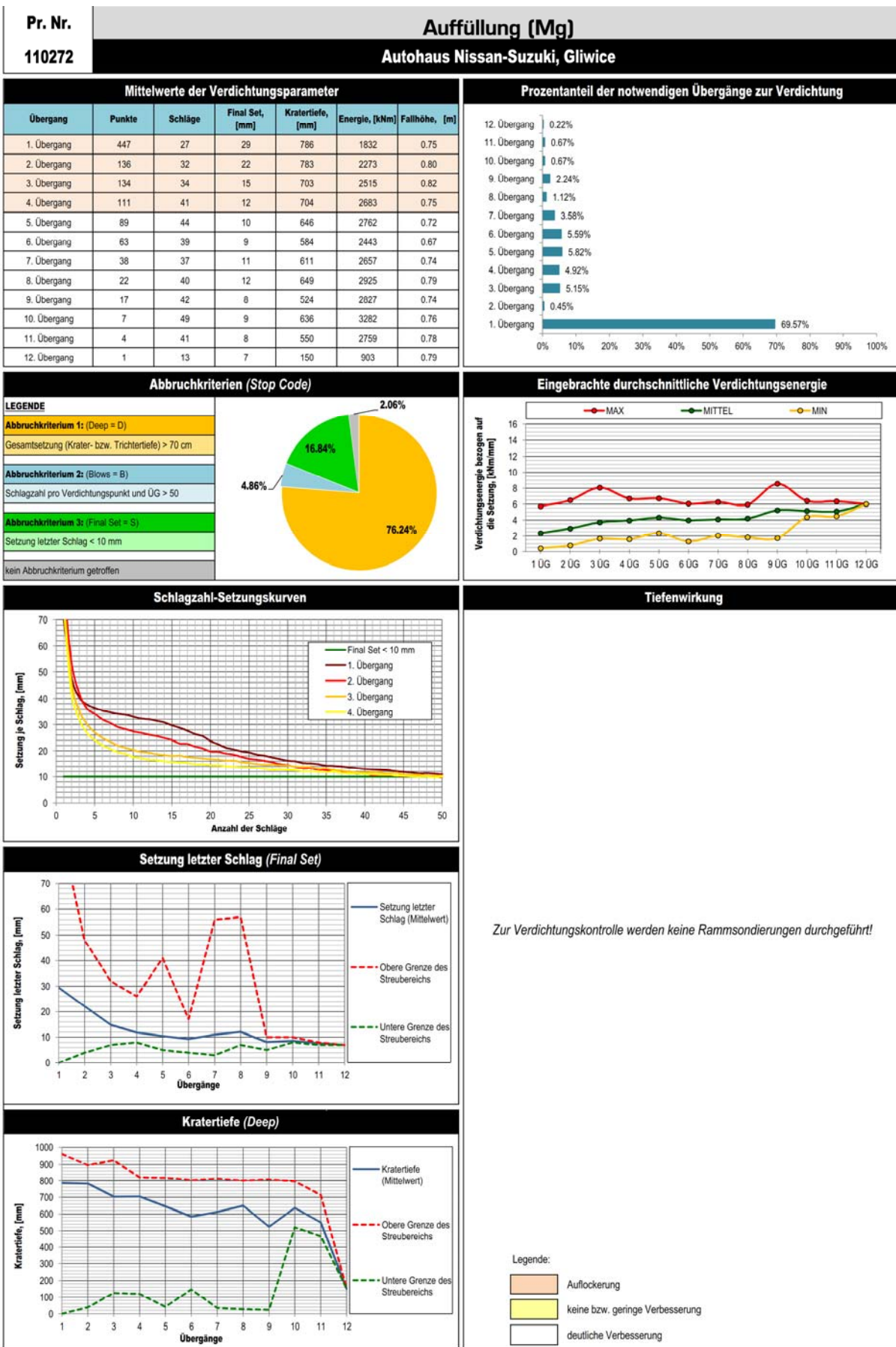


Abb. 126: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 110272

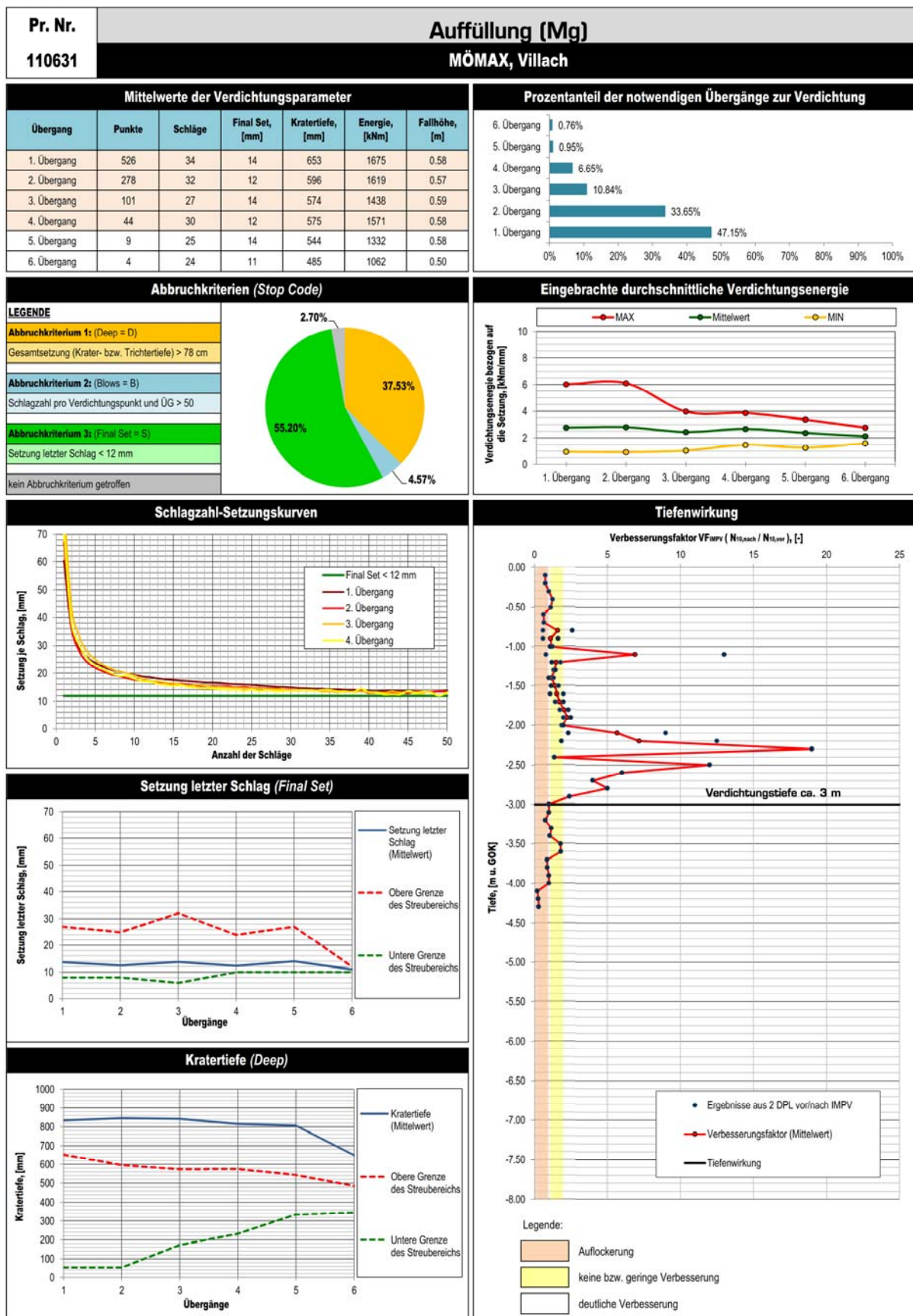


Abb. 127: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 110631

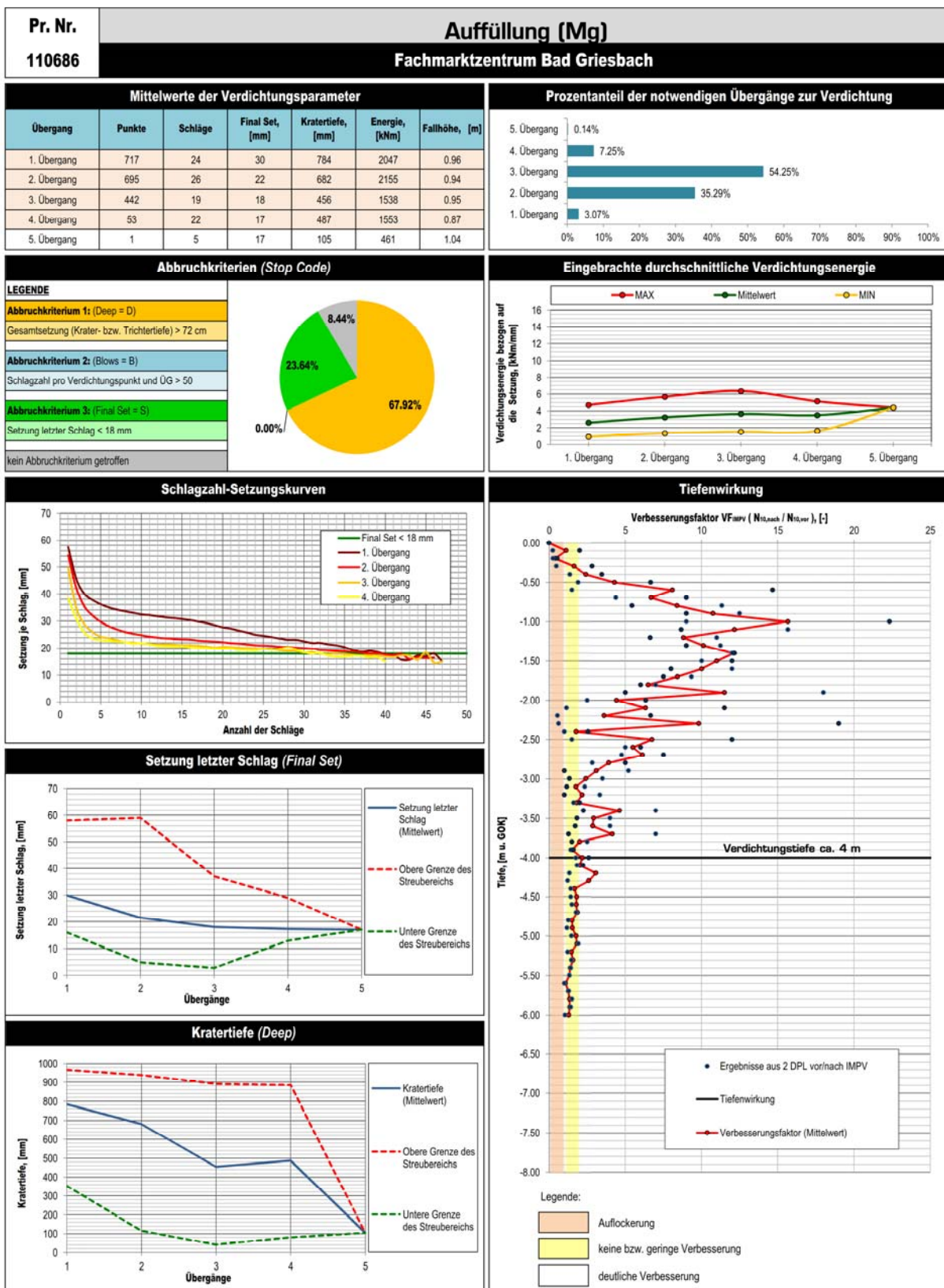


Abb. 128: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 110686

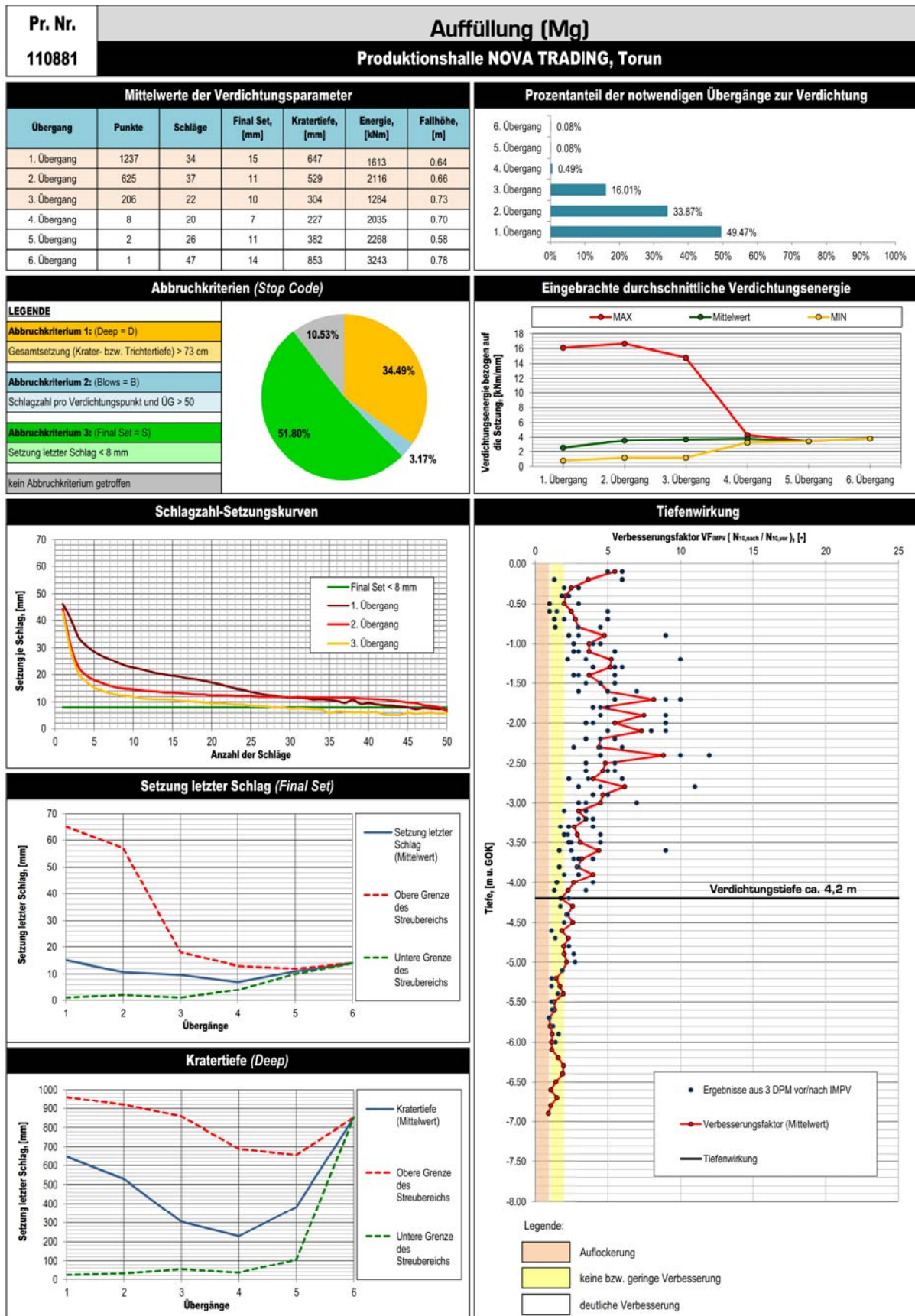


Abb. 129: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 110881

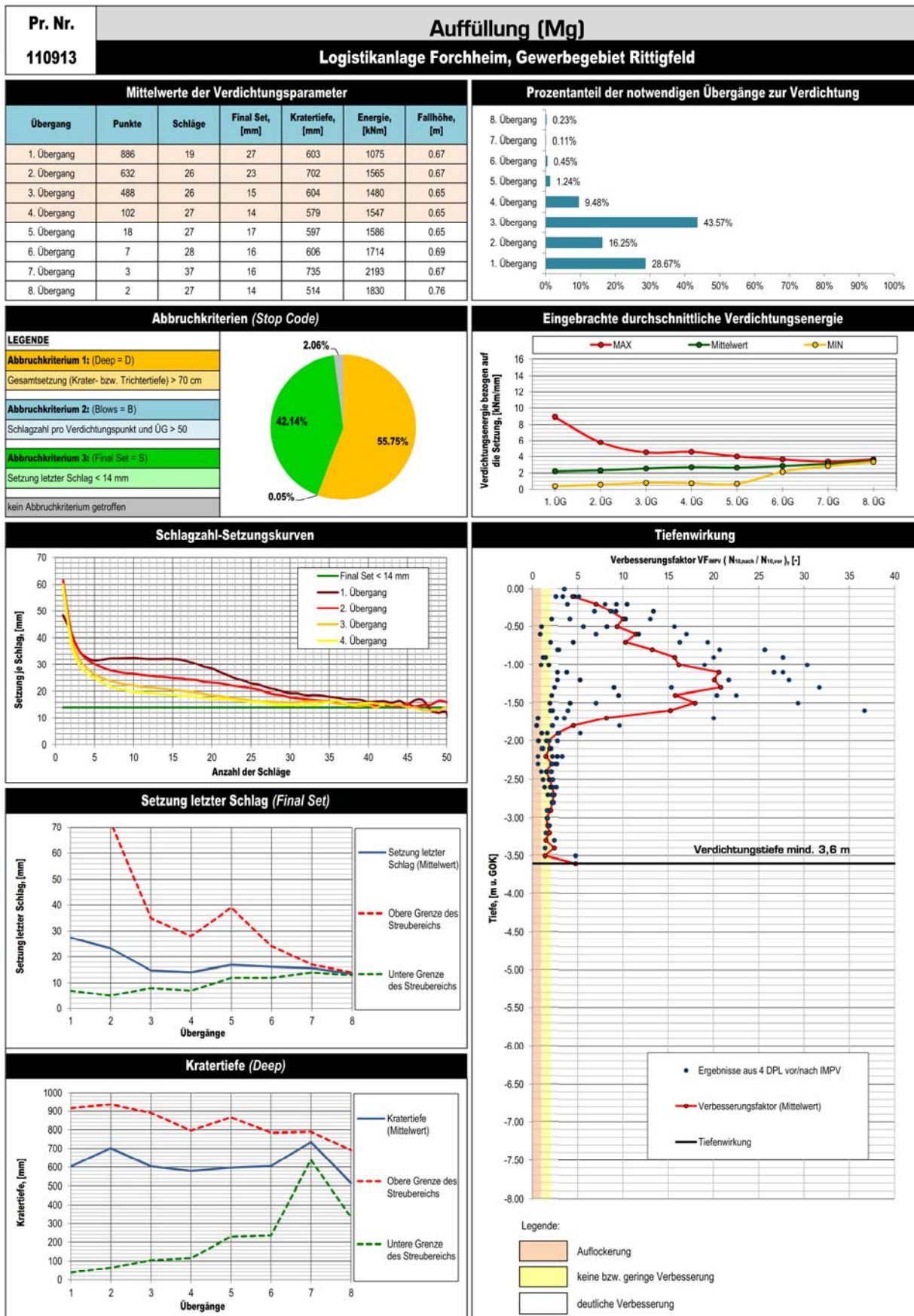


Abb. 130: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 110913

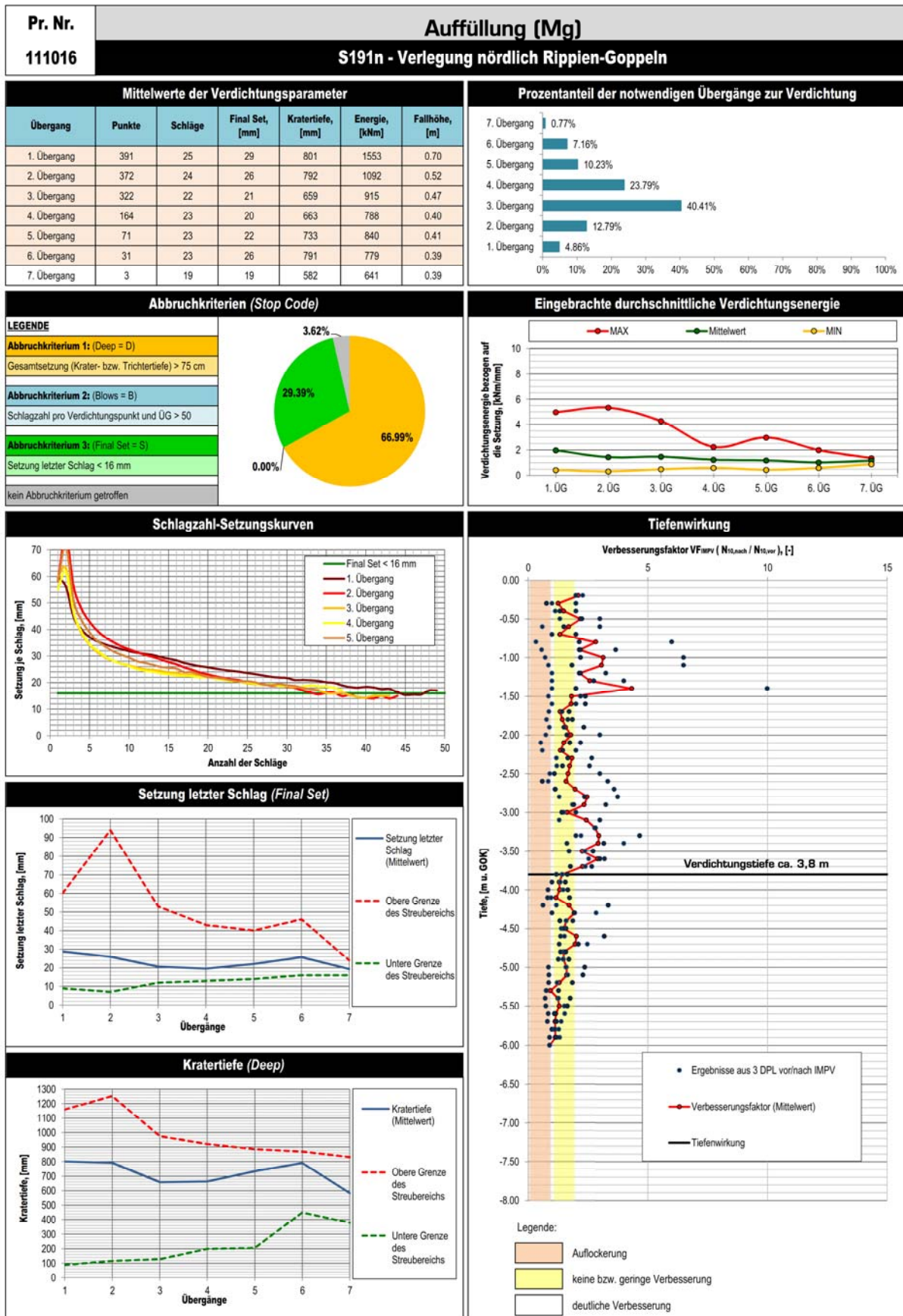


Abb. 131: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 111016

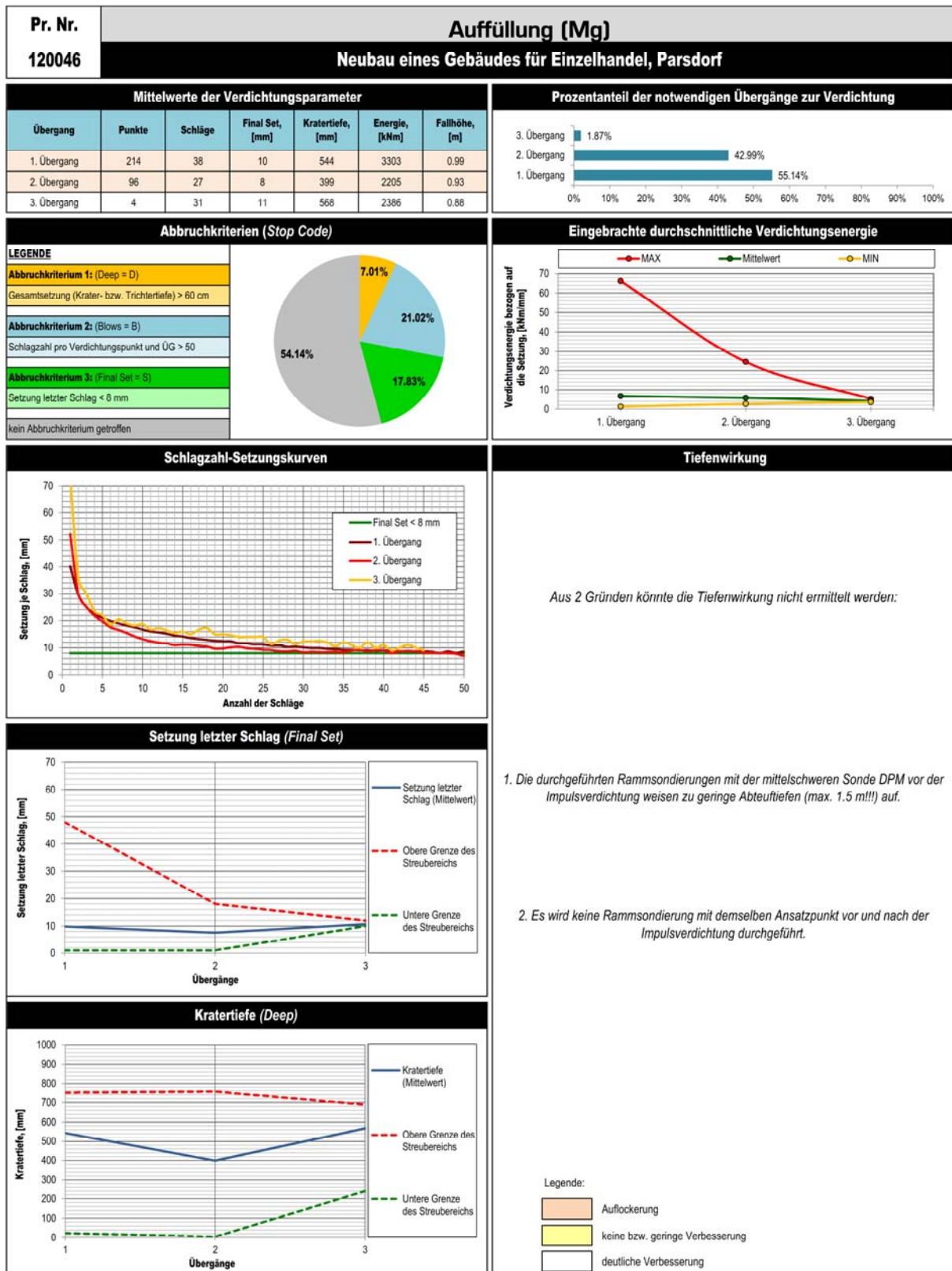


Abb. 132: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 120046

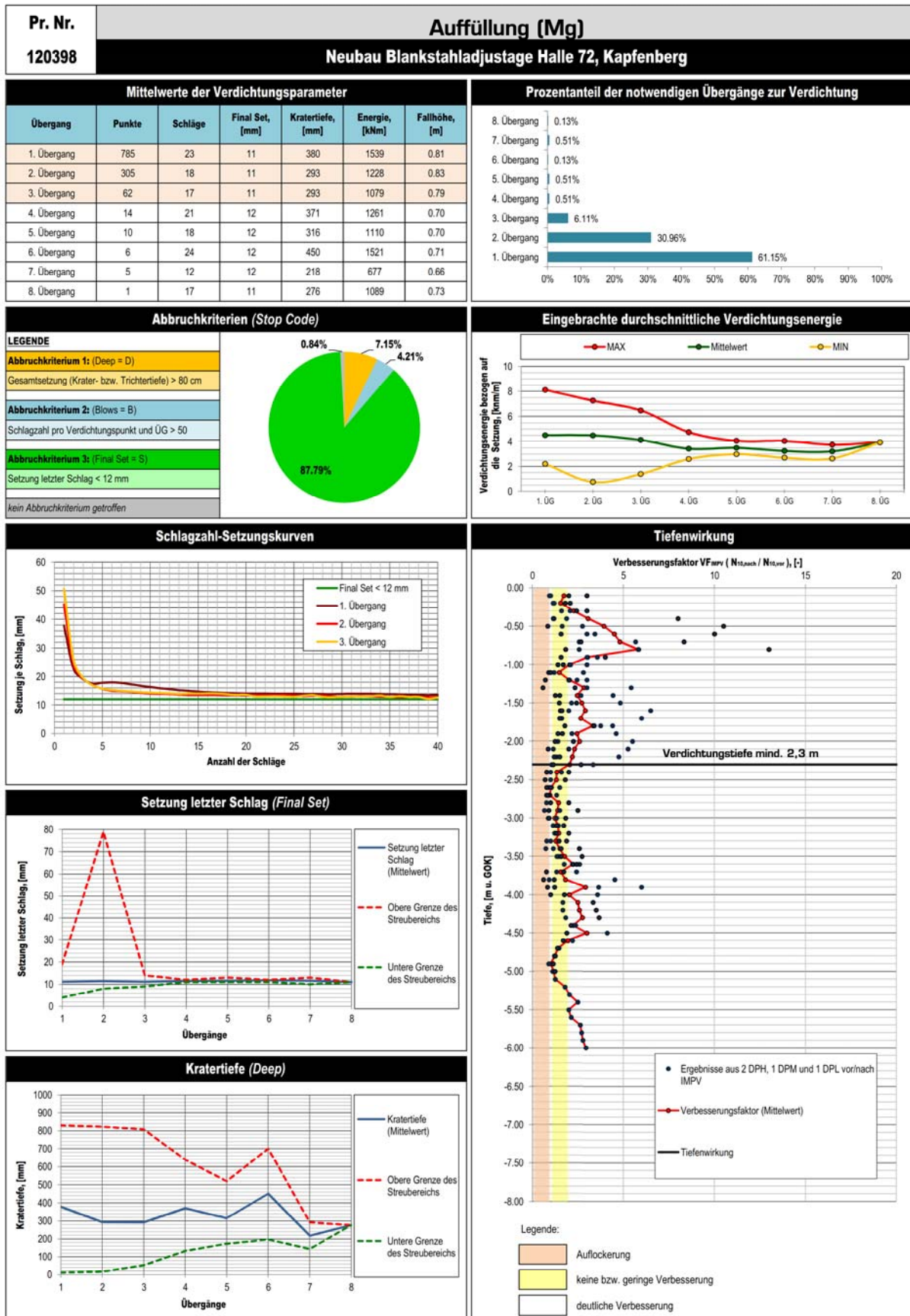


Abb. 133: Ausgewertete Verdichtungsdaten für Projekt Nr. 120398

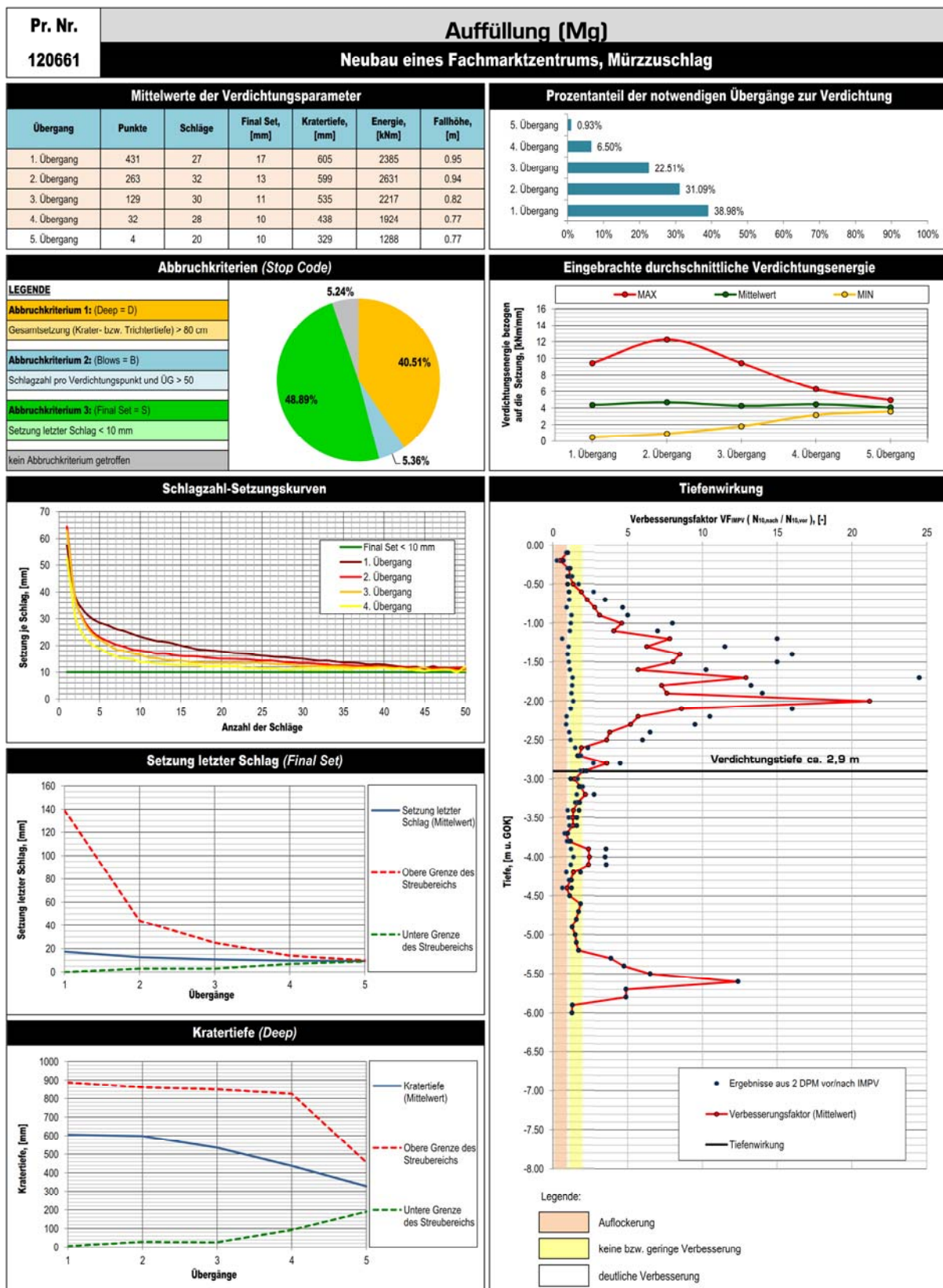


Abb. 134: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 120661

Anhang F. Formblatt zur Erfassung der Projektinformation (Beispiel)

Projektbezeichnung			
130050	Kategorie:	Schluff (Si)	
	Bauvorhaben:	Käsehof Alpenmilch, Lamprechtshausen	
	Land:	Österreich	
	Auftraggeber:	Käsehof Alpenmilch GmbH	
	Geotechnik:	Geotechnik Tauchmann GmbH	
LEISTUNGSUMFANG			
		Fläche, [m²]	SF, [lfm]
		1330	-
ZEITRAUM			
		Anfang	Ende
		18. Jun. 2013	21. Jun. 2013

Geotechnische Untersuchungen			
Untergründerkundung:			
Direkte geotechnische Aufschlussmethoden		Indirekte geotechnische Aufschlussmethoden	
Schürfe	Bohrungen	Rammsondierungen	Drucksondierungen
1/10 SCH	2/3 BK	6/16 DPH	-
Bodenphysikalische Laborversuche:			
Nr.	Bezeichnung	Anzahl	Bodenproben
1	Bestimmung des natürlichen Wassergehalts gem. ÖNORM B 4410	6	BS 3-1, SCH 4-1, SCH 9-1, SCH 6-1, SCH 7-1, SCH 1-1
2	Bestimmung der Kornverteilung gem. ÖNORM B 4412	3	SCH 4-1, SCH 6-1, Mischprobe (SCH 1-2, SCH 5-1, SCH 7-2, SCH 8-1, SCH 9-2, SCH 10-1, BS 1-1, BS 2-1, BS 3-2)
3	Bestimmung der Zustandsgrenzen gem. ÖNORM B 4411	2	SCH 4-1, SCH 9-1

Bodenverbesserungsarbeiten und Verdichtungskontrolle			
Bodenverbesserungsarbeiten:		Verdichtungskontrolle:	
Verfahren:	IMPV + Kalkstabilisierung	Rammsondierungen	
Bodenart:	grsaSi	<i>vor IMPV</i>	<i>nach IMPV</i>
Verdichtungsfuß:	1.5 m	3 DPM	5 DPL
Verdichtungs raster:	2.4 x 2.4 m + EF	<i>vor/nach IMPV</i>	3 DPL
Verdichtungspunkte:	473		
max. Übergänge:	5	Drucksondierungen	Lastplattenversuch
		-	-

Abb. 135: Formblatt 1 – Projektbezeichnung (am Beispiel von Projekt Nr. 130050)

BODENKLASSIFIZIERUNG					
	Bezeichnung	Schicht A	Schicht B	Schicht C	
		Verwitterungslehm	Ton	Terrassenschotter	
SCHICHT	Bodenart	toniger, sandigerm teils schwach kiesiger, vereinzelt schwach steiniger bis schwach blockiger Schluff	schwach schluffiger, sehr schwach bis schwach kiesiger, teils schwach bis stark sandiger Ton	schwach tonige, schluffige, sandige, vereinzelt steinige bis blockige Kiese bis schwach tonige, kiesige, sandige, vereinzelt steinige bis blockige Schluffe	Schluffige, schwach sandige, schwach steinige bis vereinzelt schwach blockige Kiese
		cl sa gr [*] Si,L - Si,M	sa gr Cl,M	cl [*] si sa co-bo Gr,W ; cl [*] gr sa co-bo Si,L	si, sa [*] co'-bo' Gr,W
	Bodenklasse (ÖNORM B 2205)	4 - 5	4 - 5	3 - 5	3 - 5
	Konsistenz / Lagerungsdichte	weich	weich bis sehr weich	locker bzw. weich	locker bis miteldicht
BODENKENNWERTE (erfahrungsgemäß)	Wichte, erdfeucht (über Wasser) cal γ [kN/m ³]	18.5	18	18.5	19
	Wichte, wassergesättigt cal γ_s [kN/m ³]	19.5	19	20	20.5
	Wichte unter Auftrieb (unter Wasser) cal γ' [kN/m ³]	9.5	9	10	10.5
	Reibungswinkel cal ϕ [°]	22.5 - 27.5	15.0 - 25.0	25.0 - 27.5	30.0 - 32.5
	Kohäsion, drainiert c _k [kN/m ²]	5 - 15	2 - 10	2 - 5	0 - 2*
	Kohäsion, undrainiert c _{uk} [kN/m ²]	10 - 25	5 - 15	5 - 10	0
	Steifemodul E _s [MN/m ²]	2 - 5	2 - 5	7.5 - 15.0	25 - 75
Anmerkung: * Kapillarkohäsion					

Abb. 136: Formblatt 2 – Bodenklassifizierung (am Beispiel von Projekt Nr. 130050)

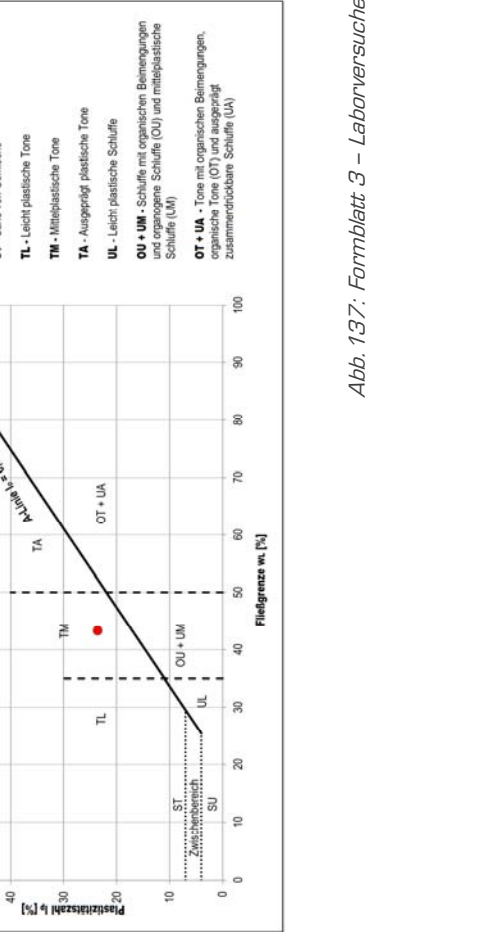
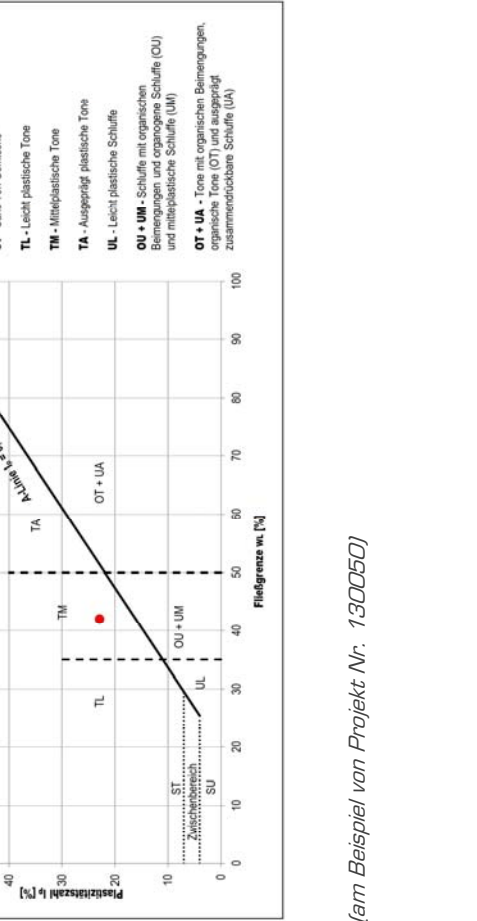
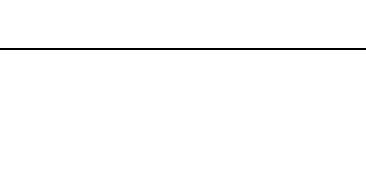
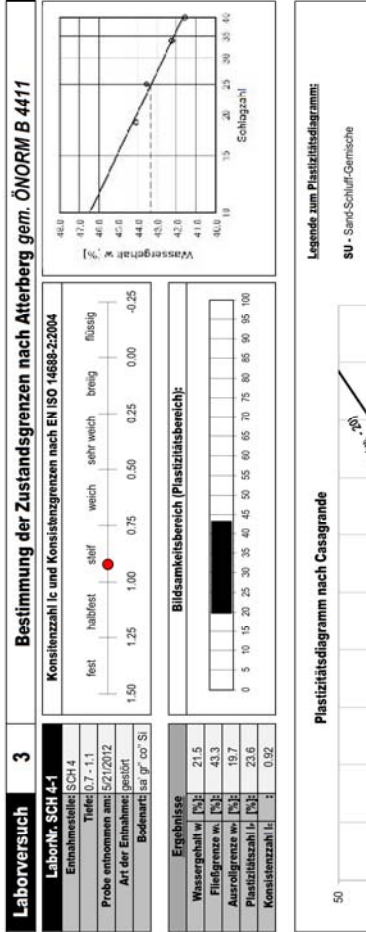
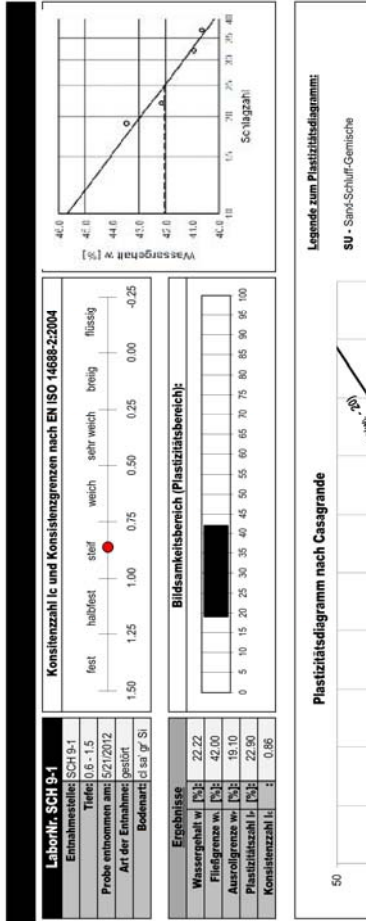
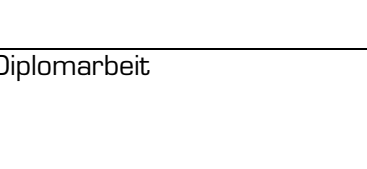
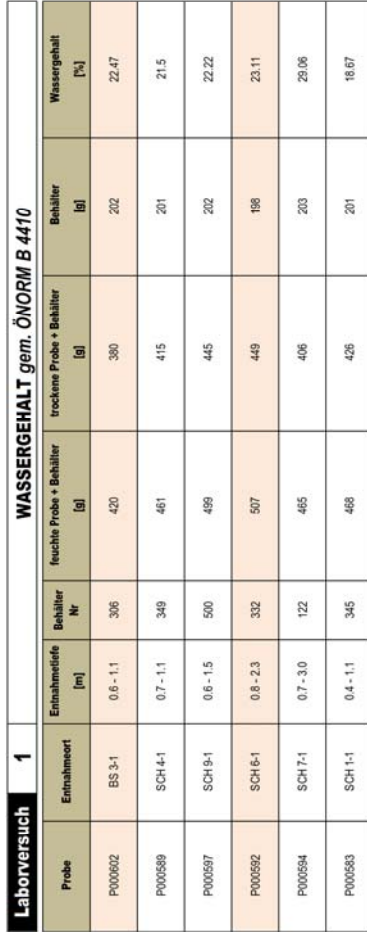
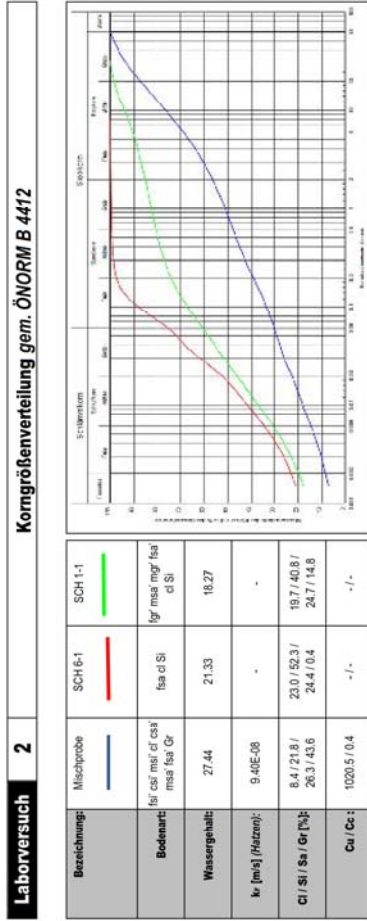


Abb. 137: Formblatt 3 – Laborversuche (am Beispiel von Projekt Nr. 1300650)

SCH 6								BS 2								BS 3								
Art: Baggerschurf		Entnahmetiefe: 3,70 m		Stationierung: 320002942, 320002948, 320002949, 320002950		Datum: 18. Jun. 2012		Art: Rammkernsondierung (Kernbohrung n. DIN 4021)		Entnahmetiefe: 6,50 m		Stationierung: 320002962, 320002965, 320002968, 320002969, 320002970		Datum: 18. Jun. 2012		Art: Rammkernsondierung (Kernbohrung n. DIN 4021)		Entnahmetiefe: 3,70 m		Stationierung: 320003038, 320003041, 320003054, 320003058, 320003061, 320003067		Datum: 18. Jun. 2012		
Bodenproben	GWS	Tiefe	Profil	Zustand	Stärke	Kurzzeichen EN ISO 14889-2	Bezeichnung	Bodenproben	GWS	Tiefe	Profil	Zustand	Stärke	Kurzzeichen EN ISO 14889-2	Bezeichnung	Bodenproben	GWS	Tiefe	Profil	Zustand	Stärke	Kurzzeichen EN ISO 14889-2	Bezeichnung	
0.00		0.00	Mu				Mutterboden, dunkelbraun	0.00		0.00	Mu				Mutterboden, dunkelbraun	0.00		0.00	Mu				Mutterboden, dunkelbraun	
0.10		0.10	Mu					0.10		0.10	Mu							0.10		0.10	Mu			
0.20		0.20	Mu					0.20		0.20	Mu							0.20		0.20	Mu			
0.30		0.30	Mu					0.30		0.30	Mu							0.30		0.30	Mu			
0.40		0.40	Mu					0.40		0.40	Mu							0.40		0.40	Mu			
0.50		0.50	Mu					0.50		0.50	Mu							0.50		0.50	Mu			
0.60		0.60	Mu					0.60		0.60	Mu							0.60		0.60	Mu			
0.70		0.70	Mu					0.70		0.70	Mu							0.70		0.70	Mu			
0.80		0.80	Mu					0.80		0.80	Mu							0.80		0.80	Mu			
0.90		0.90	Mu					0.90		0.90	Mu							0.90		0.90	Mu			
1.00		1.00	Mu					1.00		1.00	Mu							1.00		1.00	Mu			
1.10		1.10	Mu					1.10		1.10	Mu							1.10		1.10	Mu			
1.20		1.20	Mu					1.20		1.20	Mu							1.20		1.20	Mu			
1.30		1.30	Mu					1.30		1.30	Mu							1.30		1.30	Mu			
1.40		1.40	Mu					1.40		1.40	Mu							1.40		1.40	Mu			
1.50		1.50	Mu					1.50		1.50	Mu							1.50		1.50	Mu			
1.60		1.60	Mu					1.60		1.60	Mu							1.60		1.60	Mu			
1.70		1.70	Mu					1.70		1.70	Mu							1.70		1.70	Mu			
1.80		1.80	Mu					1.80		1.80	Mu							1.80		1.80	Mu			
1.90		1.90	Mu					1.90		1.90	Mu							1.90		1.90	Mu			
2.00		2.00	Mu					2.00		2.00	Mu							2.00		2.00	Mu			
2.10		2.10	Mu					2.10		2.10	Mu							2.10		2.10	Mu			
2.20		2.20	Mu					2.20		2.20	Mu							2.20		2.20	Mu			
2.30		2.30	Mu					2.30		2.30	Mu							2.30		2.30	Mu			
2.40		2.40	Mu					2.40		2.40	Mu							2.40		2.40	Mu			
2.50		2.50	Mu					2.50		2.50	Mu							2.50		2.50	Mu			
2.60		2.60	Mu					2.60		2.60	Mu							2.60		2.60	Mu			
2.70		2.70	Mu					2.70		2.70	Mu							2.70		2.70	Mu			
2.80		2.80	Mu					2.80		2.80	Mu							2.80		2.80	Mu			
2.90		2.90	Mu					2.90		2.90	Mu							2.90		2.90	Mu			
3.00		3.00	Mu					3.00		3.00	Mu							3.00		3.00	Mu			
3.10		3.10	Mu					3.10		3.10	Mu							3.10		3.10	Mu			
3.20		3.20	Mu					3.20		3.20	Mu							3.20		3.20	Mu			
3.30		3.30	Mu					3.30		3.30	Mu							3.30		3.30	Mu			
3.40		3.40	Mu					3.40		3.40	Mu							3.40		3.40	Mu			
3.50		3.50	Mu					3.50		3.50	Mu							3.50		3.50	Mu			
3.60		3.60	Mu					3.60		3.60	Mu							3.60		3.60	Mu			
3.70		3.70	Mu					3.70		3.70	Mu							3.70		3.70	Mu			
3.80		3.80	Mu					3.80		3.80	Mu							3.80		3.80	Mu			
3.90		3.90	Mu					3.90		3.90	Mu							3.90		3.90	Mu			
4.00		4.00	Mu					4.00		4.00	Mu							4.00		4.00	Mu			
4.10		4.10	Mu					4.10		4.10	Mu							4.10		4.10	Mu			
4.20		4.20	Mu					4.20		4.20	Mu							4.20		4.20	Mu			
4.30		4.30	Mu					4.30		4.30	Mu							4.30		4.30	Mu			
4.40		4.40	Mu					4.40		4.40	Mu							4.40		4.40	Mu			
4.50		4.50	Mu					4.50		4.50	Mu							4.50		4.50	Mu			
4.60		4.60	Mu					4.60		4.60	Mu							4.60		4.60	Mu			
4.70		4.70	Mu					4.70		4.70	Mu							4.70		4.70	Mu			
4.80		4.80	Mu					4.80		4.80	Mu							4.80		4.80	Mu			
4.90		4.90	Mu					4.90		4.90	Mu							4.90		4.90	Mu			
5.00		5.00	Mu					5.00		5.00	Mu							5.00		5.00	Mu			
5.10		5.10	Mu					5.10		5.10	Mu							5.10		5.10	Mu			
5.20		5.20	Mu					5.20		5.20	Mu							5.20		5.20	Mu			
5.30		5.30	Mu					5.30		5.30	Mu							5.30		5.30	Mu			
5.40		5.40	Mu					5.40		5.40	Mu							5.40		5.40	Mu			
5.50		5.50	Mu					5.50		5.50	Mu							5.50		5.50	Mu			
5.60		5.60	Mu					5.60		5.60	Mu							5.60		5.60	Mu			
5.70		5.70	Mu					5.70		5.70	Mu							5.70		5.70	Mu			
5.80		5.80	Mu					5.80		5.80	Mu							5.80		5.80	Mu			
5.90		5.90	Mu					5.90		5.90	Mu							5.90		5.90	Mu			
6.00		6.00	Mu					6.00		6.00	Mu							6.00		6.00	Mu			
6.10		6.10	Mu					6.10		6.10	Mu							6.10		6.10	Mu			
6.20		6.20	Mu					6.20		6.20	Mu							6.20		6.20	Mu			
6.30		6.30	Mu					6.30		6.30	Mu							6.30		6.30	Mu			
6.40		6.40	Mu					6.40		6.40	Mu							6.40		6.40	Mu			
6.50		6.50	Mu					6.50		6.50	Mu							6.50		6.50	Mu			

Abb. 138: Formblatt 4 – Bodenprofile (am Beispiel von Projekt Nr. 130050)

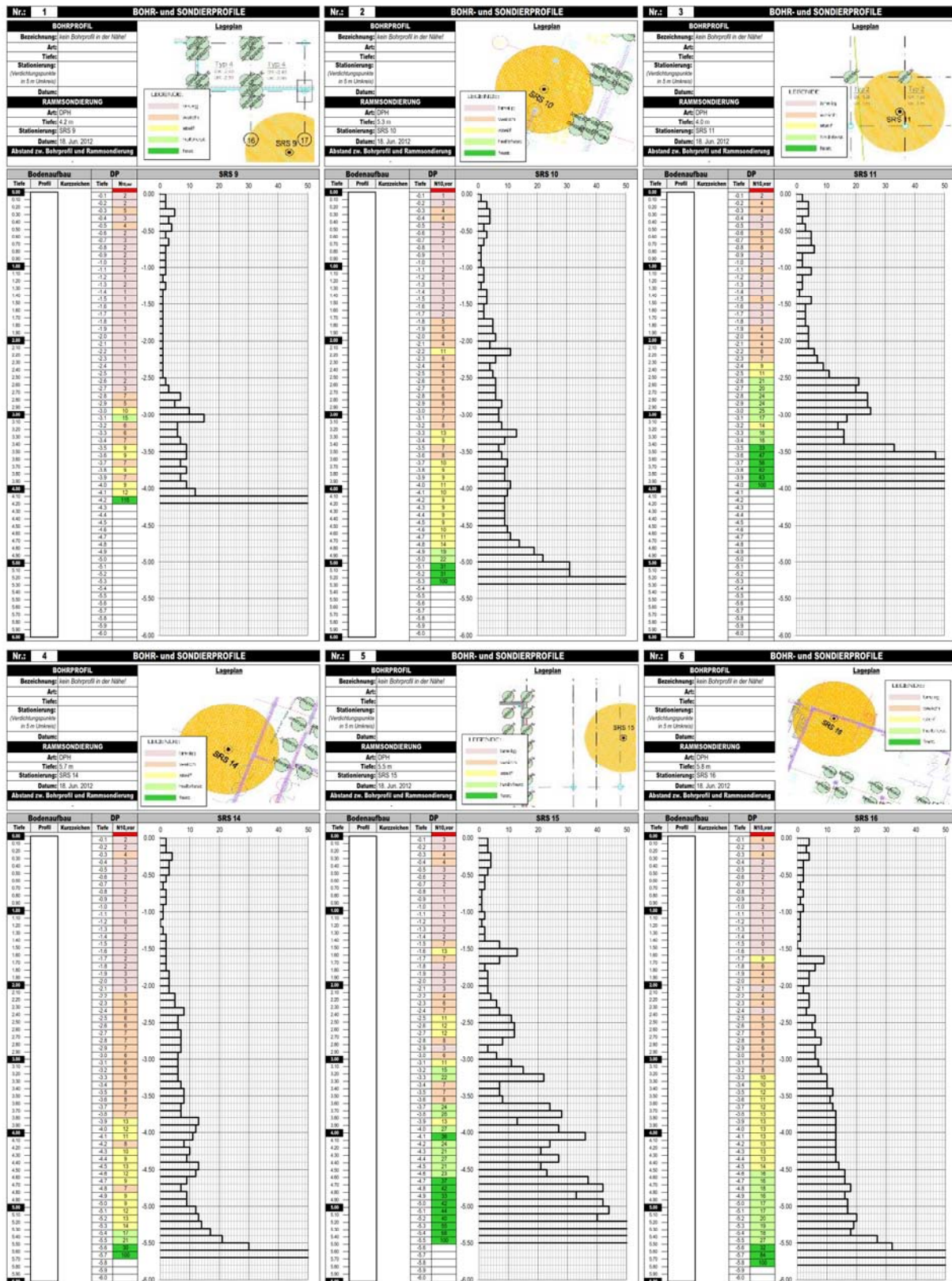


Abb. 139: Formblatt 5 – Rammsondierungen vor der Impulsverdichtung (am Beispiel von Projekt Nr. 130050)

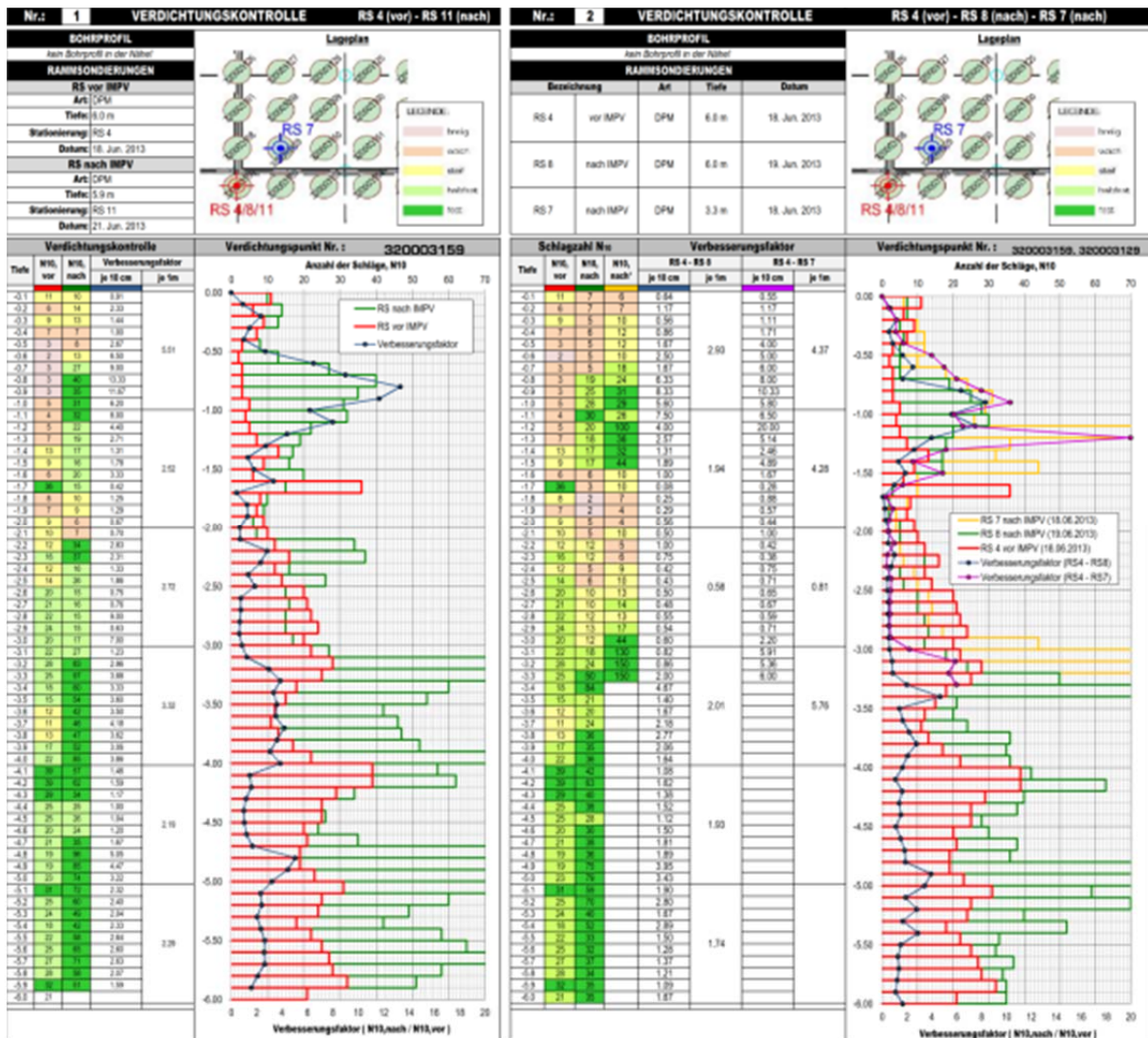


Abb. 140: Formblatt 6 – Rammsondierungen nach der Impulsverdichtung (am Beispiel von Projekt Nr. 130050)

Literaturverzeichnis

- [1] Adam, C.; Adam, D.; Falkner, F.-J.; Paulmichl, I.; Fürpaß, J.; *Der Impulsverdichter zur mitteltiefen Verdichtung und Verbesserung von Böden; Symposium "Baugrundverbesserung in der Geotechnik"*, Universität Siegen, 2010, pp. 111-134.
- [2] Adam, C.; Falkner, F.-J.; Adam, D.; Paulmichl, I.; Fürpaß, J.; *Dynamische Bodenverdichtung mit dem Impulsverdichter. Projekt Nr. 815441/13026 - SCK/KUG. Endbericht für die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft (ÖFFG)*, 2010, pp. 184.
- [3] Adam, D.; *Studienunterlagen zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik*, Wien: Institut für Geotechnik an der Technischen Universität Wien, 2010.
- [4] Adam, D.; *Baugrundverbesserung, Impulsverdichtung und Bodenstabilisierung*, Universität für Architektur, Bauwesen und Geodäsie, Sofia, Bulgarien, 2012.
- [5] Adam, D.; *Erdbau RVS 08.03.01 Technische Vertragsbedingungen, Vor-, Abbruch- und Erdarbeiten; FSV Seminar*, Linz, 2012.
- [6] Adam, D.; *Aktuelle Entwicklungen im Erd- und Grundbau für Straßen und Eisenbahnen; 9. Erdbaufachtagung "Aktuelle Entwicklungen in der Geotechnik"*, Technische Universität Leipzig, 2013, pp. 13 - 77.
- [7] Adam, D.; Adam, C.; Falkner, F.-J.; Paulmichl, I.; *Vibration emission induced by Rapid Impact Compaction; 8th International Conference on Structural Dynamics, EURODYN 2011*, Leuven, Belgium, 2011, pp. 914 - 921.
- [8] Adam, D.; Paulmichl, I.; *Bodenmechanische und bodenphysikalische Grundlagen der Bodenverbesserung; Veranstaltung der VÖBU: Neue Entwicklungen auf dem Gebiet der Bodenverbesserung*, Wien, 2009.
- [9] Adam, D.; Paulmichl, I.; Kopf, F.; Erdmann, P.; *Integrierte Verdichtungskontrollen bei dynamischen Verdichtungsverfahren; Symposium "Baugrundverbesserung in der Geotechnik"*, Universität Siegen, 2011, pp. 135-159.
- [10] Augner, D.; *Laborversuche an Bodenproben - Ermittlung von Bodenkenngößen; 62. Deutsche Brunnenbauertage und BAW-Baugrundkolloquium "Baugrundaufschlüsse: Planung, Ausschreibung, Durchführung, Überwachung und Interpretation"*, Bau-ABC Rostrup, Bad Zwischenahn, Deutschland, 2011.
- [11] Braithwaite, E. J.; Du-Preez, R. W.; *Rapid impact compaction in southern Africa; Conference on Geology for Engineering, Urban Planning and the Environment*, South African Institute of engineering Geologists, 1997, pp. 13 - 14.
- [12] Brandl, H.; *Studienblätter zur Vorlesung Grundbau und Bodenmechanik*, Wien: Institut für Geotechnik an der Technischen Universität Wien, 2006.
- [13] BSP International Foundations Ltd.; <http://www.bsp-if.com/> 1997 - 2013, pp. Rapid Impact Compaction - Documents, Brochures and Project Reports.
- [14] Bundesanstalt für Wasserbau (BAW); *Baugrundaufschlüsse: Planung, Ausschreibung, Durchführung, Überwachung und Interpretation; 62. Deutsche Brunnenbauertage/BAW-Baugrund-Kolloquium*, Bau-ABC Rostrup, Bad Zwischenahn, Deutschland, 2008.
- [15] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik; *Empfehlungen des Arbeitskreises "Baugruben"*, EAB; Berlin: Ernst & Sohn, 2012.
- [16] DIN 4094; *Baugrund - Erkundung durch Sondierung, Beiblatt 1: Anwendungshilfen, Erklärungen*; Deutsches Institut für Normung e.V., 1990.
- [17] DIN EN 1997-2; *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds; Deutsche Fassung EN 1997-2:2007 + AC:2010*; Deutsches Institut für Normung e.V., 2010.
- [18] Döllner, M.; *Revolutionäre Spezialtiefbauentwicklung; Baublatt Österreich*; specialmedia.com GmbH, Wien, 2010.
- [19] Entenmann, W.; al., e.; *Baugrunderkundungen : planen, durchführen, überwachen, auswerten*; Renningen: Expert-Verlag, 2008.
- [20] FUGRO Consult GmbH; <http://www.fugro.de/>, 2014.
- [21] Geotechnik Adam ZT GmbH; *Geotechnische Stellungnahme, Betrifft: BVH A-1220 Wien, Seefeldergasse 30 bzw. Klara-Blum-Gasse 4 und 6, Neubau von Kleinhäusern im Gartensiedlungsgebiet, Alternative Bodenverbesserung mittels Impulsverdichtung*, 2010.
- [22] GEOTOOL GmbH; *Rammsondiergeräte und spezielle Bohrgeräte für die Bodenuntersuchung*, <http://www.geotool.de>, 2014.
- [23] Keller Fondations Spéciales SAS; *Rapid Impact Compaction - Brochure 33-02F*
- [24] Kern, F.; Mayländer, M.; *Faszination Strassenbau*, Stuttgart: Motorbuch-Verlag, 2005.
- [25] Kolymbas, D.; *Geotechnik: Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau*, Berlin, Heidelberg: Springer-Verlag, 2011.
- [26] König, H.; *Maschinen im Baubetrieb: Grundlagen und Anwendung*, Wiesbaden: Vieweg + Teubner Verlag, 2008.

- [27] Kristiansen, H.; Davies, M.; *Ground improvement using rapid impact compaction (Paper No. 496); 13th World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, B.C., Canada, 2004.
- [28] Kuntsche, K.; *Geotechnik*; Braunschweig, Wiesbaden: Vieweg Verlag, 2000.
- [29] Lauzon, M.; Morel, J.-F.; Briet, S.; Beaton, N.; *Ground vibrations induced by dynamic compaction and rapid impact compaction; 14th Pan-American Conference on Soil Mechanics and Geotechnical Engineering*, Toronto, Ontario, Canada, 2011.
- [30] Maybaum, G.; Mieth, P.; Oltmanns, W.; Vahland, R.; *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtiefbau Baugrund - Baugruben - Baugrundverbesserung - Pfahlgründungen - Grundwasserhaltung*; Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag 2011.
- [31] Möller, G.; *Geotechnik Grundbau*, Berlin: Ernst & Sohn, 2012.
- [32] o.V.; *Dynamic compaction: A principle consolidated by innovation Soils & Structures, The Freyssinet Group Magazine*, 2005.
- [33] o.V.; *Innovative new ground improvement method uses controlled dynamic compaction; Civil Engineering*; SAICE Magazine, 2006.
- [34] o.V.; *TUM Vorlesungsskript Bodenmechanik und Grundbau*, München: Lehrstuhl und Prüfamts für Grundbau, Bodenmechanik, Felsmechanik und Tunnelbau an der Technischen Universität München, 2009.
- [35] o.V.; *Qualitätssicherung im Erdbau. Prüfverfahren zum Nachweis der Verdichtungsqualität*; Erdbaulaboratorium Saar, Institut für Erd- und Grundbau GmbH, Institut für Geotechnik und Umwelt GmbH, o. J.
- [36] ÖNORM B 4419-1; *Erd- und Grundbau, Untergrunderkundung durch Sondierungen, Teil 1: Rammsondierungen*; Austrian Standards Institute, 1985.
- [37] Pigisch, N.; Adam, D.; *Gründungen auf nicht ausreichend tragfähigem Untergrund*; Wien: Institut für Geotechnik an der Technischen Universität Wien, 2003.
- [38] Pregl, O.; *Handbuch der Geotechnik: Band 2 - Geologische Grundlagen, Erdbeben, Untergrunderkundungen, Feld- und Bauwerksmessungen*; Wien: Institut für Geotechnik an der Universität für Bodenkultur (BOKU), 2000.
- [39] Prinz, H.; Strauss, R.; *Ingenieurgeologie*; Heidelberg: Spektrum Akademischer Verlag, 2011.
- [40] Rizkallah, V.; *Einführung in die praktische Bodenmechanik*; Technische Universität Hannover, 1974.
- [41] Schmidt, H.-H.; *Grundlagen der Geotechnik*; Stuttgart: Vieweg+Teubner Verlag, 2006.
- [42] Serridge, C.; Synac, O.; *Application of the Rapid Impact Compaction (RIC) technique for risk mitigation in problematic soils, Paper Nr. 294; 10th IAEG International Congress*, Nottingham, United Kingdom, 2006.
- [43] Simmer, K.; *Grundbau 1 - Bodenmechanik und erdstatische Berechnungen*; Stuttgart: Teubner Verlag, 1994.
- [44] STITZ GmbH; *Meßgeräte und Apparatebau*, <http://www.stitz-gmbh.de/>, 2014.
- [45] Tara, D.; Wilson, P.; *Rapid Impact Compactor - Ground Improvement, Vibration Monitoring and Desification Assessment, Downtown Site, Squamish, B.C., Canada*; Thurber Engineering, Ltd., 2004.
- [46] Terra-Mix Bodenstabilisierungs GmbH; *Broschüre, Photos, Bodengutachten, Geotechnische Stellungnahmen und Schlussberichten für die ausgeführten Bodenverbesserungsarbeiten, CAD-Pläne ,etc.*, 2007-2013.
- [47] Watts, K. S.; Charles, J. A.; *Initial assessment of a new rapid impact ground compactor; Conference on Engineered Fills*, London, United Kingdom, 1993, pp. 399-412.
- [48] Watts, K. S.; Cooper, A., *Compaction of fills in land reclamation by rapid impact*, *Geotechnical Engineering*, 164 (2011), pp. 181-193.
- [49] Witt, K. J.; *Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen*; Berlin: Ernst & Sohn, 2008.
- [50] Witt, K. J.; *Grundbau-Taschenbuch, Teil 2: Geotechnische Verfahren*; Berlin: Ernst & Sohn, 2011.
- [51] Германов, Т.; *Лекции по Земна механика и фундиране*; Катедра "Геотехника", Университет по Архитектура, Строителство и Геодезия, София, 2011.

Normenverzeichnis

ANSI S2.47 (1990)

Vibration of Buildings – Guidelines for measurement of vibrations and evaluation of their effects on buildings

BS 7385 (1990)

Evaluation and measurement for vibration in buildings

DIN 1054 (Dezember 2010)

Baugrund – Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau – Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1

DIN 4094 (Dezember 1990)

Baugrund – Erkundung durch Sondierungen

DIN 4150-3 (Februar 1999)

Erschütterungen im Bauwesen, Teil 3: Einwirkungen auf bauliche Anlagen

DIN 18126 (November 1996)

Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Bestimmung der Dichte nichtbindiger Böden bei lockerster und dichtester Lagerung

DIN 18127 (September 2012)

Baugrund, Untersuchung von Bodenproben – Proctorversuch

DIN 18196 (Mai 2011)

Erd- und Grundbau – Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke

EN 1997-2 (Österreichische Fassung: 2012, Deutsche Fassung: 2010, Bulgarische Fassung: 2007)

Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik
Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds

EN 14731 (2005)

Ausführung von besonderen geotechnischen Arbeiten (Spezialtiefbau)
Baugrundverbesserung durch Tiefenrüttelverfahren

EN ISO 14688-1 (2002)

Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden,
Teil 1: Benennung und Beschreibung

EN ISO 14688-2 (2004)

Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden,
Teil 2: Grundlagen für Bodenklassifizierungen

EN ISO 22476-1 (2012)

Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen
Teil 1: Drucksondierungen mit elektrischen Messwertaufnehmern und Messeinrichtungen für den Porenwasserdruck

EN ISO 22476-2 (2005)

Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen
Teil 2: Rammsondierungen

EN ISO 22476-3 (2005)

Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Felduntersuchungen
Teil 3: Standard Penetration Test

ISO 4866 (1990)

Mechanical vibration and shock – Vibration of buildings – Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effect on buildings

ÖNORM B 4400-1 (März 2010)

Geotechnik – Teil 1: Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Böden – Regeln zur Umsetzung der ÖNORMEN EN ISO 14688-1 und-2 sowie grundlegende Symbole und Einheiten

ÖNORM B 4418 (Dezember 2012)

Geotechnik – Durchführung von Proctorversuchen im Erdbau unter Einbeziehung der ÖNORM EN 13286-2

ÖNORM B 4419-1 (März 1985)

Erd- und Grundbau – Untergrunderkundung durch Sondierungen
Teil 1: Rammsondierungen

ÖNORM S 9020 (August 1986)

Bauwerkserschütterungen; Sprengerschütterungen und vergleichbare impulsförmige Immissionen

RVS 08.03.01 (Oktober 2010)

Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, 08 – Technische Vertragsbedingungen, 03 – Vor-, Abtrags- und Erdarbeiten, 01 – Erdarbeiten

RVS 08.03.04 (März 2008)

Richtlinien und Vorschriften für das Straßenwesen, 08 – Technische Vertragsbedingungen, 03 – Vor-, Abtrags- und Erdarbeiten, 04 – Verdichtungsnachweis mittels dynamischen Lastplattenversuches

SN 640 312 a (1992)

Erschütterungseinwirkungen auf Bauwerke

TP BF – StB – B 7.1 (1988)

Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau
Teil B 7.1. CBR-Versuch

TP BF – StB – B 8.3 (2012)

Technische Prüfvorschriften für Boden und Fels im Straßenbau
Teil B 8.3. Dynamischer Plattendruckversuch mit leichtem Fallgewichtsgerät

ZTV A-StB (1997, 2006, 2012)

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Aufgrabungen in Verkehrsflächen

ZTVE-StB (1994, 1997, 2009)

Zusätzliche Technische Vertragsbedingungen und Richtlinien für Erdarbeiten im Straßenbau

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Übersicht der Bodenverbesserungsverfahren (adaptiert nach [8])	6
Abb. 2: Übersicht der dynamischen Bodenverdichtungsverfahren (adaptiert nach [8])	7
Abb. 3: Boden als Dreiphasensystem (adaptiert nach [12])	8
Abb. 4: Proctorversuch (adaptiert nach [5])	10
Abb. 5: Kugelmodell mit lockerster und dichtester Lagerung (adaptiert nach [40])	12
Abb. 6: Verdichtungsprüfungen im Erdbau	14
Abb. 7: Diagramm zur Ermittlung des CBR-Wertes	15
Abb. 8: Auswertung des statischen Lastplattenversuches	15
Abb. 9: Ausführung und grafische Auswertung der Verdichtungskontrolle mit einer Rammsonde	18
Abb. 10: Leichte Rammsonde - DPL	19
Abb. 11: Schwere Rammsonde - DPH	20
Abb. 12: Drucksondierung (CPT) [20]	21
Abb. 13: Der Mammutrüttler [23]	29
Abb. 14: Rapid Runway Compactor [13]	29
Abb. 15: Einsatzmöglichkeiten des Impulsverdichters gegenüber verschiedenen Baugrundverbesserungsmethoden in Abhängigkeit von der Bodenart (adaptiert nach [30])	31
Abb. 16: Numerische Computersimulation der Tiefenwirkung bei der Hybridgründung mit Impulsverdichtung und Bodenstabilisierung (nach [4])	32
Abb. 17: Bodenverbesserung mit Impulsverdichtung in Kombination mit Bodenstabilisierung für die Gründung einer Windkraftanlage in Tortoman, Rumänien [46]	32
Abb. 18: Kombiniertes Verdichtungsverfahren mit DYNIV und Impulsverdichtung bei der Erweiterung eines Containerterminals in Marseille (Südfrankreich) [23]	33
Abb. 19: Systemaufbau eines Impulsverdichters (adaptiert nach [46])	33
Abb. 20: Verdichtungsfuß (adaptiert nach [13, 1])	34
Abb. 21: Verdichtungsfüße mit verschiedenen Durchmessern	34
Abb. 22: Ergebnisse der numerischen Simulationen mit Variation der Form des Verdichtungsfußes [2]	35
Abb. 23: Systemskizze des Impulsverdichters [13]	36
Abb. 24: Verfügbare Impulsverdichter mit verschiedenen Trägergeräten [13, 46]	37
Abb. 25: Datenerfassungssysteme in der Fahrerkabine des Impulsverdichters [46]	38
Abb. 26: Eingebaute Messsysteme am Stahlgerüst des hydraulischen Hammers	39
Abb. 27: Transport des Impulsverdichters als eine Einheit [13]	39
Abb. 28: Transport des Impulsverdichters in zwei Teilen [46]	40
Abb. 29: Arbeitsweise bei der Impulsverdichtung (adaptiert nach [46])	40
Abb. 30: Verhalten von nichtbindigen und bindigen Böden bei der Impulsverdichtung	41
Abb. 31: Verdichtungsraaster (adaptiert nach [4])	42
Abb. 32: Vergleich der Verdichtungsleistung bei Impulsverdichtung und bei DYNIV (adaptiert nach [4])	43
Abb. 33: Maximale resultierende Schwingschnelle $v_{R,max}$ im Abstand vom Verdichtungsfuß – Numerisch ermittelte Abstandbeziehungen für drei unterschiedliche Böden bei der Impulsverdichtung mit einer Fallmasse von 9 t [2]	45
Abb. 34: Maximale resultierende Schwingschnelle $v_{R,max}$ im Abstand vom Verdichtungsfuß - Experimentell ermittelte Abstandbeziehungen für vier unterschiedliche Untergrundverhältnissen bei der Impulsverdichtung mit einer Fallmasse von 9 t [2]	46
Abb. 35: Maximale resultierende Schwingschnelle $v_{R,max}$ im Abstand vom Verdichtungspunkt bei der Impulsverdichtung und bei der DYNIV [7]	46
Abb. 36: Erschütterungen bei Impulsverdichtung und bei DYNIV (adaptiert nach [29])	47
Abb. 37: Ausbreitung der äquivalenten plastischen Verzerrungen im Untergrund nach dem 1. Verdichtungsstoß [2]	48
Abb. 38: Der Impulsverdichter von Terra-Mix [18]	51
Abb. 39: Erforderliche Baugeräte für Impulsverdichtung [46]	52
Abb. 40: Typische Verdichtungsraaster für die Impulsverdichtung (adaptiert nach [46])	52
Abb. 41: Beispiel für eine Probeverdichtung auf dem Kalibrierfeld [21]	54
Abb. 42: Verdichtungskontrolle nach einer Impulsverdichtung [46]	54
Abb. 43: Tabellarische Darstellung der aufgezeichneten Verfahrensparameter [46]	55
Abb. 44: Grafische Darstellung der Verdichterdaten [46]	56
Abb. 45: Lageplan zur Darstellung des Verdichtungsraasters und der Bodenaufschlüsse	60
Abb. 46: Tabellenblattes 1 der Auswertungsdatei – Allgemeine Projektinformationen	61
Abb. 47: Darstellung der Bodenprofile in tabellarischer Form in der Auswertungsdatei	62

Abb. 48: Aufbereitung der Messergebnisse von Rammsondierungen in der Auswertungsdatei.....	62
Abb. 49: Erfassung der Ergebnisse von Rammsondierungen vor und nach der Impulsverdichtung zur Verdichtungskontrolle	63
Abb. 50: Erfassung der Verdichtungsparameter in der Auswertungsdatei	64
Abb. 51: Beispiel für Tabellenblatt 7 – Auswertung der während der Impulsverdichtung aufgezeichneten Verdichtungsparameter	67
Abb. 52: Ausgewählte Bodenprofile der Untergrundkategorie „Kies“	69
Abb. 53: Anzahl der notwendigen Übergänge zur erfolgreichen Verdichtung bei der Untergrundkategorie „Kies“	70
Abb.54: Durchschnittlich angetroffene Abbruchkriterien bei der Untergrundkategorie „Kies“.....	70
Abb.55: Durchschnittliche bezogene Verdichtungsenergie bei der Untergrundkategorie „Kies“	71
Abb.56: Schlagzahl-Setzungskurven für alle Projekte der Untergrundkategorie „Kies“	71
Abb.57: Durchschnittliche Schlagzahl-Setzungskurven für die Untergrundkategorie „Kies“	72
Abb.58: Durchschnittliche Kratertiefe bei der Untergrundkategorie „Kies“	73
Abb.59: Durchschnittliche „Setzung letzter Schlag“ bei der Untergrundkategorie „Kies“.....	73
Abb.60: Ermittlung der Tiefenwirkung der Verdichtung bei der Untergrundkategorie „Kies“ mit Hilfe von Rammsondierungen	73
Abb.61: Ergebnisse der Rammsondierungen vor und nach der Impulsverdichtung beim Projekt Nr. 100394	74
Abb. 62: Ausgewählte Bodenprofile der Untergrundkategorie „Sand“	76
Abb. 63: Anzahl der notwendigen Übergänge zur erfolgreichen Verdichtung bei der Untergrundkategorie „Sand“	77
Abb.64: Durchschnittlich angetroffene Abbruchkriterien bei der Untergrundkategorie „Sand“	77
Abb.65: Durchschnittliche bezogene Verdichtungsenergie bei der Untergrundkategorie „Sand“	78
Abb.66: Durchschnittliche Schlagzahl-Setzungskurven für die Untergrundkategorie „Sand“	79
Abb.67: Durchschnittliche Kratertiefe bei der Untergrundkategorie „Sand“	79
Abb.68: Durchschnittliche „Setzung letzter Schlag“ bei der Untergrundkategorie „Sand“	79
Abb.69: Ermittlung der Tiefenwirkung bei der Untergrundkategorie „Sand“ mit Hilfe von Rammsondierungen	80
Abb.70: Ausgewählte Rammsondierungen der Untergrundkategorie „Sand“	81
Abb. 71: Ausgewählte Bodenprofile der Untergrundkategorie „Schluff“	83
Abb. 72: Anzahl der notwendigen Übergänge zur erfolgreichen Verdichtung bei der Untergrundkategorie „Schluff“ ...	84
Abb.73: Durchschnittlich angetroffene Abbruchkriterien bei der Untergrundkategorie „Schluff“	85
Abb.74: Durchschnittliche bezogene Verdichtungsenergie bei der Untergrundkategorie „Schluff“	85
Abb.75: Durchschnittliche Schlagzahl-Setzungskurven für die Untergrundkategorie „Schluff“	86
Abb.76: Durchschnittliche Kratertiefe bei der Untergrundkategorie „Schluff“	87
Abb.77: Durchschnittliche „Setzung letzter Schlag“ bei der Untergrundkategorie „Schluff“	87
Abb.78: Ausgewählte Rammsondierungen der Untergrundkategorie „Schluff“.....	89
Abb.79: Ermittlung der Tiefenwirkung der Verdichtung bei der Untergrundkategorie „Schluff“ mit Hilfe von Rammsondierungen	90
Abb. 80: Ausgewählte Bodenprofile der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“	91
Abb. 81: Anzahl der notwendigen Übergänge zur erfolgreichen Verdichtung bei der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“.....	95
Abb.82: Durchschnittlich angetroffene Abbruchkriterien bei der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“.....	95
Abb.83: Durchschnittliche bezogene Verdichtungsenergie bei der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“	96
Abb.84: Durchschnittliche Schlagzahl-Setzungskurven für die Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“	97
Abb.85: Durchschnittliche Kratertiefe bei der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“	97
Abb.86: Durchschnittliche „Setzung letzter Schlag“ bei der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“.....	97
Abb.87: Ermittlung der Tiefenwirkung der Verdichtung bei der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“ mit Hilfe von Rammsondierungen	99
Abb.88: Ausgewählte Rammsondierungen zur Verdichtungskontrolle der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“	100
Abb. 89: Gegenüberstellung der notwendigen Übergänge zur Verdichtung in den vier Untergrundkategorien.....	101
Abb.90: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Abbruchkriterien in den vier Untergrundkategorien.....	103
Abb.91: Gegenüberstellung der durchschnittlichen bezogenen Verdichtungsenergie in den vier Untergrundkategorien	104
Abb.92: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Schlagzahl-Setzungskurven bis zum 4. Übergang in den vier Untergrundkategorien.....	105
Abb.93: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Kratertiefe (Deep) in den vier Untergrundkategorien	106
Abb.94: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Setzung letzter Schlag (Final Set) in den vier Untergrundkategorien	106

Abb.95: Gegenüberstellung der durchschnittlichen Tiefenwirkung der Impulsverdichtung in den vier Untergrundkategorien.....	108
Abb.96: Mögliche Unterteilung der Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“ in 4 Unterkategorien	111
Abb.97: Auswertung der Verdichterdaten nach Untergrundkategorien – Formblatt 1/3	112
Abb.98: Auswertung der Verdichterdaten nach Untergrundkategorien – Formblatt 2/3	113
Abb.99: Auswertung der Verdichterdaten nach Untergrundkategorien – Formblatt 3/3	114
Abb.100: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 1 – Kies – Formblatt 1/2.....	115
Abb.101: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 1 – Kies – Formblatt 2/2.....	116
Abb.102: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100394.....	117
Abb.103: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100477.....	118
Abb.104: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 130164.....	119
Abb.105: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 2 – Sand – Formblatt 1/2.....	120
Abb.106: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 2 – Sand – Formblatt 2/2.....	121
Abb.107: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100437.....	122
Abb.108: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100971.....	123
Abb.109: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 110960.....	124
Abb.110: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 120303.....	125
Abb.111: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 3 – Schluff – Formblatt 1/2	126
Abb.112: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 3 – Schluff – Formblatt 2/2	127
Abb.113: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100231.....	128
Abb.114: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100923.....	129
Abb.115: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 120511.....	130
Abb.116: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 120638.....	131
Abb.117: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 120922.....	132
Abb.118: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 130018.....	133
Abb.119: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 130050.....	134
Abb.120: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 4 – künstliche Auffüllung – Formblatt 1/2.....	135
Abb.121: Auswertung der Verdichterdaten für Kategorie 4 – künstliche Auffüllung – Formblatt 2/2.....	136
Abb.122: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100192.....	137
Abb.123: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100430.....	138
Abb.124: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100590.....	139
Abb.125: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 100991.....	140
Abb.126: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 110272.....	141
Abb.127: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 110631.....	142
Abb.128: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 110686.....	143
Abb.129: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 110881.....	144
Abb.130: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 110913.....	145
Abb.131: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 111016.....	146
Abb.132: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 120046.....	147
Abb.133: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 120398.....	148
Abb.134: Ausgewertete Verdichterdaten für Projekt Nr. 120661.....	149
Abb.135: Formblatt 1 – Projektbezeichnung (am Beispiel von Projekt Nr. 130050)	150
Abb.136: Formblatt 2 – Bodenklassifizierung (am Beispiel von Projekt Nr. 130050)	151
Abb.137: Formblatt 3 – Laborversuche (am Beispiel von Projekt Nr. 130050)	152
Abb.138: Formblatt 4 – Bodenprofile (am Beispiel von Projekt Nr. 130050).....	153
Abb.139: Formblatt 5 – Rammsondierungen vor der Impulsverdichtung (am Beispiel von Projekt Nr. 130050).....	154
Abb.140: Formblatt 6 – Rammsondierungen nach der Impulsverdichtung (am Beispiel von Projekt Nr. 130050) ..	155

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Verdichtbarkeit von Böden nach ZTV-A-StB 97.....	9
Tabelle 2: Einflussfaktoren auf die Verdichtbarkeit [26]	10
Tabelle 3: Proctordichte und Güte des Schüttmaterials [34].....	11
Tabelle 4: Anhaltswerte für die Proctordichte nach Bodenart [49].....	11
Tabelle 5: Bezogene Lagerungsdichte nach EN ISO 14688-1.....	12
Tabelle 6: Lagerungsdichte nach DIN 1054 [15]	12
Tabelle 7: Relative Tragfähigkeit des Bodens in Abhängigkeit vom CBR-Wert [39]	15
Tabelle 8: Arten und Einsatzmöglichkeiten der Stabsondierungen nach EN ISO 22476, DIN 4094, ÖNORM B 4419	17
Tabelle 9: Koeffizienten zur Ermittlung der Lagerungsdichte D bzw. der bezogenen Lagerungsdichte I_D aus Sondierergebnissen nach EN 1997-2 und DIN 4094-3 Beiblatt 1 (adaptiert nach [49])	23
Tabelle 10: Koeffizienten zur Ermittlung der Steifebeiwert v aus Sondierergebnissen nach EN 1997-2 und DIN 4094-3 Beiblatt 1 (adaptiert nach [49])	24
Tabelle 11: Einfluss des Grundwassers auf die Schlagzahlen von Rammsondierungen in nichtbindigen Böden nach DIN 4094-3 [49]	25
Tabelle 12: Empirische Korrelationen zwischen den Sondierergebnissen verschiedener Sonden und der Lagerungsdichte nichtbindiger Böden bzw. der Konsistenz bindiger Böden [39]	25
Tabelle 13: Zusammenhänge für Druck-, Ramm und Bohrlochrammsondierungen in nichtbindigen Böden nach Erfahrungen von der Bundesanstalt für Wasserbau (BAW) [14].....	26
Tabelle 14: Zusammenhang zwischen Lagerungsdichte und Sondierergebnissen bei nichtbindigen Böden nach TUM – Zentrum Geotechnik [34]	26
Tabelle 15: Abschätzung der Lagerungsdichte anhand Rammsondierungen bei kiesig-sandigen Böden nach Türke 1984 [38].....	26
Tabelle 16: Abschätzung der Lagerungsdichte und des Steifemoduls anhand schweren Rammsondierungen im sandigen Kies (saGr) nach Gstöttner 1987 [38].....	27
Tabelle 17: Interpretation der Sondierergebnisse im Sand nach Kirsch 1979 [38].....	27
Tabelle 18: Zusammenhang zwischen Schlagzahlen von schweren Rammsonde DPH und der Bohrlochrammsonde BDP (SPT) und diversen Bodenparametern [28]	27
Tabelle 19: Zusammenhang zwischen Sondierergebnissen und undrainierter Scherfestigkeit bindiger Böden nach Placzek 1985 [41].....	28
Tabelle 20: Zusammenhang zwischen Schlagzahlen der schweren Rammsonde DPH und der relativen Dichte [38].	28
Tabelle 21: Abmessungen der verschiedenen Gerätetypen [13]	36
Tabelle 22: Technische Daten von verschiedenen Impulsverdichtern [13]	36
Tabelle 23: Trägergeräte für den Impulsverdichter.....	37
Tabelle 24: Regelwerke zur Beurteilung von Bauwerkerschütterungen	43
Tabelle 25: Richtwerte der zulässigen maximalen resultierenden Schwinggeschwindigkeit nach ÖNORM S 9020 [7].	44
Tabelle 26: Tiefenwirkung der Impulsverdichtung in Abhängigkeit von der Bodenart [33].....	48
Tabelle 27: Unternehmen, die in Europa im Bereich Impulsverdichtung tätig sind.....	49
Tabelle 28: Unternehmen weltweit.....	50
Tabelle 29: Bei der Auswertung bearbeitete Projekte - Aufteilung der Projekte nach Untergrundkategorie	58
Tabelle 30: Empirische Zusammenhänge zwischen der Lagerungsdichte bei nichtbindigen bzw. Konsistenz bei bindigen Böden und der Schlagzahl N_{10} der leichten (DPL), mittelschweren (DPM) und schweren Rammsonde (DPH) [39, 14]	64
Tabelle 31: Legende zur Bewertung des Verbesserungsfaktors.....	66
Tabelle 32: Leistungsumfang und Verdichtungsraaster für die Untergrundkategorie „Kies“.....	69
Tabelle 33: Mittelwerte der Verdichtungsparameter für die Untergrundkategorie „Kies“.....	69
Tabelle 34: Leistungsumfang und Verdichtungsraaster für die Untergrundkategorie „Sand“.....	76
Tabelle 35: Mittelwerte der Verdichtungsparameter für die Untergrundkategorie „Sand“.....	76
Tabelle 36: Leistungsumfang und Verdichtungsraaster für die Untergrundkategorie „Schluff“	83
Tabelle 37: Mittelwerte der Verdichtungsparameter für die Untergrundkategorie „Schluff“	84
Tabelle 38: Leistungsumfang und Verdichtungsraaster für die Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“	94
Tabelle 39: Mittelwerte der Verdichtungsparameter für die Untergrundkategorie „künstliche Auffüllung“	94

Abkürzungsverzeichnis

Abb.	Abbildung
B	Schlagzahl <i>Blows</i>
BDP	Bohrlochrammsondierung <i>Borehole Dynamic Probing</i>
bspw.	beispielsweise
BV	Bauvorhaben
CBR	California Bearing Ratio
cl	tonig
co	steinig
CPT	Drucksondierung <i>Cone Penetration Test</i>
D	Kratertiefe <i>Deep</i>
DPH	Schwere Rammsondierung <i>Dynamic Probing Heavy</i>
DPL	Leichte Rammsonde <i>Dynamic Probing Light</i>
DPM	Mittelschwere Rammsonde <i>Dynamic Probing Medium</i>
DPSH-A/-B	Überschwere Rammsondierung Typ A bzw. B <i>Dynamic Probing Super Heavy Type A resp. B</i>
DYNIV	Dynamische Intensivverdichtung
EF	Einzelfundament
EN	Europäische Norm
etc.	et cetera
ev.	eventuell
GE	enggestufte Kies-Sand-Gemische
ggf.	gegebenenfalls
GI	intermittierend gestufte Kies-Sand-Gemische
Gl.	Gleichung
GOK	Geländeoberkante
Gr	Kies <i>Gravel</i>
gr	kiesig
GT	Kies-Ton-Gemische mit 5 % bis 15 % Feinkornanteil ($\leq 0,063$ mm)
GT*	Kies-Ton-Gemische über 15 % bis 40 % Feinkornanteil ($\leq 0,063$ mm)
GU	Kies-Schluff-Gemische mit 5 % bis 15 % Feinkornanteil ($\leq 0,063$ mm)
GU*	Kies-Schluff-Gemische über 15 % bis 40 % Feinkornanteil ($\leq 0,063$ mm)
GW	weitgestufte Kies-Sand-Gemische
GWS	Grundwasserspiegel
GZ	Grenzzustand
IMPV	Impulsverdichtung
ISO	International Organization for Standardization
KB	Kernbohrung
LFG	Leichtes Fallgewichtsgerät
LKW	Lastkraftwagen
Mg	künstliche Auffüllung <i>Made Ground</i>
Mu	Mutterboden

o.g.	oben genannt
PEEQ	äquivalente plastische Verzerrungen <i>Equivalent Plastic Strains</i>
PLT	Plattendruckversuch <i>Plate Loading Test</i>
PNr.	Projektnummer
RDV	Rütteldruckverdichtung
RIC	Rapid impact compactor / Rapid impact compaction
RKS	Rammkernsondierung
RRC	Rapid runway compactor
RS	Rammsondierung
RSV	Rüttelstopfverdichtung
S	Setzung letzter Schlag Final Set
s.	siehe
Sa	Sand <i>Sand</i>
sa	sandig
Sch	Schurf
SE	enggestufte Sande
SF	Streifenfundament
SI	intermittierend gestufte Sand-Kies-Gemische
Si	Schluff <i>Silt</i>
si	schluffig
SPT	Bohrlochrammsondierung <i>Standard Penetration Test</i>
ST	Sand-Ton-Gemische mit 5 % bis 15 % Feinkornanteil ($\leq 0,063$ mm)
ST*	Sand-Ton-Gemische über 15 % bis 40 % Feinkornanteil ($\leq 0,063$ mm)
SU	Sand-Schluff-Gemische mit 5 % bis 15 % Feinkornanteil ($\leq 0,063$ mm)
SU*	Sand-Schluff-Gemische über 15 % bis 40 % Feinkornanteil ($\leq 0,063$ mm)
SW	weitgestufte Sand-Kies-Gemische
TA	ausgeprägt plastische Tone
TL	leicht plastische Tone
TM	mittelpastische Tone
ÜG	Übergang
UA	ausgeprägt plastische Schluffe
UL	leicht plastische Schluffe
UM	mittelpastische Schluffe
VP	Verdichtungspunkt
z.B.	zum Beispiel
z.T.	zum Teil

Symbolverzeichnis

B	[-]	Anzahl der Schläge
CBR	[-]	CBR-Wert
CBR _d	[-]	dynamischer CBR-Wert
c _u	[kN/m ²]	undrainierte Kohäsion
C _u	[-]	Ungleichförmigkeitszahl
D	[-]	Lagerungsdichte
D _{Pr}	[%]	Verdichtungsgrad
e	[-]	Porenzahl
e _{max}	[-]	Porenzahl bei lockerster Lagerung
e _{min}	[-]	Porenzahl bei dichtester Lagerung
E	[kNm]	Verdichtungsenergie
E _s	[MN/m ²]	Steifemodul
E _{v1}	[MN/m ²]	Verformungsmodul der Erstbelastung
E _{v2}	[MN/m ²]	Verformungsmodul der Zweitbelastung
E _{vd}	[MN/m ²]	dynamischer Verformungsmodul
f _s	[MN/m ²]	lokale Mantelreibung
g	[m/s ²]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Fallhöhe
I _D	[-]	Konsistenzzahl
I _D	[-]	bezogene Lagerungsdichte (relative Dichte)
I _f	[-]	Verdichtungsfähigkeit
k _f	[m/s]	Durchlässigkeitsbeiwert
m	[kg]	Masse des Fallgewichtes
m _d	[g]	Trockenmasse der Bodenprobe
m _f	[g]	Masse der feuchten Bodenprobe
m _w	[g]	Masse des Wassers
N ₁₀	[-]	Anzahl der Schläge je 10 cm Eindringtiefe
N ₃₀	[-]	Anzahl der Schläge je 30 cm Eindringtiefe
n	[-]	Porenanteil
n _a	[-]	Porenluftanteil
n _w	[-]	Porenwasseranteil
n _{max}	[-]	Porenanteil bei lockerster Lagerung
n _{min}	[-]	Porenanteil bei dichtester Lagerung
p	[N/mm ²]	Pressung unter dem Druckstempel bei der Bodenprobe (CBR-Versuch)
p _a	[N/mm ²]	atmosphärischer Druck
p _s	[N/mm ²]	Pressung unter dem Druckstempel beim Standardboden (CBR-Versuch)
q _c	[MN/m ²]	Spitzenwiderstand
v	[m/s]	Auftreffgeschwindigkeit bei freiem Fall
VF _{IMPV}	[-]	Verbesserungsfaktor
v _{R,max}	[mm/s]	maximal resultierende Schwingschnelle
w	[%]	Wassergehalt
w _{opt}	[%]	optimaler Wassergehalt
ρ _d	[g/cm ³]	Trockendichte
ρ _{Pr}	[g/cm ³]	Proctordichte
ρ _s	[g/cm ³]	Korndichte
φ	[°]	Reibungswinkel