

Korrelationen zwischen Sondierverfahren zur Ermittlung der Festigkeit nichtbindiger Böden und deren bodenmechanischen Kennwerten

Zur Erlangung des akademischen Grades
Master of Science
vorgelegt am Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg
Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften
Fachbereich Geowissenschaften

Martin Busch

16.10.2017

Betreuerin: Prof. Dr. Eva-Maria Pfeiffer, Institut für Bodenkunde
Zweitgutachter: Dipl.-Ing. Frank Schwieger, HPC AG

Korrelationen zwischen geotechnischen Feld- und Laborversuchen
zur Feststellung der Lagerungsdichte nichtbindiger Böden und deren bodenmechanischen Kennwerten

Martin Busch
Groote Wischen 14
21147 Hamburg

Matrikelnummer 6468431

Diese Studie wurde ermöglicht durch



Mit freundlicher Unterstützung von



BURMANN, MANDEL + PARTNER



Danksagung

Hiermit spreche ich allen Menschen und Organisationen, die mich bei der Erstellung der vorliegenden Arbeit unterstützt haben, meinen herzlichen Dank aus. Insbesondere gilt meine Dankbarkeit:

- Prof. Dr. Eva-Maria Pfeiffer für die Unterstützung des Arbeitsthemas, die stets angenehme Betreuung, Vermittlung von Feld- und Laborgeräten sowie die Organisation diverser Formalitäten.
- Frank Schwieger und Stefan Reich für die umfassende fachliche Betreuung, Unterstützung bei der Aufstellung des Feld- und Laborversuchsplans sowie der Interpretation von Messwerten und viel konstruktive Kritik.
- dem Institut für Bodenkunde der Universität Hamburg für die zeitweilige Bereitstellung einer Hilfskraft für die Feldarbeit, für die Ausleihe des Bohrgerätes und speziell Volker Kleinschmidt für technische Unterstützung auch nach Feierabend.
- Prof. Dr. Gerhard Schmiedl und dem Institut für Geologie für die Bereitstellung eines Arbeitsplatzes mit Binokular.
- der HPC AG für die großzügige Unterstützung durch die mehrwöchige Bereitstellung der Sondiergeräte, eines Kraftfahrzeuges und zeitweilig von Mitarbeitern zur Hilfe bei der Feldarbeit.
- der Hamburg Port Authority für die Genehmigung der Arbeit und Organisation der zugehörigen Formalitäten auf dem Spülfeld Moorburg-Ellerholz und der Deponie Francop.
- dem Ingenieurbüro Burmann, Mandel + Partner für den Zugang zur Baustelle im Baakenhafen, die Bereitstellung eines Fachmannes für Kampfmittelsondierung sowie die Überlassung von Drucksondenmesswerten.
- der Eggers Umwelttechnik GmbH für den Zugang zur Baustelle Baakenhafen Nord.
- meinen FeldhelferInnen Eva, Isabel und Peter für ihre unermüdliche Muskelkraft beim Transport von Generatoren, Aggregaten, Bohr- und Rammgeräten an lockeren, steilen Sandböschungen.
- meinem Freund Nicolas für die methodische Überprüfung der statistischen Auswertung.

Zusammenfassung

Rammsondierungen sind ein gängiges Verfahren zur qualitativen Bestimmung der Lagerungsdichte bzw. Festigkeit nichtbindiger Böden im Rahmen geotechnischer Untersuchungen. Viele Jahre lang war die Verwendung der leichten Rammsonde mit 5 cm² Spitzenfläche („Künzelstab“) in der Feldpraxis üblich und es existieren solide Erfahrungswerte zur Interpretation ihrer Schlagzahlen. Mit Einführung der DIN EN ISO 22476-2:2012-03 ist ihre Verwendung jedoch nicht mehr zugelassen, sie wurde abgelöst von der leichten Rammsonde mit 10 cm² Spitzenfläche. Bisherige Veröffentlichungen geben eine große Spannweite für Umrechnungsfaktoren zwischen den Schlagzahlen dieser Sonden an, so dass die Interpretation von heute normkonform gewonnenen Messwerten anhand der früheren Erfahrungen und im Vergleich mit älteren Ergebnissen schwer fällt.

Die vorliegende Arbeit bewertet anhand systematischer vergleichender Feldversuche in unterschiedlich gekörnten Böden über und unter dem Grundwasserspiegel die leichte, mittlere und schwere Rammsonde sowie den Künzelstab hinsichtlich der Reproduzierbarkeit ihrer Messwerte. Sie stellt die Schlagzahlen der Sonden zueinander ins Verhältnis, abhängig von der Korngrößenverteilung und Festigkeit des Bodens, der Wassersättigung und der Arbeitstiefe. Die Verlässlichkeit der Festigkeitseinschätzung wird mit Hilfe von Spitzendruckmesswerten einer Drucksondierung überprüft. Es werden gegenüber den bisherigen Veröffentlichungen verbesserte Umrechnungstabellen aufgestellt und ein Beitrag zur Beantwortung der Frage geleistet, ob die Schlagzahlen von Rammsonden einen direkten Rückschluss auf die Lagerungsdichte nichtbindiger Böden zulassen, oder ob dafür die Kenntnis weiterer Bodenparameter erforderlich ist.

Summary

Dynamic probing is an established method of determining soil density and strength, respectively. For many years, the light dynamic probe with a cone area of 5 cm² (locally also known as „Künzelstab“) was routinely used in field surveys across Germany, and from that substantial experience its measurements could be interpreted well. However, with the introduction of DIN EN ISO 22476-2:2012-03, its use is no longer permitted; it was replaced by the light dynamic probe with a cone area of 10 cm². Previous publications specified a large range of conversion factors between the two probes, leading to difficulties interpreting measurements that comply with today's standards in comparison with earlier experience and older field work.

The study at hand assesses the reproducibility of measurements done with the light, medium and heavy dynamic probe and the „Künzelstab“ in sands of different grain size distributions, above and below the groundwater level. The different probes' stroke counts are correlated to each other, depending on the grain size distribution and the penetration resistance of the soil, on water saturation and depth. The reliability of the probes' soil strength assessments is checked by comparing them to tip resistance readings from a cone penetrometer. Compared to previous publications, improved conversion tables are established and a contribution is made to answering the question of whether the stroke count of dynamic probes allows a direct evaluation of the density of non-cohesive soils, or whether knowledge of further soil parameters is necessary for this purpose.

Abbildungsverzeichnis

| | | |
|------|-------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Zusammenhang zwischen Rammsonden laut DIN 4094 | 3 |
| 3.1 | Vorbelastungsschüttung Baakenhafen Nord | 5 |
| 3.2 | Verfüllung Baakenhafen | 6 |
| 3.3 | Spülfeld Moorburg-Ellerholz, oberes Ende (Spülkopf) | 6 |
| 3.4 | Deponie Francop aus der Luft | 7 |
| 4.1 | Sondierung mit der leichten Rammsonde (links pneumatisch, rechts handbetrieben) | 8 |
| 4.2 | Sondierung mit der schweren Rammsonde | 9 |
| 4.3 | Drucksonde | 9 |
| 4.4 | Rammkernsondierung | 10 |
| 4.5 | Anordnung der Sondierungen im Gelände | 11 |
| 5.1 | Mikrofotos ausgewählter Bodenproben | 14 |
| 5.2 | DPL-5: Streuung nach Schlagzahl | 15 |
| 5.3 | DPL-5: Streuung nach Bodenfestigkeit | 16 |
| 5.4 | DPL-5: Streuung nach Arbeitstiefe | 16 |
| 5.5 | DPL-10: Streuung nach Schlagzahl | 17 |
| 5.6 | DPL-10: Streuung nach Bodenfestigkeit | 17 |
| 5.7 | DPL-10: Streuung nach Arbeitstiefe | 18 |
| 5.8 | DPM: Streuung nach Schlagzahl | 18 |
| 5.9 | DPM: Streuung nach Bodenfestigkeit | 19 |
| 5.10 | DPM: Streuung nach Arbeitstiefe | 19 |
| 5.11 | DPH: Streuung nach Schlagzahl | 20 |
| 5.12 | DPH: Streuung nach Bodenfestigkeit | 20 |
| 5.13 | DPH: Streuung nach Arbeitstiefe | 21 |
| 5.14 | Verhältnis DPL-10 / DPL-5 über Grundwasser | 22 |
| 5.15 | Verhältnis DPL-10 / DPL-5 unter Grundwasser | 22 |
| 5.16 | Verhältnis DPL-10 / DPL-5 nach Bodengruppen | 23 |
| 5.17 | Verhältnis DPL-10 / DPL-5 nach Bodenfestigkeit | 23 |
| 5.18 | Verhältnis DPM / DPL-5 über Grundwasser | 24 |
| 5.19 | Verhältnis DPM / DPL-5 unter Grundwasser | 24 |
| 5.20 | Verhältnis DPM / DPL-5 nach Bodengruppen | 25 |
| 5.21 | Verhältnis DPM / DPL-5 nach Bodenfestigkeit | 25 |
| 5.22 | Verhältnis DPH / DPL-5 über Grundwasser | 26 |
| 5.23 | Verhältnis DPH / DPL-5 unter Grundwasser | 26 |
| 5.24 | Verhältnis DPH / DPL-5 nach Bodengruppen | 27 |
| 5.25 | Verhältnis DPH / DPL-5 nach Bodenfestigkeit | 27 |
| 5.26 | Verhältnisse Rammsonden nach Wassergehalt (gesamt) | 28 |
| 5.27 | Verhältnisse Rammsonden nach Wassergehalt (ohne Moorburg-Ellerholz) | 28 |
| 5.28 | Vergleich Drucksonde - schwere Rammsonde | 30 |
| 6.1 | Verhältnis DPM / DPL-5 nach Ungleichförmigkeit und Krümmung | 33 |

| | | |
|-----|----------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.1 | Verhältnisse zwischen den Rammsonden, Bodengruppe SU, über Grundwasser | 35 |
| 7.2 | Verhältnisse zwischen den Rammsonden, Bodengruppe SE, über Grundwasser | 36 |
| 7.3 | Verhältnisse zwischen den Rammsonden, Bodengruppe SE, im Grundwasser | 37 |
| B.1 | Bohrprofile der Untersuchungsbereiche | 45 |
| B.2 | Sondierungen Baakenhafen Nord | 46 |
| B.3 | Sondierungen Verfüllung Baakenhafen | 47 |
| B.4 | Sondierungen Moorburg-Ellerholz Spülkopf | 48 |
| B.5 | Sondierungen Moorburg-Ellerholz Spülfläche | 49 |
| B.6 | Sondierungen Francop Süd Bereich 1 | 50 |
| B.7 | Sondierungen Francop Süd Bereich 2 | 51 |

Tabellenverzeichnis

| | | |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Literaturwerte für Schlagzahlverhältnisse | 3 |
| 4.1 | Abmessungsunterschiede zwischen den Rammsonden | 9 |
| 5.1 | Grenzen der Bodenfestigkeitsklassen | 15 |
| 6.1 | Streuung der Schlagzahlen | 31 |
| 6.2 | Verhältnisse von Spitzen- zu Gestängedurchmesser | 32 |
| 7.1 | Umrechnungsfaktoren zwischen den Rammsonden, Bodengruppe SU, über Grundwasser | 36 |
| 7.2 | Festigkeitsgrenzen in N_{10} der verschiedenen Rammsonden, Bodengruppe SU, über Grundwasser | 36 |
| 7.3 | Umrechnungsfaktoren zwischen den Rammsonden, Bodengruppe SE, über Grundwasser | 36 |
| 7.4 | Festigkeitsgrenzen in N_{10} der verschiedenen Rammsonden, Bodengruppe SE, über Grundwasser | 37 |
| 7.5 | Umrechnungsfaktoren zwischen den Rammsonden, Bodengruppe SE, im Grundwasser | 37 |
| 7.6 | Festigkeitsgrenzen in N_{10} der verschiedenen Rammsonden, Bodengruppe SE, im Grundwasser | 37 |
| 7.7 | Schätzwerte des Reibungswinkels von Sand aus dem Spitzendruck | 38 |
| A.1 | Zusammenhänge zwischen Sonden laut BAW (1990) | 42 |
| A.2 | Zusammenhänge zwischen Sonden laut SCHUMACHER (1999) | 43 |

Abkürzungsverzeichnis

CPT Drucksondierung

DPL-5 Leichte Rammsondierung, 5 cm² Spitzenfläche

DPL-10 Leichte Rammsondierung, 10 cm² Spitzenfläche

DPM Mittelschwere Rammsondierung, 15 cm² Spitzenfläche

DPH Schwere Rammsondierung, 15 cm² Spitzenfläche

N₁₀ Schlagzahl je 10 cm Eindringung

RKS Rammkernsondierung

Inhaltsverzeichnis

| | | |
|----------|--------------------------------------------------------|-----------|
| 1 | Einleitung | 1 |
| 1.1 | Kontext, Grundlagen und Motivation | 1 |
| 1.2 | Ziele dieser Arbeit | 2 |
| 2 | Stand der Forschung | 3 |
| 3 | Untersuchungsgebiete | 5 |
| 3.1 | Vorbelastungsschüttung Baakenhafen Nord | 5 |
| 3.2 | Verfüllung Baakenhafen | 6 |
| 3.3 | Spülfeld Moorburg-Ellerholz | 6 |
| 3.4 | Baggergutdeponie Francop | 6 |
| 4 | Material und Methoden | 8 |
| 4.1 | Gerätebeschreibung | 8 |
| 4.1.1 | Rammsonden | 8 |
| 4.1.2 | Drucksonde | 9 |
| 4.1.3 | Rammkernsonde | 10 |
| 4.2 | Feldversuche | 10 |
| 4.3 | Laborversuche | 11 |
| 4.4 | Datenaufbereitung | 12 |
| 5 | Ergebnisse | 13 |
| 5.1 | Bodenproben | 13 |
| 5.2 | Streuung und Reproduzierbarkeit | 15 |
| 5.3 | Verhältniszahlen zwischen den Rammsonden | 21 |
| 5.4 | Verhältnis zwischen Drucksonde und Rammsonde | 29 |
| 6 | Diskussion | 31 |
| 6.1 | Bewertung der Ergebnisse | 31 |
| 6.2 | Grenzen der Studie | 34 |
| 7 | Schlussfolgerungen | 35 |
| 7.1 | Umrechnungstabellen und Diagramme | 35 |
| 7.2 | Fazit und Ausblick | 38 |
| | Anhang | 41 |
| A | Tabellen aus der Literatur | 41 |
| B | Bohrprofile und Messwerte | 44 |

1 Einleitung

1.1 Kontext, Grundlagen und Motivation

Im Rahmen geotechnischer Untersuchungen für Bauprojekte werden zur Erkundung des Untergrundes regelmäßig Rammsondierungen als indirekte Aufschlussmethode durchgeführt. Dabei wird eine genormte Sonde durch ein Fallgewicht mit definierter Masse und Fallhöhe in den Boden getrieben und aufgezeichnet, wie viele Schläge jeweils 10 cm Eindringung bewirken. Diese Schlagzahl N_{10} ist – mit gewissen natürlichen und systembedingten Schwankungen – abhängig von der Bodenfestigkeit, die wiederum das Tragverhalten des Bodens, seine Reaktion auf mechanische Belastung, beschreibt (BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU, i.F. BAW, 1997). Ob sie einen direkten Rückschluss auf die Lagerungsdichte erlaubt, wird kontrovers diskutiert. Die Autoren der DIN EN ISO 22476-2:2012-03 vertreten die Meinung, dass die Schlagzahlen der Rammsonden direkt abhängig sind von der Lagerungsdichte des nichtbindigen Bodens. Die BAW (1997) hingegen argumentiert, der Widerstand des Bodens gegen die Eindringung einer Sondenspitze und gegen Grundbruch hänge außerdem auch von der Korngrößenverteilung, ihrer Ungleichförmigkeit und der Kornrauigkeit ab, die Lagerungsdichte könne daher nicht direkt bestimmt werden und sei auch nicht ausreichend, um die Tragfähigkeit eines Bodens zu beschreiben. In der vorliegenden Arbeit sind zur leichteren Lesbarkeit die Begriffe „Lagerungsdichte“, „Verdichtung“ und „Festigkeit“ unter der Bezeichnung „(Boden-)Festigkeit“ zusammengefasst.

Die Bestimmung der Festigkeit eines Bodens hat praktische Relevanz beispielsweise für die Eignung der jeweiligen Bodenschicht zur Gründung von Bauwerken oder für Qualitätskontrollen nach gezielter Bodenverdichtung. Die Rammsonden dienen dabei auch als in der Regel tragbarer, kostengünstiger Ersatz für die Drucksonde, deren Messwerte zwar genauer und zuverlässiger sind, die aber in Anschaffung und Betrieb sehr teuer und in schwierigem Gelände oder beengten Verhältnissen nicht einsetzbar ist.

Die Eigenschaften der Rammsonden sind definiert in DIN EN ISO 22476-2:2012-03. Demgemäß zulässige Sondiergeräte sind die leichte Rammsonde DPL (dynamic probe light) mit einer Sondenspitzenfläche von 10 cm^2 und einer Fallgewichtsmasse von 10 kg, die mittlere Rammsonde DPM (dynamic probe medium) mit einer Fläche von 15 cm^2 und einem Fallgewicht von 30 kg, die schwere DPH (... heavy, 15 cm^2 und 50 kg) sowie die eher ungebräuchliche DPSH (... super heavy, 16 oder 20 cm^2 und 63,5 kg). In der mittlerweile nicht mehr gültigen DIN 4094-3:2002-01 war für die leichte Rammsonde noch eine alternative Spitze mit der Querschnittsfläche 5 cm^2 vorgesehen (DPL-5). Zu dieser ist dort der branchenübliche Erfahrungswert aufgeführt, dass in Sand eine Schlagzahl von 10 Schlägen pro 10 cm einer mittleren Lagerungsdichte entspricht (dies ist die Mindestanforderung zur sicheren Gründung von Bauwerken (nach KOLYMBAS, 2007)). Für die anderen Rammsonden ist ein ähnlicher Erfahrungswert nicht allgemein bekannt. In der DIN 4094-3:2002-01 und im Beiblatt zur DIN liegen Korrelationskurven vor für den Zusammenhang zwischen DPL-5 sowie DPL-10 und DPH, jedoch sind diese in der neuen DIN EN ISO 22476-2:2012-03 nicht mehr vorhanden. Eine Einordnung der mittelschweren Rammsonde DPM fehlt völlig. Andere Quellen geben teils stark von den Angaben der DIN abweichende beziehungsweise stark gestreute empirische Verhältniszahlen zwischen den Sonden an (siehe Kapitel 2).

Im Vorlauf zur Entfernung der DPL-5 aus der Norm wurde z.B. seitens der BAW (1997) die Verfälschung ihrer Schlagzahlen durch Reibung am Gestänge (Mantelreibung) bemängelt, jedoch haben sowohl der

Autor dieser Arbeit als auch weitere Mitarbeiter der Firma HPC hierzu abweichende Beobachtungen in der Feldpraxis gemacht. Resultat all dieser Diskrepanzen ist eine allgemeine Unsicherheit über die Interpretation von Sondierungsergebnissen, teilweise Unverständnis über die Unzulässigkeit der DPL-5. Aus diesem Grund wurde der Entschluss gefasst, eine systematische Vergleichsstudie der verschiedenen Rammsonden durchzuführen und bei dieser Gelegenheit den Versuch zu unternehmen, Zusammenhänge mit bestimmten Bodenparametern qualitativ und quantitativ zu bewerten. Mit Hilfe von Rammkernsondierungen wurden zu diesem Zweck Bodenproben gewonnen und im Labor untersucht. Auch die Korrelation der Rammsonden-Schlagzahlen zu den Messwerten der Spitzendrucksonde sollte überprüft werden.

1.2 Ziele dieser Arbeit

Folgende Fragen sollen mit der vorliegenden Arbeit beantwortet werden:

- Wie groß ist die Streuung der Schlagzahlen von Rammsonden in ein und dem selben Boden (aufgrund natürlicher oder systembedingter Schwankungen)?
- In welchem Verhältnis stehen die Schlagzahlen der verschiedenen Rammsonden zueinander und zu den Messwerten der Drucksonde?
- Ändert sich o.g. Verhältnis in Abhängigkeit von der Festigkeit des Bodens, der Korngrößenverteilung, von Wassergehalt bzw. Grundwasserführung, von der Kornform oder Kornrauigkeit?
- Erlauben etwaige Korrelationen mit vorgenannten Einflussgrößen eine Aussage zur Kontroverse Lagerungsdichte/Festigkeit (siehe Abschnitt 1.1)?
- Hat die Arbeitstiefe einen Einfluss auf die Reproduzierbarkeit der Messungen oder auf die Verhältniszahlen zwischen den Rammsonden?
- Was bedeuten die gewonnenen Erkenntnisse für die praktische Anwendung der untersuchten Geräte?

2 Stand der Forschung

Wie bereits in Abschnitt 1.1 erwähnt, gibt es zu den Verhältnissen der Schlagzahlen verschiedener Rammsonden zueinander mehrere nicht übereinstimmende Quellen. Die folgend genannten Verhältnisse zwischen den Rammsonden aus der Literatur sind in Tabelle 2.1 zusammengefasst.

Tabelle 2.1: Literaturwerte für die Verhältnisse zwischen den Schlagzahlen der Rammsonden

| N_{10} (DPL-10) / N_{10} (DPL-5) | N_{10} (DPM) / N_{10} (DPL-5) | N_{10} (DPH) / N_{10} (DPL-5) | Quelle |
|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-------------------|
| 1,54 | fehlt | 0,6 | BAW (1990) |
| 2 | 0,6 | 0,5 | SCHUMACHER (1999) |
| 1,5 | fehlt | 0,5 | DIN 4094-3 |
| 1,5 | fehlt | 0,5 | EAU (2012) |

Im Beiblatt zur DIN 4094-3:2002-01 finden sich Korrelationskurven zwischen den einzelnen Rammsonden. Ein Umrechnungsfaktor wird angegeben als N_{10} (DPL-5) = 2 N_{10} (DPH). Ebenso liegt dort ein empirischer Zusammenhang zwischen DPL-10 und DPH vor, er beträgt N_{10} (DPL-10) = 3 N_{10} (DPH). Daraus rechnerisch ableitbar ist ein Verhältnis der Schlagzahlen N_{10} (DPL-5) : N_{10} (DPL-10) = 1,5. Aus den dargestellten Diagrammen lässt sich jedoch, je nach mittlerer Schlagzahl, eine Spannweite der Korrelation von 1,3 bis 2,5 ablesen (beispielhaft Abbildung 2.1 - hier wird davon ausgegangen, die Lagerungsdichte direkt bestimmen zu können, eine Annahme, der die BAW (1997) widerspricht, siehe Abschnitt 1.1).

Dem Autor lag weiterhin eine Umrechnungstabelle der Bundesanstalt für Wasserbau vor (BAW (1990), siehe Abschnitt 7.2), die folgende Verhältnisse angibt: DPL-10:DPL-5 \approx 1,54; DPH:DPL-5 \approx 0,6; CPT:DPH \approx 1. Dies entspricht den Angaben aus BAW (1997). In letzterer Quelle wird zusätzlich der Streubereich des Verhältnisses zwischen DPL-10 und DPL-5 für Sande geringer bis mittlerer Festigkeit mit 1,5-2,5 bei einem Mittelwert von 2,0 angegeben. Ebenda wird außerdem für die Korrelation zwischen Drucksonde und schwerer Rammsonde das empirische Verhältnis CPT:DPH \approx 1,28 angegeben und zur Sicherheit empfohlen, mit einem Verhältnis von 1:1 zu rechnen. Weiterhin wird dort argumentiert, dass aufgrund des geringeren Unterschiedes zwischen Spitzen- und Gestängedurchmesser die Schlagzahlen der leichten Rammsonde DPL-5 durch Reibungskräfte mit zunehmender Tiefe stark verfälscht würden und daher unzuverlässig seien.

SCHUMACHER (1999) stellte rechnerisch für Ramm- und Drucksonden eine Vorhersage für den Zusammenhang zwischen Schlagzahl und Spitzendruck auf. Daraus lassen sich Verhältnisse wie folgt berechnen:

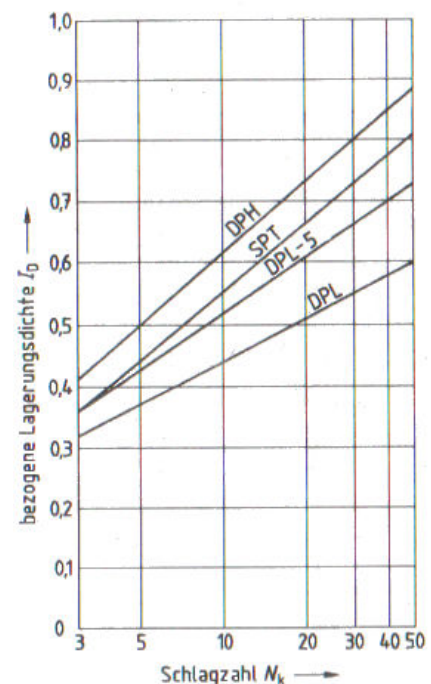


Abbildung 2.1: Zusammenhang zwischen den Schlagzahlen verschiedener Rammsonden in enggestuftem Sand unter dem Grundwasserspiegel laut Beiblatt 1 zur DIN 4094-3:2002-01

DPL-10:DPL-5 \approx 2; DPM:DPL-5 \approx 0,6; DPH:DPL-5 \approx 0,5. Die vollständige Tabelle ist ebenfalls im Abschnitt 7.2 abgedruckt.

Vom ARBEITSAUSSCHUSS „UFEREINFASSUNGEN“ DER HTG E.V. (EAU, 2012) werden Mindestschlagzahlen bzw. -widerstände von DPL-5, DPL-10, DPH und CPT für bestimmte Verdichtungsansprüche genannt. Aus diesen lassen sich folgende Verhältnisse berechnen: DPL-10:DPL-5 = 1,5; DPH:DPL-5 = 0,5; CPT:DPH = 1; gültig für gleichförmigen Mittelsand und ungleichförmigen Feinsand.

3 Untersuchungsgebiete

Zur Erlangung möglichst reproduzierbarer Ergebnisse wurden die vergleichenden Untersuchungen in gleichmäßigen, mächtigen Sandkörpern durchgeführt. Da natürliche Sandböden im Hamburger Raum vielerorts Einlagerungen von Till (lokal als Geschiebemergel und -lehm bezeichnet) beinhalten (KAUSCH, o.J.) und ein möglichst vorhersehbarer Bodenaufbau gesucht wurde, fiel die Wahl auf anthropogen aufgefüllte Böden bzw. vorübergehende Sandablagerungen im Hamburger Stadtgebiet. Die Auswahlkriterien lauteten wie folgt:

- Bodenart Sand, möglichst gleichmäßig (ohne Kieslagen o.Ä.)
- Mächtigkeit mindestens 5 Meter
- Keine bindigen Deckschichten oder Zwischenlagen
- Anfahrt mit Kfz möglich
- Regelmäßiger Zugang innerhalb des Versuchszeitraumes möglich

Im Folgenden werden die einzelnen Untersuchungsgebiete vorgestellt.

3.1 Vorbelastungsschüttung Baakenhafen Nord

Im Hamburger Stadtentwicklungsgebiet HafenCity wird der künstlich aufgefüllte Boden der Hafenanlagen von primärem, organikreichem Schluff, im norddeutschen Raum bekannt unter der lokal üblichen Bezeichnung „Klei“, unterlagert. Dieser Weichboden ist stark setzungsempfindlich und daher zur Gründung von Verkehrsflächen und Gebäuden im Allgemeinen ungeeignet (HENNINGSEN, 2013). Zur Bauvorbereitung von Verkehrsflächen wurde daher örtlich eine Vorverdichtung des Kleis mit Hilfe einer Vorbelastungsschüttung vorgenommen (Abbildung 3.1). Dabei werden mehrere Meter Sand aufgehäuft und lagenweise mit Walzen verdichtet. Unter dieser Zusatzlast entwässert nun der Weichboden teilweise und wird komprimiert, bis seine Konsistenz ausreicht, um die zukünftige Last mit verträglichen Restsetzungen zu tragen (AMANN et al. 2011). Nach einigen Monaten kann die Schüttung abgetragen und durch die geplante Verkehrsfläche ersetzt werden. Die zum Zeitpunkt der Studie im Baugebiet nördlich des Baakenhafens vorhandene Vorbelastungsschüttung hatte eine Mächtigkeit von etwa 10 Metern und war damit für diese Studie geeignet. Der Zugang zur Baustelle wurde freundlicherweise ermöglicht durch die Eggers Umwelttechnik GmbH.



Abbildung 3.1: Vorbelastungsschüttung Baakenhafen Nord

3.2 Verfüllung Baakenhafen



Abbildung 3.2: Verfüllung Baakenhafen

Das ebenfalls in der HafenCity gelegene Hafenbecken „Baakenhafen“ wurde im Zeitraum der Studie zwecks späterer Bebauung teilweise mit Sand verfüllt (Abbildung 3.2). Über den perimarin Ablagerungen des Hafenbeckens liegen also auch dort mehr als zehn Meter Sand ohne Zwischenlagen oder Deckschichten, womit ebenfalls die genannten Bedingungen erfüllt sind. Die Geländeoberfläche befand sich zum Zeitpunkt der Feldversuche auf 2 m ü. NN. Das Wasser des tidebeeinflussten Hamburger Hafens wurde daher ab ca. 2 Meter unter Geländeoberkante angetroffen. Der Einfluss von Grundwasser auf die Schlagzahlen der Rammsonden ist eine zentrale Frage dieser Studie, so dass dieses Untersuchungsgebiet von besonderem Interesse war. Den Zugang ermöglichte freundlicherweise das Ingenieurbüro Burmann, Mandel + Partner.

3.3 Spülfeld Moorburg-Ellerholz



Abbildung 3.3: Spülfeld Moorburg-Ellerholz, oberes Ende (Spülkopf)

Aus dem Hamburger Hafen wird regelmäßig der durch *tidal pumping* (LI et al. 2014) elbaufwärts transportierte Sand ausgebaggert. Zur Weiterverwendung als Baumaterial wird dieser Sand als Suspension auf von der Hamburg Port Authority betriebene Spülfelder transportiert (Abbildung 3.3), wo die Kornfraktionen nach dem Prinzip der Stromklassierung von grob nach fein sortiert nacheinander aus dem Wasserstrom sedimentieren (PATZOLD, GRUHN und DREBENSTEDT, 2008). Diese Ablagerungen erreichen bei Ende des Spülbetriebes eine Mächtigkeit von 7 bis 10 Metern, wonach das Feld zur Entwässerung einige Wochen ruht. Der Sand ist locker bis sehr locker gelagert und stellt damit ein Extrem dar, das in natürlich gewachsenen Böden nur selten vorkommt. Zur umfassenden Betrachtung des Einflusses der Bodenfestigkeit auf die Sondierergebnisse war also auch dieser Zustand von Interesse.

3.4 Baggergutdeponie Francop

Bei der Ausbaggerung des Hamburger Hafens wird nicht nur Sand gewonnen, sondern auch perimarin Schlick. Dieser ist als Baumaterial ungeeignet (siehe Abschnitt 3.1) und muss daher deponiert werden. Nach diversen Vorbehandlungsschritten wird das Material u. a. in der ebenfalls von der HPA betriebenen Baggergutdeponie Francop untergebracht (Abbildung 3.4). Diese Deponie ist von randlichen Stützkörpern aus verdichtetem Sand umgeben, welche wiederum als geeignet für die vorliegende Studie eingeschätzt wurden. Mehrere Flächen auf den Stützkörpern wurden vorausgewählt und zunächst mittels Rammkernsondierung erkundet. Dabei stellte sich allerdings heraus, dass an den meisten dieser Punkte ei-

ne teilweise 1,75 m mächtige Rekultivierungsschicht aus kalkigem, kiesführendem, stark schluffigem Sand (anthropogen umgelagertes pleistozänes Moränenmaterial, regionale Bezeichnung: Geschiebemergel) aufgebracht worden war. Aufgrund der großen Haftreibung, die eine solche bindige Schicht am Gestänge der Rammsonden verursacht, sind die gewinnbaren Messwerte nicht zuverlässig (BAW, 1997). Eine Handvorschachtung jeder einzelnen Sondierung wurde für zu zeitaufwändig befunden, so dass nur eine der Untersuchungsflächen am Südrand der Deponie, auf der keine bindige Schicht angetroffen wurde, zur systematischen Sondierung ausgewählt wurde.



Abbildung 3.4: Deponie Francop aus der Luft, Blickrichtung Westen. REGE HAMBURG, 2017

4 Material und Methoden

4.1 Gerätebeschreibung

4.1.1 Rammsonden

Die Rammsonden sind Geräte zur Ermittlung der Festigkeit nichtbindiger Böden in situ über den Widerstand des Bodens gegen die Eindringung einer Sondenspitze. Ihre Eigenschaften sind in der DIN EN ISO 22476-2:2012-03 festgelegt. Eine kegelförmige Metallspitze wird über ein verlängerbares Gestänge mittels wiederholter Schläge eines Fallgewichtes in den Boden getrieben. Die Schlagzahl je 10 cm Eindringung wird protokolliert und erlaubt einen Rückschluss auf die Bodenfestigkeit. Die Fallhöhe des Gewichtes beträgt bei allen hier verwendeten Rammsonden 50 cm, der Winkel der Kegelspitze beträgt 90°. Unterschiede bestehen in der Masse des Fallgewichtes, der Spitzengröße und dem Gestängedurchmesser. Sie werden i. F. beschrieben und sind in Tabelle 4.1 aufgelistet. Die Rammsonde ermöglicht weniger genaue Aussagen über die Bodenfestigkeit als die Drucksonde (siehe Abschnitt 4.1.2), ist aber in Anschaffung und Betrieb sehr viel kostengünstiger. Sie wird daher verwendet, wenn eine qualitative Betrachtung der Bodenfestigkeit ausreicht oder eine Drucksonde aufgrund schwierigen Geländes oder beengter Verhältnisse nicht eingesetzt werden kann.

Leichte Rammsonde



Die leichte Rammsonde (Abbildung 4.1), auch unter dem Namen „Künzelstab“ oder der Abkürzung **DPL** (für *dynamic probe light*) bekannt, besitzt ein 10 kg schweres Fallgewicht. Die Rammspitze hat eine Fläche von 10 cm² (einen Durchmesser von 35,7 mm), der Gestängedurchmesser beträgt 22 mm. Nach der veralteten DIN 4094 war eine Spitzenfläche von 5 cm² (Ø 25,2 mm) ebenfalls zulässig. In der Praxis wird letztere auch heute noch oft eingesetzt. Grund hierfür sind die branchenweit jahrzehntelang gesammelten Erfahrungen mit der 5 cm²-Spitze und die bis dato unsichere Quantifizierung der Korrelation zwischen den Schlagzahlen dieser und der 10 cm²-Spitze. Im Folgenden wird

Abbildung 4.1: Sondierung mit der leichten Rammsonde (links pneumatisch, rechts handbetrieben)

die leichte Rammsonde mit 10 cm²-Spitze als **DPL-10**, jene mit 5 cm²-Spitze als **DPL-5** bezeichnet.

Für die Felduntersuchungen im Rahmen dieser Studie wurde eine pneumatische Rammsonde der Firma Geotechnik Dunkel mit der Modellbezeichnung PR10 eingesetzt. Nur einmalig nach einem technischen Defekt wurde eine Sondierung mit einer handbetriebenen Ramme (klassischer Künzelstab) zu Ende gebracht.

Mittelschwere Rammsonde

Die mittelschwere Rammsonde oder **DPM** (für *dynamic probe medium*) besitzt ein Fallgewicht mit einer Masse von 30 kg, einen erhöhten Gestängedurchmesser von 32 mm und eine Spitzenfläche von 15 cm² (Ø 43,7 mm). In dieser Studie wurde die pneumatische Rammsonde PR35 der Firma Dunkel verwendet (Abbildung 4.2).



Abbildung 4.2: Sondierung mit der PR35, hier mit Zusatzgewicht als DPH

Schwere Rammsonde

Die schwere Rammsonde oder **DPH** (für *dynamic probe heavy*) entspricht der mittelschweren Rammsonde mit einem auf 50 kg erhöhten Fallgewicht. Bei der vorliegenden Studie wurde dafür ebenfalls die oben genannte PR35 mit einem angebrachten Zusatzgewicht von 20 kg Masse verwendet.

Tabelle 4.1: Abmessungsunterschiede zwischen den Rammsonden; die Fallhöhe beträgt immer 50 cm

| Rammsonde | Fallgewicht [kg] | Spitzenfläche [cm ²] | Ø Spitze [mm] | Ø Gestänge [mm] |
|-----------|------------------|----------------------------------|---------------|-----------------|
| DPL-5 | 10 | 5 | 25,2 | 22 |
| DPL-10 | 10 | 10 | 35,7 | 22 |
| DPM | 30 | 15 | 43,7 | 32 |
| DPH | 50 | 15 | 43,7 | 32 |

4.1.2 Drucksonde

Die Drucksonde oder CPT (für *cone penetration test*) treibt mittels Hydraulik eine mit Druck- und Reibungssensoren ausgestattete kegelförmige Spitze mit konstanter Geschwindigkeit in den Boden und zeichnet die auftretenden Kräfte auf. Das erforderliche Gegengewicht wird durch einen Lastwagen oder ein großes Raupenfahrzeug aufgebracht, in dem das Gerät verbaut ist (Abbildung 4.3). Die Sensoren in der Spitze ermöglichen hierbei eine sehr genaue Feststellung der auftretenden Kräfte und damit der Bodenfestigkeit, jedoch sind Anschaffung und Betrieb eines solchen Fahrzeuges mit entsprechenden Kosten verbunden. Der erforderliche Zufahrtsweg und begrenzte Geländegängigkeit schränken die Einsatzmöglichkeiten ein. Für diese Studie standen im Untersuchungsgebiet „Verfüllung Baakenhafen“ die Messergebnisse einer Drucksonde der Firma Fugro zur Verfügung.



Abbildung 4.3: Drucksonde der Firma Fugro

4.1.3 Rammkernsonde

Zur schnellen Gewinnung von Bodenproben ohne Anlage einer Schürfgrube oder Einsatz eines großen Bohrfahrzeuges dient die Rammkernsonde. Es handelt sich hierbei um ein Rohr mit seitlichem Entnahmeschlitz, das, ggf. mittels Verlängerungsgestänge, von einem Brennkraft- oder Elektrohammer in den Boden getrieben wird und einen Bohrkern aussticht. Für die vorliegende Studie stand eine 36 mm-Rammkernsonde nebst Gestänge und ein Elektrohammer nebst Stromerzeugern zur Verfügung (Abbildung 4.4).

4.2 Feldversuche



Abbildung 4.4: Rammkernsondierung am Standort Deponie Francop

In den einzelnen Untersuchungsgebieten wurden nach Zugänglichkeit und Geländeneigung ein oder zwei Untersuchungsgebiete festgelegt. In jedem dieser Bereiche wurde zunächst eine Rammkernsondierung vorgenommen, um den Schichtaufbau des Untergrundes auf Eignung gemäß der in Kapitel 3 festgelegten Voraussetzungen zu prüfen und Proben zur Analyse der mechanischen Eigenschaften zu gewinnen (Abbildung 4.4). In direkter Nähe dieser Bohrungen (1-2 m Umkreis bei 0,5 m Mindestabstand) wurden sodann mit jeder Rammsonde und allen Spitzengrößen Sondierungen ausgeführt und die auftretenden Schlagzahlen je 10 cm (N_{10}) protokolliert. Nach Möglichkeit wurde jede Sondierung je Untersuchungsgebiet dreimal ausgeführt. Die Anordnung der Sondierungen ist am Beispiel des Untersuchungsgebietes Baakenhafen dargestellt in Abbildung 4.5. Aufgrund der begrenzten Zeit, die zur Erstellung dieser Arbeit zur Verfügung stand, wurde die Sondiertiefe auf 5 Meter festgelegt, obwohl die mittlere und schwere Rammsonde durchaus regelmäßig auch in größeren Tiefen eingesetzt werden. Diese Einschränkung wurde zur Ermöglichung einer höheren Wiederholungszahl in Kauf genommen.

Im Untersuchungsgebiet **Baakenhafen Nord** war zeitlich nur die Ausführung einer Sondierung pro Gerät möglich, da die Schüttung zeitnah abgetragen werden sollte. Auch wurde hier mit der leichten Rammsonde aufgrund einer mit dieser nicht durchdringbaren, hochverdichteten Lage nur eine Tiefe von 3,2 m erreicht.

Der Untersuchungsbereich im teilverfüllten **Baakenhafen** wurde in nächster Nähe zur zeitgleich mit den ersten Rammsondierungen ausgeführten Drucksondierung gewählt (ca. 5 Meter Abstand), um einen Bezug zwischen den Schlagzahlen und Spitzendruckwerten herstellen zu können.

Auf dem **Spülfeld Ellerholz** wurden aufgrund der erwarteten unterschiedlichen Korngrößenverteilung infolge der gradierten Ablagerung (siehe Abschnitt 3.3) zwei Messbereiche gewählt: Bereich 1 an der Position des Spülkopfes, an dem die Sandsuspension aus dem Transportrohr fließt; Bereich 2 etwa 50 m in Abstromrichtung am Rand des Spülfeldes.

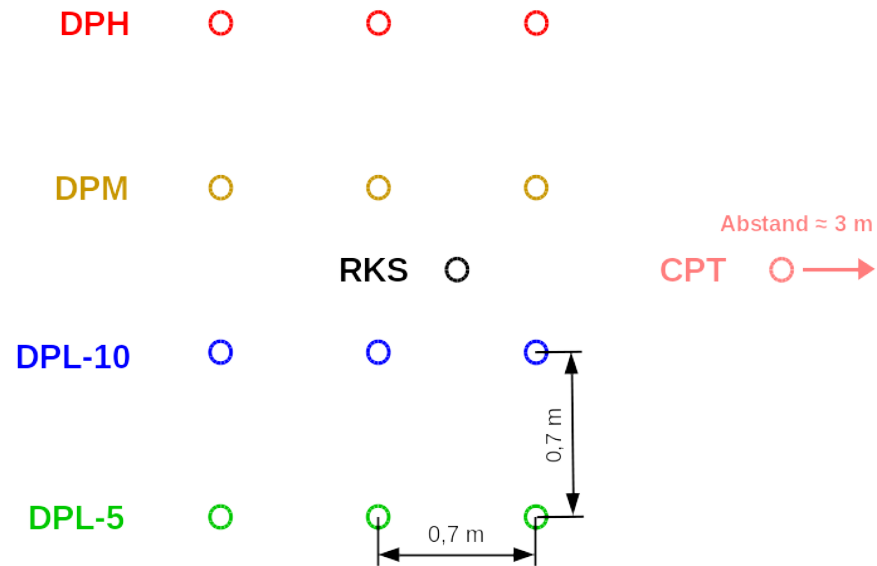


Abbildung 4.5: Anordnung der Sondierungen im Gelände am Beispiel Baakenhafen. DPL-5/10: Leichte Rammsondierung, 5/10-cm²-Spitze; DPM: Mittelschwere Rammsondierung; DPH: Schwere Rammsondierung; RKS: Rammkernsondierung; CPT: Spitzendrucksondierung

Im Bereich der **Baggergutdeponie Francop** wurde lediglich ein Teil des südlichen Randstützkörpers für geeignet befunden. Andere zunächst in Frage gekommene Flächen waren aufgrund von Bewuchs oder Geländeneigung zu schwer zugänglich oder enthielten teils mächtige bindige Schichten (Rekultivierungsschicht), wie mit der Rammkernsondierung festgestellt wurde. Auf dem südlichen Randstützkörper konnten zwei Untersuchungsbereiche in einigem Abstand festgelegt werden, jedoch wurde hier in Bereich 2 die Zieltiefe aufgrund sehr hoher Bodenfestigkeit nur mit der schweren Rammsonde erreicht. Die DPL-10 drang nur bis in 1,2 m Tiefe vor. Die hier und auch in Bereich 1 sehr große Festigkeit des Bodens führte zu einem sehr langsamen Arbeitsfortschritt, erhöhtem Verschleiß inklusive Ermüdungsbrüchen an den Rammgeräten und am Ende zu Zeit- und Ersatzteilmangel, der nur eine Ausführung von zwei Sondierungen pro Bereich und Gerät ermöglichte.

4.3 Laborversuche

Die mittels Rammkernsondierung gewonnenen Bodenproben wurden im geotechnischen Labor der HPC AG kornanalytisch angesprochen und klassifiziert. Der Wassergehalt wurde gemäß DIN EN ISO 17892-1:2015-03 bestimmt. Die Korngrößenverteilung jeder Probe wurde durch Trockensiebung bzw. für schluffige Proben durch Nasssiebung gemäß DIN EN ISO 14688-1:2013-12 ermittelt. Gemäß der Korngrößenverteilung erfolgte die Zuordnung in Bodengruppen nach DIN 18196:2011-05. Stichprobenartig wurde im Institut für Geologie der Universität Hamburg unter einem Binokular die Kornform und Kornrauigkeit nach der Skala aus SMOLTCZYK (2009) visuell untersucht.

4.4 Datenaufbereitung

Für jeden 0,1 m - Tiefenabschnitt eines Untersuchungsbereiches wurden die Schlagzahlen aller Sondierungen gleicher Größe tiefengleich gemittelt und die Verhältnisse der mittleren Schlagzahlen jedes Gerätes gegenüber DPL-5 berechnet. Traten lokale Auflockerungen/Hohlräume auf ($N_{10} = 0$), wurde die Schlagzahl des nächsttieferen Intervalls mit $N_{10} > 0$ durch die Anzahl der Null-Schläge-Intervalle + 1 dividiert und auf diese sowie das darunter liegende Intervall verteilt (Beispiel: Schlagzahlabfolge 0; 0; 1 wird als 0,33; 0,33; 0,33 ausgewertet). Lokal auftretende hohe Schlagzahlen durch Steine oder andere Hindernisse wurden belassen. Aufgrund solcher lokaler Unregelmäßigkeiten kamen zwischen DPL-10 und DPL-5 in vier Tiefenintervallen Verhältniszahlen größer 4 zustande. Diese Intervalle wurden von der Auswertung ausgeschlossen.

5 Ergebnisse

5.1 Bodenproben

Die Vorbelastungsschüttung Baakenhafen Nord bestand über die ganze Tiefe aus Sand der Bodengruppe SU (Sand, schluffig) mit der Hauptkomponente Mittelsand. Der Wassergehalt betrug etwa 5-7%.

Das Verfüllungsmaterial im Hafenbecken ist zu etwa gleichen Teilen zusammengesetzt aus Feinsand und Mittelsand, zählt zur Bodengruppe SE (Sand, enggestuft) und hatte zum Zeitpunkt der Untersuchung einen Wassergehalt zwischen 10 und 19% oberhalb des Grundwassers; der Grundwasserspiegel befand sich zum Zeitpunkt der Bohrung bei 2 m unter Gelände.

Auf dem Spülfeld Ellerholz befand sich ebenfalls enggestufter Sand (SE) mit der Zusammensetzung Mittelsand, grobsandig bis stark grobsandig, schwach kiesig. Im Tiefenbereich 3-4 m lagen Mittelsand und Grobsand zu etwa gleichen Teilen vor. Der Wassergehalt betrug ca. 2-4%.

Auch der südliche Randstützkörper der Baggergutdeponie Francop ist zusammengesetzt aus enggestuftem Sand (SE) mit der Hauptkorngröße Mittelsand sowie etwa gleich großen Teilen Fein- und Grobsand als Nebenbodenarten. Der Wassergehalt lag zum Untersuchungszeitpunkt bei etwa 5%.

In Kornform und -rauigkeit unterscheiden sich die ausgewählten Stichproben aus den fünf Untersuchungsgebieten nur unerheblich. Gemäß der Skala im Grundbautaschenbuch (SMOLTCZYK, 2009) ist die Kornform als größtenteils gedrunken, untergeordnet prismoidal, vereinzelt plattig bzw. kugelig zu beschreiben. Die Rauigkeit der Körner kann als überwiegend gerundet, untergeordnet rundkantig, vereinzelt glatt bzw. kantig beschrieben werden. Die Mikrofotos in Abbildung 5.1 verdeutlichen die geringen Unterschiede.

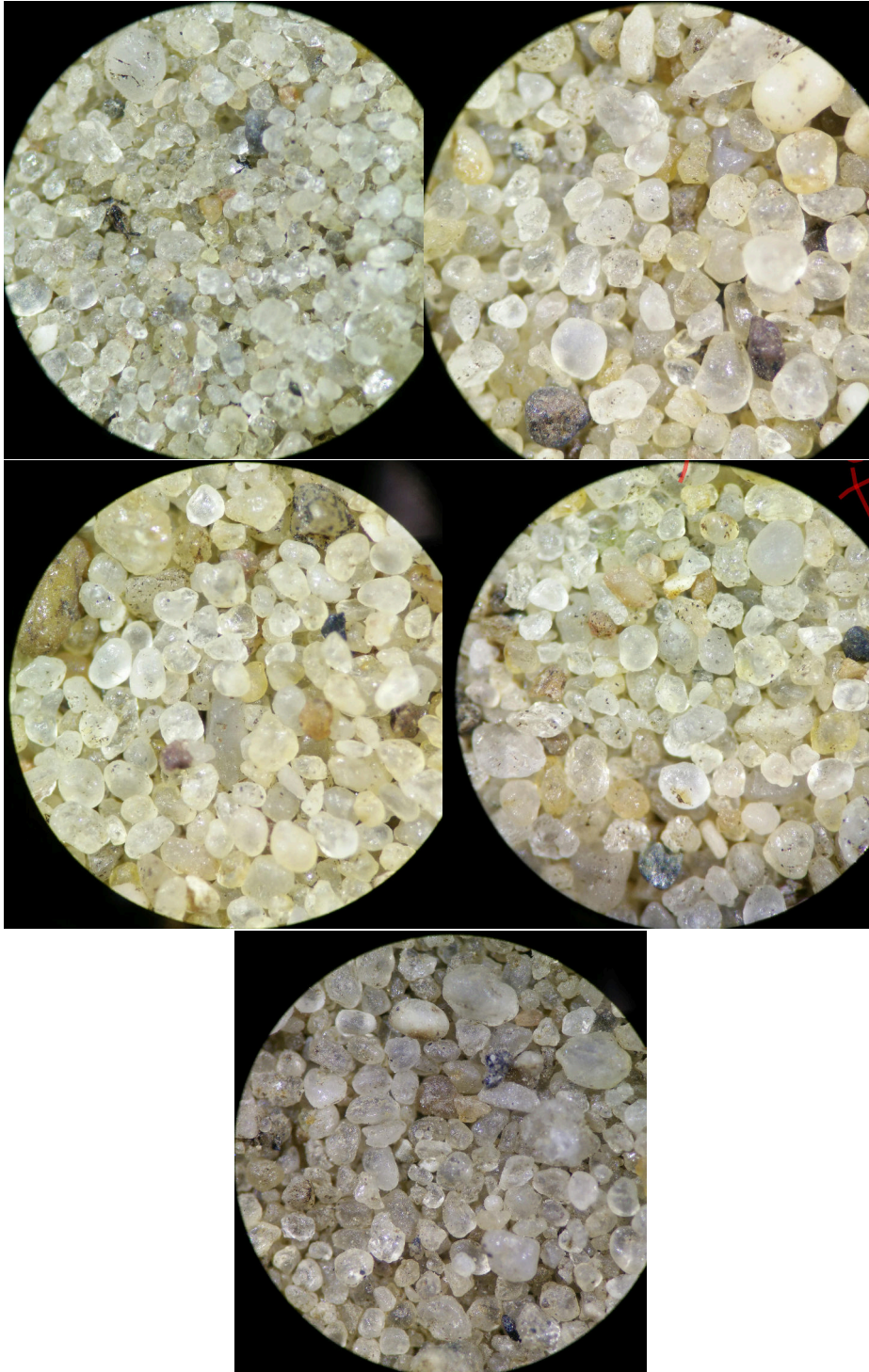


Abbildung 5.1: Mikrofotos ausgewählter Bodenproben. Von links nach rechts, obere Reihe:
 Baakenhafen, 1-2 m Tiefe, 50x; Ellerholz Spülkopf, 3-4 m Tiefe, 40x.
 Mittlere Reihe: Ellerholz Spülkopf, 4-5 m Tiefe, 40x; E. Spülfläche, 4-5 m Tiefe, 40x.
 Untere Reihe: Francop Süd, 3-4 m Tiefe, 40x.

5.2 Streuung und Reproduzierbarkeit

Zur Beurteilung der Streuung der Schlagzahlen wurden nur die fünf Untersuchungsbereiche mit mehr als einer Messreihe betrachtet. Die Streuung unterscheidet sich je nach Bodenfestigkeit; die Festigkeitsklassen wurden aus BAW (1997) übernommen, ihre Grenzen entsprechend Tabelle 5.1 anhand der vorliegenden Ergebnisse korrigiert (Ausnahme: für das Verhältnis zwischen Drucksonde und schwerer Rammsonde wird aufgrund zu kleiner Datenbasis für eine Korrektur die gängige Übertragung 1:1 (BAW, 1997) angewendet).

Tabelle 5.1: Grenzen der Bodenfestigkeitsklassen im Sinne dieser Arbeit, angegeben in MN/m² Spitzenwiderstand und Schlagzahlen der schweren und leichten Rammsonde. Bearbeitet aufgrund eigener Messungen, nach BAW (1997)

| Festigkeit | Spitzenwiderstand CPT [MN/m ²] / N ₁₀ (DPH) | N ₁₀ (DPL-5) |
|-------------|--------------------------------------------------------------------|-------------------------|
| sehr gering | <2 | <4 |
| gering | 2-6 | 4-12 |
| mittel | 6-11 | 12-22 |
| groß | 11-19 | 22-38 |
| sehr groß | >19 | >38 |

Leichte Rammsonde DPL-5

Die Schlagzahlen der DPL-5 zeigen eine mittlere relative Standardabweichung von $22,26 \pm 17,1\%$. Anhand von Abbildung 5.2 ist ersichtlich, dass die Streuung mit zunehmender Bodenfestigkeit geringer wird. Noch deutlicher ist dies bei Betrachtung der einzelnen Festigkeitsklassen nach Tabelle 5.1 von „sehr gering“ bis „sehr fest“ (Abbildung 5.3). Eine Tiefenabhängigkeit der Reproduzierbarkeit ist nach Abbildung 5.4 nicht erkennbar.

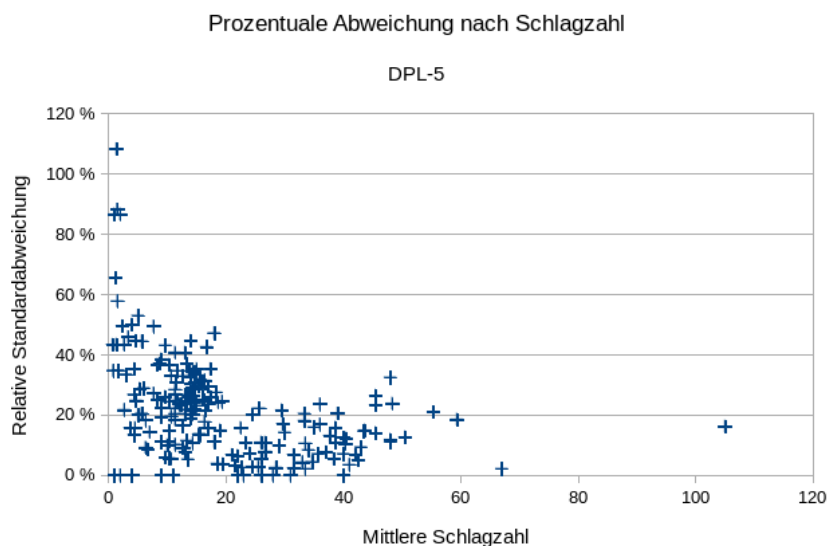


Abbildung 5.2: Streuung der Schlagzahlen der leichten Rammsonde DPL-5 in Abhängigkeit von der mittleren Schlagzahl

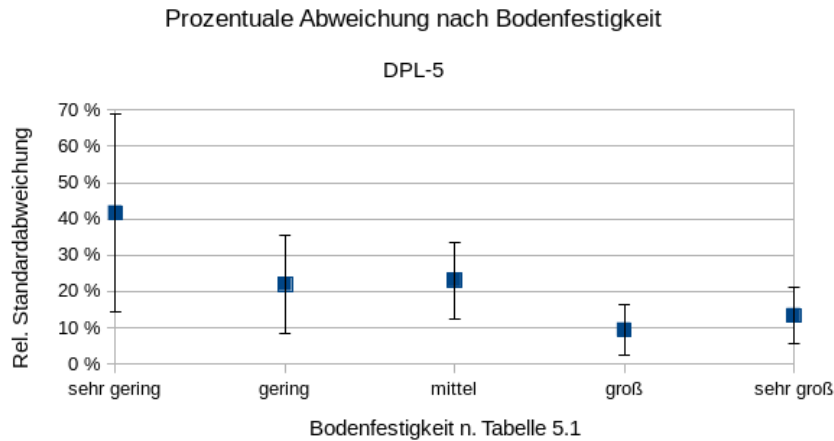


Abbildung 5.3: Streuung der Schlagzahlen der leichten Rammsonde DPL-5 in Abhängigkeit von der Bodenfestigkeit

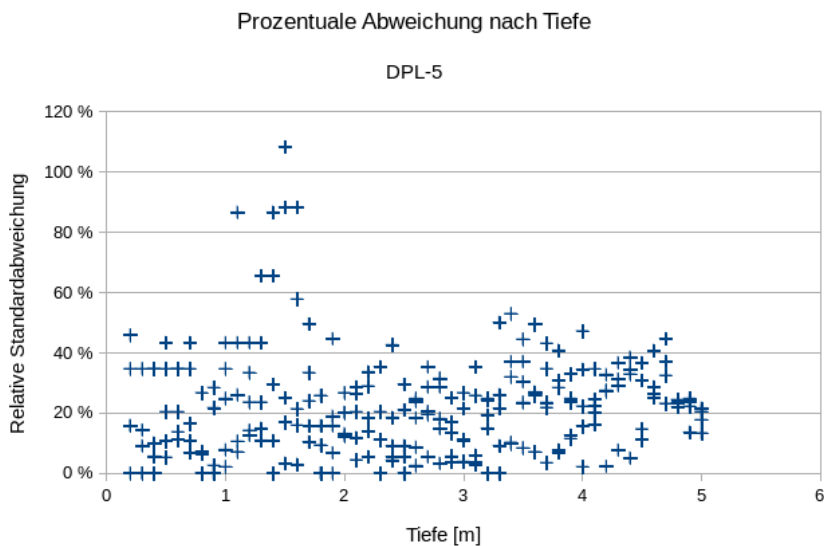


Abbildung 5.4: Streuung der Schlagzahlen der leichten Rammsonde DPL-5 in Abhängigkeit von der Arbeitstiefe

Leichte Rammsonde DPL-10

Im Vergleich zur DPL-5 erreicht die DPL-10 eine etwas niedrigere relative Standardabweichung von $18,81 \pm 11,6\%$ und eine geringere Schwankung dieses Wertes bei unterschiedlichen Bodenfestigkeiten. Eine klare Korrelation mit der Schlagzahl ist in Abbildung 5.5 visuell nicht zu erkennen. Bei Zusammenfassung in Festigkeitsklassen (Abbildung 5.6) ist die größte Schwankung in Böden geringer Festigkeit festzustellen. Die geringste Streuung wird bei großer und sehr großer Festigkeit erreicht.

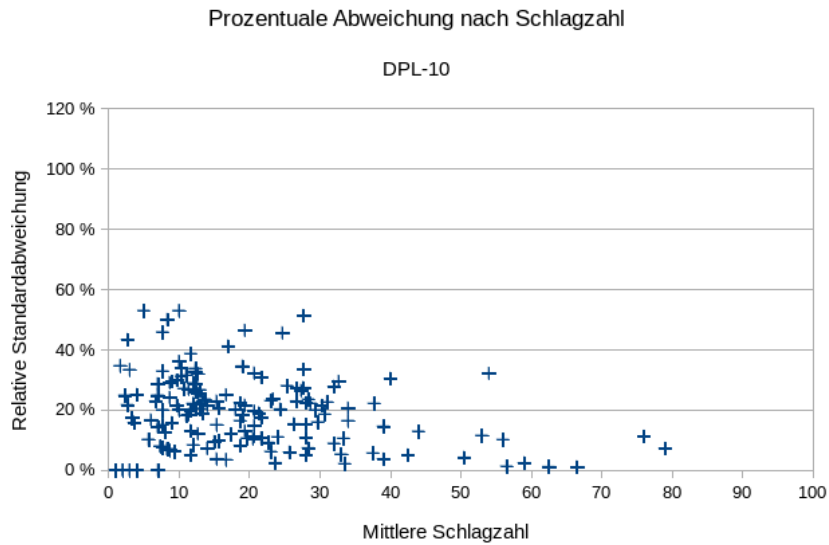


Abbildung 5.5: Streuung der Schlagzahlen der leichten Rammsonde DPL-10 in Abhängigkeit von der mittleren Schlagzahl

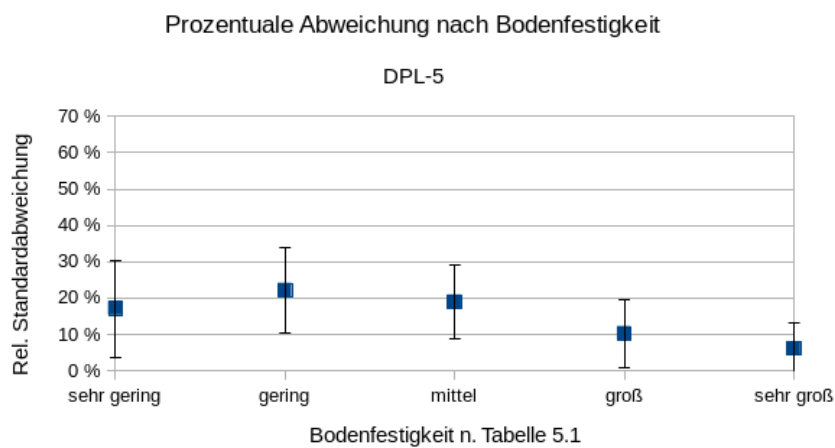


Abbildung 5.6: Streuung der Schlagzahlen der leichten Rammsonde DPL-10 in Abhängigkeit von der Bodenfestigkeit

Bei zunehmender Arbeitstiefe werden die Schwankungen um den Mittelwert größer (Abbildung 5.7). Im Mittel beträgt die relative Standardabweichung nahe der Geländeoberkante 10 % und steigt linear auf 30 % in 5 m Tiefe; diese Korrelation ist signifikant mit einem p -Wert $< 0,001$ der Varianzanalyse.

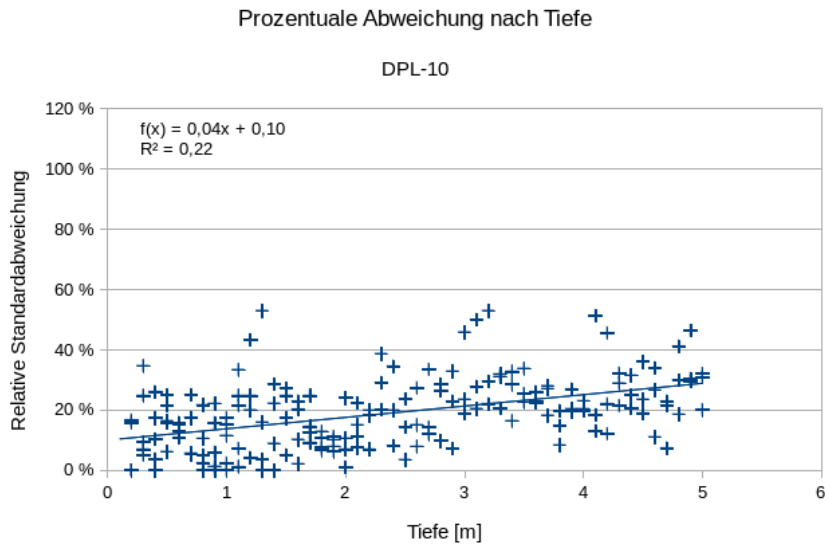


Abbildung 5.7: Streuung der Schlagzahlen der leichten Rammsonde DPL-10 in Abhängigkeit von der Arbeitstiefe; mit Regressionsgerade, Geradengleichung und Bestimmtheitsmaß R^2 .

Mittelschwere Rammsonde DPM

Die mittlere relative Standardabweichung der Schlagzahlen der mittelschweren Rammsonde beträgt $21,52 \pm 17,7\%$. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der DPL-5 mit erhöhter Reproduzierbarkeit bei höherer mittlerer Schlagzahl (Abbildung 5.8) beziehungsweise Bodenfestigkeit (Abbildung 5.9) sowie keiner erkennbaren Tiefenabhängigkeit der Streuung (Abbildung 5.10).

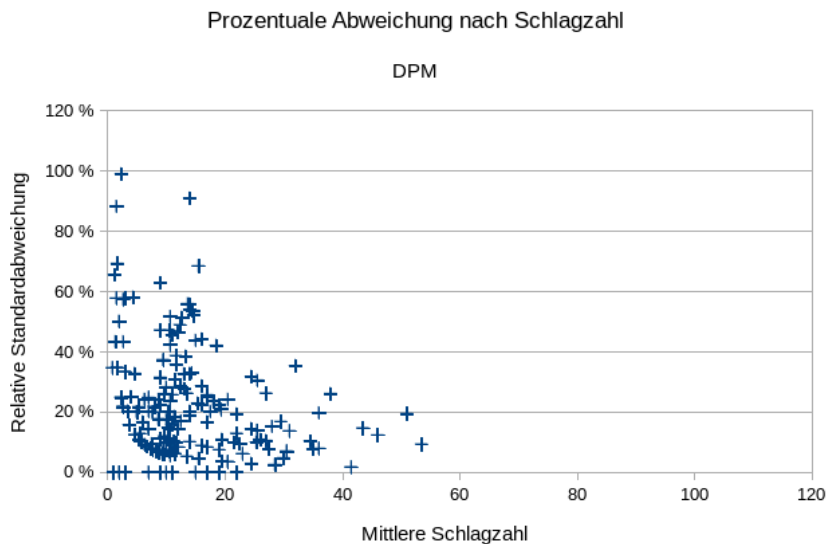


Abbildung 5.8: Streuung der Schlagzahlen der mittelschweren Rammsonde DPM in Abhängigkeit von der mittleren Schlagzahl

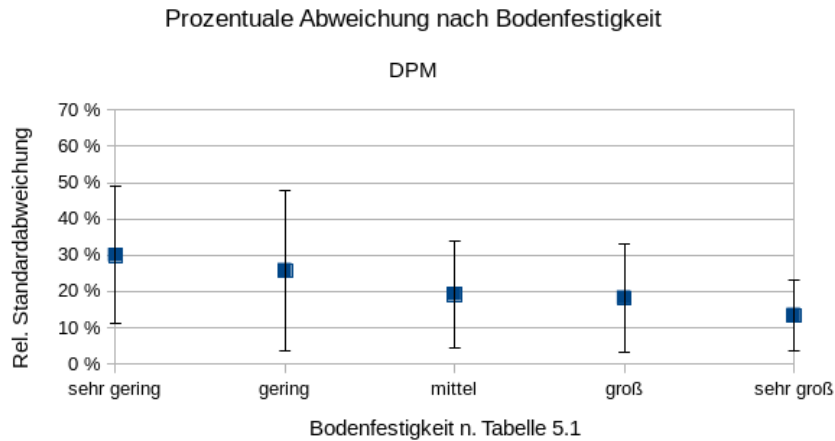


Abbildung 5.9: Streuung der Schlagzahlen der mittelschweren Rammsonde DPM in Abhängigkeit von der Bodenfestigkeit

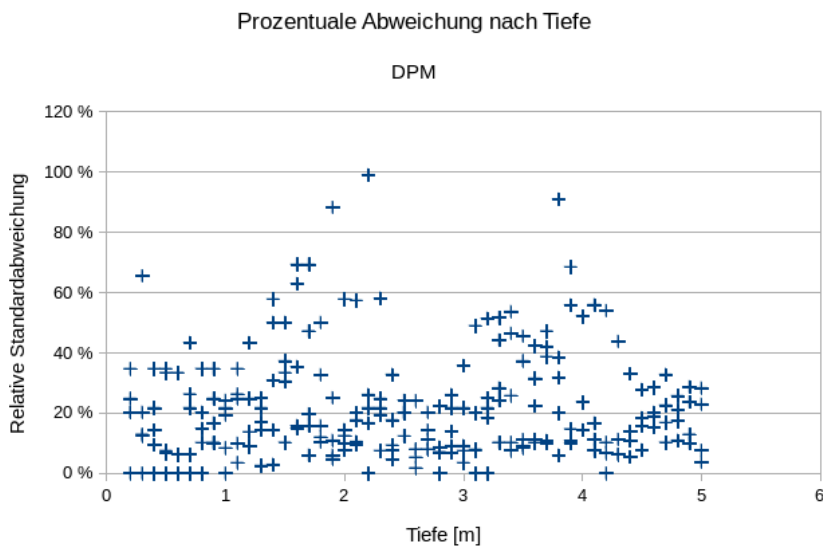


Abbildung 5.10: Streuung der Schlagzahlen der mittelschweren Rammsonde DPM in Abhängigkeit von der Arbeitstiefe

Schwere Rammsonde DPH

Bei der schweren Rammsonde beträgt der Mittelwert der relativen Standardabweichung $20,58 \pm 17,8\%$. Ähnlich wie bei DPL-5 und DPM sinkt die Streuung bei steigender mittlerer Schlagzahl (Abbildung 5.11) bzw. zunehmender Bodenfestigkeit (Abbildung 5.12). Eine Tiefenabhängigkeit der Streuung ist nicht erkennbar (Abbildung 5.13).

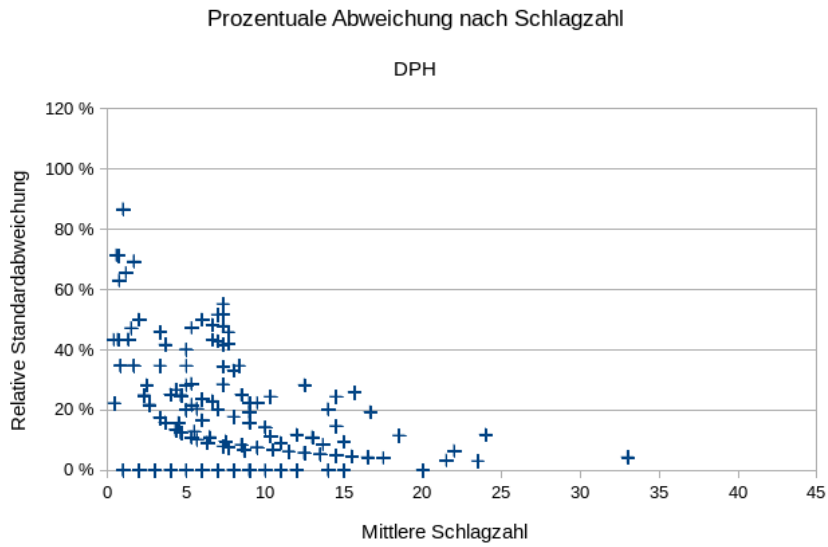


Abbildung 5.11: Streuung der Schlagzahlen der schweren Rammsonde DPH in Abhängigkeit von der mittleren Schlagzahl

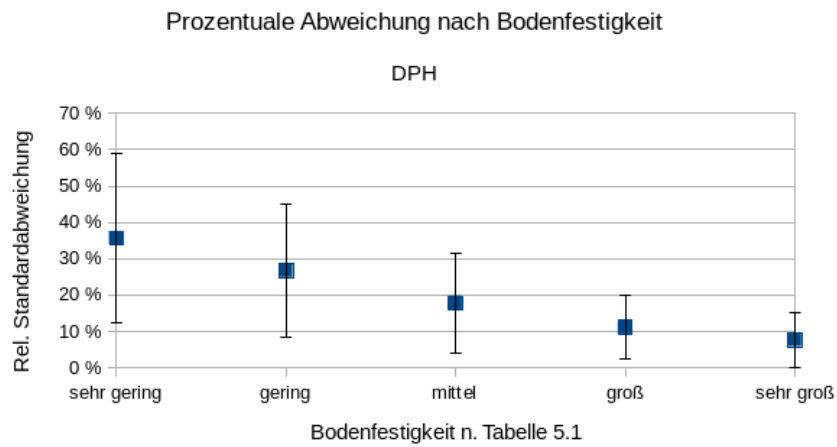


Abbildung 5.12: Streuung der Schlagzahlen der schweren Rammsonde DPH in Abhängigkeit von der Bodenfestigkeit

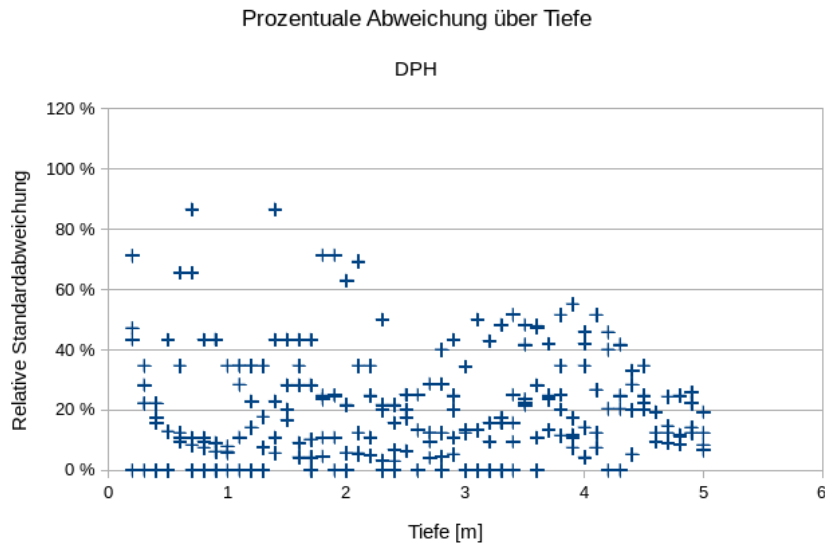


Abbildung 5.13: Streuung der Schlagzahlen der schweren Rammsonde DPH in Abhängigkeit von der Arbeitstiefe

5.3 Verhältniszahlen zwischen den Rammsonden

Nach den DIN-Angaben und der weiteren Literatur (Kapitel 2) wird die Höhe der Schlagzahlen durch die Wassersättigung des Bodens beeinflusst. Die Verhältniszahlen zwischen den Schlagzahlen der verschiedenen Rammsonden wurden daher für Böden unter und über dem Grundwasserspiegel getrennt betrachtet und zusätzlich in Abhängigkeit weiterer Bodeneigenschaften aufgeteilt. Die Verhältniszahlen beziehen sich zur besseren Vergleichbarkeit alle auf die DPL-5, bedeuten also die notwendige Anzahl der Schläge mit der jeweiligen Sonde, um (bei identischen Bodeneigenschaften) die Eindringtiefe eines Schlages mit der DPL-5 zu erreichen. Als Signifikanzniveau für statistische Tests wurden 95% beziehungsweise ein Wahrscheinlichkeitswert p von 0,05 festgelegt.

Verhältnis DPL-10 : DPL-5

Das Verhältnis $N_{10}(\text{DPL-10}) : N_{10}(\text{DPL-5})$ beträgt den gewonnenen Daten zufolge in der ungesättigten Zone $1,57 \pm 0,26$. Abbildung 5.14 zeigt eine negative Korrelation mit der Arbeitstiefe von $-0,1/\text{m}$. Das Verhältnis beträgt demnach im Mittel an der Geländeoberfläche 1,84 und sinkt linear auf 1,34 in einer Tiefe von 5 Metern. Dieser Zusammenhang ist laut Varianzanalyse mit $p < 0,001$ signifikant.

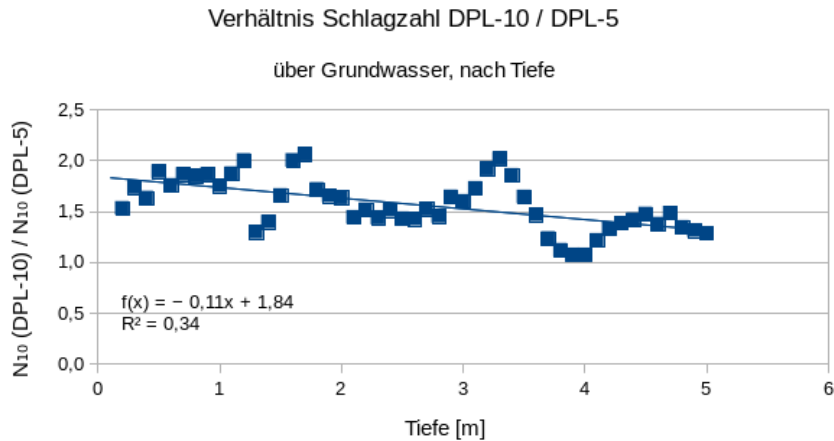


Abbildung 5.14: Verhältnis der Schlagzahlen von DPL-10 und DPL-5 oberhalb des Grundwasserspiegels; mit Regressionsgerade, Geradengleichung und Bestimmtheitsmaß R^2 .

In grundwassergesättigtem Sand beträgt das Verhältnis $N_{10}(\text{DPL-10}) : N_{10}(\text{DPL-5})$ im Mittel $0,83 \pm 0,13$ (siehe Abbildungen 5.15 und 5.16). Eine Korrelation mit der Arbeitstiefe ist im Diagramm visuell zu erkennen und gemäß Varianzanalyse mit einem p -Wert von 0,001 signifikant. Der Zusammenhang beträgt $-0,1/m$, was in 2 m Tiefe einem Verhältnis von 1 entspricht und in 5 m Tiefe einem Verhältnis von 0,7. Eine Extrapolation bis zur Geländeoberkante führt zu einem Verhältnis von 1,2 (NB: Einschränkungen in Abschnitt 6.2).

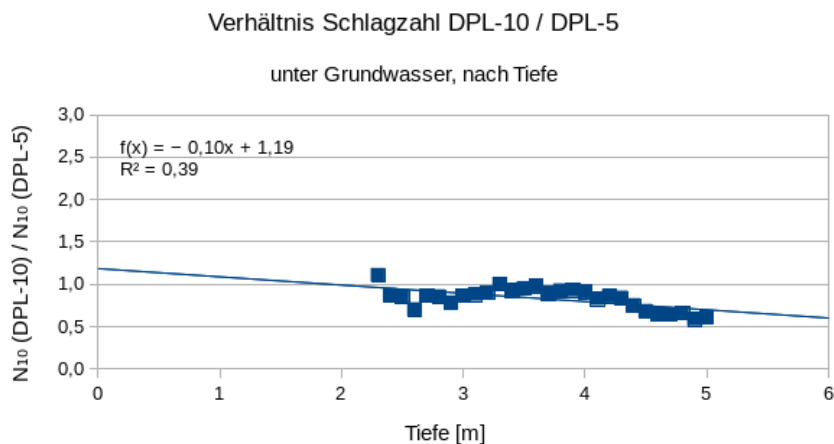


Abbildung 5.15: Verhältnis der Schlagzahlen von DPL-10 und DPL-5 unterhalb des Grundwasserspiegels; mit Regressionsgerade, Geradengleichung und Bestimmtheitsmaß R^2 .

Bei getrennter Betrachtung der Bodengruppen SU (Sand, schluffig) und SE (Sand, enggestuft) lässt sich, wie in Abbildung 5.16 dargestellt, ein Unterschied erkennen. Das Verhältnis für schluffigen Sand ohne Grundwassereinfluss beträgt $1,45 \pm 0,23$; in enggestuftem Sand beträgt es $1,72 \pm 0,61$. Die Differenz zwischen den beiden Bodengruppen ist nach Mann-Whitney-U-Test (MANN und WHITNEY, 1947) signifikant mit $p = 0,007$. Für einen Boden der Gruppe SU lag in den Untersuchungsgebieten kein Grundwassereinfluss vor.

Verhältnis DPL-10 / DPL-5 nach Bodengruppe

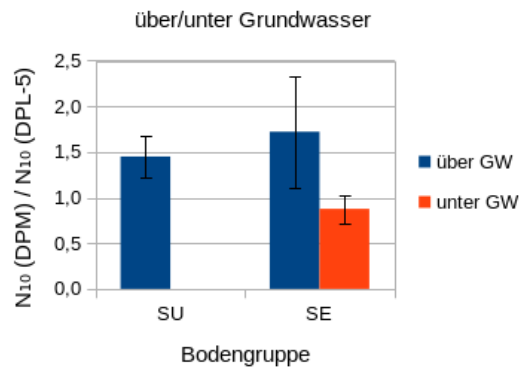


Abbildung 5.16: Verhältnis der Schlagzahlen von DPL-10 und DPL-5, getrennt nach Bodengruppen SU (Sand, schluffig) und SE (Sand, enggestuft) über und unter dem Grundwasserspiegel. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung.

Deutliche Unterschiede in den Verhältniszahlen und ihrer Streuung werden sichtbar, wenn sie nach Bodenfestigkeit getrennt betrachtet werden. Zur Unterteilung in Festigkeitsklassen wurde erneut die Tabelle 5.1 herangezogen. In Sanden sehr geringer Festigkeit oberhalb des Grundwasserspiegels beträgt das Verhältnis $N_{10}(\text{DPL-10}) : N_{10}(\text{DPL-5})$ $2,06 \pm 0,86$; bei geringer Festigkeit beträgt es $1,79 \pm 0,6$, bei mittlerer Festigkeit $1,45 \pm 0,32$, bei großer Festigkeit $1,56 \pm 0,29$ und bei sehr großer Festigkeit $1,56 \pm 0,18$. Die Streuung der Verhältniszahlen nimmt mit steigender Festigkeit des Bodens deutlich ab (Abbildung 5.17).

Unterhalb des Grundwasserspiegels wurden in den Untersuchungsgebieten lediglich Sande mittlerer bis großer Festigkeit angetroffen; das Verhältnis der Schlagzahlen von DPL-10 zu DPL-5 beträgt unter Grundwasser bei mittlerer Festigkeit $0,86 \pm 0,15$ sowie bei großer Festigkeit $1,03 \pm 0,08$. Auch unter Wasser nimmt also die Streuung der Werte mit steigender Festigkeit ab.

Verhältnis DPL-10 / DPL-5 nach Bodenfestigkeit

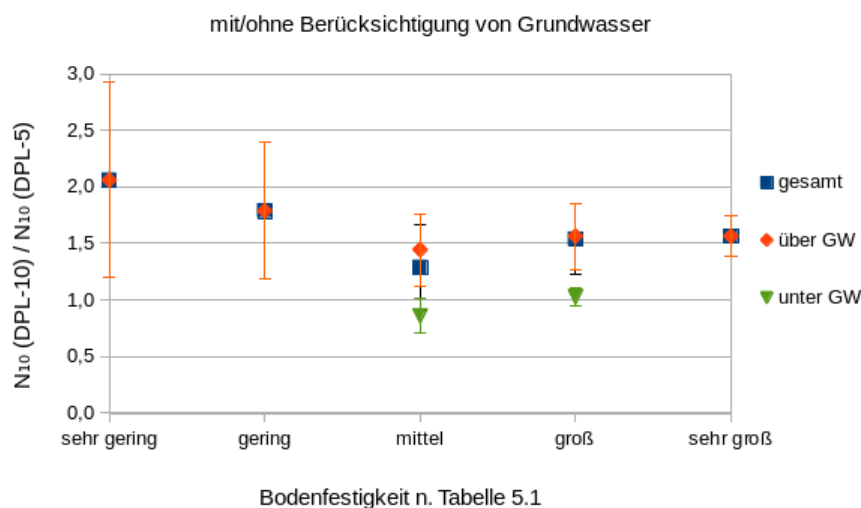


Abbildung 5.17: Verhältnis der Schlagzahlen von DPL-10 und DPL-5, getrennt nach Bodenfestigkeit gemäß Tabelle 5.1, über und unter dem Grundwasserspiegel. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung.

Verhältnis DPM : DPL-5

Das Verhältnis $N_{10}(\text{DPM}) : N_{10}(\text{DPL-5})$ beträgt in der ungesättigten Zone $0,87 \pm 0,12$. Eine Korrelation mit der Arbeitstiefe ist nicht erkennbar (Abbildung 5.18).

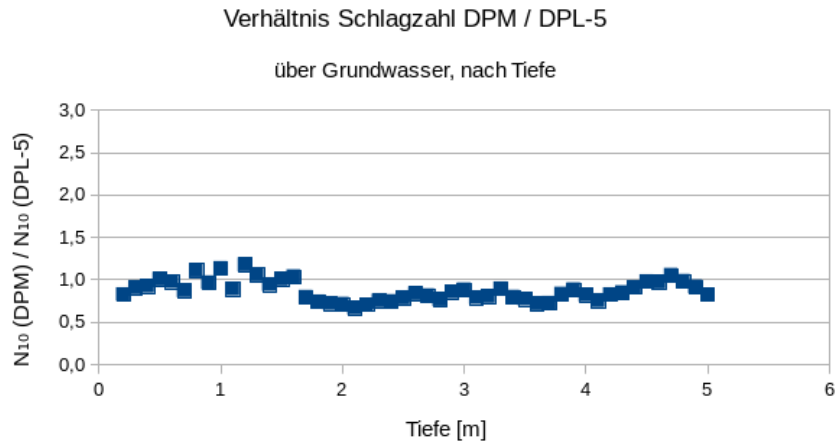


Abbildung 5.18: Verhältnis der Schlagzahlen von DPM und DPL-5 oberhalb des Grundwasserspiegels

In grundwassergesättigtem Sand beträgt das Verhältnis $N_{10}(\text{DPM}) : N_{10}(\text{DPL-5})$ im Mittel $0,61 \pm 0,16$ (siehe Abbildungen 5.19 und 5.20). Eine Korrelation mit der Arbeitstiefe ist im Diagramm visuell zu erkennen und gemäß Varianzanalyse mit einem p-Wert von 0,001 signifikant. Der Zusammenhang beträgt $0,15/\text{m}$, was in 2 m Tiefe einem Verhältnis von circa 0,5 entspricht und in 5 m Tiefe einem Verhältnis von 0,8. Eine Extrapolation bis zur Geländeoberkante führt zu einem Verhältnis von 0,05 und ist wahrscheinlich gemäß der Gültigkeitsbeschränkungen in Abschnitt 6.2 unzulässig.

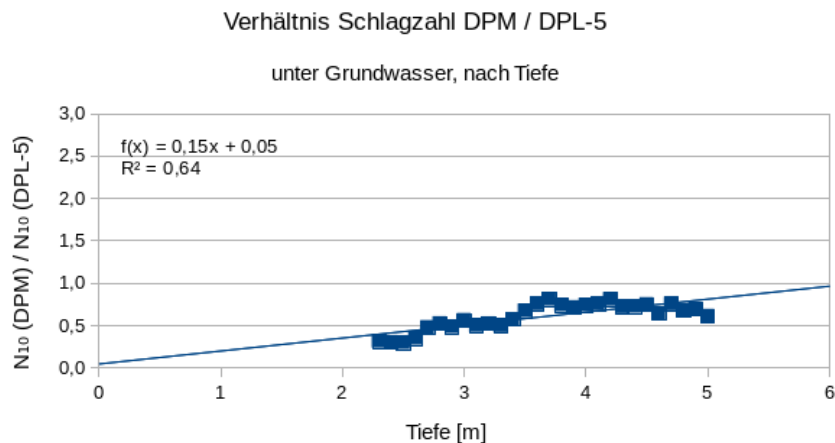


Abbildung 5.19: Verhältnis der Schlagzahlen von DPM und DPL-5 unterhalb des Grundwasserspiegels; mit Regressionsgerade, Geradengleichung und Bestimmtheitsmaß R^2 .

Im Verhältnis $N_{10}(\text{DPM}) : N_{10}(\text{DPL-5})$ ist kein signifikanter Unterschied zwischen den Bodengruppen SU (Sand, schluffig) und SE (Sand, enggestuft) feststellbar, siehe Abbildung 5.16. Das Verhältnis für schluffigen Sand ohne Grundwassereinfluss beträgt $0,79 \pm 0,19$; in enggestuftem Sand beträgt es $0,93 \pm 0,5$. Die Differenz zwischen den beiden Bodengruppen ist nach Mann-Whitney-U-Test (MANN und WHITNEY, 1947) insignifikant mit $p = 0,455$.

Verhältnis DPM / DPL-5 nach Bodengruppe

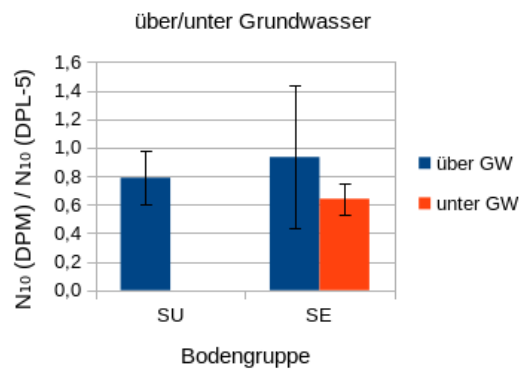


Abbildung 5.20: Verhältnis der Schlagzahlen von DPM und DPL-5, getrennt nach Bodengruppen SU (Sand, schluffig) und SE (Sand, enggestuft) über und unter dem Grundwasserspiegel. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung.

Auch im Vergleich von DPM und DPL-5 treten Unterschiede je nach Bodenfestigkeit auf. In Sanden sehr geringer Festigkeit oberhalb des Grundwasserspiegels beträgt das Verhältnis $N_{10}(\text{DPM}) : N_{10}(\text{DPL-5})$ $1,42 \pm 0,74$; bei geringer Festigkeit beträgt es $0,92 \pm 0,35$; bei mittlerer Festigkeit $0,75 \pm 0,2$, bei großer Festigkeit $0,68 \pm 0,17$ und bei sehr großer Festigkeit $0,59 \pm 0,12$. Die Streuung der Verhältniszahlen nimmt erneut mit steigender Festigkeit des Bodens deutlich ab (Abbildung 5.21).

Unterhalb des Grundwasserspiegels ist kein signifikanter Unterschied zu den Verhältniszahlen in nicht wasserführendem Sand festzustellen. Die größte Differenz besteht bei Sand großer Festigkeit mit einem Verhältnis von $0,53 \pm 0,02$, der Mann-Whitney-U-Test ergibt jedoch einen p -Wert von 0,052, damit ist diese Differenz knapp nicht signifikant.

Verhältnis DPM / DPL-5 nach Bodenfestigkeit

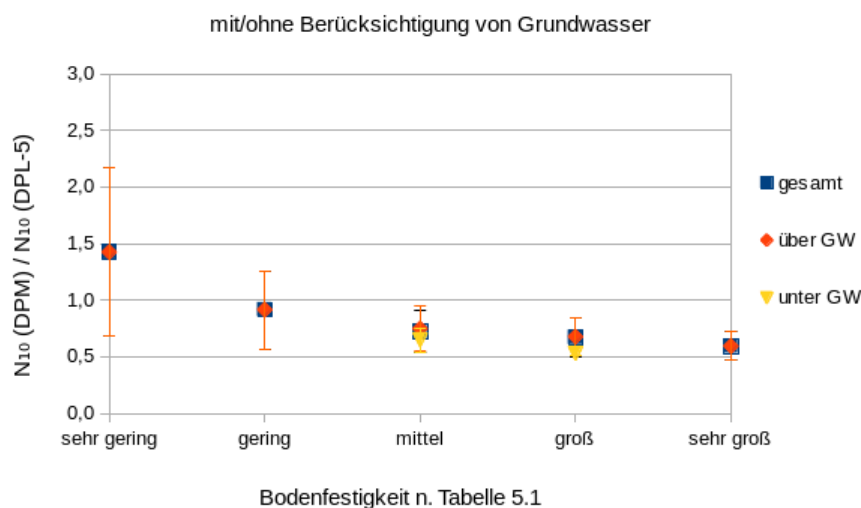


Abbildung 5.21: Verhältnis der Schlagzahlen von DPM und DPL-5, getrennt nach Bodenfestigkeit gemäß Tabelle 5.1, über und unter dem Grundwasserspiegel. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung.

Verhältnis DPH : DPL-5

Das Verhältnis $N_{10}(\text{DPH}) : N_{10}(\text{DPL-5})$ beträgt oberhalb des Grundwassers im Durchschnitt $0,47 \pm 0,07$. Eine Korrelation mit der Arbeitstiefe ist nicht zu erkennen (Abbildung 5.22).

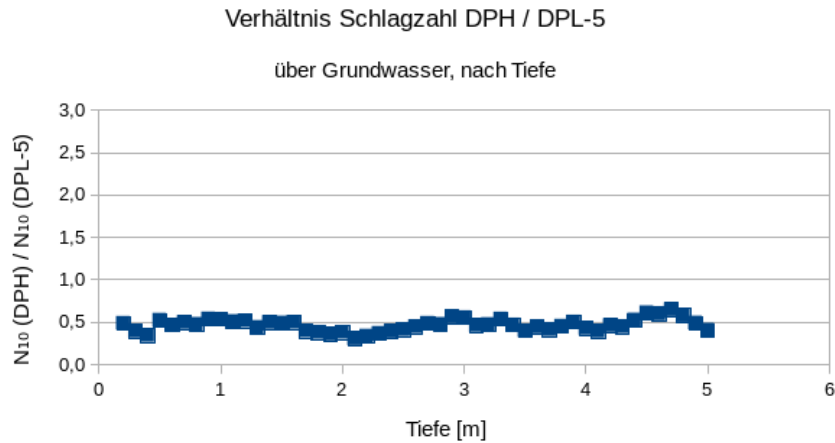


Abbildung 5.22: Verhältnis der Schlagzahlen von DPH und DPL-5 oberhalb des Grundwasserspiegels

Unterhalb des Grundwasserspiegels beträgt das Verhältnis $N_{10}(\text{DPH}) : N_{10}(\text{DPL-5})$ im Mittel $0,3 \pm 0,05$ (siehe Abbildungen 5.19 und 5.20). Eine Korrelation mit der Arbeitstiefe ist nicht zu erkennen.

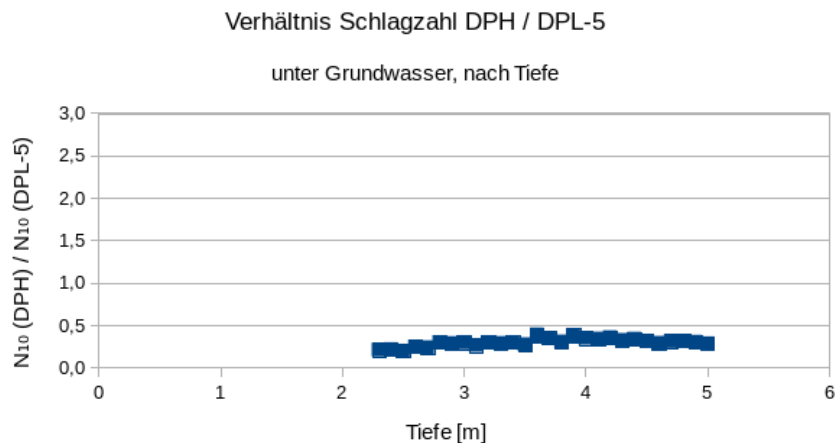


Abbildung 5.23: Verhältnis der Schlagzahlen von DPH und DPL-5 unterhalb des Grundwasserspiegels

Der Unterschied der Verhältniszahlen für die schwere Rammsonde zwischen den Bodengruppen SU (Sand, schluffig) und SE (Sand, enggestuft) ist sehr klein (Abbildung 5.24). Das Verhältnis zur DPL-5 für schluffigen Sand ohne Grundwassereinfluss beträgt $0,47 \pm 0,07$; für enggestuften Sand $0,49 \pm 0,25$. Die Differenz zwischen den beiden Bodengruppen ist augenscheinlich insignifikant, der Mann-Whitney-U-Test bestätigt dies mit $p = 0,174$.

Verhältnis DPH / DPL-5 nach Bodengruppe

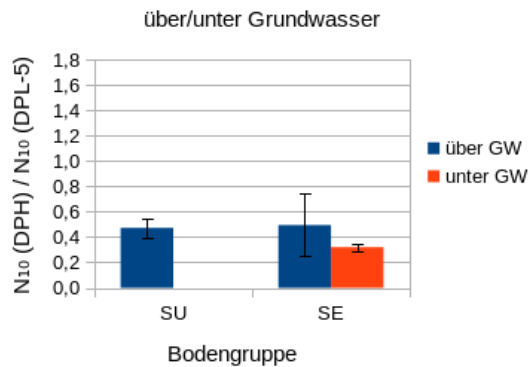


Abbildung 5.24: Verhältnis der Schlagzahlen von DPH und DPL-5, getrennt nach Bodengruppen SU (Sand, schluffig) und SE (Sand, enggestuft) über und unter dem Grundwasserspiegel. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung.

Die Differenzen zwischen Böden unterschiedlicher Festigkeit fallen für $N_{10}(\text{DPH}) : N_{10}(\text{DPL-5})$ geringer aus als für die Verhältnisse der anderen Rammsonden zur DPL-5. In Sanden sehr geringer Festigkeit oberhalb des Grundwasserspiegels beträgt das Verhältnis $0,63 \pm 0,32$; bei geringer Festigkeit beträgt es $0,52 \pm 0,25$, bei mittlerer Festigkeit $0,45 \pm 0,13$, bei großer Festigkeit $0,37 \pm 0,09$ und bei sehr großer Festigkeit $0,35 \pm 0,08$. Erneut nimmt die Streuung der Verhältniszahlen mit steigender Festigkeit des Bodens deutlich ab. (Abbildung 5.25).

Die Unterschiede zu den Verhältniszahlen unterhalb des Grundwasserspiegels sind, nach Bodenfestigkeit aufgelöst, wie bei der mittelschweren Rammsonde gering, aber bei mittlerer Bodenfestigkeit dennoch signifikant mit $p < 0,001$ (Mann-Whitney-U-Test). Hierbei beträgt das Verhältnis $N_{10}(\text{DPH}) : N_{10}(\text{DPL-5})$ unter Grundwasser $0,32 \pm 0,03$. Bei großer Festigkeit beträgt die Differenz zum Verhältnis ohne Grundwasser $0,05$ und ist mit $p = 0,165$ vernachlässigbar.

Verhältnis DPH / DPL-5 nach Bodenfestigkeit

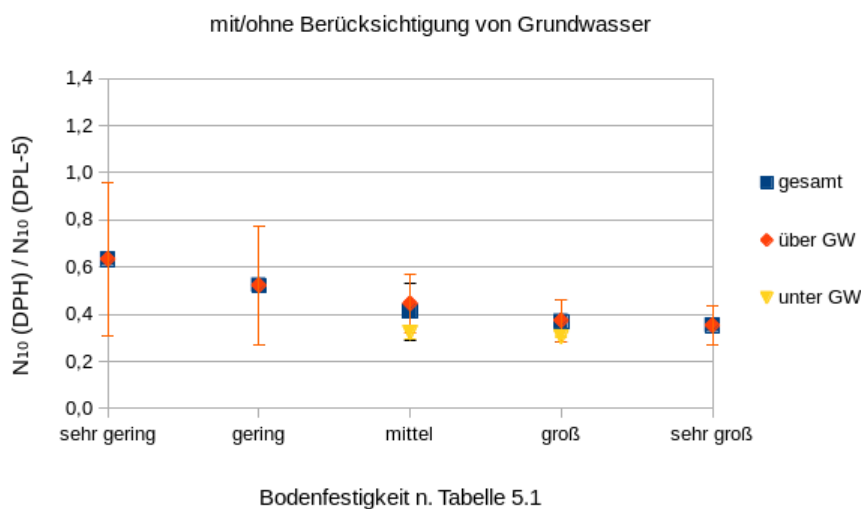


Abbildung 5.25: Verhältnis der Schlagzahlen von DPH und DPL-5, getrennt nach Bodenfestigkeit gemäß Tabelle 5.1, über und unter dem Grundwasserspiegel. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung.

Verhältniszahlen bezogen auf Wassergehalt

Bei einer Betrachtung der Schlagzahlverhältnisse gegenüber dem Wassergehalt in der ungesättigten Bodenzone über alle Untersuchungsgebiete ist zunächst eine große Streuung im Bereich geringer Wassergehalte (unter etwa 5%) zu sehen (Abbildung 5.26). Das ist auf die nicht zufällige Verteilung von Wassergehalten und Bodenfestigkeit zurückzuführen. Die geringsten Wassergehalte traten im Sand des Spülfeldes Ellerholz auf (siehe Abschnitt 5.1), wo auch die geringste durchschnittliche Bodenfestigkeit vorlag (siehe Abbildungen B.4 und B.5), welche mit der größten Streuung der Verhältniszahlen korreliert (siehe vorige Unterabschnitte). Wird das Gebiet Moorburg- Ellerholz ausgeschlossen, zeigt sich eine übersichtlichere Verteilung der Verhältniszahlen (Abbildung 5.27). Eine Korrelation zwischen Wassergehalt und Schlagzahlverhältnissen ist nicht erkennbar.

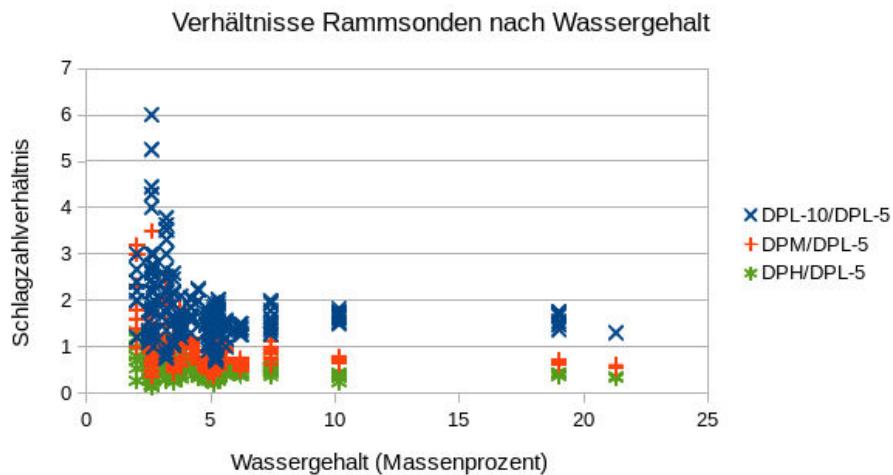


Abbildung 5.26: Schlagzahlverhältnisse zwischen den Rammsonden nach Wassergehalt des Bodens, über alle Untersuchungsgebiete

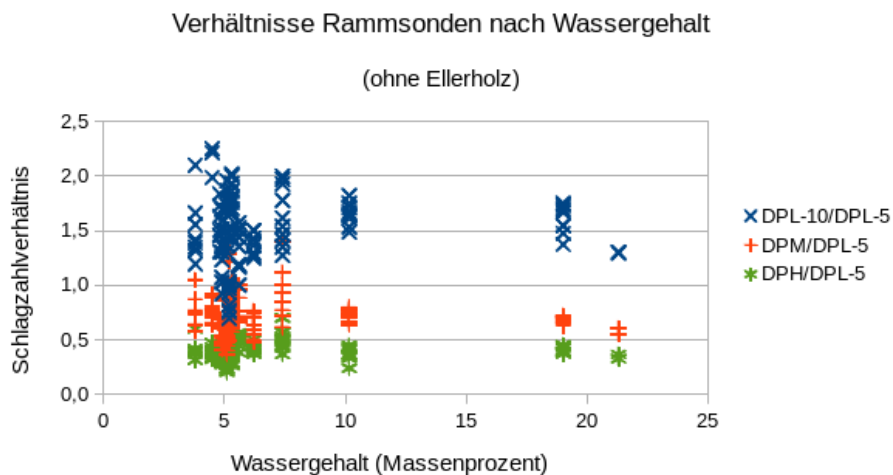


Abbildung 5.27: Schlagzahlverhältnisse zwischen den Rammsonden nach Wassergehalt des Bodens, ohne Gebiet Moorburg- Ellerholz

5.4 Verhältnis zwischen Drucksonde und Rammsonde

Im Untersuchungsbereich „Verfüllung Baakenhafen“ standen zum Vergleich mit den Rammsonden die Messwerte einer Drucksondierung zur Verfügung. Der direkte Vergleich mit der schweren Rammsonde DPH ergibt ein mittleres Verhältnis $N_{10}(\text{DPH})$ zu Spitzendruck $[\text{MN}/\text{m}^2]$ von $1,5 \pm 0,3$. Eine tiefenbezogene Darstellung findet sich in Abbildung 5.28. Auf eine Unterteilung nach Bodenfestigkeit, Korngrößenverteilung oder Wassergehalt muss aufgrund der zu kleinen Datenbasis verzichtet werden. Prinzipiell ist aber über die Tiefe ein ähnlicher Verlauf von Spitzendruck und Schlagzahlen zu erkennen.

Vergleich Drucksondierung und schwere Rammsondierung

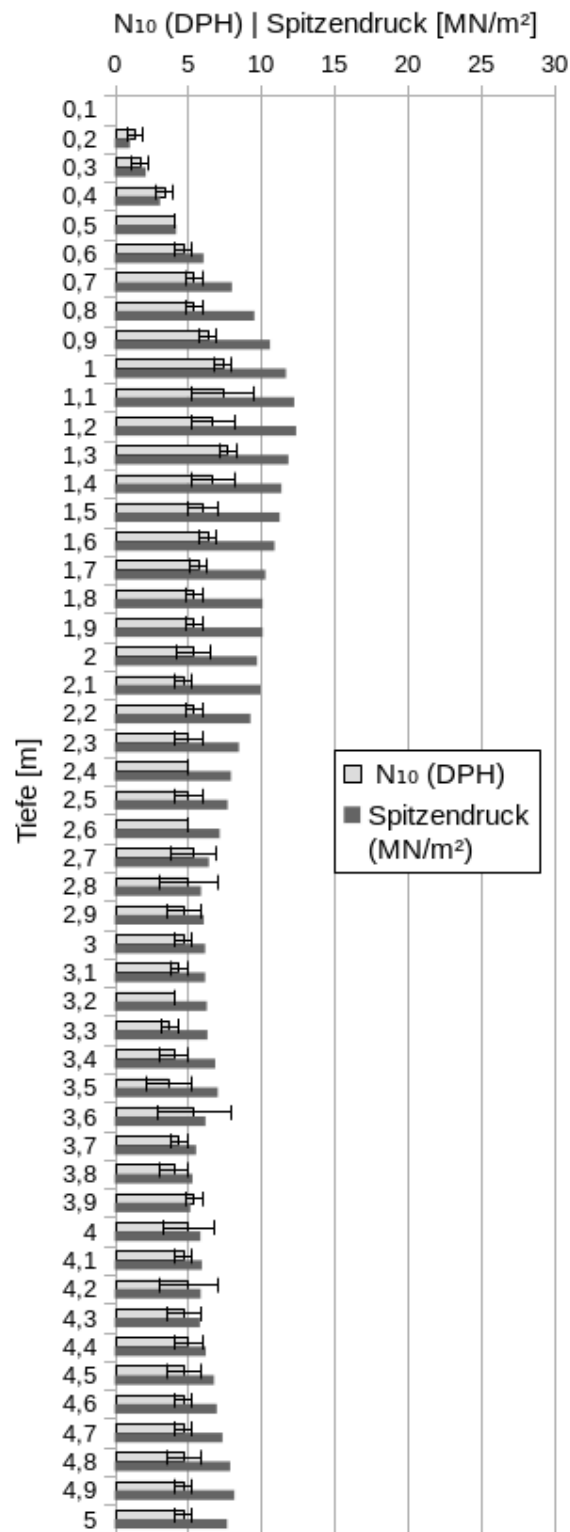


Abbildung 5.28: Tiefenbezogene Messwerte der schweren Rammsonde in Schlägen/10 cm und der Drucksonde in MN/m² am Standort „Verfüllung Baakenhafen“. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung.

6 Diskussion

6.1 Bewertung der Ergebnisse

Praktische Relevanz der Streuung

Wie bereits aus der bisherigen Forschung (Kapitel 2) ableitbar und aus berufspraktischen Erfahrungen erwartbar, zeigen die Schlagzahlen aller Rammsonden eine relativ große Streuung bei wiederholter Messung im gleichen Boden. Anhand der Ergebnisse der vorliegenden Studie kann eine Rangfolge der Geräte nach Reproduzierbarkeit aufgestellt werden (Tabelle 6.1). Demnach zeigt die leichte Rammsonde DPL-10 die geringste Streuung mit einer mittleren relativen Standardabweichung von 18,81 %. Die zweitbeste Reproduzierbarkeit bietet die schwere Rammsonde DPH mit 20,58 % mittlerer relativer Standardabweichung, darauf folgen die mittelschwere DPM mit einer Streuung von 21,52 % und die DPL-5 mit 22,26 % relativer Standardabweichung. In der Praxis dürften diese Unterschiede jedoch von geringer Bedeutung sein, da nur ganze Schläge gezählt werden können. Die kritische Schlagzahl für mittlere Festigkeit gemäß der Tabelle 7.4 entspräche unter Berücksichtigung dieser Streuungen bei der DPL-5 12 ± 3 Schlägen, bei der DPL-10 18 ± 3 Schlägen, bei Anwendung der DPM 9 ± 2 Schlägen und bei der DPH 6 ± 1 Schlägen. Eine Bevorzugung oder Vermeidung einer der betrachteten Rammsonden ist nach Meinung des Autors hinsichtlich der Reproduzierbarkeit der Messungen nicht als notwendig zu erkennen.

Tabelle 6.1: Rammsonden sortiert nach Streuung der Schlagzahlen (in mittlerer relativer Standardabweichung)

| Rammsonde | Streuung |
|-----------|----------|
| DPL-10 | 18,81 % |
| DPH | 20,58 % |
| DPM | 21,52 % |
| DPL-5 | 22,26 % |

Es kann nun die Frage aufgeworfen werden, ob diese Streuung in die kritischen Schlagzahlen zur Bestimmung der Festigkeitsgrenzen einfließen sollte, um sicherzustellen, dass die Bodenfestigkeit nicht überbewertet wird - auch, wenn nur eine Sondierung ausgeführt wird. Dagegen spricht nicht nur die Praxiserfahrung, dass mit der bisher durch „Überlieferung“ gängigen Grenze von $N_{10}(DPL-5) = 10$ für mittlere Festigkeit offensichtlich gut gearbeitet werden konnte - sonst käme es sicherlich häufiger zu Setzungsschäden an Gebäuden und Verkehrsflächen. Auch basiert die hier ausgeführte Neuberechnung der Festigkeitsgrenzen bereits auf der Annahme, dass die Schlagzahl der schweren Rammsonde dem Spitzenwiderstand der Drucksonde in MN/m^2 entspricht. Diese Korrelation zwischen DPH und CPT ist nach BAW (1997) vermutlich um 28 % konservativer gewählt als rechnerisch notwendig (siehe Kapitel 2), beziehungsweise gar um 50 % konservativer, wenn der in dieser Studie ermittelte Korrelationsfaktor von $1,5 \pm 0,3$ (siehe Abschnitt 5.4) angesetzt würde. Die Streuung der Rammsonden wird durch diese sicherheitsorientierte Annahme also mindestens ausgeglichen. Der Autor dieser Arbeit ist daher der Meinung, dass eine Anpassung der Festigkeitsgrenzen aufgrund der beobachteten Streuung über die Korrektur mithilfe der neu ermittelten Verhältniszahlen hinaus nicht notwendig ist. Würde jedoch ein genauere Korrelationsfaktor mit geringerer Sicherheitsreserve zwischen Druck- und Rammsonden angewendet, müsste eine solche Korrektur gegebenenfalls in Betracht gezogen werden.

Einfluss der Arbeitstiefe / Mantelreibung

Aus den Ergebnissen der durchgeführten Versuche ist ein Einfluss der Arbeitstiefe bis in eine Tiefe von 5 Metern nur im Verhältnis der Schlagzahlen von DPL-10 und DPL-5 zu erkennen. Mit zunehmender Tiefe sinkt die Schlagzahl der DPL-10 linear im Vergleich zur Schlagzahl der DPL-5. Aus der Abwesenheit einer solchen Korrelation im Vergleich der DPM und DPH mit der DPL-5 ist zu schließen, dass sich dieser Einfluss nur auf die Vergleichbarkeit der DPL-10 mit den anderen Sonden auswirkt. Eine mögliche Interpretation ist der von der BAW (1997) u. a. angegebene Einfluss der Gestänge- bzw. Mantelreibung. Während alle Sondenspitzen einen größeren Durchmesser haben als ihr jeweiliges Gestänge, ist dieser Unterschied für die DPL-10 am größten (Tabelle 6.2). Die DPL-10 schafft sich also unter allen

Tabelle 6.2: Verhältnisse von Spitzen- zu Gestängedurchmesser

| Rammsonde | ∅ Spitze [mm] | ∅ Gestänge [mm] | Verhältnis Spitze/Gestänge |
|-----------|---------------|-----------------|----------------------------|
| DPL-5 | 25,2 | 22 | 1,15 |
| DPL-10 | 35,7 | 22 | 1,62 |
| DPM, DPH | 43,7 | 32 | 1,37 |

Rammsonden den größten Ringraum, sollte daher von Reibungseffekten am wenigsten beeinflusst werden. Angesichts der Beobachtungen dieser Studie kann das als bestätigt angesehen werden. Mit den hier verwendeten Methoden kann nicht festgestellt werden, ob die Schlagzahl der DPL-10 zur Tiefe hin bei gleicher Festigkeit geringer wird, oder ob die Schlagzahlen der anderen Sonden zur Tiefe hin ansteigen. Es liegen nur für einen Untersuchungsbereich Spitzendruckmesswerte vor, die direkte Erkenntnisse über die Festigkeit des Bodens liefern, und selbst dort wurde aufgrund der hohen Kosten einer Drucksondierung nur eine Messung ausgeführt. Die große natürliche Streuung von Bodeneigenschaften erlaubt auf dieser Datenbasis keine statistisch gesicherten Aussagen.

Beobachtet wurde eine zunehmende Streuung der Schlagzahlen mit wachsender Arbeitstiefe ebenfalls ausschließlich bei der DPL-10. Die Mantelreibung kommt angesichts der zuvor genannten Erkenntnisse als Auslöser offensichtlich nicht in Frage. Aufgrund der Erfahrungen des Autors und des Dipl.-Geol. Frederik Arnold (mündl. Aussage, 2017) wird vermutet, dass bei zunehmender Länge des Gestänges Schwingungen auftreten, die zu einer ungleichmäßigen oder abgeschwächten Energieübertragung auf die Sondenspitze führen. Auch damit wäre die oben beschriebene Korrelation mit der Arbeitstiefe erklärbar, die Mantelreibung der anderen Sonden wäre dann nicht oder nur untergeordnet dafür verantwortlich.

Schwingungen im Gestänge werden ebenfalls als mögliche Ursache für eine in der Tiefe angestiegene Schlagzahl der DPH im Untersuchungsbereich Ellerholz Spülkopf vorgeschlagen (siehe Abbildung B.4 im Abschnitt 7.2). Die Schlagzahl der anderen Sonden stieg dort nicht im gleichen Maße an. Eine signifikant von vergleichbaren Proben abweichende Korngrößenverteilung, Kornrauigkeit oder sonstige mechanische Eigenschaft des Bodens konnte nicht erkannt werden. Es wird vermutet, dass die beschriebenen Schwingungen nur dort diese Wirkung entfalten konnten, da der Sand oberflächennah besonders locker gelagert und trocken war und sich daher ein ungewöhnlich großer Ringraum bilden konnte. Aus diesen Beobachtungen und Vermutungen, sofern korrekt, kann geschlossen werden, dass bei erwartetem oberflächennahem Vorliegen geringer Bodenfestigkeit bzw. einer Auflockerungstendenz die leichte Rammsonde DPL-5 das Mittel der Wahl sein sollte, um die führende Wirkung des relativ zur Spitze großen Gestänges zu nutzen und Messfehler in der Tiefe möglichst gering zu halten. Gezielte weiterführende Versuche wären zur Aufklärung dieses Zusammenhanges wünschenswert.

Einfluss von Korngrößenverteilung, Kornform und -rauigkeit

In den Untersuchungsgebieten lag fast ausschließlich Mittelsand als Hauptbodenart vor. Der Einfluss der Hauptbodenart konnte daher leider im Rahmen dieser Studie nicht ermittelt werden. Der Schluffgehalt des Sandes wurde als Einflussfaktor auf die Verhältniszahlen zwischen den Rammsonden identifiziert und schlägt sich in den Umrechnungstabellen in Abschnitt 7.1 entsprechend nieder. Ungleichförmigkeit und Krümmung der Korngrößenverteilung wurden betrachtet, lassen aber zumindest über den in den Untersuchungsgebieten aufgetretenen Bereich keine Korrelation erkennen. Die Spannweite der angetroffenen Ungleichförmigkeit reichte von 2 bis 5, die der Krümmungszahl von 0,9 bis 1,3. (beispielhaft: Abbildung 6.1). Diese Beobachtung unterstützt die Aussage der BAW (1997), dass die Schlagzahlen der Rammsonden proportional zur Bodenfestigkeit sind, die u.a. direkt von der Korngrößenverteilung abhängt (siehe Abschnitt 1.1, erster Absatz). Unterschiede in der Ungleichförmigkeit und Krümmung müssten somit alle Rammsonden gleichermaßen beeinflussen, eine Änderung ihrer Verhältnisse zueinander wäre dadurch nicht zu erwarten.

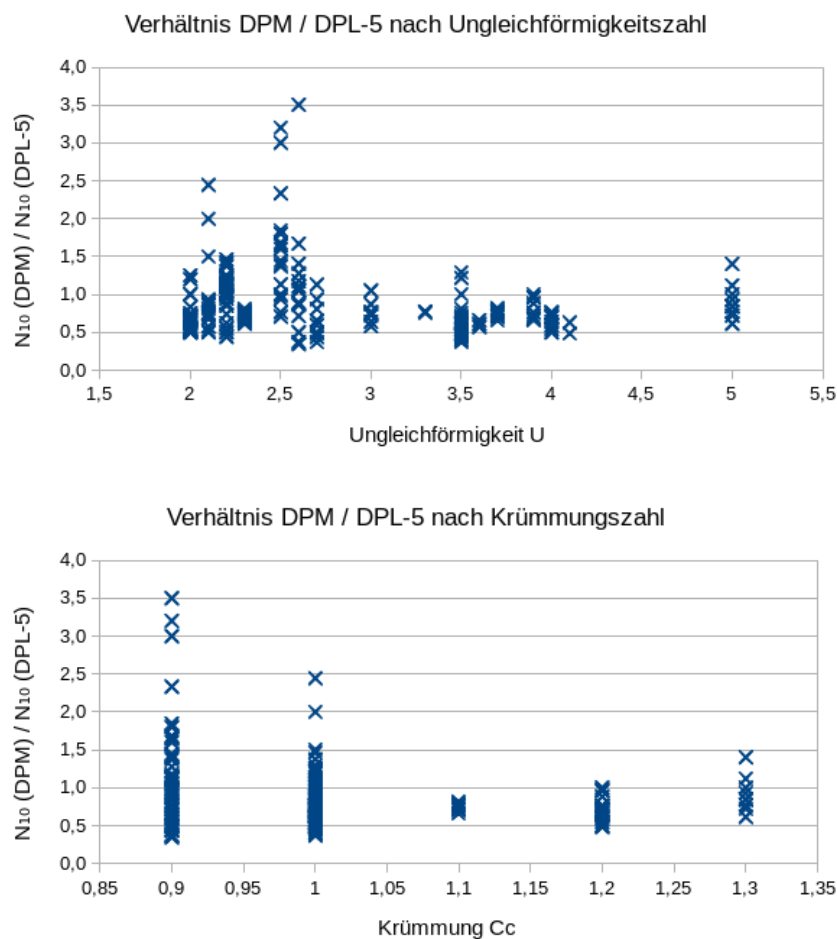


Abbildung 6.1: Verhältnis der Schlagzahlen von DPM und DPL-5 in Abhängigkeit der Ungleichförmigkeit und Krümmung der Korngrößenverteilung

Kornform und Kornrauigkeit unterschieden sich in den untersuchten Proben nur so unwesentlich (siehe Abschnitt 5.1), dass aus den in dieser Studie gewonnenen Daten keine Aussage über Abhängigkeiten zwischen ihnen und den Schlagzahlverhältnissen oder der Messgenauigkeit getroffen werden kann.

Einfluss des Wassergehaltes/Grundwassers

Der Wassergehalt des ungesättigten Bodens beeinflusst die Schlagzahlverhältnisse zwischen den Rammsonden nicht (siehe Abschnitt 5.3). Die beobachtete größere Streubreite bei niedrigen Wassergehalten hängt mit der geringen Festigkeit zusammen, die in den Untersuchungsgebieten meist gemeinsam mit geringem Wassergehalt auftrat.

Anstehendes Grundwasser im sondierten Boden beeinflusst die Schlagzahlen der Rammsonden und ihre Verhältnisse zueinander. Zur Ermittlung einer absoluten Verschiebung wären mehr Vergleichsmessungen mit der Drucksonde über und unter dem Grundwasserspiegel wünschenswert; eine statistische Auswertung bei nur einer vorliegenden Drucksondierung erscheint dem Autor dieser Arbeit unzuverlässig und wird daher nicht vorgenommen, es können nur die relativen Unterschiede zwischen den verschiedenen Rammsonden bewertet werden.

Das Schlagzahlverhältnis der beiden leichten Rammsonden ist unter Grundwasser am deutlichsten verschoben (von durchschnittlich 1,57 zu 0,83), die mittlere und schwere Rammsonde verändern ihre Schlagzahl relativ zur DPL-5 nur unwesentlich. Lediglich bei der schweren Rammsonde gibt es bei mittlerer Bodenfestigkeit eine Differenz zwischen 0,45 über Grundwasser und 0,32 darunter.

Als Mechanismus für den Einfluss des Grundwassers auf die Sondierergebnisse ist eine Verringerung der Reibung denkbar; dieser Effekt hängt augenscheinlich vom Verhältnis des Spitzendurchmessers zum Gestängedurchmesser ab, das für die DPL-10 mit $d_{Spitze}/d_{Gestänge} = 1,62$ am größten ist (s.a. Tabelle 6.2).

6.2 Grenzen der Studie

Für die in Kapitel 5 und Abschnitt 6.1 genannten Zahlenwerte und Zusammenhänge ist zu beachten: Sondierungen wurden nur bis zu einer Tiefe von 5 Metern ausgeführt. Grundwasser wurde nur an einem Standort und damit in drei Messreihen ab einer Tiefe von ca. 2 Metern angetroffen. Die Bodengruppe SU (Sand, schluffig) lag ebenfalls nur an einem Standort mit nur einer Messreihe vor. Die Allgemeingültigkeit von Aussagen, die sich auf schluffigen Sand oder grundwasserbeeinflusste Böden beziehen, sollte daher von nachfolgenden Studien verifiziert oder falsifiziert werden. Das Gleiche betrifft die Gültigkeit allgemeiner Aussagen für größere Sondiertiefen als fünf Meter oder für weitere Bodengruppen wie SW (Sand, weit gestuft), SI (Sand, intermittierend) oder G... (Kies, ...).

Bewusst wurden, wie bereits in Kapitel 3 beschrieben, nur Böden ohne bindige Schichten untersucht. Das Durchteufen von bindigen Schichten kann zu erhöhter Gestängereibung und damit zu abweichenden Festigkeitsgrenzen und Verhältniszahlen in darunter liegenden Schichten führen (BAW, 1997).

7 Schlussfolgerungen

7.1 Umrechnungstabellen und Diagramme

Im Folgenden sind die im Abschnitt 5.3 beschriebenen Verhältnisse zwischen den Rammsonden für verschiedene Bodeneigenschaften graphisch und tabellarisch dargestellt. NB: die Umrechnungsfaktoren und Festigkeitsgrenzen für die Bodengruppe SU (Sand, schluffig) stammen aus einer einzigen Messreihe in nur einem Untersuchungsgebiet und sind damit noch nicht zuverlässig bestimmt. Die Festigkeitsgrenzen basieren auf den Verhältnissen der größeren Rammsonden zur DPL-5, weshalb für letztere die Grenzen unter allen Bedingungen gleich dargestellt werden. Eine genauere Berechnung auf Basis des Verhältnisses CPT/DPH wird möglich, wenn eine größere Zahl von vergleichenden Drucksondierungen durchgeführt wird. Analog der Argumentation in Abschnitt 6.1 wird die vorhandene Sicherheitsreserve dennoch als ausreichend eingeschätzt.

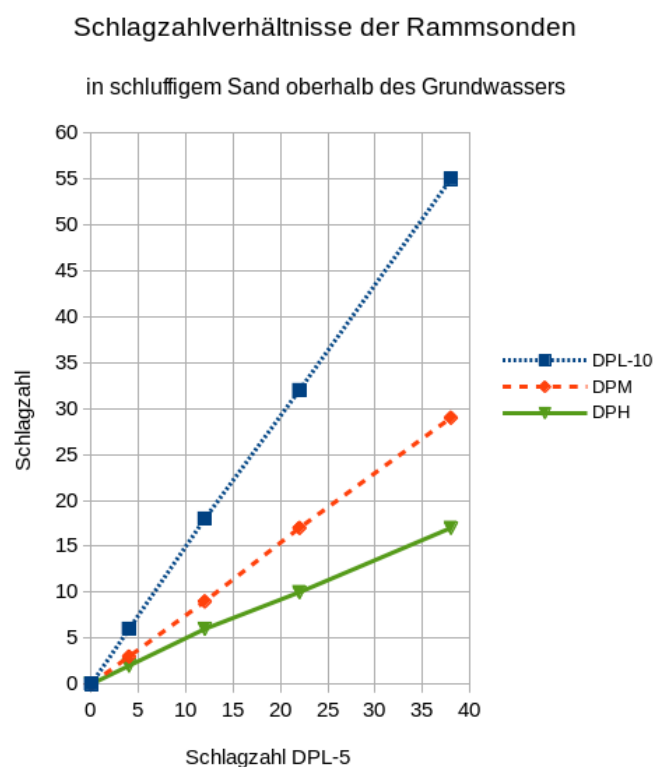


Abbildung 7.1: Vorläufige Verhältnisse zwischen den Rammsonden, Bodengruppe SU (Sand, schluffig) oberhalb des Grundwasserspiegels; Zwischenwerte interpoliert

Tabelle 7.1: Vorläufige Umrechnungsfaktoren zwischen den Rammsonden, Bodengruppe SU (Sand, schluffig) oberhalb des Grundwasserspiegels

| Bodenfestigkeit | $N_{10} \text{ (DPL-10)} / N_{10} \text{ (DPL-5)}$ | $N_{10} \text{ (DPM)} / N_{10} \text{ (DPL-5)}$ | $N_{10} \text{ (DPH)} / N_{10} \text{ (DPL-5)}$ |
|-----------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| alle | $1,43 \pm 0,2$ | $0,74 \pm 0,16$ | $0,45 \pm 0,07$ |

Tabelle 7.2: Vorläufige Festigkeitsgrenzen in N_{10} der verschiedenen Rammsonden (sicherheitsorientierte Rundungsgrenze: -,15) für Bodengruppe SU (Sand, schluffig) oberhalb des Grundwasserspiegels

| Bodenfestigkeit | Untere Grenze der Festigkeitsklasse | | | |
|-----------------|-------------------------------------|---------------------------|------------------------|------------------------|
| | $N_{10} \text{ (DPL-5)}$ | $N_{10} \text{ (DPL-10)}$ | $N_{10} \text{ (DPM)}$ | $N_{10} \text{ (DPH)}$ |
| gering | 4 | 6 | 3 | 2 |
| mittel | 12 | 18 | 9 | 6 |
| groß | 22 | 32 | 17 | 10 |
| sehr groß | 38 | 55 | 29 | 17 |

Schlagzahlverhältnisse der Rammsonden

in eng gestuftem Sand oberhalb des Grundwassers

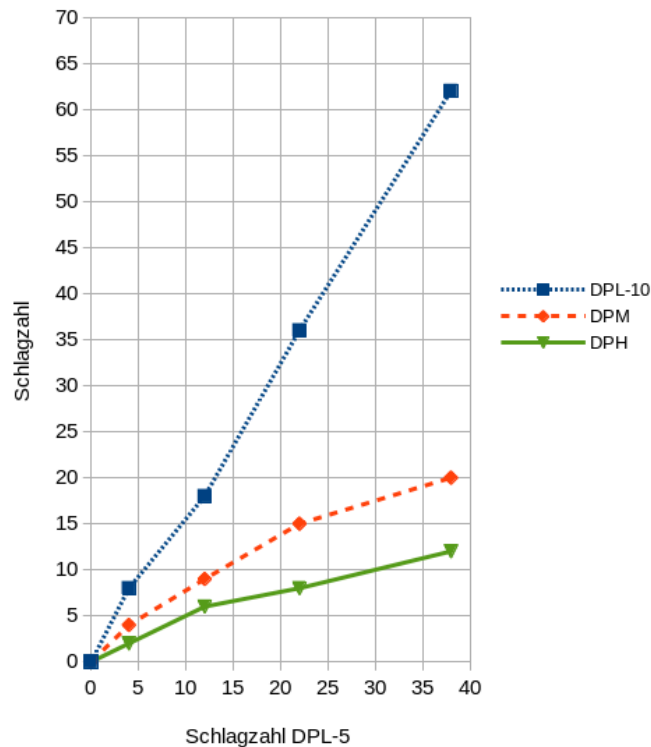


Abbildung 7.2: Verhältnisse zwischen den Rammsonden, Bodengruppe SE (Sand, eng gestuft) oberhalb des Grundwasserspiegels; Zwischenwerte interpoliert

Tabelle 7.3: Umrechnungsfaktoren zwischen den Rammsonden, Bodengruppe SE (Sand, eng gestuft) oberhalb des Grundwasserspiegels

| Bodenfestigkeit | $N_{10} \text{ (DPL-5)}$ | $N_{10} \text{ (DPL-10)} / N_{10} \text{ (DPL-5)}$ | $N_{10} \text{ (DPM)} / N_{10} \text{ (DPL-5)}$ | $N_{10} \text{ (DPH)} / N_{10} \text{ (DPL-5)}$ |
|-----------------|--------------------------|----------------------------------------------------|-------------------------------------------------|-------------------------------------------------|
| sehr gering | < 4 | $2,06 \pm 0,86$ | $1,42 \pm 0,74$ | $0,63 \pm 0,32$ |
| gering | 4-12 | $1,81 \pm 0,62$ | $0,93 \pm 0,35$ | $0,53 \pm 0,26$ |
| mittel | 12-22 | $1,44 \pm 0,34$ | $0,74 \pm 0,20$ | $0,44 \pm 0,13$ |
| groß | 22-38 | $1,60 \pm 0,29$ | $0,65 \pm 0,15$ | $0,35 \pm 0,08$ |
| sehr groß | > 38 | $1,62 \pm 0,17$ | $0,53 \pm 0,08$ | $0,30 \pm 0,02$ |

Tabelle 7.4: Festigkeitsgrenzen in N_{10} der verschiedenen Rammsonden (sicherheitsorientierte Rundungsgrenze: -,15) für Bodengruppe SE (Sand, eng gestuft) oberhalb des Grundwasserspiegels

| Bodenfestigkeit | Untere Grenze der Festigkeitsklasse | | | |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| | N_{10} (DPL-5) | N_{10} (DPL-10) | N_{10} (DPM) | N_{10} (DPH) |
| gering | 4 | 8 | 4 | 2 |
| mittel | 12 | 18 | 9 | 6 |
| groß | 22 | 36 | 15 | 8 |
| sehr groß | 38 | 62 | 20 | 12 |

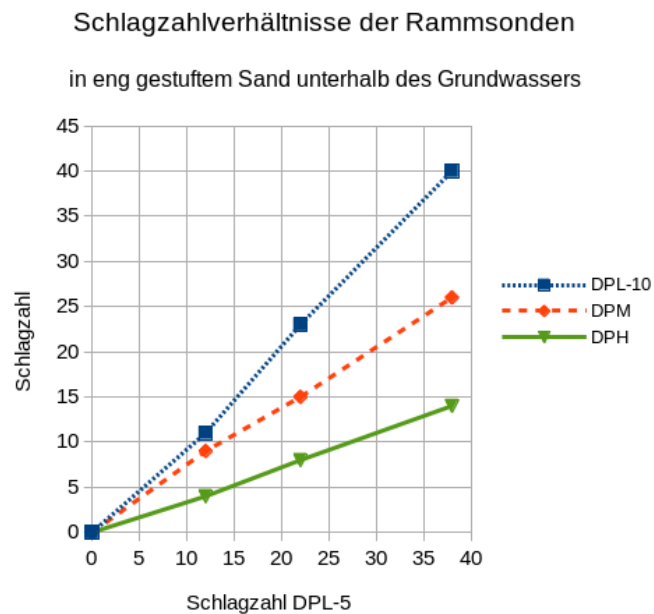


Abbildung 7.3: Verhältnisse zwischen den Rammsonden, Bodengruppe SE (Sand, eng gestuft) unterhalb des Grundwasserspiegels; Zwischenwerte interpoliert

Tabelle 7.5: Umrechnungsfaktoren zwischen den Rammsonden, Bodengruppe SE (eng gestufter Sand) unterhalb des Grundwasserspiegels

| Bodenfestigkeit | N_{10} (DPL-5) | N_{10} (DPL-10) / N_{10} (DPL-5) | N_{10} (DPM) / N_{10} (DPL-5) | N_{10} (DPH) / N_{10} (DPL-5) |
|-----------------|------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
| mittel | 12-22 | $0,86 \pm 0,15$ | $0,72 \pm 0,18$ | $0,32 \pm 0,03$ |
| groß | 22-38 | $1,03 \pm 0,08$ | $0,67 \pm 0,17$ | $0,37 \pm 0,09$ |

Tabelle 7.6: Festigkeitsgrenzen in N_{10} der verschiedenen Rammsonden (sicherheitsorientierte Rundungsgrenze: -,15) für Bodengruppe SE (eng gestufter Sand) unterhalb des Grundwasserspiegels.

| Bodenfestigkeit | Untere Grenze der Festigkeitsklasse | | | |
|-----------------|-------------------------------------|-------------------|----------------|----------------|
| | N_{10} (DPL-5) | N_{10} (DPL-10) | N_{10} (DPM) | N_{10} (DPH) |
| mittel | 12 | 11 | 9 | 4 |
| groß | 22 | 23 | 15 | 8 |
| sehr groß | 38 | 40 | 26 | 14 |

7.2 Fazit und Ausblick

Die in Abschnitt 1.2 formulierten Fragen konnten mit dieser Studie zumindest für die vorgefundenen Bodenarten weitgehend beantwortet werden. Sicherheitsorientierte Faktoren für die Umrechnung von Schlagzahlen zwischen den verschiedenen Rammsonden sowie in den Spitzendruck der Drucksonde konnten bestimmt werden. Dabei wurden Werte in der gleichen Größenordnung ermittelt, die bereits in vorherigen Veröffentlichungen angegeben wurden. Aufgrund der relativ großen Stichprobenzahl und systematischen Vorgehensweise dieser Studie konnte die Genauigkeit jedoch deutlich verbessert werden, so dass die neu aufgestellten Umrechnungsfaktoren für die Rammsonden sich im Gegensatz zu früheren, unpräzisen Angaben als tatsächlich praxistauglich erweisen dürften. Sie ermöglichen für viele Anwendungen mit hinreichender Sicherheitsreserve die direkte Abschätzung des Reibungswinkels nichtbindiger Böden über den Spitzendruck gemäß der Tabelle 7.7; der Steifemodul lässt sich immerhin grob abschätzen nach der Formel $E_s = [1.5, 3] \cdot q_c$ (KOLYMBAS, 2007). Dennoch darf nicht vernachlässigt werden, dass aufgrund ihrer deutlich höheren Genauigkeit grundsätzlich immer die Ergebnisse von Drucksondierungen als maßgebend zur Beurteilung des Bodens anzusehen sind.

Weiterer Forschungsbedarf besteht hinsichtlich der Korrelationen zwischen den Rammsonden in anderen Bodengruppen als eng gestuftem und schluffigem Sand. Für schluffigen Sand wäre der Einfluss unterschiedlicher Schluffgehalte zu quantifizieren; auch bleibt zu klären, ob die Wirkung von Grundwasser sich in anders gekörnten Böden abweichend manifestiert. Die Untersuchung des Einflusses von Kornform und Kornrauigkeit erfordert eine größere Bandbreite dieser Eigenschaften, als sie in den untersuchten Böden vorgelegen hat. Allgemein erstrebenswert wäre, insbesondere in schluffigem Sand, eine Erhöhung der Versuchszahl zur weiteren Verbesserung der statistischen Aussagekraft.

Tabelle 7.7: Schätzwerte des Reibungswinkels von Sand aus dem Spitzendruck q_c , nach KOLYMBAS (2007).

| q_c (MN/m ²) | Reibungswinkel φ' |
|----------------------------|---------------------------|
| 5,0 | 32,5 |
| 7,5 | 35,0 |
| 15,0 | 37,5 |
| 25,0 | 40,0 |

Zur sicheren Überprüfung des Umrechnungsfaktors zwischen Drucksonde und Rammsonden wäre es notwendig, eine größere Zahl an vergleichenden Drucksondierungen vorzunehmen, insbesondere auch, um den Einfluss der Arbeitstiefe auf die Rammsondenschlagzahlen genauer zu klären. Ohne vergleichende Drucksondierung in jedem Untersuchungsbereich fehlt eine Messung der Bodenfestigkeit, die von den relativen Differenzen und möglichen tiefenabhängigen Abweichungen der Rammsonden unabhängig ist.

Um die Frage, ob mit Rammsonden die Bodenfestigkeit oder die Lagerungsdichte ermittelt wird, endgültig zu klären, müssen Versuche an Böden mit bekannter Lagerungsdichte durchgeführt bzw. sie muss mit anderen Methoden direkt gemessen werden. Da sowohl die vorliegende Studie als auch die Untersuchungen der BAW (1997) ausschließlich in norddeutschen Böden mit überwiegend (glazi-)fluviatiler Genese (und im Fall dieser Arbeit anthropogener Umlagerung) vorgenommen wurden, ist denkbar, dass sich das Verhalten der Rammsonden in Böden anderer Regionen unterscheidet. Empfehlenswert wären Versuche an künstlich erstellten Modellböden mit kontrollierter Lagerungsdichte, Korngrößenverteilung, Kornform und -rauigkeit.

Angesichts der vorliegenden Ergebnisse können beide leichten Rammsonden nach Meinung des Autors weiterhin unter Berücksichtigung ihrer systembedingten Grenzen als günstige, flexible Alternative zur Drucksonde bei oberflächennahen Untersuchungen (bis min. 5 m) in nichtbindigen Böden eingesetzt werden. Je nach zu erwartender Bodenfestigkeit kann dabei die DPL-10 oder DPL-5 besser geeignet sein. Durch weiterführende Untersuchungen zur Klärung der offen gebliebenen Fragen kann die Interpretation der Messwerte aller Rammsonden noch weiter verbessert und eine größere Genauigkeit erreicht werden.

Literatur

- AMANN, PETER et al. (2011). "Setzungsberechnung". In: *Bodenmechanik und Grundbau: Das Verhalten von Böden und Fels und die wichtigsten grundbaulichen Konzepte*. Springer Berlin Heidelberg, S. 109–121.
- ARBEITSAUSSCHUSS „UFEREINFASSUNGEN“ DER HTG E.V. (2012). *Empfehlungen des Arbeitsausschusses „Uferneinfassungen“ Häfen und Wasserstraßen EAU 2012*. 11. Aufl. Ernst & Sohn.
- ARBEITSKREIS „BAUGRUBEN“ DER DGGT E.V. (2012). "Baugruben in weichen Böden". In: *Empfehlungen des Arbeitskreises „Baugruben“ (EAB)*. Ernst & Sohn, S. 213–258.
- BUNDESANSTALT FÜR WASSERBAU (1990). *Bewertung von Sondierungen in rolligen Böden*.
— (1997). *Bewertung von Ergebnissen unterschiedlicher Sondierverfahren zur Ermittlung der Festigkeit nichtbindiger Böden - Schlussbericht*.
- DIN 18196:2011-05. *Erd- und Grundbau - Bodenklassifikation für bautechnische Zwecke*.
- DIN 4094-3:2002-01. *Baugrund - Felduntersuchungen - Teil 3: Rammsondierungen*.
- DIN EN ISO 14688-1:2013-12. *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Benennung, Beschreibung und Klassifizierung von Boden - Teil 1: Benennung und Beschreibung (ISO 14688-1:2002 + Amd 1:2013); Deutsche Fassung EN ISO 14688-1:2002 + A1:2013*.
- DIN EN ISO 17892-1:2015-03. *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 1: Bestimmung des Wassergehalts (ISO 17892-1:2014); Deutsche Fassung EN ISO 17892-1:2014*.
- DIN EN ISO 22476-2:2012-03. *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchungen - Teil 2: Rammsondierungen (ISO 22476-2:2005 + Amd 1:2011); Deutsche Fassung EN ISO 22476-2:2005 + A1:2011*.
- HENNINGSEN, D. (2013). *Einführung in die Geologie für Bauingenieure*. Hochschultext. Springer Berlin Heidelberg.
- KAUSCH, FRIEDRICH (o.J.). *Geotechnische Charakterisierung des Hamburger Baugrundes*. URL: <https://www.hamburg.de/contentblob/1298120/152cdc0f47334bf187a6d836976b5fa1/data/d-geotechnik-text.pdf> (besucht am 15.09.2017).
- KOLYMBAS, DIMITRIOS (2007). *Geotechnik - Bodenmechanik, Grundbau und Tunnelbau*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
- LI, MAOTIAN et al. (2014). "Morphodynamic processes of the Elbe River estuary, Germany: the Coriolis effect, tidal asymmetry and human dredging". In: *Frontiers of Earth Science* 8.2, S. 181–189.
- MANN, H. B. und D. R. WHITNEY (1947). "On a Test of Whether one of Two Random Variables is Stochastically Larger than the Other". In: *Ann. Math. Statist.* 18.1, S. 50–60.
- PATZOLD, VOLKER, GÜNTER GRUHN und CARSTEN DREBENSTEDT (2008). "Aufbereitung von Kies und Sand". In: *Der Nassabbau: Erkundung, Gewinnung, Aufbereitung, Bewertung*. Springer Berlin Heidelberg, S. 335–396.
- REGE HAMBURG (2017). *Umgehungsstraße Finkenwerder*. URL: <http://www.rege.hamburg/projekte/referenzen/umgehungsstrasse-finkenwerder/> (besucht am 02.10.2017).
- SCHUMACHER, LOTHAR (1999). "Spitzendruck bei Sondierungen. Einflußgrößen und Prognose". In: *Bautechnik* 76.7, S. 568–580.
- SMOLTCZYK, ULRICH (2009). *Grundbau-Taschenbuch, Teil 1: Geotechnische Grundlagen*. 7. Aufl. John Wiley & Sons.

Anhang

A. Tabellen aus der Literatur

Tabelle A.1: Zusammenhänge zwischen Sonden laut BAW (1990)

B A W
Ref. K1

Sondierungen

"SONDIER"
Stand 10/90

BEWERTUNG VON SONDIERUNGEN IN ROLLIGEN BÖDEN

| Sondenart | Sondierergebnis | Benennung der Festigkeit | Charakt. Scherwinkel ϕ' [°] | cal ϕ' EAU [°] | Steifemodul E_s [MN/m ²] |
|-----------|--------------------|--------------------------|----------------------------------|---------------------|----------------------------------------|
| CPT | $q_c < 2$ | | | | |
| DPL-5 | $N_{10} < 3$ | sehr gering | < 30 | < 27,5 | < 15 |
| DPL | $N_{10} < 5^*$ | | | | |
| DPH | $N_{10} < 2$ | | | | |
| SPT | $N_{30} < 4$ | | | | |
| CPT | $q_c = 2-6$ | | | | |
| DPL-5 | $N_{10} = 3-10$ | gering | 30-35 | 27,5-32,5 | 15-50 |
| DPL | $N_{10} = 5-15^*$ | | | | |
| DPH | $N_{10} = 2-6$ | | | | |
| SPT | $N_{30} = 4-12$ | | | | |
| CPT | $q_c = 6-11$ | | | | |
| DPL-5 | $N_{10} = 10-18$ | mittel | 35-37,5 | 32,5-35 | 50-80 |
| DPL | $N_{10} = 15-27^*$ | | | | |
| DPH | $N_{10} = 6-11$ | | | | |
| SPT | $N_{30} = 12-22$ | | | | |
| CPT | $q_c = 11-19$ | | | | |
| DPL-5 | $N_{10} = 18-30$ | groß | 37,5-40 | 35-37,5 | 80-100 |
| DPL | $N_{10} = 27-45^*$ | | | | |
| DPH | $N_{10} = 11-19$ | | | | |
| SPT | $N_{30} = 22-38$ | | | | |
| CPT | $q_c > 19$ | | | | |
| DPL-5 | $N_{10} > 30$ | sehr groß | > 40 | > 37,5 | > 100 |
| DPL | $N_{10} > 45^*$ | | | | |
| DPH | $N_{10} > 19$ | | | | |
| SPT | $N_{30} > 38$ | | | | |

CPT Drucksonde nach DIN 4094

DPL-5 Leichte Rammsonde nach DIN 4094 (Spitzenfläche 5 cm²)DPL Leichte Rammsonde nach DIN 4094 (Spitzenfläche 10 cm²)DPH Schwere Rammsonde nach DIN 4094 (Spitzenfläche 15 cm²)

SPT Standard Penetration Test nach DIN 4094

 q_c Spitzenwiderstand [MN/m²] N_{10} bzw. N_{30} Schlagzahl für 10 bzw. 30 cm Eindringung

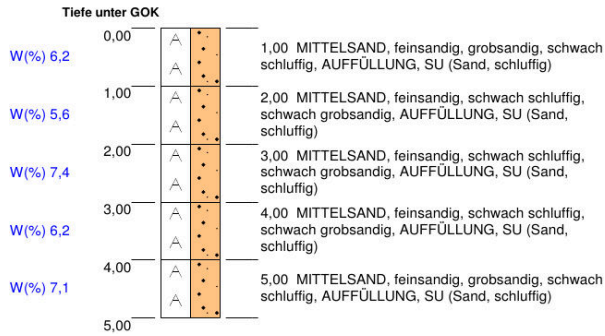
*) Diese Werte sind noch nicht ausreichend überprüft.

Tabelle A.2: Zusammenhänge zwischen Sonden laut SCHUMACHER (1999), bezogen auf Spitzendruck, prognostiziert aus Schlagenergie, Reibung und Spitzenquerschnitt.

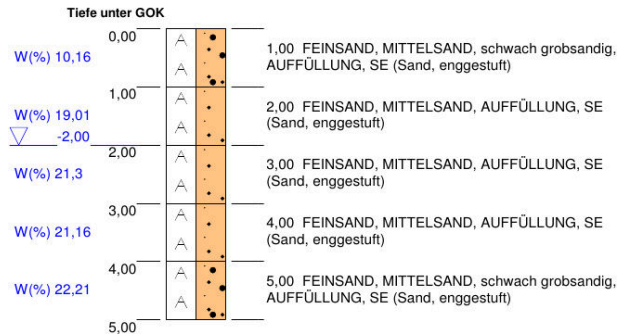
| Teufe in m | K _{DPL-5} in MPa | K _{DPL} in MPa | K _{DPM-A} in MPa | K _{DPM} in MPa | K _{DPH} in MPa | K _{SRS100} in MPa | K _{SRS200} in MPa | K _{SPT} in MPa |
|------------|---------------------------|-------------------------|---------------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------------|----------------------------|-------------------------|
| 1 | 0,73 | 0,36 | 0,52 | 1,09 | 1,33 | 1,99 | 4,24 | 0,56 |
| 5 | 0,54 | 0,27 | 0,44 | 0,87 | 1,11 | 1,76 | 3,93 | 0,56 |
| 10 | 0,46 | 0,23 | 0,37 | 0,74 | 0,95 | 1,57 | 3,64 | 0,56 |
| 15 | 0,42 | 0,21 | 0,34 | 0,67 | 0,86 | 1,44 | 3,41 | 0,56 |
| 20 | – | – | 0,31 | 0,63 | 0,80 | 1,34 | 3,22 | 0,56 |
| 30 | – | – | – | 0,58 | 0,72 | 1,22 | 2,94 | 0,56 |
| 40 | – | – | – | – | – | 1,13 | 2,73 | 0,56 |
| 50 | – | – | – | – | – | – | 2,58 | 0,56 |

B. Bohrprofile und Messwerte

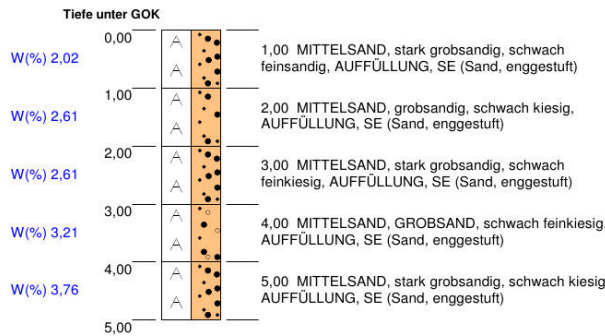
(03.05.2017)
Baakenhafen Nord P1



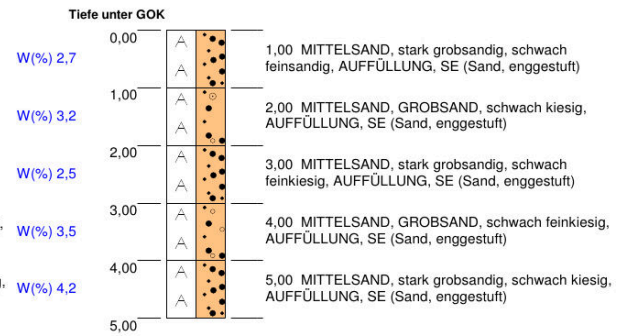
(24.05.2017)
Baakenhafen P1



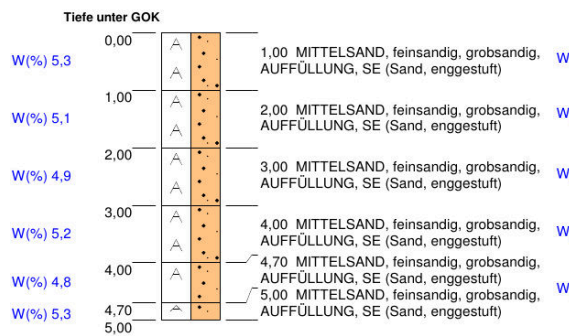
(31.05.2017)
Ellerholz Spülkopf



(05.07.2017)
Ellerholz Spülfläche



(17.05.2017)
Francop Süd P1



(17.05.2017)
Francop Süd P2

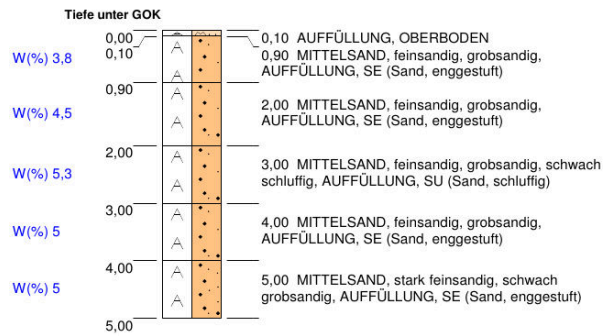


Abbildung B.1: Bohrprofile der Untersuchungsgebiete. Baakenhafen P1 mit angebohrtem Wasserstand. GOK = Geländeoberkante, W(%) = Wassergehalt (Massenprozent).

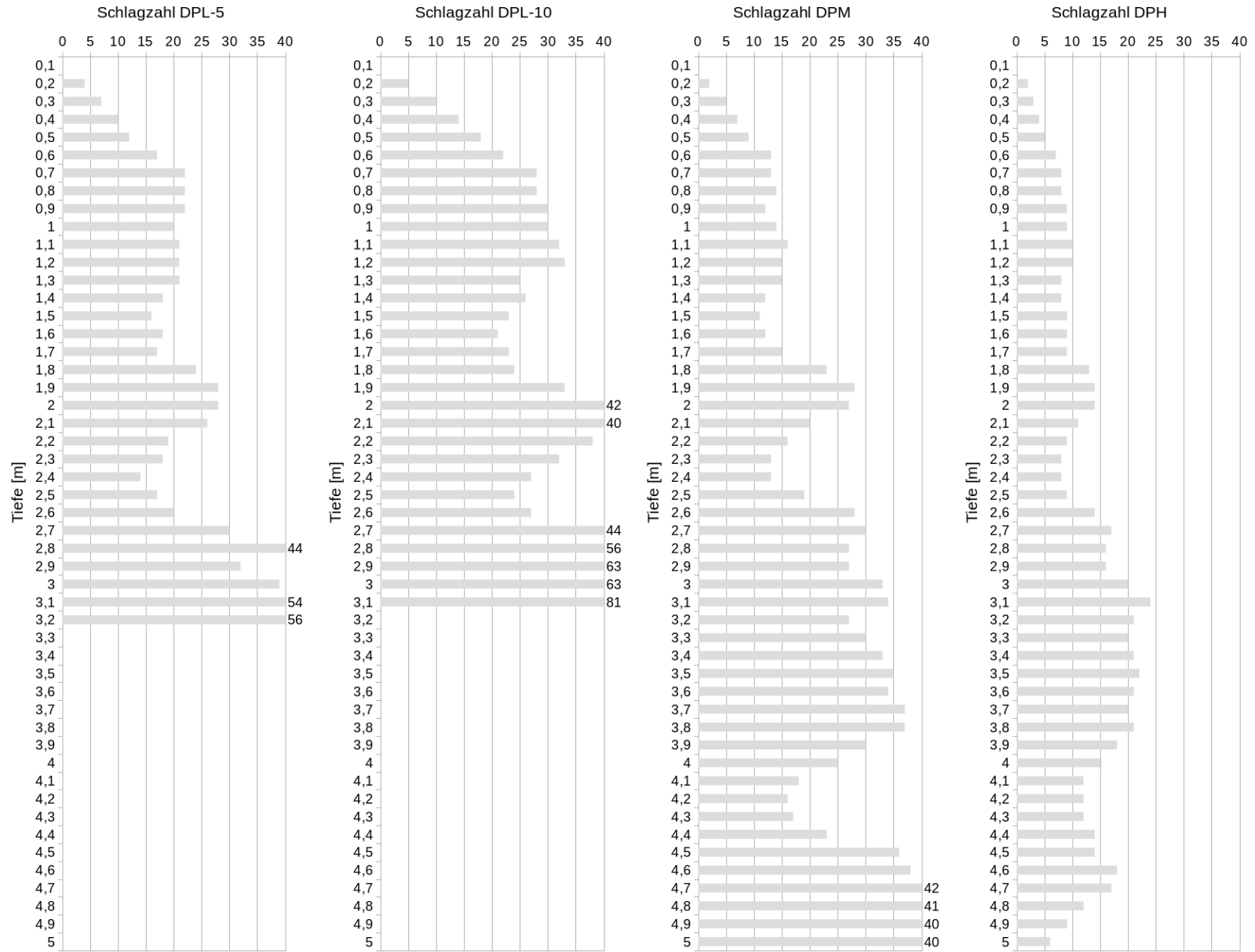


Abbildung B.2: Sondierungen Baakenhafen Nord. Anzahl Messreihen: 1

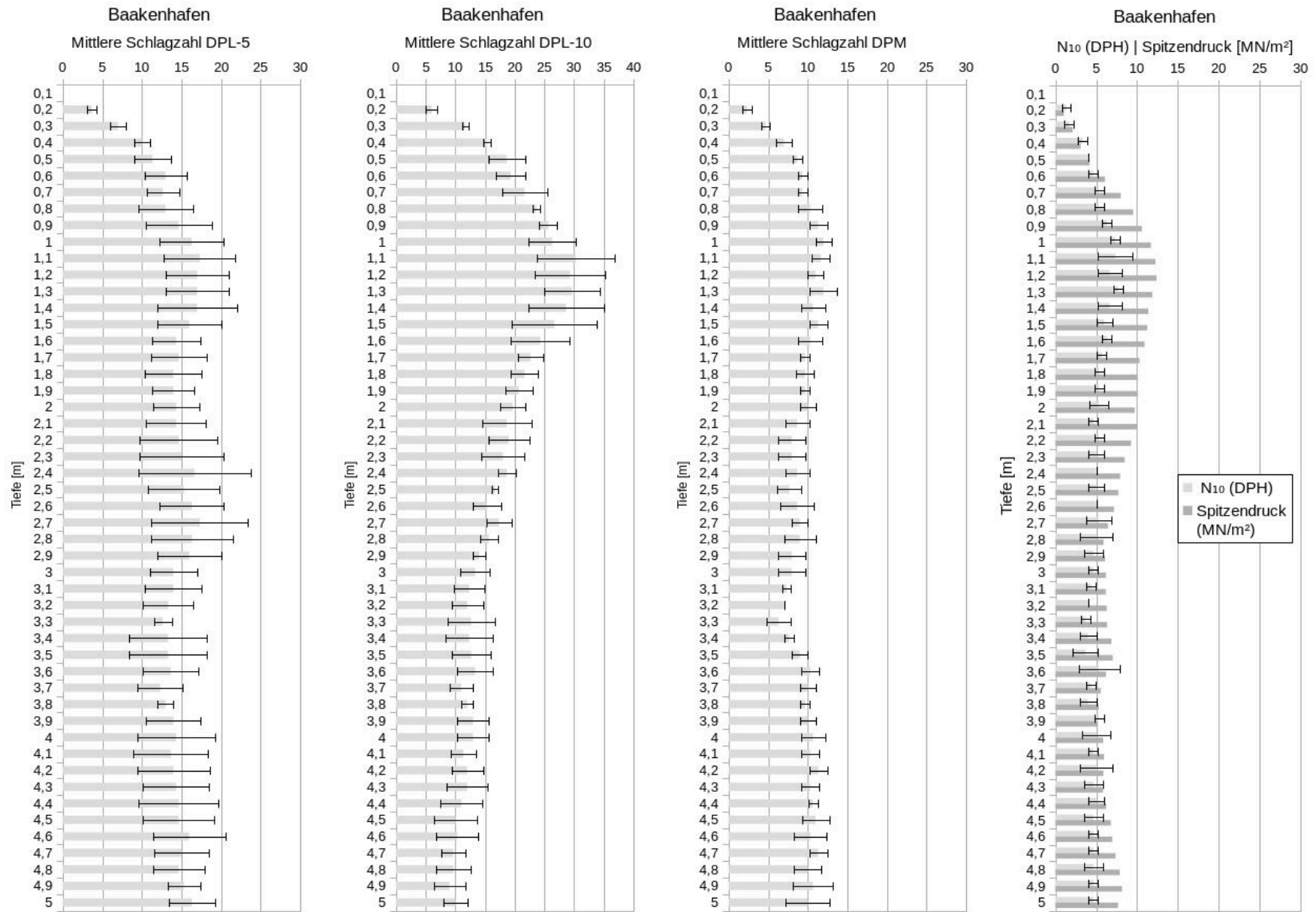


Abbildung B.3: Sondierungen Verfüllung Baakenhafen. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung. Anzahl Messreihen: 3

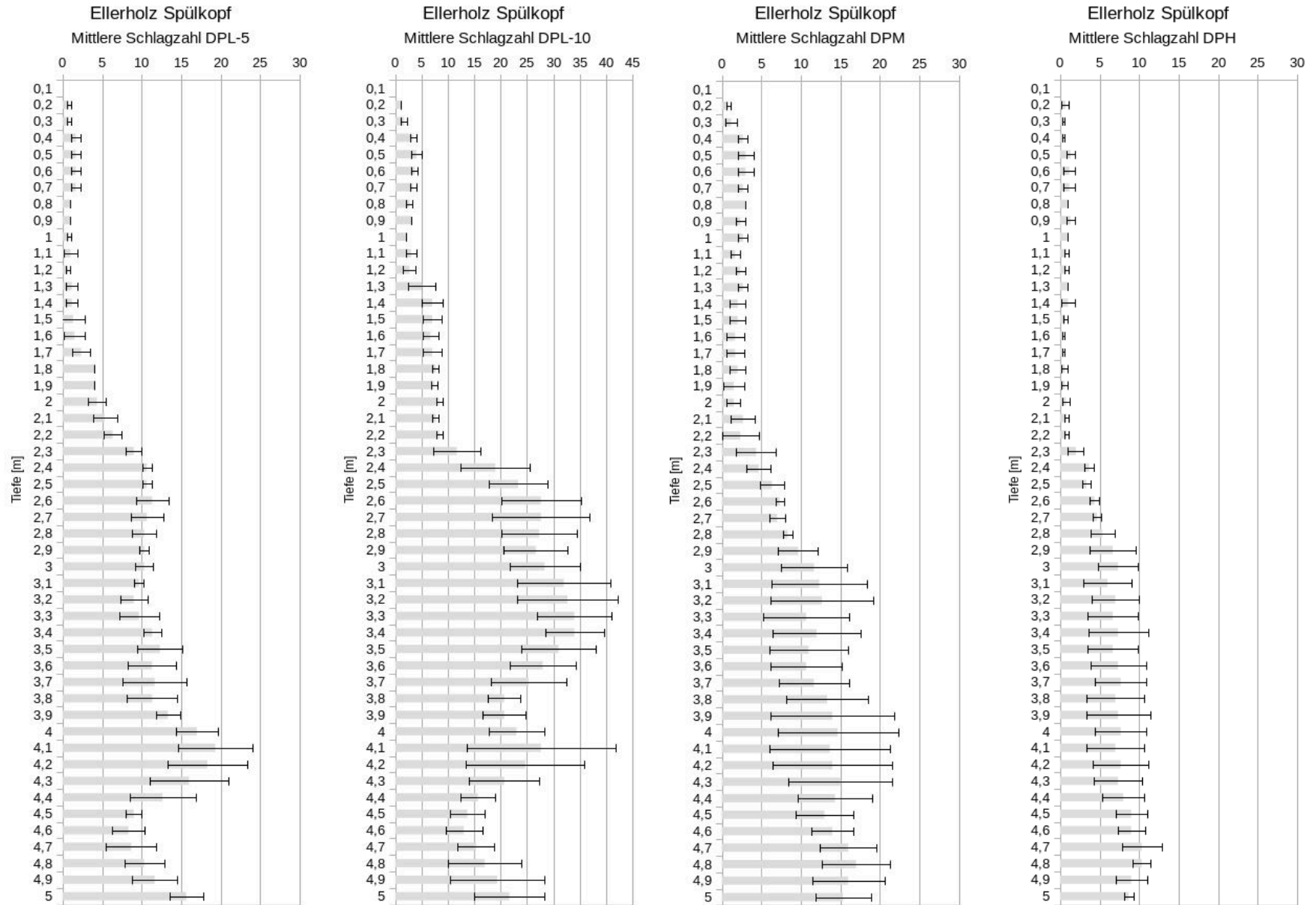


Abbildung B.4: Sondierungen Moorbург-Ellerholz Spülkopf. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung. Anzahl Messreihen: 3

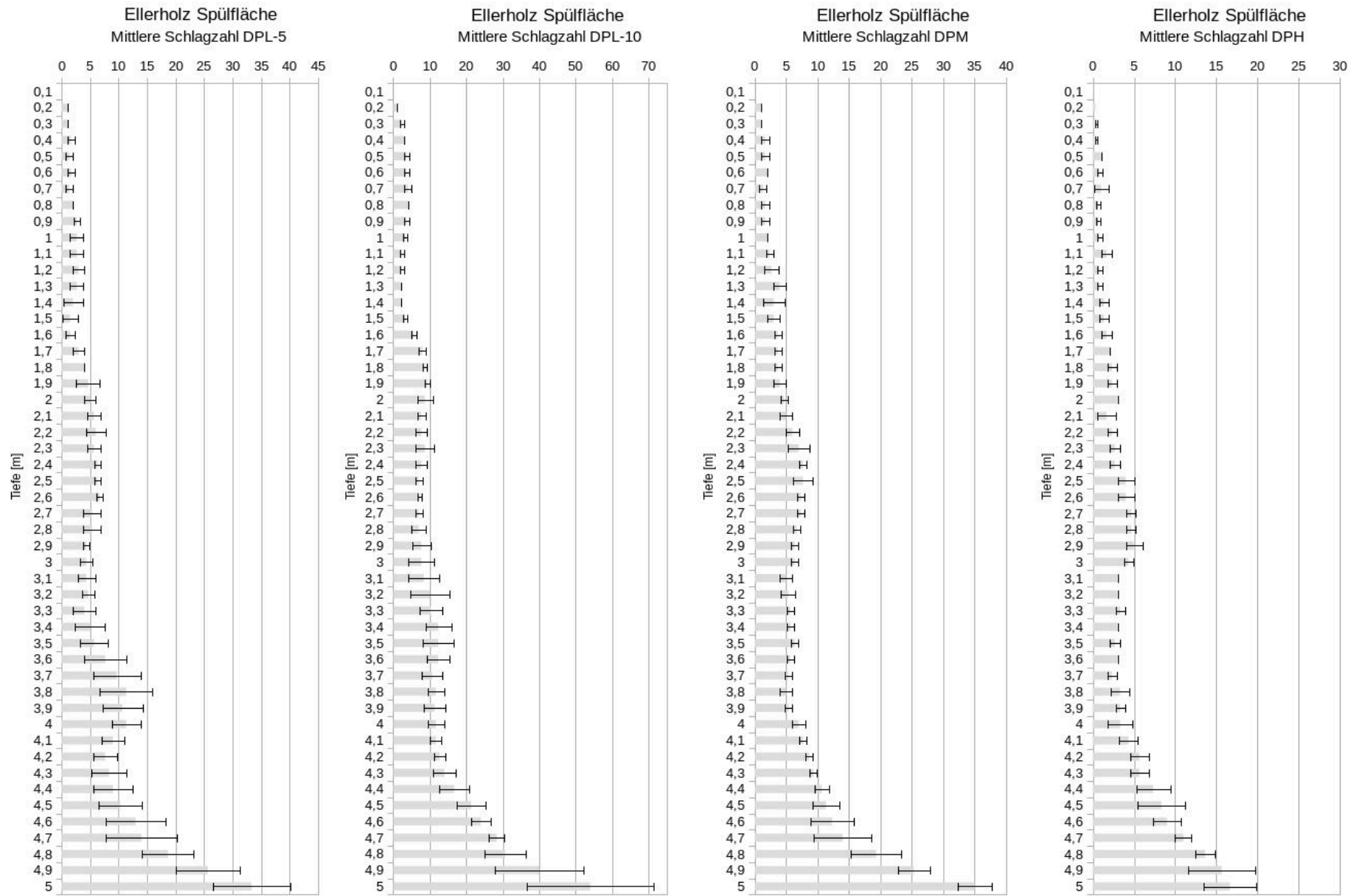


Abbildung B.5: Sondierungen Moorburg-Ellerholz Spülfläche. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung. Anzahl Messreihen: 3

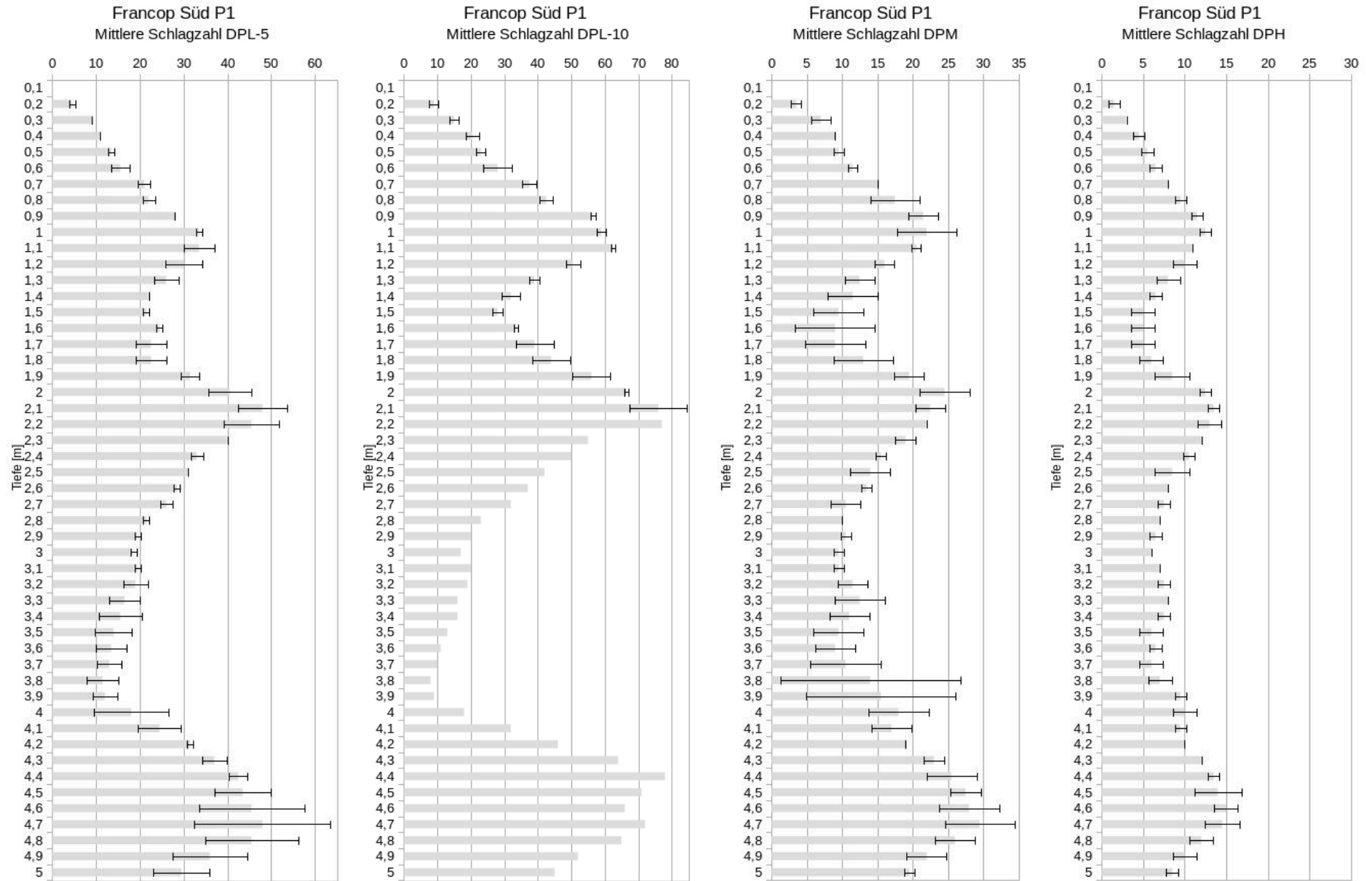


Abbildung B.6: Sondierungen Francop Süd Bereich 1. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung. Anzahl Messreihen: 2

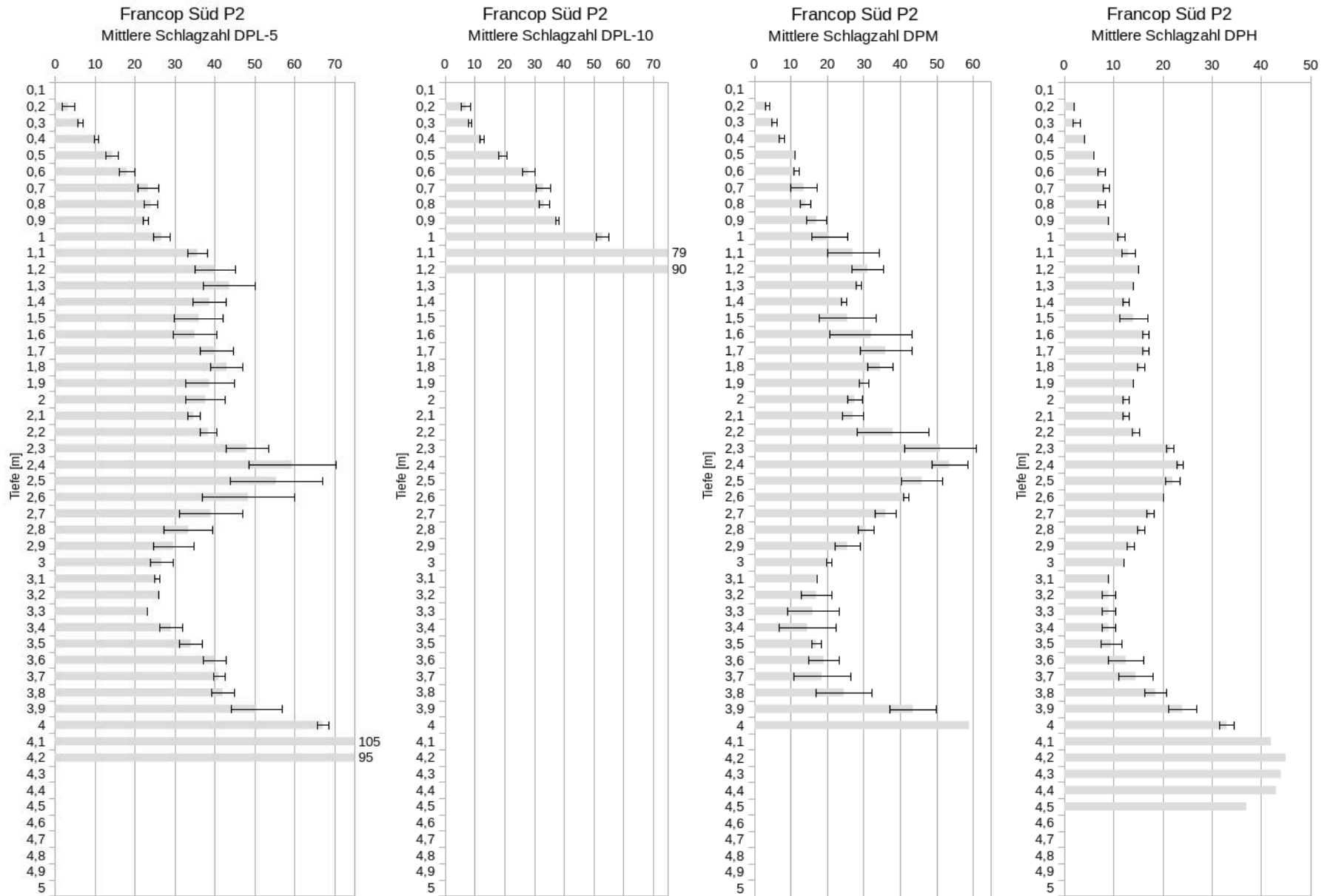


Abbildung B.7: Sondierungen Francop Süd Bereich 2. Fehlerbalken zeigen Standardabweichung. Anzahl Messreihen: 2 (DPM, DPH) / 3 (DPL)

Versicherung an Eides statt

Hiermit versichere ich an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit im Studiengang Geowissenschaften selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel – insbesondere keine im Quellenverzeichnis nicht benannten Internet-Quellen – benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus Veröffentlichungen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Ich versichere weiterhin, dass ich die Arbeit vorher nicht in einem anderen Prüfungsverfahren eingereicht habe und die eingereichte schriftliche Fassung der auf dem elektronischen Speichermedium entspricht.

Hamburg, 16. Oktober 2017

Martin Busch