

Masterarbeit an der TU Braunschweig zum Thema:

# **Untersuchungen zur axialen Tragfähigkeit und zur Rammbarkeit der Gründungspfähle beim Offshore-Windpark London Array**

Dipl.-Ing. (FH) Matthias Hencke

## **1 Einleitung**

Gründungen von Windenergieanlagen werden im Offshore-Bereich i.d.R. mittels Pfählen oder pfahlartiger Gründungselemente realisiert. Verwendet werden überwiegend offene, gerammte Stahlpfähle. Der Ermittlung von belastbaren Kennwerten für die Bemessung dieser Pfähle kommt eine entscheidende Bedeutung zu. (BALTHES et al., 2005)

Ziel der Masterthesis ist die Untersuchung der axialen Tragfähigkeit und Rammbarkeit der Gründungspfähle beim Offshore-Windpark London Array mit einer abschließenden Bewertung der Untersuchungsergebnisse. Für die Ermittlung der statischen Grenztragfähigkeit der Monopiles wurden diverse Berechnungsansätze an verschiedenen Standorten der Windenergieanlagen (WEA) angewendet und die Ergebnisse miteinander verglichen. Des Weiteren wird mit Hilfe der Software ALLNAMICS PDP der Installationsprozess der Monopiles an den gewählten Standorten simuliert. Die resultierenden Simulationsergebnisse werden anschließend den Daten der Rammprotokolle gegenübergestellt und bewertet. Die dynamischen Pfahlwiderstände, die der Rammsimulation zugrunde liegen, werden abschließend gesondert betrachtet und ebenfalls beurteilt.

## **2 Offshore-Windpark „London Array“**

Der Offshore-Windpark London Array (OWP LA) befindet sich im äußeren Themseästuar östlich von London (Abbildung 2.1).

Die Entstehung des Windparks erfolgt in zwei Phasen. Dabei wird die erste Konstruktionsphase vom Joint Venture zwischen Bilfinger Berger und Per Aarsleff (ABJV) durchgeführt. Diese beinhaltet den Bau von 175 WEA und 2 Umspannwerken. Die zweite Phase ist zum aktuellen Zeitpunkt noch nicht ausgeschrieben. Die Gründungen der WEA und der

Umspannwerke werden als Monopiles ausgeführt und besitzen bei einer Länge von bis zu 60 m einen Durchmesser zwischen 4,7 m und 5,7 m in der Gründung. Die Einbringung der Monopiles erfolgt durch Rammung mit Hilfe eines Hydrohammers.

Im Untersuchungsgebiet des OWP LA wurden 4 wesentliche Bodenarten vorgefunden. Diese sind als obere Schicht Sande und Kiese, bis zu 25 m Stärke. Unter der Kies- und Sandschicht befindet sich harter, schluffiger Ton. Diese Tonschicht weist eine Mächtigkeit von maximal 55 m auf. Die abschließende Bodenformation wird charakterisiert durch kalkartige Ureinlagerungen, die das gesamte Gebiet unterlagern.

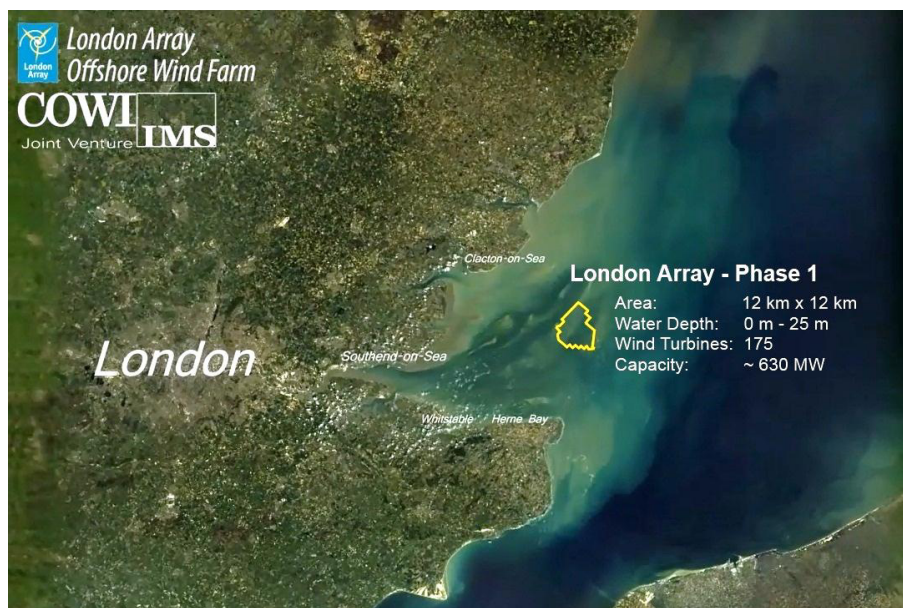


Abbildung 2.1: OWP London Array – Lage (COWI, 2010)

### 3 Tragverhalten offener Stahlrohrpfähle

Beim Rammen von Stahlrohrpfählen treten Kornumlagerungen in der näheren Pfahlumgebung auf. Innerhalb des Pfahles formt sich eine Bodensäule. Mit zunehmender Rammtiefe erhöht sich der Reibungswiderstand zwischen den Pfahlmantelflächen und dem angrenzenden Boden. Die Höhe der Bodensäule wird im Vergleich zur Einbindelänge des Pfahls kleiner und der Boden zwischen den gegenüberliegenden Mantelflächen verspannt sich. In diesem Zustand hat sich ein sogenannter minder fester Bodenpfropfen gebildet. Für die weitere Eindringung des Pfahles wird somit eine Teilverdrängung des unter dem Pfahl liegenden Bodens nötig. Während des fort dauernden Rammvorgangs kann sich der Mantelwiderstand derart erhöhen, dass sich eine vollständige Verspannung des Bodens zwischen den gegenüberliegenden Pfahlmantelflächen einstellt und sich ein fester Bodenpfropfen bildet. Der zunächst offene Pfahl wird so durch einen Bodenpfropfen am Pfahlfuß

verschlossen und verhält sich beim Tieframmen wie ein geschlossener Pfahl. (LAMMERTZ, 2008). Ob sich ein fester, minder fester oder kein Bodenpfropfen bildet, ist zu untersuchen. In der ausgeführten Masterarbeit wurde aufgrund diverser

Die beim Eindringen des Pfahls auftretende Mantelreibung kann nach dem Mohr-Coulombschen Gesetz bestimmt werden. Während der Einbringung des Pfahls finden eine Verdrängung und eine Verdichtung des Bodens statt. Dabei kommt es infolge der Scherbeanspruchung zu Umlagerungen im Korngerüst. Durch die Scherbeanspruchung findet entweder ein Abbau der Normalspannung statt, wenn der Boden kontraktantes Verhalten aufweist, oder eine Erhöhung, wenn der Boden dilatant ist. Die auf den Mantel eines offenen Pfahls wirkende Radialspannung ist geringer als bei einem vergleichbaren Pfahl mit geschlossener Spitze (WHITE et. al, 2005). Grund dafür ist, dass der geschlossene Pfahl ein größeres Bodenvolumen verdrängt und deswegen größere Radialspannungen auf den Pfahlschaft wirken. Bei offenen Pfählen bestimmt zudem der Grad der Pfropfenbildung – also ob sich ein fester, minder fester oder kein Pfropfen während der Rammung bildet – die auf den Pfahlschaft wirkende maximale Radialspannung (LAMMERTZ, 2008).

Nach der Pfahlherstellung steigen die Tragfähigkeiten infolge rückläufiger Umlagerungsprozesse wieder an. Die durch die Rammung bedingte kurzfristige Abnahme der Pfahltragfähigkeit bezieht sich auf den statischen, d.h. den vom Eindringungsweg abhängigen Anteil des Rammwiderstandes (SRD = Soil Resistance to Driving). (STAHLMANN et al., 2005). Die anschließende Tragfähigkeitssteigerung resultiert aus der Dissipation des infolge der Pfahleinbringung induzierten Porenwasserdrucks. Während dieser Vorgang in nichtbindigen Böden in der Regel innerhalb von 48 Stunden nach der Rammung abgeschlossen ist, kann die vollständige Dissipation in bindigen Böden bis zu mehreren Wochen andauern. Bei dem sich über einen längeren Zeitraum erstreckenden Festigkeitszuwachs spricht man auch vom Anwachsen des Pfahls.

## **4 Ermittlung axialer Tragfähigkeiten**

Rechnerisch setzt sich die Tragfähigkeit eines Pfahles aus Spitzenwiderstand am Pfahlfuß und Mantelreibung am Pfahlumfang zusammen. Der Spitzenwiderstand ergibt sich dabei aus der Multiplikation der wirksamen Pfahlfußfläche mit dem Spitzendruck. Der Mantelwiderstand wiederum ergibt sich aus dem Produkt des Pfahlumfangs und dem Integral der Mantelreibung. Mantelreibung und Spitzendruck können mit unterschiedlichen Herangehensweisen ermittelt werden. Zum Vorgehen zur Abschätzung der Tragfähigkeit eines Pfahles liegt in der einschlägigen Literatur eine Vielzahl von Verfahren vor. So gibt es neben den direkten und den indirekten Verfahren weiterhin die halbempirischen Verfahren. Diese halbempirischen Verfahren, die sich für die Abschätzung der Tragfähigkeit von

gerammten Pfählen durchgesetzt haben wurden im Verlauf der Masterarbeit angewendet. Grundlage der halbempirischen Verfahren ist die Ableitung des Pfahlwiderstandes aus mit der Drucksonde gemessenen Spitzendrücken. Die Ermittlung der Pfahlmantelreibung und des Pfahlspitzendrucks erfolgt mit erdstatischen Ansätzen. Zur Anwendung kamen die Verfahren des API (American Petroleum Institute), des ICP (Imperial College Pile), der UWA (University of Western Australia), des NGI (Norwegian Geotechnical Institute), nach FUGRO und das Verfahren nach FORAY & COLLIAT. Die Bemessungsansätze dieser Verfahren wurden in der Theorie erläutert und anschließend an verschiedenen Standorten im Windpark angewendet. Abschließend wurden die ermittelten Ergebnisse nach den verschiedenen Verfahren miteinander verglichen.

## **5 Rammsimulation**

Neben der Ermittlung der Tragfähigkeit wurde im Rahmen der Masterarbeit an verschiedenen Standorten die Rammbarkeit der Monopiles untersucht. Hierzu wurde das Programm ALLNAMICS PDP verwendet. Die realen Hammerkennwerte, Pfahlabmessungen und Bodenverhältnisse flossen in das Programm als Eingangsdaten ein. Dazu wurden im Programm die eingesetzten Hämmer ausgewählt oder ggf. definiert, der Pfahl mit seinen Eigenschaften wie Länge, Wandstärke, Durchmesser und Material eingegeben und die Bodeneigenschaften mit einem entsprechenden Bodenmodell möglichst realitätsnah abgebildet. Zudem wird die Rammenergie definiert, um so den Rammvorgang realitätsnah abbilden zu können. Für eine abschließende Beurteilung der Simulationsergebnisse, wurden diese mit den Rammprotokollen verglichen, grafisch dargestellt und interpretiert.

Des Weiteren wurden die der Rammung zugrunde liegenden dynamischen Pfahlwiderstände betrachtet und für die ausgewählten Standorte untersucht. Das Programm ALLNAMCIS PDP wurde auch hier eingesetzt und mit den Ergebnisse der Bemessungsansätze nach STEVENS et al. (1982) und nach ALM & HAMRE (2001)

## **6 Zusammenfassung**

Die Tragfähigkeit der Gründungspfähle wird mit Hilfe der Bemessungsansätze zur Ermittlung von axialen Tragfähigkeiten offener Stahlohrpfähle in nichtbindigen Böden und bindigen Böden ermittelt. Bei der Bemessung wird lediglich ein unverspannter Zustand des Bodens im Pfahl betrachtet, eine vollständige Pfropfenbildung bleibt unberücksichtigt. Aus den Ergebnissen ist zu erkennen, dass die angewendeten Bemessungsansätze variierende Tragfähigkeiten ermitteln.

Neben der axialen Tragfähigkeit wird die Rammpbarkeit der Monopiles untersucht. Für die Simulation der Pfahlrammung findet die Software ALLNAMICS PDP Verwendung. Die Vergleiche der Ergebnisse aus den Simulationen mit den Rammprotokollen zeigen für den aus Sand und Ton bestehenden Baugrund eine sehr gute Übereinstimmung. Des Weiteren werden die der Rammung zugrunde liegenden dynamischen Pfahlwiderstände betrachtet und mit den Werten nach STEVENS et al. (1982) und ALM & HAMRE (2001) verglichen. Für die örtlichen, bodenspezifischen Randbedingungen kann die Software ALLNAMICS PDP sowohl für die Rammung als auch die dynamischen Pfahlwiderstände ein sehr gutes Ergebnis erzielen.

## **7 Literaturverzeichnis**

HAMRE, L.; ALM, T.; (2001): Soil model for pile driveability predictions based on CPT interpretations

BALTHES, R.; THIELE, R.; L.v.d. ZWAAG, G. (2005): Geotechnische Erkundung im Nearshore- und Offshore-Bereich zur Ermittlung von Bodenkennwerten für die Bemessung von Pfahlgründungen, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Pfahl-Symposium, Braunschweig

COWI (2010): Animationsfilm „Offshore Wind Farm London Array“

LAMMERTZ, P. (2008): Ermittlung der Tragfähigkeit vibrierter Stahlrohrpfähle in nichtbindigem Boden, hrsg. von Professor Dr.-Ing. W. Richwien, Universität Duisburg-Essen, VGE Verlag GmbH, Essen

STAHLMANN, J.; FISCHER, J. (2005): Rammpbarkeitsuntersuchungen für Offshore-Monopiles von Windenergieanlagen, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig, Pfahl-Symposium, Braunschweig

STEVENS, R.; WILTSIE, E.; TURTON, H. (1982): Evaluating Pile Drivability for Hard Clay, Very Dense Sand, and Rock, 14<sup>th</sup> Annual Offshore Technology Conference, Houston, Texas

WHITE, D.J.; SCHNEIDER, J.A.; LEHANE, B.M. (2005): The Influence of Effective Area Ratio on Shaft Friction of Displacement Piles in Sand; Proceedings of the International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, Balkema, p. 741-747, Rotterdam

## Anhang

Im Anhang sind exemplarisch die vergleichenden Ergebnisse für einen untersuchten Standort dargestellt. So sind sowohl die ermittelten Tragfähigkeiten als auch die Ergebnisse einer Rammsimulation aufgeführt.

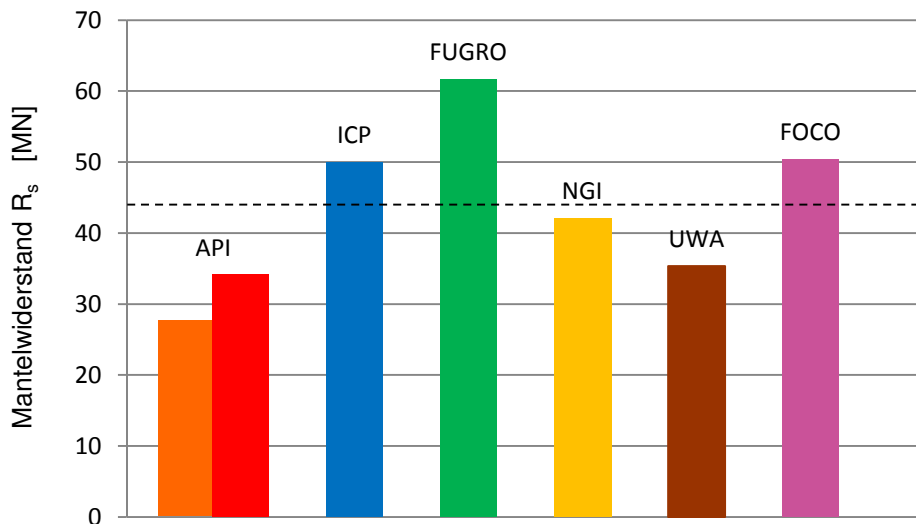


Abbildung 0.1: Vergleich der Mantelreibung  $R_s$  am Standort NB 13

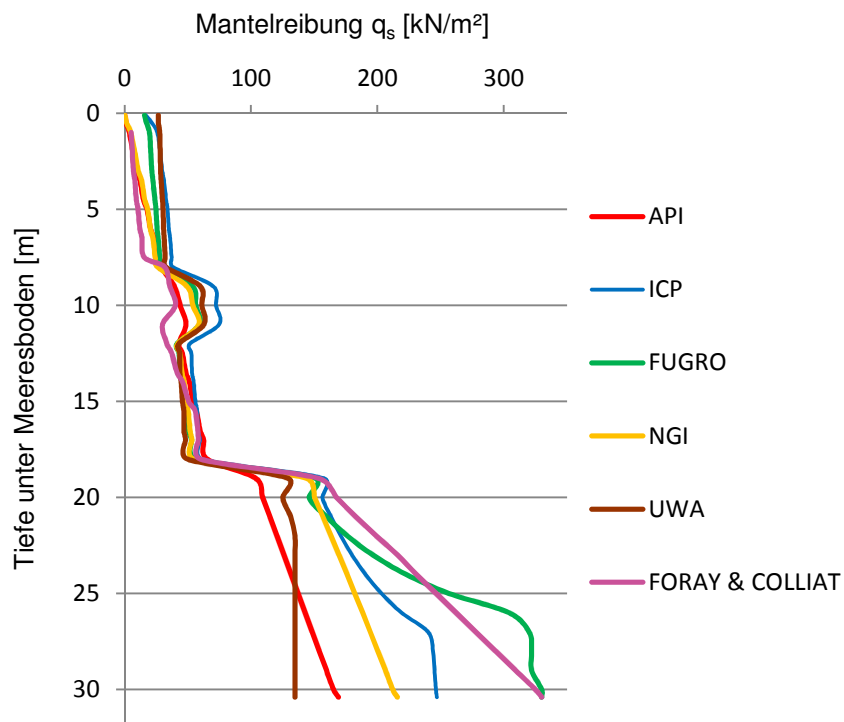


Abbildung 0.2: Vergleich der Mantelreibung  $q_s$  über die Tiefe

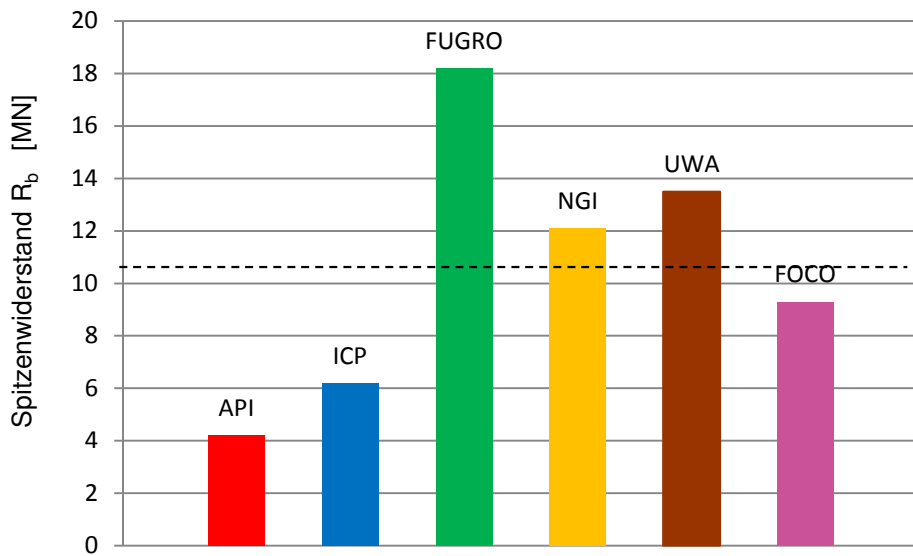


Abbildung 0.3: Vergleich der Spitzendruck  $R_b$  am Standort NB 13

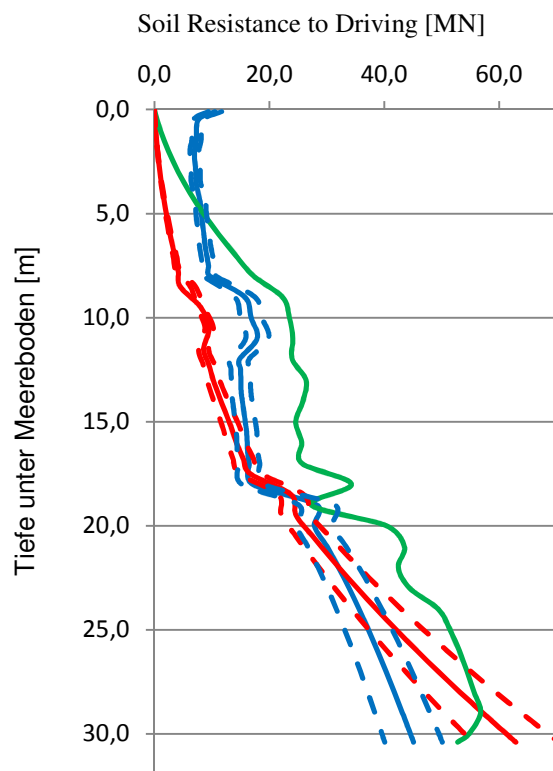


Abbildung 0.4: SRD – Standort NB13

— STEVENS

— ALM & HAMRE

— ALLNAMCIS PDP

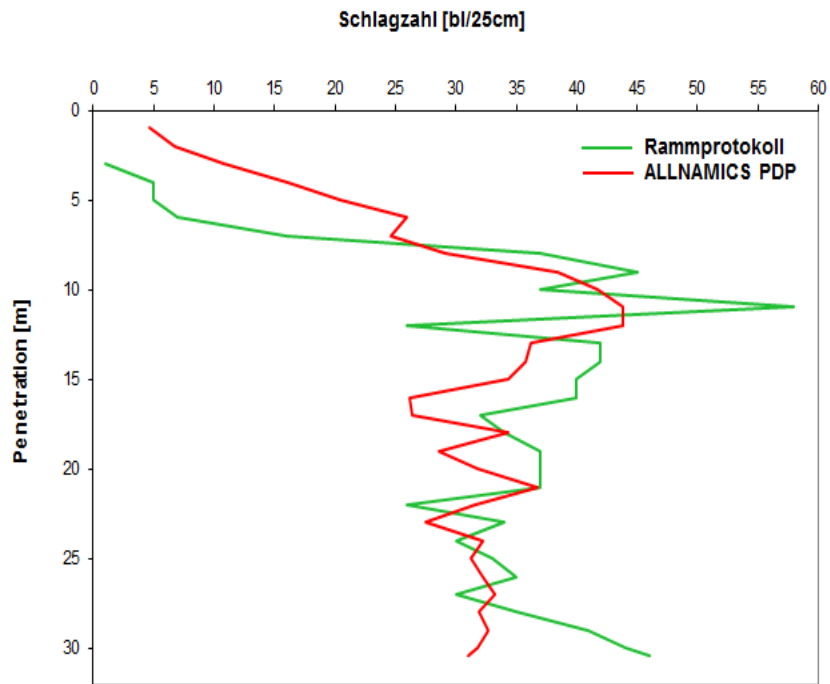


Abbildung 0.5: Standort NB 13 – Vergleich Schlagzahl/Distanz

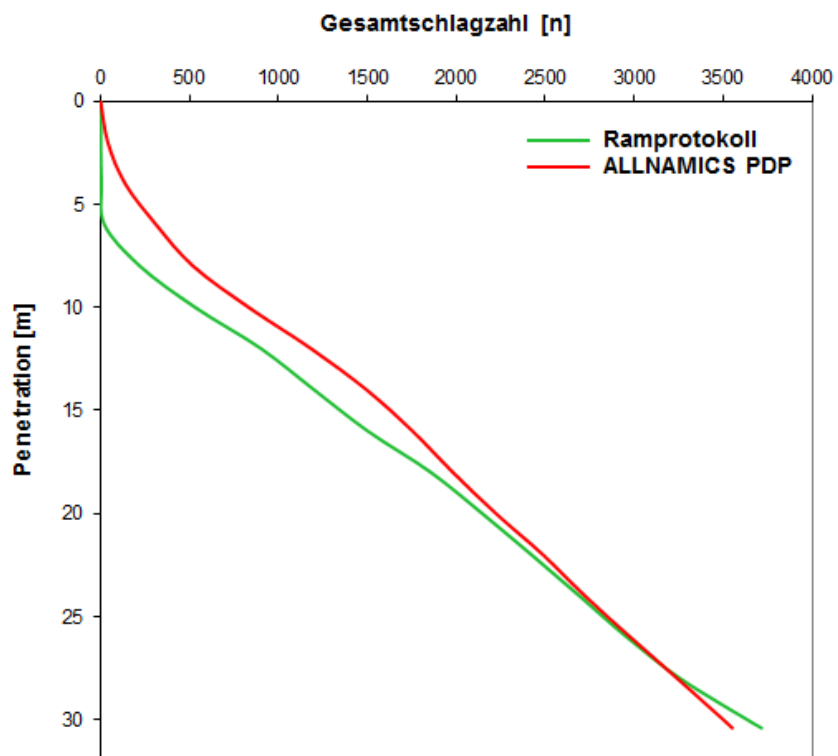


Abbildung 0.6: Standort NB 13 – Vergleich Gesamtschlagzahl