

# **Pfahl-Boden-Interaktion beim Rückbau von Rohrpfählen durch die Erzeugung eines hydraulischen Überdrucks im Pfahlinneren**

Von der  
Fakultät Architektur, Bauingenieurwesen und Umweltwissenschaften  
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina  
zu Braunschweig

zur Erlangung des Grades eines  
**Doktoringenieurs (Dr.-Ing.)**  
genehmigte

## **Dissertation**

von  
Nils Hinzmann  
geboren am 22.01.1988  
aus Gladbeck

Eingereicht am: 27. Juni 2023

Disputation am: 23. Januar 2024

Berichterstatter: Prof. Dr.-Ing. Joachim Stahlmann  
Prof. Dr.-Ing. Markus Herten

(2024)

---

*"Without speculation there is no good and original observation."*

Charles Darwin

---



## Inhaltsverzeichnis

|          |                                                                                     |           |
|----------|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Motivation .....</b>                                                             | <b>1</b>  |
| 1.1      | Einführung in die Fragestellung .....                                               | 1         |
| 1.2      | Ziel und Struktur der Arbeit .....                                                  | 2         |
| <b>2</b> | <b>Rückbau von Offshore-Pfahlgründungen.....</b>                                    | <b>4</b>  |
| 2.1      | Offshore-Windenergieanlagen .....                                                   | 4         |
| 2.2      | Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen .....                                       | 7         |
| 2.3      | Forschungsvorhaben DeCoMP.....                                                      | 8         |
| 2.3.1    | Vibrationstechnik.....                                                              | 9         |
| 2.3.2    | Spüllanzen .....                                                                    | 10        |
| 2.3.3    | Bodenaushub im Pfahllinneren – Dredging .....                                       | 11        |
| 2.3.4    | Hydraulischer Überdruck .....                                                       | 12        |
| <b>3</b> | <b>Tragverhalten eines unter Innendruck stehenden Rohrpfahls .....</b>              | <b>14</b> |
| 3.1      | Grundlegendes zum Tragverhalten.....                                                | 14        |
| 3.2      | Axiales Tragverhalten von Zugpfählen.....                                           | 14        |
| 3.2.1    | Spannungszustand an der Pfahllaußenseite .....                                      | 19        |
| 3.2.2    | Spannungszustand im Pfahllinneren .....                                             | 23        |
| 3.2.3    | Beschreibung der statischen Kontaktspannung zwischen Pfahlmantel<br>und Boden ..... | 32        |
| 3.3      | Strömendes Wasser im Boden .....                                                    | 37        |
| 3.3.1    | Hydrodynamische Bodendeformation mit Kornumlagerung.....                            | 39        |
| 3.3.2    | Veränderung des Spannungszustands .....                                             | 40        |
| 3.4      | Tragverhalten eines Rohrpfahls bei Innendruck .....                                 | 42        |
| 3.5      | Resümee der Literaturstudie.....                                                    | 44        |
| <b>4</b> | <b>Arbeitshypothesen .....</b>                                                      | <b>45</b> |
| <b>5</b> | <b>Ziel der Arbeit.....</b>                                                         | <b>49</b> |
| <b>6</b> | <b>Modellversuche.....</b>                                                          | <b>51</b> |
| 6.1      | Versuchseinrichtung .....                                                           | 51        |
| 6.2      | Versuchsplanung .....                                                               | 53        |
| 6.2.1    | Modellboden .....                                                                   | 53        |
| 6.2.2    | Modellpfahl .....                                                                   | 55        |
| 6.3      | Messkonzept.....                                                                    | 59        |
| 6.3.1    | Pfahllmesstechnik.....                                                              | 60        |
| 6.3.2    | Spannungsmessung im Boden .....                                                     | 66        |

|           |                                                                                        |            |
|-----------|----------------------------------------------------------------------------------------|------------|
| 6.3.3     | Druckerzeugung.....                                                                    | 68         |
| 6.4       | Versuchsprogramm.....                                                                  | 70         |
| 6.5       | Sondierung .....                                                                       | 72         |
| 6.6       | Pfahlinstallation.....                                                                 | 73         |
| 6.7       | Axiale Pfahltragfähigkeit .....                                                        | 77         |
| 6.7.1     | Durchführung der statischen Probelastungen .....                                       | 78         |
| 6.7.2     | Auswertung der statischen Probelastungen.....                                          | 79         |
| <b>7</b>  | <b>Auswertung und Interpretation der Messergebnisse .....</b>                          | <b>80</b>  |
| 7.1       | Grundlegendes zur Ergebnisdarstellung .....                                            | 80         |
| 7.2       | Versuchsreihe 1 – Stufenweise Drucksteigerung.....                                     | 80         |
| 7.2.1     | Versuchsparameter der Versuchsreihe 1.....                                             | 80         |
| 7.2.2     | Spannungsmessungen am Pfahl der Versuchsreihe 1 .....                                  | 81         |
| 7.2.3     | Spannungsmessungen im Boden der Versuchsreihe 1 .....                                  | 87         |
| 7.2.4     | Effektivspannung der Versuchsreihe 1 .....                                             | 90         |
| 7.2.5     | Kurzzusammenfassung Ergebnisse Versuchsreihe 1.....                                    | 97         |
| 7.3       | Versuchsreihe 2 – Kontinuierliche Drucksteigerung.....                                 | 98         |
| 7.3.1     | Versuchsparameter der Versuchsreihe 2.....                                             | 98         |
| 7.3.2     | Spannungsmessungen am Pfahl der Versuchsreihe 2 .....                                  | 99         |
| 7.3.3     | Spannungsmessungen im Boden der Versuchsreihe 2 .....                                  | 101        |
| 7.3.4     | Effektivspannung der Versuchsreihe 2 .....                                             | 104        |
| 7.3.5     | Kurzzusammenfassung Ergebnisse Versuchsreihe 2.....                                    | 107        |
| 7.4       | Versuchsreihe 3 – Simulierte Abdichtung .....                                          | 108        |
| 7.4.1     | Versuchsparameter der Versuchsreihe 3.....                                             | 108        |
| 7.4.2     | Spannungsmessungen am Pfahl der Versuchsreihe 3 .....                                  | 110        |
| 7.4.3     | Spannungsmessungen im Boden der Versuchsreihe 3 .....                                  | 113        |
| 7.4.4     | Effektivspannung der Versuchsreihe 3 .....                                             | 115        |
| 7.4.5     | Kurzzusammenfassung Ergebnisse Versuchsreihe 3.....                                    | 118        |
| 7.5       | Zusammenfassung der Auswertung und Interpretation .....                                | 118        |
| <b>8</b>  | <b>Vergleich der Messergebnisse mit Erkenntnissen aus der Literatur .....</b>          | <b>122</b> |
| <b>9</b>  | <b>Auswirkung der Extraktion auf die Lagerungsdichtung des anstehenden Bodens.....</b> | <b>127</b> |
| <b>10</b> | <b>Resümee.....</b>                                                                    | <b>132</b> |
| <b>11</b> | <b>Literatur .....</b>                                                                 | <b>135</b> |
|           | <b>Verwendete Normen und Richtlinien .....</b>                                         | <b>141</b> |
|           | <b>Verwendete Software .....</b>                                                       | <b>142</b> |
|           | <b>Anhang .....</b>                                                                    | <b>143</b> |

|    |                                                                     |
|----|---------------------------------------------------------------------|
| A1 | Abkürzungsverzeichnis                                               |
| A2 | Lateinische Buchstaben (Symbolverzeichnis)                          |
| A3 | Griechische Buchstaben (Symbolverzeichnis)                          |
| B  | Modellierungsparameter der stationären<br>Sickerströmungsberechnung |
| C  | Laboruntersuchungen                                                 |
| D1 | Versuchsergebnisse HO1                                              |
| D2 | Versuchsergebnisse HO2                                              |
| D3 | Versuchsergebnisse HO3                                              |
| D4 | Versuchsergebnisse HO4                                              |
| D5 | Versuchsergebnisse HO5                                              |
| D6 | Versuchsergebnisse HO6                                              |
| D7 | Versuchsergebnisse HO7                                              |
| D8 | Versuchsergebnisse HO8                                              |
| E  | Versuchsgeräte                                                      |

---

## Kurzfassung

Das Thema der vorliegenden Arbeit ist die Untersuchung der Pfahl-Boden-Interaktion beim Rückbau von Rohrpfählen durch die Erzeugung eines hydraulischen Überdrucks im Pfahlinneren. Im Vordergrund steht dabei die Betrachtung der Spannungsänderung in der Scherzone durch eine aufgebrachte Druckbelastung und Durchströmung des Rohrpfahls.

Zur Beurteilung der Spannungsänderung in der Scherzone wurden umfangreiche großmaßstäbliche Modellversuche durchgeführt. Für die messtechnische Erfassung und Beurteilung der bodenphysikalischen Prozesse im Kontaktbereich Pfahl-Boden wurden neu entwickelte Totalspannungsgeber auf dem Pfahlmantel appliziert. Bisher war eine Beurteilung der ungestörten Scherzone nicht möglich. Entweder wurde die Scherzone durch einen großen Auftrag der Sensoren beeinflusst, oder die Sensoren wurden mit einem Abstand zum Pfahlmantel angeordnet, sodass die Phänomene lediglich abgeschätzt werden konnten.

Die Ergebnisse der Modellversuche haben eine starke Abhängigkeit zwischen dem Durchfluss des eingeleiteten fluiden Mediums und einer erfolgreichen Extraktion gezeigt. So konnte festgestellt werden, dass sich bei großer Durchströmung die Kontaktspannung in der Scherzone infolge einer hydromechanischen Bodendeformation mit Kornumlagerung reduziert. Eine besonders ausgeprägte Spannungsreduktion konnte bei einer stufenweisen Druckerzeugung beobachtet werden. Die aufgebrachte Druckbelastung im Pfahlinneren erzeugt eine Erhöhung der Effektivspannungen  $\Delta\sigma'_v$  und  $\Delta\sigma'_h$  entlang des Pfahlschafts. Ohne die Spannungsreduktion infolge der Gefügeänderung führt die Spannungssteigerung von  $\Delta\sigma'_h$  zu einer signifikanten Erhöhung der Pfahlwiderstände und beeinflusst damit maßgeblich die Extraktion.

Zur Abschätzung des erforderlichen Drucks und der Erfolgsaussicht ist die Erkenntnis der zeitlich bedingten Spannungsreduktion von großer Bedeutung. Bisherige Untersuchungen zeigen zwar die Zunahme in  $\Delta\sigma'_h$  infolge einer Druckbelastung, aber nicht eine relevante Reduktion der Effektivspannung im Pfahlinneren. Die entwickelten Totalspannungsgeber ermöglichen die Erfassung von Spannungsänderungen direkt im Kontaktbereich Pfahl-Boden. Daraus ergeben sich weitere Möglichkeiten, bisher unbeantwortete Fragestellungen in der Geotechnik wie bspw. das Tragverhalten von Pfählen näher zu untersuchen.

---

## Abstract

The scope of the present thesis is the investigation of pile-soil-interaction during the decommissioning of open-ended pipe piles by generating a hydraulic overpressure inside the pile. The main focus is the analysis of the stress change in the shear zone, due to an applied pressure load and fluid flow through the pipe pile.

To answer the research question, large-scale model tests were carried out with newly developed total stress transducer, for the metrological recording and assessment of the physical processes in the shear zone, on the pile surface. Previously, an assessment of the undisturbed shear zone was not possible. The shear zone was influenced by a thickness of the sensors or the sensors were arranged with a distance to the pile shaft, so that the phenomena could only be estimated.

The results of the model tests showed a strong dependence between the flow rate of the introduced fluid medium and a successful extraction. Thus, it was found that a reduction of the contact stress in the shear zone takes place in case of a large flow rate, due to a hydrodynamic soil rearrangement. The stress reduction was observed to be particularly pronounced in the case of gradual pressure application with sufficient pressure maintenance. The generated compressive force on the inside soil produces an increase in the effective stresses  $\Delta\sigma'_v$  and  $\Delta\sigma'_h$  along the pile shaft. Without the stress reduction due to the hydrodynamic soil rearrangement, the stress increase of  $\Delta\sigma'_h$  leads to a significant increase of the pile resistances and thus significantly affects the extraction.

To estimate the required pressure and the probability of success, the recognition of the stress reduction over time is of great importance. Previous investigations show the increase in  $\Delta\sigma'_h$  due to pressure loading, but not a relevant reduction of the effective stress inside the pile. The developed total stress transducers allow the detection of stress changes directly in the pile-soil contact area. This opens up further possibilities for investigating previously unanswered questions in geotechnical engineering, such as the load-bearing behaviour of piles.

# 1 Motivation

## 1.1 Einführung in die Fragestellung

Neben dem Bestreben vollständig auf fossile Rohstoffe zur Energiegewinnung zu verzichten, haben die Ereignisse im Jahr 2022 die Verwundbarkeit und potenzielle Instabilität des gesamten deutschen Energiemarkts infolge zu großer Lieferabhängigkeiten gezeigt. Neben der deutschen Bundesregierung haben weitere EU-Mitglieder daher den Ausbau von Erneuerbaren Energien und speziell den Ausbau der Offshore-Windenergie forciert [BUNDESREGIERUNG, 2022].

Seit der Fertigstellung des ersten deutschen Offshore-Windparks (OWP) *alpha ventus* im Jahr 2010 ist die Weiterentwicklung hinsichtlich Gründungsstrukturen und Dimensionen stark vorangegangen. Mit einer prognostizierten Lebensdauer von ca. 25 Jahren hat eine Offshore-Windenergieanlage (OWEA) und damit der gesamte OWP eine kurze Lebensdauer. Die Betreiber von OWP müssen vor dem Ende der Lebenszeit geeignete Rückbaustrategien und -konzepte beim Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie beantragen [BSH, 2022]. Geeignete Verfahren für den Rückbau der Gründungsstrukturen sind von großer Bedeutung.

OWEA werden überwiegend auf Pfählen, einem Monopfahl oder einer Pfahlgruppe gegründet [WIND EUROPE, 2022]. Die Pfahleinbindelängen fertiggestellter OWP betragen überwiegend zwischen 20 und 40 m [WIND EUROPE, 2020]. Der Rückbau solcher Pfahlgründungen erfolgt derzeit durch ein Abtrennen des Pfahls kurz unterhalb der Meeresbodenoberfläche [HINZMANN ET AL., 2017]. Nach den Vorgaben des BSH [2022] ist die Tiefe so zu wählen, dass ein Freispülen des verbleibenden Pfahls ausgeschlossen ist.

Aufgrund der Dimensionen und einer Standzeit von 25 Jahren kann von sehr hohen axialen Widerständen der Gründungspfähle ausgegangen werden. Die vollständige Entfernung eines Pfahls ist technisch zwar möglich, birgt allerdings einen sehr hohen Aufwand. Wenn die Pfähle vollständig aus dem Untergrund entfernt werden sollen, muss daher der Pfahlwiderstand reduziert werden. Verfahren für eine rückstandslose

Extraktion der Gründungspfähle befinden sich noch im Entwicklungsstadium und sind noch nicht praktisch erprobt.

Um diese Lücke zu schließen, wurden im Forschungsvorhaben DeCoMP (DeCommissioning of Monopiles) – Großmaßstäbliche Untersuchungen technischer Lösungen zum Rückbau von Gründungspfählen von Offshore-Windenergieanlagen (FKZ: 0324316) am Institut für Geomechanik und Geotechnik der Technischen Universität Braunschweig (IGG-TUBS) von 2016 bis 2022 – Verfahren für einen vollständigen Rückbau von Offshore-Pfahlgründungen in großmaßstäblichen Modellversuchen untersucht.

Eines der im Forschungsvorhaben DeCoMP untersuchten Verfahren ist die Extraktion eines Modellpfahls durch hydraulischen Überdruck. Im Rahmen dieser Dissertation werden die physikalischen Prozesse im Pfahlinneren während der Extraktion eines Modellpfahls mittels der Erzeugung eines hydraulischen Überdrucks genauer untersucht.

## 1.2 Ziel und Struktur der Arbeit

Das Ziel der vorliegenden Arbeit ist es, einen Beitrag zum Verständnis hinsichtlich der Pfahl-Boden-Interaktion während der Extraktion eines Modellpfahls mittels hydraulischen Überdrucks zu leisten. Zur Erfassung der Spannungsänderung und damit der Korrelation von möglichen Veränderungen im Korngerüst des Bodens ist es unabdingbar, den Kontaktbereich zwischen Pfahl und Boden zu betrachten. Der im Pfahlinneren aufgebrauchte Druck bedingt eine signifikante Spannungserhöhung und Gefügeänderung infolge der Durchströmung des eingeleiteten fluiden Mediums.

Im Rahmen dieser Arbeit werden die beschriebenen Prozesse und Interaktionen in großmaßstäblichen Versuchsreihen untersucht. Zur Beurteilung der geotechnischen Phänomene werden eigens entwickelte Totalspannungs- und Porenwasserdrucksensoren in die Oberfläche des Modellpfahls integriert. Des Weiteren werden unterschiedliche Belastungsszenarien hinsichtlich ihres Einflusses auf die Extraktion untersucht.

In Kapitel 2 wird zunächst der Stand der Wissenschaft und Technik hinsichtlich des Rückbaus der Gründungsstrukturen von OWEA dargestellt. In Kapitel 3 werden die

theoretischen Grundlagen der axialen Pfahltragfähigkeit sowie der hydromechanischen Eigenschaften von nichtbindigen Böden erläutert. In Kapitel 4 werden Arbeitshypothesen für die Versuchsdurchführung aus den Erkenntnissen der Literaturstudie abgeleitet.

Die Forschungsfrage zur Spannungsänderung infolge einer hydraulischen Druckbelastung im Pfahlinneren wird in Kapitel 5 formuliert.

Kapitel 6 beschreibt die durchgeführten Modellversuche. Neben den Randbedingungen der Modellversuche werden speziell die entwickelten Totspannungsgeber beschrieben, welche für die Beurteilung des Kontaktbereichs Pfahl-Boden elementar sind. In Kapitel 7 werden die Versuchsergebnisse ausführlich dargestellt und interpretiert. In Kapitel 8 folgt ein Vergleich mit den Ansätzen aus der Literatur.

Der Eingriff in den anstehenden Boden ist hinsichtlich einer potenziellen Weiternutzung des Offshore-Standorts nicht trivial. Für eine Abschätzung der Bodenauflockerung und des Radius der Störung infolge einer Extraktion werden in Kapitel 9 Sondiererergebnisse vor und nach der Extraktion miteinander verglichen und beurteilt.

Abschließend werden in Kapitel 10 die gewonnenen Erkenntnisse zusammengetragen und es wird ein Ausblick auf weitere Entwicklungsmöglichkeiten im Hinblick auf eine in-situ-Umsetzung gegeben.



## 2 Rückbau von Offshore-Pfahlgründungen

In den nachfolgenden Abschnitten werden die relevanten Zusammenhänge bzgl. der Entwicklung von OWEA beschrieben. Eine Übersicht der vorhandenen Offshore-Gründungsstrukturen und deren festgelegte Lebens- bzw. Betriebsdauer wird dargestellt. Abschließend werden mögliche Rückbaumethoden beschrieben und deren Funktionsweise erläutert. Der Fokus liegt dabei auf den geotechnischen Aspekten des Rückbaus von OWEA.

### 2.1 Offshore-Windenergieanlagen

Zum Ende des Jahres 2021 wurden in der deutschen Nord- und Ostsee 1.539 OWEA mit einer Gesamtleistung von ca. 8,1 GW errichtet [DEUTSCHE WINDGUARD, 2022]. Die bereits genehmigten und in Planung befindlichen OWP sollen die Steigerung der Gesamtkapazität in den deutschen Meeren auf etwa 12 GW bis Ende 2026 gewährleisten. Die ambitionierten Vorhaben der Bundesregierung definieren ein Ausbauziel der Offshore-Windenergie von 30 GW bis zum Jahr 2035 und 40 GW bis zum Jahr 2045. Bis in das Jahr 2030 will die deutsche Bundesregierung 80 % der benötigten Energie aus Erneuerbaren Energien und davon ca. 40 % aus der Windenergie erzeugen [BMWK, 2022].

In Europa beträgt die Gesamtleistung der Offshore-Windenergie schon jetzt über 28 GW mit 5.785 laufenden OWEA [WIND EUROPE, 2022]. Bei einer prognostizierten Lebensdauer von maximal 25 Jahren bedeuten der heutige Ausbau sowie die Ausbauziele der kommenden Jahre eine enorme Anzahl an zurückzubauenden OWEA [BSH, 2021; BSH, 2022]. Abbildung 2-1 zeigt die kumulierte Anzahl an europäischen OWEA sowie die dazugehörigen Leistungen zum Ende der Betriebsdauer bis in das Jahr 2040. Die OWP *Horns Rev 1*, *Nysted* und *UK Round 1* werden die ersten europäischen OWP sein, die in den Jahren 2025 – 2030 die Betriebsdauer von 25 Jahren erreichen.

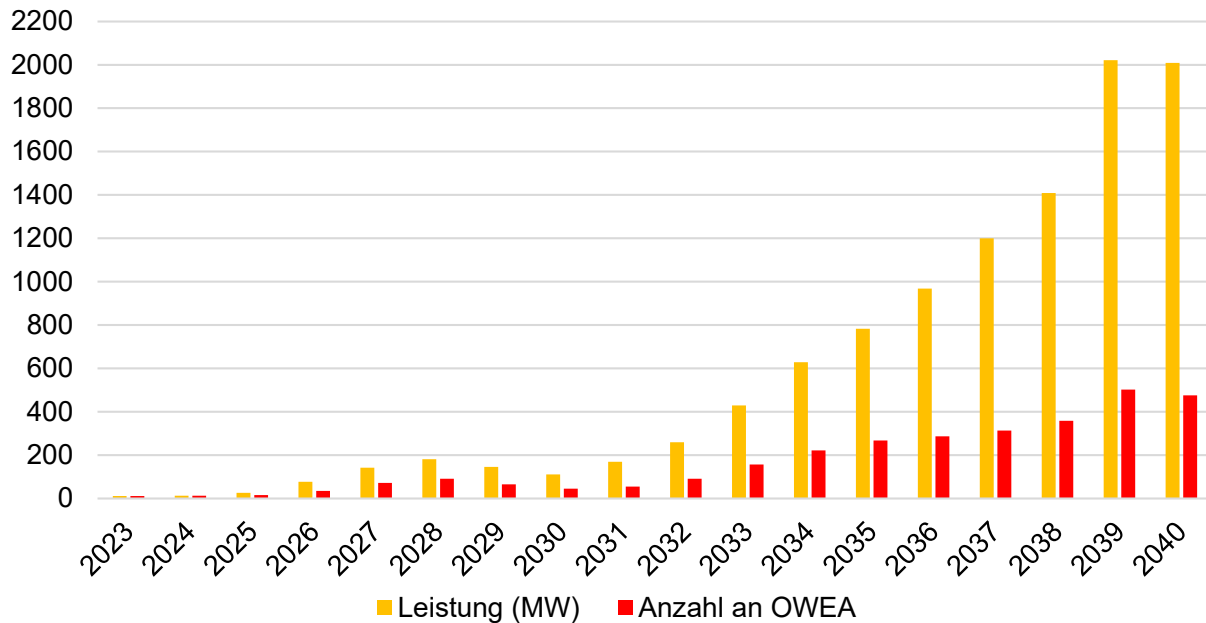


Abbildung 2-1: Zeitlicher Verlauf der Anzahl von OWEA beim Erreichen der Lebensdauer von 25 Jahren nach [WIND EUROPE, 2020]

Bis in das Jahr 2030 werden kleine OWP, die als Testfelder fungierten, zurückgebaut. Ab dem Jahr 2030 wird das jährliche Rückbauvolumen allerdings stark ansteigen. Der Höhepunkt wird im Jahr 2040 erreicht. Ab diesem Zeitpunkt müssen jährlich ca. 500 Anlagen zurückgebaut werden.

Die in Abbildung 2-1 dargestellten prognostizierten Werte berücksichtigen weder eine Lebensdauerverlängerung durch ein Monitoring-Konzept noch mögliche Repowering-Bestrebungen für eine Weiternutzung der vorhandenen Gründungsstrukturen.

Für die Gründung einer OWEA bestehen unterschiedliche Möglichkeiten. Abbildung 2-2 illustriert die nach dem heutigen Stand der Technik möglichen Gründungsstrukturen. Zur Vereinfachung wird im Folgenden zwischen Pfahlgründungen und alternativen Gründungsvarianten unterschieden. Zu den alternativen Gründungsvarianten gehören Schwerkraftfundamente mit einem Anteil der bisher errichteten Anlagen von 6 % sowie Suction Buckets und schwimmende Gründungen mit einem Anteil von unter 1 %.

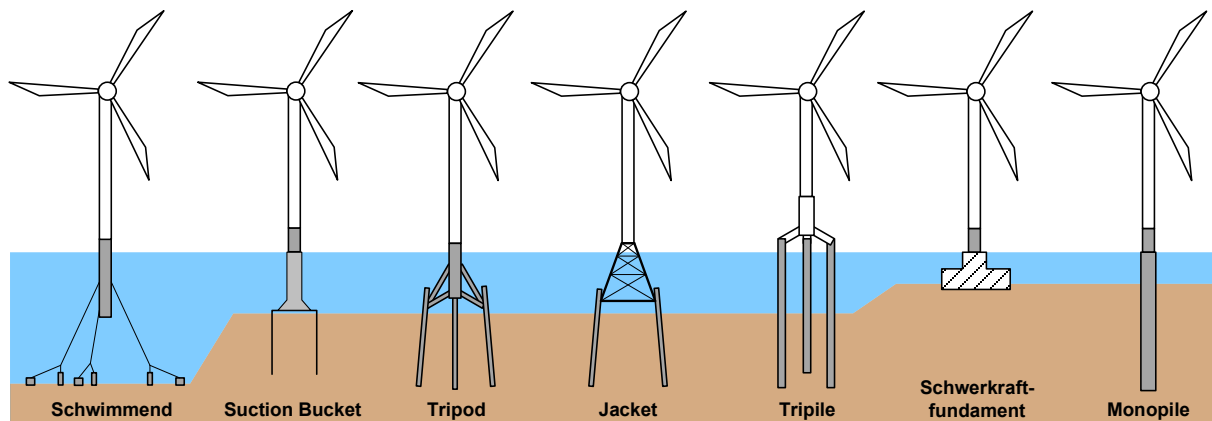


Abbildung 2-2: Mögliche Gründungsstrukturen von OWEA [STIFTUNG OFFSHORE WINDENERGIE, 2021]

Über 93 % aller in Europa errichteten OWEA wurden auf Pfählen gegründet und bei über 85 % der Pfahlgründungen wurden Monopfähle als Gründungsstruktur errichtet [WIND EUROPE, 2022]. Der Pfahldurchmesser eines Monopiles variiert zwischen 4,75 – 9,6 m, wobei die Planungen für Durchmesser von bis zu 12 m bereits begonnen haben [DÜHRKOP ET AL., 2019]. Die Pfahldurchmesser einer Jacket- oder Tripod-Gründung sind mit  $D_a < 4,0$  m vergleichsweise kleiner. Zur Installation stehen unterschiedliche Verfahren zur Verfügung. Die Installation mittels Schlagrammung stellt dabei die am weitesten verbreitete Installationsvariante dar.

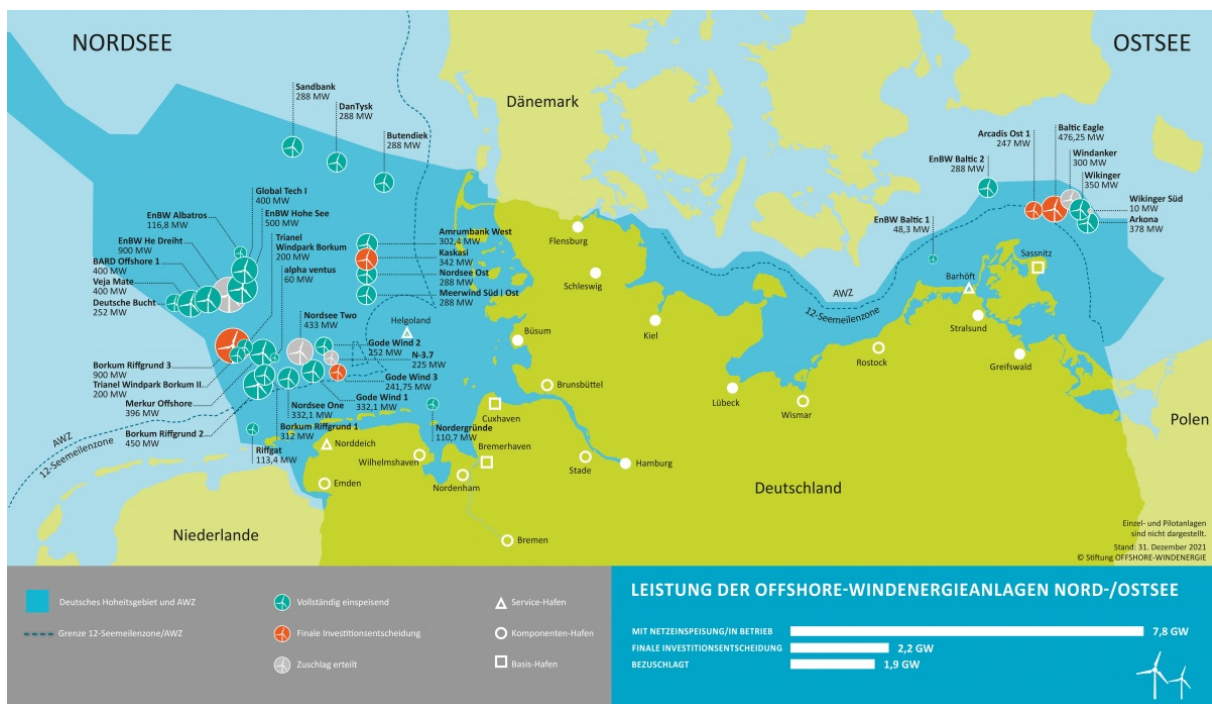


Abbildung 2-3: Offshore-Windparks in der deutschen Nord- und Ostsee [STIFTUNG OFFSHORE WINDENERGIE, 2021]

Die in der deutschen ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ) errichteten oder bereits genehmigten OWP sind in Abbildung 2-3 dargestellt.

### 2.2 Rückbau von Offshore-Windenergieanlagen

Der Rückbau einer OWEA kann grundlegend in die zwei Teilbereiche Ober- und Gründungsstruktur differenziert werden. Die Oberstruktur beinhaltet alle Bauteile oberhalb der Meeresoberfläche. Für die ganzheitlichen Rückbaukonzepte der Oberstruktur wird auf das Forschungsvorhaben SeeOff verwiesen ECKARDT ET AL. [2022]. Der Zwischenbericht des FRAUNHOFER IWES [2022] betrachtet neben den Rückbauprozessen auch die Offshore-Vermaschung sowie die Nachnutzung von Bestandsflächen. Der Kern dieser Arbeit beschäftigt sich mit dem Rückbau des zweiten Teilbereichs, der Gründungsstruktur.

Das BSH [2021] beschreibt in den Richtlinien der Standard Konstruktion für die Rückbauphase: *„Rechtzeitig vor dem Ende der Betriebsphase ist eine Rückbauplanung zu erstellen, die auf dem im Rahmen der Konstruktionsbewertung geprüften Rückbaukonzept aufbaut. Soweit der Stand der Technik zwischen der Konstruktionsphase und dem Ende der Betriebsphase weiterentwickelt wurde, so sind Anpassungen der Rückbauplanung an den aktuellen Stand der Technik vorzunehmen. Die mit dem Prüfbeauftragten abgestimmte Rückbauplanung ist der Zulassungsbehörde vorzulegen, die sich die Plausibilitätsprüfung vorbehält.“*

Die Neuerungen des Entwurfs des Flächenentwicklungsplans [BSH, 2022] bestätigen die damaligen Aussagen [BSH, 2021]. Somit liegt, wie auch für die Errichtung, eine Einzelfallentscheidung basierend auf dem aktuellen Stand der Technik vor. Die Untersuchungen für einen vollständigen und effektiven Rückbau von Offshore-Pfahlgründungen haben in den letzten Jahren zugenommen. Die Veröffentlichungen der vergangenen Jahre behandeln den Rückbau der Gründungsstruktur jedoch nur theoretisch und beschreiben mögliche Verfahren anhand des derzeitigen Stands der Technik [TOPHAM & McMILLAN, 2017; GJØDVAD & IBSEN, 2016].

Der Rückbau von einem der ersten Monopfähle, der in der AWZ zurückgebaut wurde, wird von HINZMANN ET AL. [2017] beschrieben. Der Messmast des Windparks Amrumbank West (AW) wurde 2016 etwa 2,0 m unter dem Meeresboden mit einem

abrasiven Wasserscheidgerät abgetrennt. Die übrigen 21 m des Monopfahls verblieben im Untergrund.

Mit dem Forschungsvorhaben DeCoMP am IGG-TUBS begann 2018 das erste vom heutigen Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) geförderte Projekt, das den vollständigen Rückbau von Offshore-Gründungspfählen untersuchte. In den von 2019 – 2022 durchgeführten großmaßstäblichen Versuchen wurden vier verschiedene Methoden für eine rückstandslose Extraktion der Pfähle unabhängig vom Pfahldurchmesser untersucht. Dabei wurden die in der deutschen Nordsee verbreiteten nichtbindigen Böden verwendet.

Ebenfalls wurden Untersuchungen zur vollständigen Extraktion von Rohrpfählen an der TU Delft im Rahmen des Forschungsprojekts GROW durchgeführt [CORONEL ET AL., 2020]. In den Untersuchungen wurden Pfähle mit Durchmessern von 0,404 m und 0,273 m erprobt. Die Testpfähle wurden durch die Erzeugung eines hydraulischen Innendrucks aus dem Untergrund extrahiert. Aussagen über die bodenmechanischen Vorgänge während der Druckerzeugung an der Pfahlwandung und über die daraus resultierende Veränderung des Spannungszustands wurden nicht getroffen.

### 2.3 Forschungsvorhaben DeCoMP

Mit dem Ziel, technische Lösungen für den vollständigen Rückbau von Offshore-Gründungspfählen zu finden und bestehende Verfahren zu verbessern, startete im Dezember 2018 das Forschungsvorhaben DeCoMP. Im Rahmen der Forschung wurden vier verschiedene Verfahren in großmaßstäblichen Versuchen mit umfangreicher messtechnischer Erfassung durchgeführt. Im Folgenden werden die jeweiligen Techniken grundlegend erörtert. Für eine detailliertere Betrachtung wird auf die Veröffentlichung im Rahmen des Vorhabens verwiesen [HINZMANN ET AL., 2023]

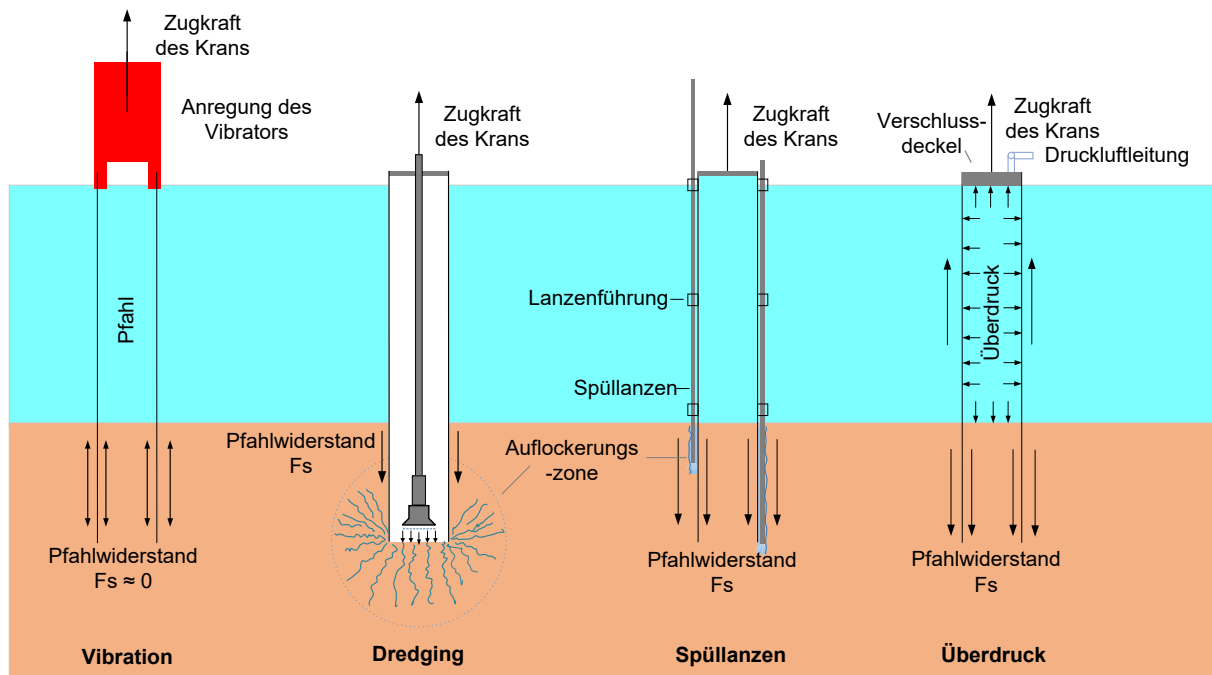


Abbildung 2-4: Schematische Darstellung der untersuchten Techniken im Vorhaben DeCoMP [HINZMANN ET AL., 2019]

### 2.3.1 Vibrationstechnik

On- und Offshore wird die Vibrationstechnik bereits für die Installation von Gründungspfählen oder auch von Spundwänden genutzt. Zusammen mit dem Projektpartner CAPE Holland wurden mehrere Versuche zur Untersuchung der Pfahl-Boden-Interaktion sowie der Fluidisierung in der Scherzone absolviert.

Wie in Abbildung 2-5 grafisch dargestellt, wird infolge der Beschleunigung der exzentrisch drehenden Massen des Vibrators der Pfahl und auch der anstehende Boden in der Scherzone angeregt. Phase 1 stellt dabei den Ausgangszustand im Korngerüst vor Beeinflussung durch den Vibrator dar. Sobald die Beschleunigung der Bodenelemente einen Wert von ca.  $1,5 g$  (Erdbeschleunigung  $g = 9,81 m/s$ ) erreicht, tritt ein Zustand der Pseudoverflüssigung ein (vgl. Phase 2 Abbildung 2-5) und der Boden verliert fast vollständig seine Vertikal- und Horizontalspannung [VIKING, 2006; RODGER & LITTLEJOHN, 1980]. Infolge der reduzierten Mantelwiderstände verbleibt als Widerstand gegen die Extraktion lediglich das Gewicht des Systems Vibrator-Pfahl.

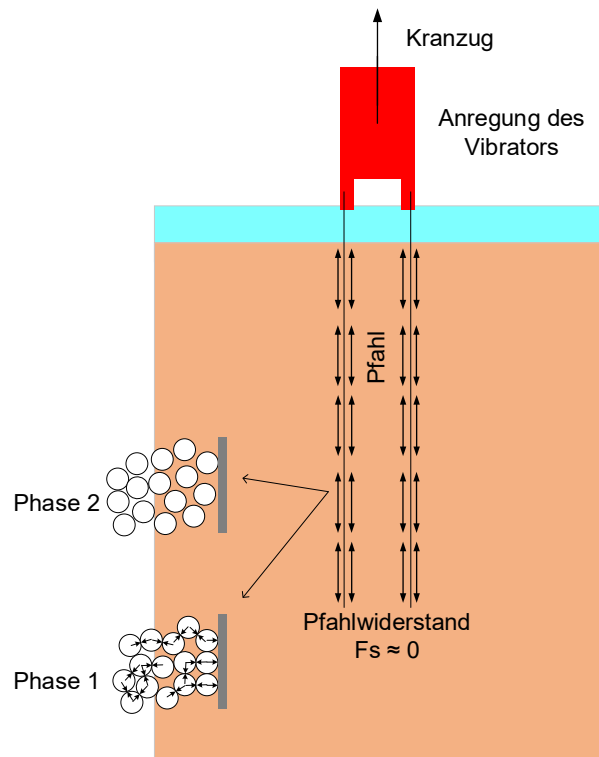


Abbildung 2-5: Pfahl-Boden-Interaktion während der Anregung mittels Vibrator  
[HINZMANN ET AL., 2019]

### 2.3.2 Spüllanzen

Das Spüllanzen-Verfahren nutzt ein Gemisch aus Wasser und Luft, welches am Ende einer Lanze zusammengeführt wird. Die in Abhängigkeit des Pfahldurchmessers symmetrisch um den Pfahl angeordneten Lanzen werden bis zum Pfahlfuß abgeteuft. Das Wasser-Luftgemisch zerstört das anliegende Korngefüge und reduziert damit die Horizontalspannung sowie Mantelwiderstände (s. Abbildung 2-6). Die Auftriebskraft der beigemischten Luft bewirkt eine Offenhaltung der Störzone entlang des Pfahlschafts. Sobald alle Lanzen bis auf Tiefe des Pfahlfußes abgeteuft sind, kann der Pfahl zusammen mit der Spüllanzenkonstruktion aus dem Untergrund gehoben werden. Die Pfahlwiderstände bestehen zu diesem Zeitpunkt aus der Gewichtskraft des Pfahls und der Spüllanzenkonstruktion.

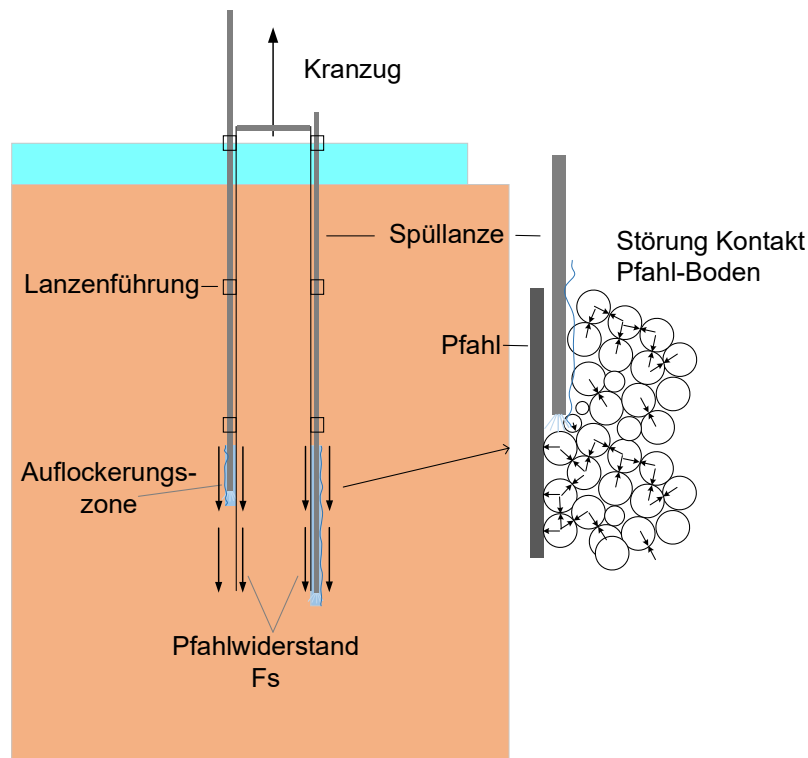


Abbildung 2-6: Widerstandsreduktion am Pfahlmantel durch Spüllanzen  
[HINZMANN ET AL., 2019]

### 2.3.3 Bodenaushub im Pfahlinneren – Dredging

Der Bodenaushub im Pfahlinneren (Dredging) dient zur Reduzierung der Pfahltragfähigkeit durch die Entfernung der Bodensäule im Pfahlinneren. Das Dredging-Verfahren wird ursprünglich zur Förderung bzw. zum Ausbaggern sandiger Böden im Hafen- oder Offshore-Bereich genutzt und wurde für die Extraktion von Rohrpfählen adaptiert.

Untersuchungen von JARDINE ET AL. [2005] oder LÜKING [2010] haben gezeigt, dass selbst ohne Pfropfen im Pfahlinneren die Pfahlmantelreibung an der Innenseite des Pfahls mit den Widerständen an der Außenseite vergleichbar sein kann. Untersuchungen im Rahmen des Vorhabens DeCoMP deuten zudem auf eine Reduzierung der Horizontalspannung an der Außenseite durch das fehlende Bodenwiderlager im Pfahlinneren hin. Vorausgesetzt, der Boden im Bereich des Pfahlfußes wird während des Dredgings entfernt, kann der erzwungene hydraulische Grundbruch den Spannungszustand in unmittelbarer Umgebung zum Pfahlfuß zusätzlich herabsetzen (s. Abbildung 2-7).



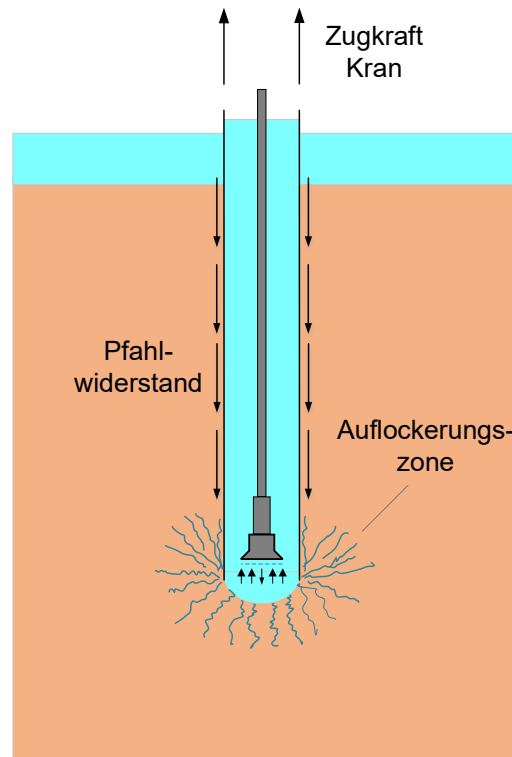


Abbildung 2-7: Bodenaushub im Pfahlinnenen – Dredging [HINZMANN ET AL., 2019]

### 2.3.4 Hydraulischer Überdruck

Die vierte im Forschungsvorhaben DeCoMP untersuchte Methode stellt die Extraktion eines Rohrpfahls durch die Aufbringung eines hydraulischen Überdrucks im Pfahlinnenen dar. Sie bildet den essenziellen Teil der vorliegenden Arbeit. Die Anwendung ist dabei nicht auf Monopiles limitiert, sondern kann für alle in Abbildung 2-2 dargestellten Pfahlgründungen angewandt werden.

Zur Vorbereitung der Extraktion mit hydraulischem Überdruck wird der Pfahl bspw. mit einem Deckel druckdicht verschlossen und anschließend mit Wasser gefüllt (s. Abbildung 2-8). Der oberhalb des Bodens befindliche Teil des Pfahls wird im Folgenden als Druckkammer bezeichnet. Über den Zufluss wird der Wasserdruck im Inneren erhöht. Durch den entstehenden Überdruck verändert sich zuerst das Spannungsverhältnis oberhalb des Bodens. Die Pfahlwandung sowie der Meeresgrund bzw. der anstehende Boden werden als unverschieblich betrachtet. Die infolge des Überdrucks auf der Innenseite des Deckels wirkende Flächenkraft ist in Kombination mit dem einzigen Freiheitsgrad der Bewegungsrichtung in der Vertikalen weg vom Meeresgrund die maßgebende Einwirkung  $F_{ges}$  für die Extraktion des Pfahls.

Die Hypothese, dass der Pfahl aufgrund des Innendrucks aus dem Untergrund herausgedrückt wird, ist eines der entscheidendsten Untersuchungsfelder dieser Arbeit. Auf eine detaillierte Verfahrensbeschreibung wird an dieser Stelle verzichtet und stattdessen auf Kapitel 6 verwiesen.

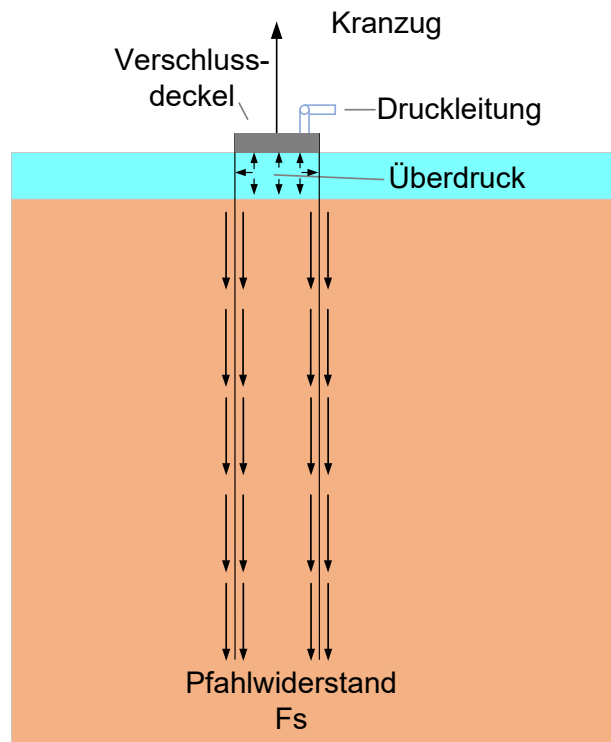


Abbildung 2-8: Pfahlextraktion mit hydraulischem Überdruck [HINZMANN ET AL., 2019]

### 3 Tragverhalten eines unter Innendruck stehenden Rohrpfahls

#### 3.1 Grundlegendes zum Tragverhalten

Der grundsätzliche Lastabtrag eines Pfahls erfolgt über die Mobilisierung der Pfahlmantelreibung und des Spitzendrucks. Wie in Kapitel 2 aufgezeigt, wird der Pfahl bei der Extraktion aus dem Untergrund entfernt. Der Widerstandsanteil aus dem Spitzendruck wird somit nicht mobilisiert. Zur Beschreibung der Pfahlmantelreibung muss der Anwachs- oder Setup-Effekt, eine zeitliche Komponente des Widerstandsanstiegs nach Installation, berücksichtigt werden.

Bei der Belastung eines Pfahls mit einem hydraulischen Innendruck kann sich neben dem Spannungszustand im Korngerüst auch das Korngefüge verändern. Ein möglicher Materialtransport infolge auftretender Erosion oder eine hydrodynamische Kornumlagerung an der Pfahlinnenseite führt zu einer Spannungsänderung in der Kontaktzone Pfahl-Boden. Zur Beschreibung des Extraktionsprozesses ist daher eine Beurteilung des gesamten Spannungssystems notwendig.

Im folgenden Abschnitt werden die Grundlagen zur Betrachtung der bodenmechanischen Vorgänge bei Extraktion eines offenen Rohrpfahls mittels hydraulischen Überdrucks erarbeitet. Dazu wird zunächst das Tragverhalten, speziell das Spannungsfeld eines Pfahls im Boden betrachtet. Zudem werden das hydraulische Verhalten von Wasser sowie Möglichkeiten des Materialtransports im Boden und die Auswirkung auf den Spannungszustand, soweit relevant, dargestellt. Es sei an dieser Stelle darauf hingewiesen, dass in Anlehnung an die Modellversuche das Tragverhalten von Rohrpfählen in nichtbindigen Böden untersucht wird.

#### 3.2 Axiales Tragverhalten von Zugpfählen

Der Gesamtwiderstand  $R_{ges}$  eines auf Zug belasteten Pfahls wird vereinfacht durch die folgende Gleichung beschrieben:

$$R_{ges} = R_{s,a} + R_{s,i} + G_P \quad 3-1$$

Die mobilisierbaren Widerstände des Pfahlmantels werden durch die innere  $R_{s,i}$  und die äußere  $R_{s,a}$  Pfahlmantelreibung ausgedrückt. Das Eigengewicht des Pfahls  $G_P$  wirkt entgegen der Einwirkung und wird somit als Widerstandsanteil aufgenommen. Die Anteile des Pfahlsitzendrucks entfallen bei der Betrachtung der Widerstände eines auf Zug belasteten Pfahls, da diese aufgrund der Lastangriffsrichtung nicht mobilisiert werden. Eine erhöhte Bodenspannung im Pfahlinneren kann nach EA-PFÄHLE [2012] und LÜKING [2010] bis zu einem Pfahldurchmesser von  $D \approx 2 - 3 \text{ m}$  zu einer Verspannung des Bodens und zur Entstehung eines Pfropfens führen. Die Widerstandsanteile der inneren Pfahlmantelreibung werden bei Zugpfählen im Falle einer Pfropfenbildung durch die Gewichtskraft des verspannten Bodens  $G_B$  ersetzt:

$$R = R_{s,a} + G_B + G_P \quad 3-2$$

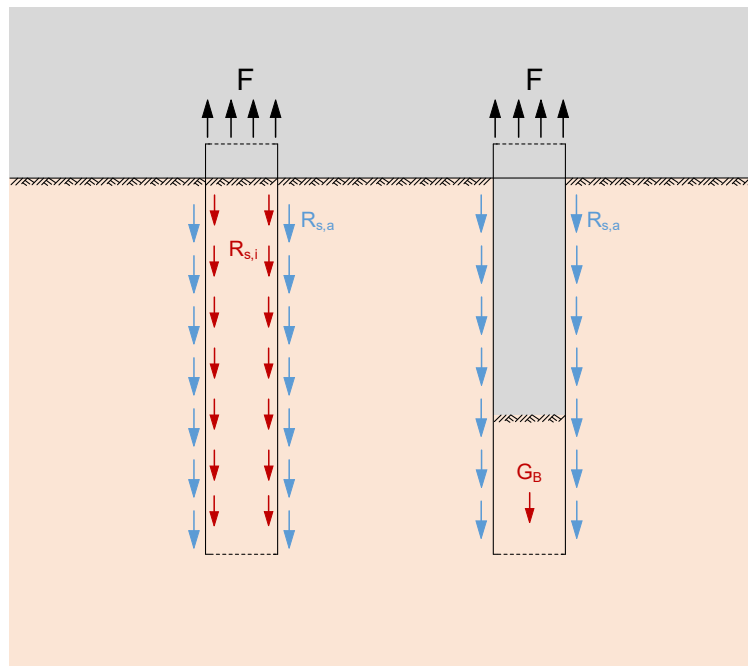


Abbildung 3-1: Pfahlwiderstände bei zugbelasteten Rohrpfählen, unverspannt (links) und voll verspannt (rechts)

In Abbildung 3-1 sind die Belastungsszenarien eines auf Zug belasteten Pfahls dargestellt.

Die Mantelreibung kann bei der Betrachtung über die gesamte Einbindetiefe  $L_b$  als Integral der Reibungsspannung zwischen Pfahlwand und Boden für jedes Tiefensegment  $z$  des Pfahls beschrieben werden. Die Gleichungen 3-3 und 3-4 unterteilen zudem die Mantelreibung in innere  $R_{s,i}$  und äußere Pfahlmantelreibung  $R_{s,a}$ :

$$R_{s,a} = \pi \cdot D_a \cdot \int_0^{L_p} q_s(z) \cdot dz \quad 3-3$$

$$R_{s,i} = \pi \cdot D_i \cdot \int_0^{L_p} q_s(z) \cdot dz \quad 3-4$$

$D_a$                       Pfahlaußendurchmesser

$D_i$                       Pfahlinnendurchmesser

Im Kontaktbereich zwischen Boden und Pfahlmantel entsteht bei der Mobilisierung der Pfahlmantelreibung  $q_s$  die Schubspannung  $\tau_s$  in den Scherzonen [RICHWIEN, 1986]. Mit dem Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium kann die Pfahlmantelreibung  $q_s$  aus der effektiven Horizontalspannung  $\sigma'_h$  und dem Wandreibungswinkel  $\delta$  im Kontaktbereich Boden-Pfahl beschrieben werden:

$$q_s(z) = \tau_s(z) = \sigma'_h(z) \cdot \tan \delta \quad 3-5$$

$$\sigma'_h(z) = K_o \cdot \sum_{i=1}^n \gamma_i \cdot z_i \quad 3-6$$

$K_o$                       Umlagerungsbeiwert

$\gamma_i$                       Wichte des Bodens

$z_i$                       Tiefe

Zur Bestimmung des Wandreibungswinkels  $\delta$  in Abhängigkeit der Lagerungsdichte hat API [2007] eine Bandbreite veröffentlicht (s. Tabelle 3-1):

*Tabelle 3-1: Wandreibungswinkel  $\delta$  [API, 2007]*

| Bodenart | Lagerungsdichte | $\delta$ [°] |
|----------|-----------------|--------------|
| Sand     | sehr locker     | 15           |
|          | locker          | 20           |
|          | mittel          | 25           |
|          | dicht           | 30           |
|          | sehr dicht      | 35           |

Detaillierte Untersuchungen zur Bestimmung des Wandreibungswinkels haben u.a. UESUGI & KISHIDA [1986] und JARDINE ET AL. [1993] durchgeführt.

UESUGI & KISHIDA [1986] charakterisieren in ihrer Studie den Einfluss der Kornform und der Oberflächenrauheit auf den Wandreibungswinkel. Die Untersuchungen beziehen sich zwar auf luftgetrocknete Sande, dennoch können die bodenmechanischen Vorgänge auf wassergesättigte Böden übertragen werden. So kommt es nach UESUGI & KISHIDA [1986] ab einer bestimmten Rauheit der Pfahlwandung zu einem Versagen im Bodenkörper und nicht im Kontaktbereich Pfahl-Boden. Um das Phänomen adäquat beschreiben zu können und eine Überschätzung des Wandreibungswinkels zu vermeiden, führen die Autoren mit  $\delta_{max} = \varphi$  einen oberen Grenzwert für den Wandreibungswinkel ein, der dem inneren Reibungswinkel des Bodens entspricht.

Die ICP-Methode von JARDINE ET AL. [2005], die auf JARDINE ET AL. [1993] basiert, nutzt ebenfalls eine Begrenzung des Wandreibungswinkels. Des Weiteren unterscheiden die Autoren zwischen  $\delta_{max}$  und einem kritischen Wandreibungswinkel im Versagensfall  $\delta_{cs}$  (Critical State). Der kritische Wandreibungswinkel  $\delta_{cs}$  wird dabei als maßgebender Parameter zur Bestimmung der Pfahlmantelreibung von Pfählen in Sand genutzt. Aufgrund des abrasiven Verhaltens des Sandes und der Reibungsinkremente ist bei geschlagenen Stahlpfählen nach der Installation von einem Wandreibungswinkel  $\delta_{cs} \approx 29^\circ$  auszugehen. Im Gegensatz zu den Empfehlungen der API [2007] wird in der ICP-Methode [JARDINE ET AL., 2005] der Wandreibungswinkel  $\delta_{cs}$  unabhängig von der initialen relativen Lagerungsdichte betrachtet. Außerdem steht der Wandreibungswinkel  $\delta_{cs}$  in einem linearen Zusammenhang zu der normalisierten Oberflächenrauheit und hat einen oberen

Grenzwert. Den Zusammenhang zwischen dem Wandreibungswinkel  $\delta_{cs}$  und der mittleren Korngröße  $D_{50}$  verdeutlicht Abbildung 3-2.

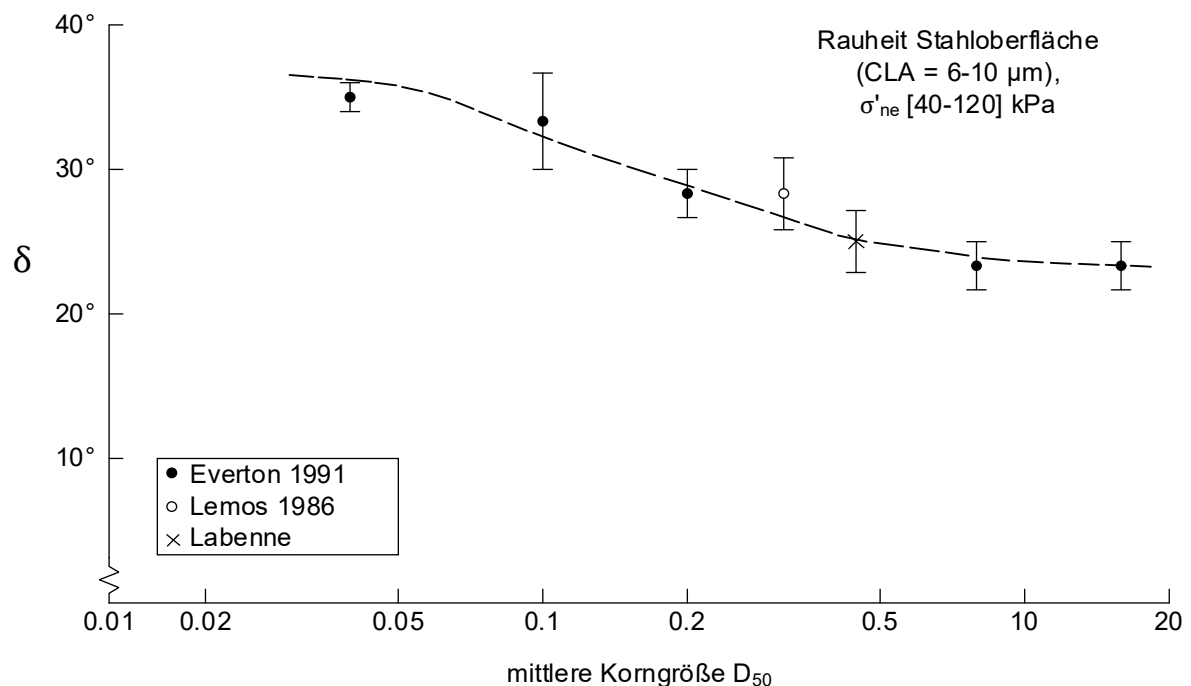
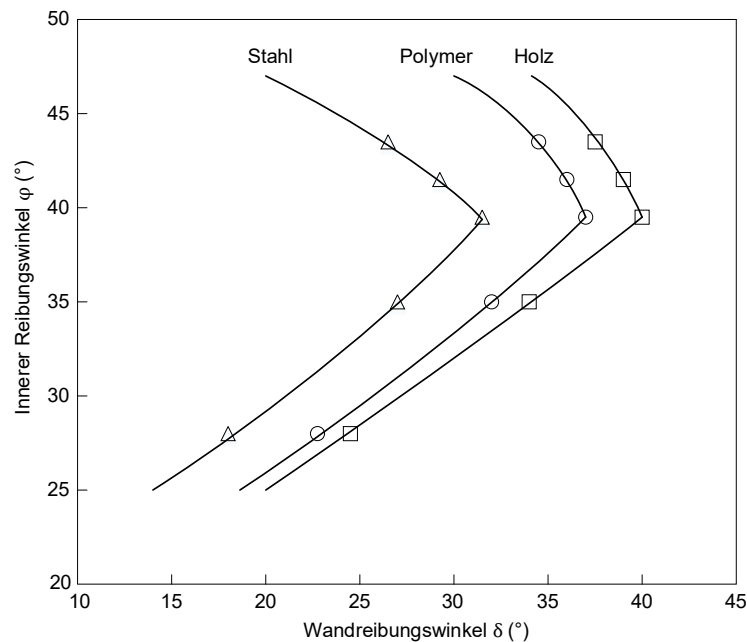


Abbildung 3-2: Wandreibungswinkel  $\delta$  in Abhängigkeit der mittleren Korngröße  $D_{50}$  für Sande [JARDINE ET AL., 1993]

Neuere Untersuchungen von AKSOY ET AL. [2016] und TIWARI & AL-ADHADH [2014] betrachten weitere Aspekte bei der Beurteilung des Wandreibungswinkels wie bspw. die effektive Normalspannung. Bleibt der Fokus allerdings auf der Interaktion zwischen Stahl und Sand, kann nach TIWARI & AL-ADHADH von einem konstanten Wandreibungswinkel  $\delta = 28^\circ$  ausgegangen werden.

AKSOY ET AL. [2016] haben in ihren Versuchen einen Zusammenhang zwischen der Oberflächenrauheit unterschiedlicher Materialien (Stahl, Holz, Polymer) und Böden (Sand und Ton) untersucht. Anhand von direkten Scherversuchen haben sie den Zusammenhang zwischen dem inneren Reibungswinkel des Bodens und des Wandreibungswinkels grafisch dargestellt (s. Abbildung 3-3).



**Abbildung 3-3:** Verhältnis von  $\delta$  zu  $\varphi$  für unterschiedliche Materialien [Aksoy et al., 2016]

In der Literatur wird eine Vielzahl von Einflussparametern auf den Wandreibungswinkel beschrieben. Dabei wird einheitlich die Rauheit des betrachteten Materials als sehr einflussreich identifiziert. Zur Vereinfachung und zur Verhinderung von Überschätzungen wird mehrheitlich ein linearer Zusammenhang zwischen der Oberflächenrauheit und dem Wandreibungswinkel sowie seiner Obergrenze genannt. Der Einfluss von Korngröße, Normalspannung, Kornform, Lagerungsdichte und Wassergehalt hingegen wird unterschiedlich gewichtet.

## 3.2.1 Spannungszustand an der Pfahlaußenseite

Das Tragverhalten eines auf Zug belasteten Rohrpfahls wurde grundlegend zu Beginn von Kapitel 3.2 umrissen. In der Vergangenheit wurden zahlreiche Untersuchungen zum Lastabtrag offener Stahlrohrpfähle und zum unterschiedlichen Tragverhalten in Bezug auf Druck- oder Zugbelastung durchgeführt. Im Folgenden werden die Spannungsverteilung sowie mögliche Berechnungsansätze zur Abschätzung der äußeren Pfahlreibungswiderstände dargestellt.

Ein international verbreiteter Berechnungsansatz für die Spannung im Kontaktbereich Pfahl-Boden nach API [2007] basiert auf dem erdstatischen Ansatz. Der



Berechnungsansatz der Pfropfenspannung unterscheidet dabei zwischen verspannt und unverspannt. Die Gleichung zur Ermittlung der inneren Pfahlmantelreibung ist folgende:

$$q_s(z) = K_0 \cdot \sigma'_v(z) \cdot \tan \delta \quad 3-7$$

Der Erddruckbeiwert  $K_0$  reicht dabei für Druck- und Zugpfähle von  $K_0 = 0,8$  für den unverspannten Zustand bis  $K_0 = 1,0$  für den verspannten Zustand des Pfropfens. Eine Unterscheidung für die Berechnung der inneren und äußeren Pfahlmantelreibung wird nach API [2007] nicht vorgenommen.

Der Wandreibungswinkel  $\delta$  beträgt in Abhängigkeit der Lagerungsdichte zwischen  $15^\circ$  und  $35^\circ$ . Besonders bei Offshore-Gründungspfählen kann es zu großen Einbindelängen kommen, was nach Gleichung 3-7 zu großen Mantelwiderständen führt. Um eine unrealistische Überschätzung der Widerstände zu verhindern, hat API [2007] Obergrenzen festgelegt.

API GEO hat im Jahr 2011 mit der  $\beta$ -Methode einen modifizierten Ansatz zur Berechnung der Pfahlmantelreibung vorgestellt. Die  $\beta$ -Methode gilt primär für Druckpfähle. Jedoch kann mit der Hypothese, dass der berechnete Pfahlmantelwiderstand auf Zug gleich dem Widerstand oder kleiner als der Widerstand auf Druck sein muss, dieser auch für Zugpfähle genutzt werden. Eine Abminderung des Pfahlmantelwiderstands bei Zugbeanspruchung wird dabei nicht vorgenommen.

Wie auch der erdstatische Ansatz nach API [2007] basiert die  $\beta$ -Methode auf der Mohr-Coulomb'schen Bruchbedingung. So kann die Gleichung 3-7 durch den empirischen Wert  $\beta$  in Gleichung 3-8 vereinfacht werden:

$$q_s(z) = K_0 \cdot \sigma'_v(z) \cdot \tan \delta = \beta \cdot \sigma'_v(z) \quad 3-8$$

Die Pfahlmantelreibung  $q_s$  wird als Produkt aus der effektiven Vertikalspannung des Bodens und dem Mantelreibungsfaktor  $\beta$  berechnet. Die effektive Vertikalspannung wird wie in Gleichung 3-6 aus der Wichte  $\gamma$  des umliegenden Bodens und dem Tiefeninkrement  $z$  berechnet. In Tabelle 3-2 sind die Mantelreibungsfaktoren nach API GEO [2011] dargestellt.

*Tabelle 3-2: Mantelreibungsfaktoren in Abhängigkeit der Lagerungsdichte  
[API GEO, 2011]*

| Bodenart | Lagerungsdichte | $\beta$ [°] |
|----------|-----------------|-------------|
| Sand     | sehr locker     | -           |
|          | locker          | -           |
|          | mittel          | 0,37        |
|          | dicht           | 0,46        |
|          | sehr dicht      | 0,56        |

In der ICP-Methode von JARDINE ET AL. [2005] und in CHOW [1996] wurden Ansätze zur Bestimmung der Pfahlmantelreibung als Funktion des Spitzendrucks einer Drucksondierung formuliert. Anhand einer Vielzahl von Feldversuchen sowie der Auswertung einer umfangreichen Datenbank empfehlen die Autoren eine Segmentierung der betrachteten Tiefenelemente entsprechend dem Spitzendruckverlauf einer Drucksondierung.

Aus den Versuchsergebnissen wurde zudem abgeleitet, dass bei Zugversuchen kleinere Werte für die effektive Horizontalspannung  $\sigma'_h(z)$  und Scherspannung  $\tau_s(z)$  auftreten. Die aus der Zugbewegung resultierende Scherspannungsübertragung reduziert den globalen Druckspannungszustand nach der Installation. Des Weiteren tritt infolge der Installation eine Rotation der Hauptspannungsachse sowie ein Spannungsausgleich durch das Abklingen der Querdehnung auf, von den Autoren als elastische Poisson-Radialkontraktion des Pfahlmantels bezeichnet. In Abbildung 3-4 ist die Spannungsorientierung während einer Druck- und Zugbelastung dargestellt.

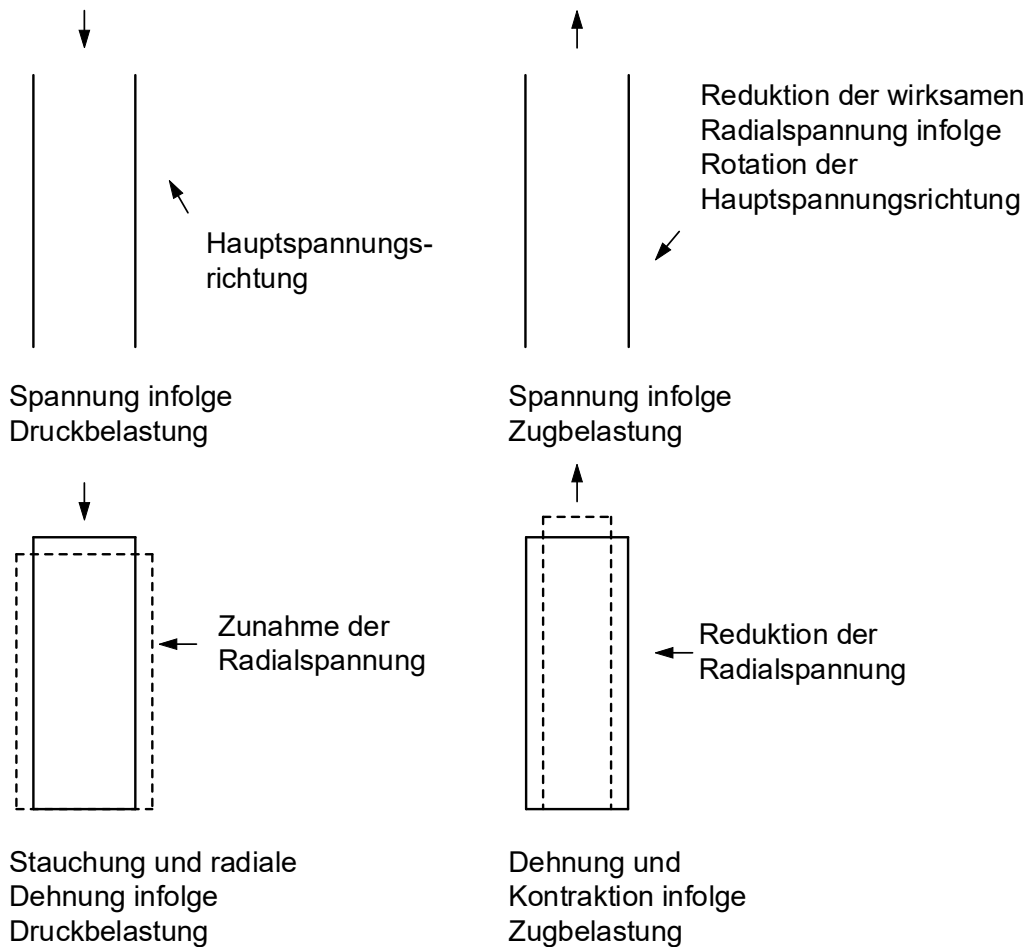


Abbildung 3-4: Unterscheidung der Spannungsorientierung zwischen Druck- und Zugbelastung nach JARDINE ET AL. [2005]

In Analogie zu den Gleichungen 3-3 und 3-5 wird hingegen nach JARDINE ET AL. [2005] die Horizontalspannung für Zugbelastung um 20 % und die Scherspannung um 10 % für offene Stahlrohrpfähle reduziert:

$$q_s = \tau_s = 0,9 \cdot (0,8 \cdot \sigma'_{hc} + \Delta\sigma'_h) \cdot \tan \delta \quad 3-9$$

$$\sigma'_{hc} = 0,029 \cdot q_c \cdot \left( \frac{\sigma'_v}{P_a} \right)^{0,13} \cdot \left( \frac{h}{R^*} \right)^{-0,38} \quad 3-10$$

$$R^* = (R^2_{au\ddot{a}u\ddot{a}en} - R^2_{innen})^{0,5} \quad 3-11$$

$$\Delta\sigma'_h = 2 \cdot G \cdot \Delta r / R^* \quad 3-12$$

$$G = q_c \cdot [A + B \cdot \eta - C \cdot \eta^2]^{-1} \quad 3-13$$

$$\eta = q_c \cdot (P_a \cdot \sigma'_v)^{-0,5} \quad 3-14$$

Mit den Parametern:

$$A = 0,0203$$

$$B = 0,00125$$

$$C = 1,1216 e^{-6}$$

Die Scherspannung  $\tau_s(z)$  ist nach der Gleichung 3-9 das Produkt aus der Summe der Horizontalspannung  $\sigma'_h(z)$  nach dem Abklingen möglicher Porenwasserdruckakkumulation  $\sigma'_{hc}$  und der Horizontalspannungsänderung  $\Delta\sigma'_h$  durch Dilatanz und elastische *Poisson*-Radialkontraktionen während der Belastung und dem Tangens des Wandreibungswinkels  $\delta$ .  $\Delta r$  stellt in der Gleichung 3-12 ein Maß der Rauigkeit des Pfahlmantels dar und kann für leicht angerostete Stahlpfähle zu  $\Delta r = 2 \cdot R_{cla} = 0,02 \text{ mm}$  angenommen werden.

In die Gleichung 3-10 fließen die Bodenkennwerte als Sondierwiderstand  $q_c$  und die effektive Vertikalspannung  $\sigma'_v$  ein.  $P_a$  ist der atmosphärische Druck ( $P_a = 100 \text{ kPa}$ ). Die Höhe  $h$  wird als Distanz zwischen betrachtetem Tiefenpunkt  $z$  und Pfahlfuß dargestellt. Der Ersatzradius  $R^*$  für offene Rohrpfähle kann mit der Gleichung 3-11 aus Pfahlradius  $R_{innen}$  und  $R_{außen}$  berechnet werden. Es gilt die Grenzbedingung  $h/R^* \geq 8$ .

### 3.2.2 Spannungszustand im Pfahlinneren

Wie bereits in Abschnitt 3.2 aufgezeigt, kann bei einem auf Zug belasteten Pfahl zwischen innerer  $R_{s,i}$  und äußerer  $R_{a,i}$  Mantelreibung unterschieden werden. Die Anteile der inneren Pfahlmantelreibung sind von einer möglichen Pfropfenbildung und einem damit veränderten Spannungszustand abhängig. Die Entstehung und Bestimmung eines Pfropfens wurde in der Vergangenheit mehrfach untersucht.

Als Ergebnis der durchgeführten Literaturstudie lassen sich unterschiedliche Ausgangssituationen ableiten, die einen Einfluss auf die Pfropfenbildung haben.

So haben JARDINE ET AL. [1993] die Abhängigkeit des Wandreibungswinkels innerhalb eines Pfropfen von der Kornform, dem Korndurchmesser sowie dem Mineraltyp untersucht. Sie beschreiben den Abfall des Wandreibungswinkels bei steigendem Korndurchmesser, wobei dieser als unabhängig von der Lagerungsdichte dargestellt wird. JARDINE ET AL. [1993] bestätigen qualitativ ihre Annahmen aus dem Jahr 1993 durch eine Untersuchung der Shell UK Ltd [JARDINE ET AL., 2005]. Validiert werden die Ergebnisse von LEHANE ET AL. [2005], wobei hier eine Obergrenze von  $\delta = 29^\circ$  festgelegt wird.

LEHANE & GAVIN haben 2001 festgestellt, dass der Spannungszustand des Bodens keinen gravierenden Einfluss auf die Pfropfenbildung hat. Weitergehend beschreiben LEHANE & GAVIN [2001] die effektive Radialspannung im Pfropfen eines nicht dilatanten Bodens mit:

$$\sigma'_h = \sigma'_v * K_0 \quad 3-15$$

Ohne ein dilatantes Bodenverhalten bricht der Boden bei steigender Belastung in der Pfropfenmitte. Im Gegensatz dazu versagt der Boden mit Einbeziehung des Dilatanzverhaltens im Kontaktbereich Pfahlinnenwand-Pfropfen. Nach LÜKING [2010] kann der Pfropfen als ein starrer Körper mit annähernd konstanter Vertikal- und Radialspannungsverteilung betrachtet werden. Durch die konstante Spannungsverteilung erzeugen bereits kleine Relativverschiebungen deutlich erhöhte Schubspannungen in der Scherfuge. Die Schubspannung  $\tau_{sp}$  im Kontaktbereich Pfahlinnenwand-Pfropfen, wie auch die Schubspannung  $\tau_s$  auf der Pfahlausenseite, können in Abhängigkeit des Wandreibungswinkels  $\delta$  und der Radialspannung  $\sigma'_r$  beschrieben werden. Infolge der Gleichgewichtsbeziehung zwischen Radial-  $\sigma'_r$  und Vertikalspannung  $\sigma'_v$  kann die Schubspannung  $\tau_{sp}$  mit den folgenden Gleichungen berechnet werden:

$$\frac{\sigma'_r}{\sigma'_v} = \frac{(1 - \sin\varphi' * \sin\psi)}{(1 + \sin\varphi' * \sin\psi)} \quad 3-16$$

$$\tau_{sp} = \sigma'_r \cdot \tan\delta \quad 3-17$$

Der Dilatanzwinkel  $\psi$  kann nach BOLTON [1986] mit:

$$\psi = 1,25 (\varphi'_p - \varphi') \quad 3-18$$

näherungsweise beschrieben werden. Wobei  $\varphi'_p$  den maximalen effektiven Reibungswinkel im Scherversuch darstellt und  $\varphi'$  den effektiven Reibungswinkel im Rahmenscherversuch.

Neben der Einbeziehung eines dilatanten Stoffverhaltens hat auch der Wandreibungswinkel  $\delta$  einen Einfluss auf die Zunahme des Spannungsverhältnisses  $\tau_{sp}/\sigma'_v$ . Wie die numerischen Ergebnisse von LEHANE & GAVIN [2001] in Abbildung 3-5 verdeutlichen, hat der innere Reibungswinkel des Bodens bezogen auf die aufgezeigte Bandbreite einen kleinen Einfluss.

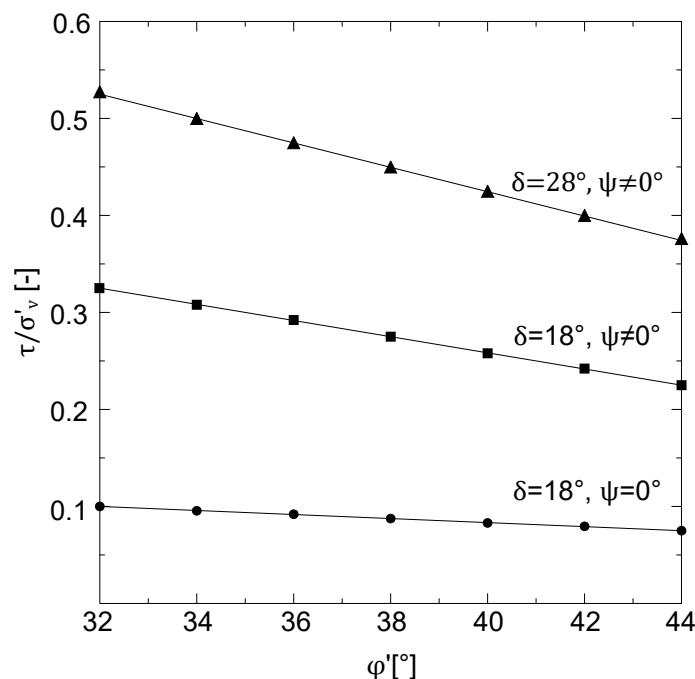


Abbildung 3-5: Spannungsverhältnis  $\tau_{sp}/\sigma'_v$  über den inneren Reibungswinkel des Bodens, mit Variationen des Wandreibungswinkels  $\delta$  sowie des Dilatanzwinkels  $\psi$  [LEHANE & GAVIN, 2001]

Neben den Randbedingungen des anstehenden Bodens wie die Lagerungsdichte, die Sättigungszahl und die Konsistenzzahl sind die Pfahleinbringung, die Pfahllänge und die Einbindetiefe weitere Einflussfaktoren auf die Entstehung eines Pfropfens.

### 3.2.2.1 Einflussfaktoren auf die Entstehung eines Pfropfens

Wird ein offener Rohrpfahl statisch in den Boden gedrückt und werden bspw. die nach unten wirkenden Widerstände im Pfahlinneren  $R_{s,i}$  größer als die entgegenwirkenden Widerstände des Pfahlfußes  $R_{b,i}$ , kann von einer Verspannung des Bodens im Pfahlinneren ausgegangen werden [FISCHER, 2021]:

$$R_{s,i} > R_{b,i} \rightarrow \text{Pfahl ist verspannt} \quad 3-19$$

Wird der Pfahl hingegen im Rahmen der Installation dynamisch beansprucht wie bei einer Schlagrammung oder Vibrationsrammung, muss die beschleunigte Gewichtskraft des Bodens im Pfahlinneren als Massenträgheit bei der Gegenüberstellung einbezogen werden [RAUSCHE & WEBSTER, 2007], um von einer Verspannung des Bodens im Pfahlinneren auszugehen:

$$R_{s,i} > R_{b,i} + R_{MT} \rightarrow \text{Pfahl ist verspannt} \quad 3-20$$

[KLOS & TEJCHMAN, 1981] haben aus In-situ- und Modellversuchen drei Phasen der Pfropfenbildung bei Stahlrohrpfählen abgeleitet (s. Abbildung 3-6).

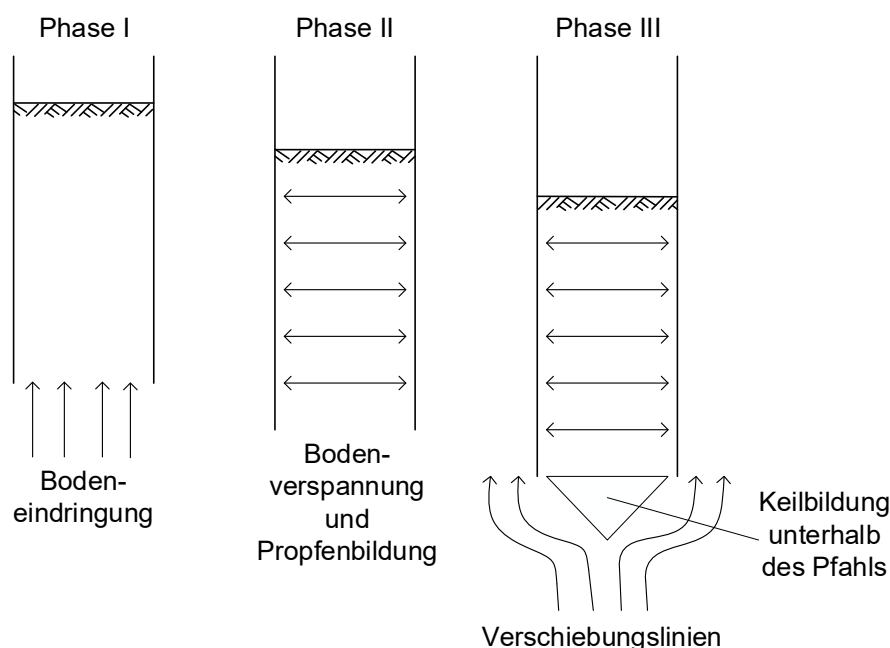


Abbildung 3-6: Phasen der Pfropfenbildung beim Installationsprozess von Rohrpfählen [KLOS & TEJCHMAN, 1981]

Wie KLOS & TEJCHMAN [1981] haben auch [PAIKOWSKY ET AL., 1989] unterschiedliche Entwicklungsphasen von Pfropfen während der Pfahlinstallation festgestellt. In Phase I dringt der Boden in den Pfahl ein. Widerstände werden an der inneren Pfahlwandung mobilisiert. In Phase II wird der eindringende Boden verdichtet und die Radialspannungen steigen. Sobald die maximale Verdichtung des Bodens erreicht ist, kann durch den verspannten Bodenkörper ein Spitzendruck mobilisiert werden.

Während der Phase III hat sich der Boden maximal verspannt. Der unterhalb des Pfahlfußes befindliche Boden wird nach außen verdrängt.

Insbesondere bei der Bewertung der Pfropfenbildung und der Wahl eines geeigneten Spannungsansatzes für axiale Zugpfähle spielt die Identifizierung der drei Phasen eine wichtige Rolle. KLOS & TEJCHMAN [1981] haben in ihren Untersuchungen eine Abhängigkeit vom Längen- zum Durchmesser Verhältnis und der Pfropfenhöhe zum Durchmesser (s. Abbildung 3-7) festgestellt.

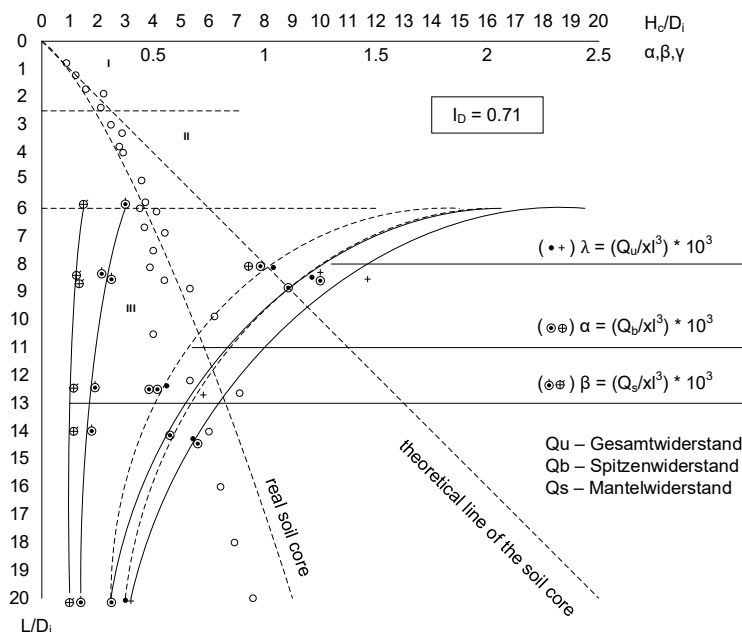


Abbildung 3-7: Relation zwischen Längen / Durchmesser Verhältnis und der Pfropfenhöhe zum Durchmesser [Klos & Tejchman, 1981]

Die Spannungsverteilung innerhalb eines Pfropfen kann durch die Entstehung eines Spannungsgewölbes, vergleichbar mit der Silotheorie, ausgedrückt werden [PAIKOWSKY, 1990; PAIKOWSKY & WHITMAN, 1990].

In den einzelnen Phasen bilden sich unterschiedliche Spannungsverteilungen aus, die sich je nach Installationsfortschritt umlagern (s. Abbildung 3-8). So bewirken die



vorhandenen Schubspannungen im Kontaktbereich Pfahlinnenseite-Boden eine konvexe oder konkave Spannungsverteilung. In Phase I ist die mobilisierte Schubspannung kleiner als die Hauptspannung im anstehenden Boden. Die Scherfuge bricht, bewirkt aber einen ausgeprägten konvexen Spannungsverlauf. In Phase II, die als Übergang zwischen teilweise und vollständig verspannt beschrieben werden kann, ist die Scherspannung so groß, dass der konvexe und der konkave Spannungsbogen gleich groß ist, sodass sich der Boden in einem Spannungsgleichgewicht befindet.

Die Hauptspannungstrajektorien ändern sich bei einer Zunahme der Schubspannung infolge des Installationsfortschritts. Die Folge ist ein konkaver Spannungsbogen.

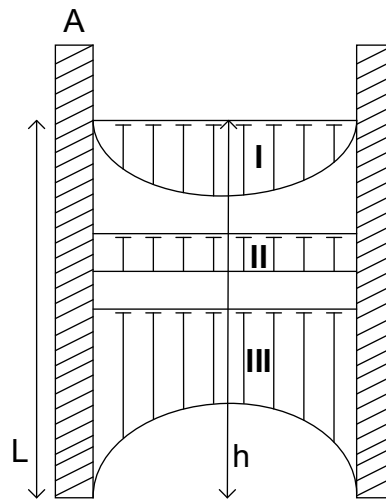


Abbildung 3-8: Spannungsverteilung im Pfropfen zu den einzelnen Phasen [KLOS & TEJCHMAN, 1981]

### 3.2.2.2 Bewertungsansätze der Pfropfenspannung

Die bodenmechanischen Einflüsse sowie das allgemeine Spannungsbild während der Pfropfenbildung wurden im vorangegangenen Abschnitt erörtert. Im Folgenden werden nun Berechnungs- und Bewertungsansätze zur Charakterisierung des Verspannungsgrads eines Pfropfens in nichtbindigen Böden vorgestellt.

Der inkrementelle Füllungsgrad IFR kann als Bewertungshilfe zur Pfropfenbildung herangezogen werden. Der in 1989 von PAIKOWSKY ET AL. vorgeschlagene Ansatz zur Bestimmung des Prozentgrads der Verspannung stellt die abschnittsweise Einbindung des Pfahls  $\Delta_D$  zur Höhe der Bodensäule im Pfahl  $\Delta_L$  dar:

$$y = IFR \approx \frac{\Delta_L}{\Delta_D} \cdot 100\% \quad 3-21$$

Für die Bestimmung des Grads der Verspannung wird die Bodensäule vor und nach einer definierten Einbindung des Pfahls verglichen. Abbildung 3-9 illustriert beispielhaft den IFR zu den jeweiligen Phasen eines Pfahlpfropfens nach KLOS & TEJCHMAN [1981].

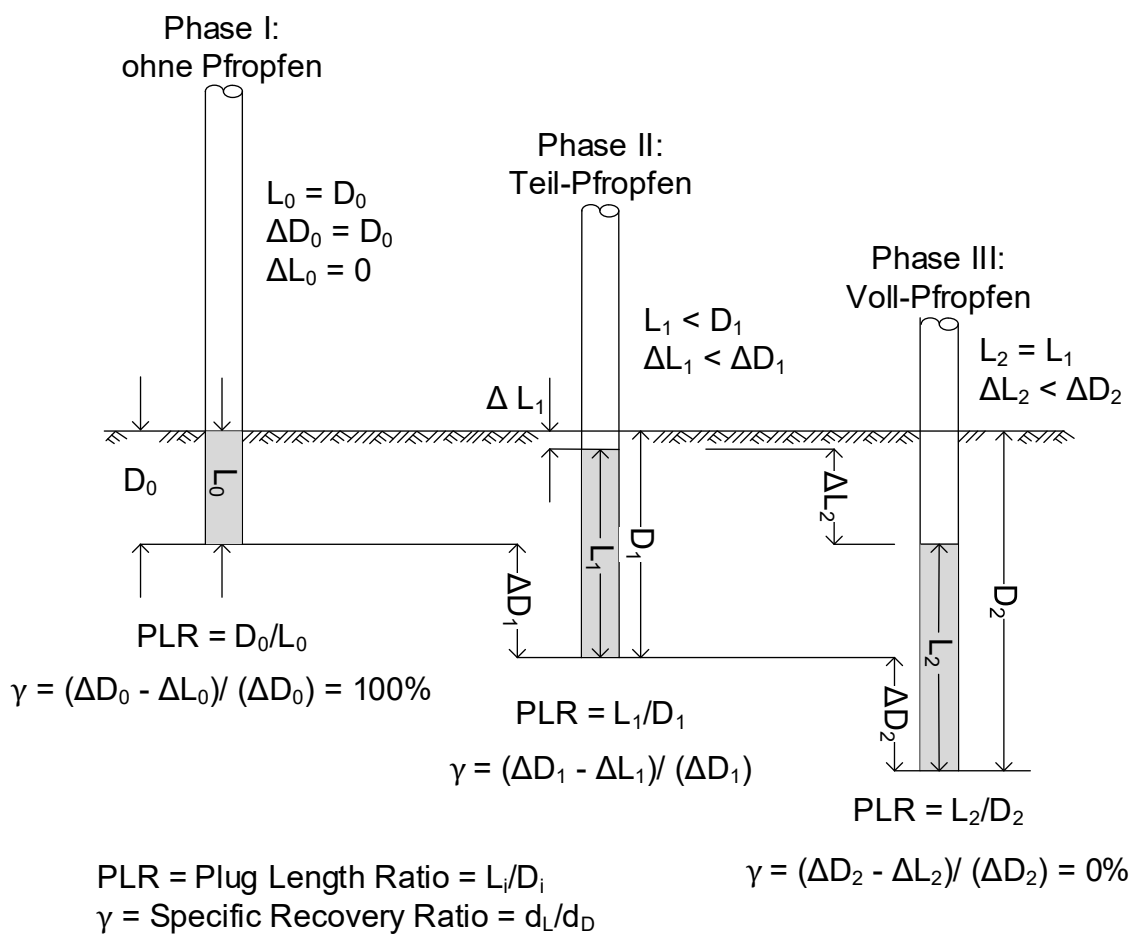


Abbildung 3-9: Drei mögliche Phasen des Bodens im Pfahlinnenen während der Installation mit dem jeweiligen IFR [PAIKOWSKY ET AL., 1989]

Der IFR liegt bei  $y = 100\%$ , wenn sich die Lage bzw. die Höhe der inneren Bodensäule während eines Rammabschnitts nicht verändert ( $\Delta_L = 0$ ) (s. Abbildung 3-9, Phase 1).

In Phase 2 wird die Höhendifferenz der Bodensäule  $\Delta_L$  zur Einbindung des Pfahls  $\Delta_D$  kleiner und eine Teilverspannung des Pfropfens IFR  $y < 100\%$  ist gegeben. Ist der Boden vollständig verspannt IFR  $y = 0\%$ , sind die Längendifferenzen  $\Delta_L = \Delta_D$  gleich

und die Realposition der Pfropfenoberkante bleibt konstant bezogen auf die Position des Pfahlfußes.

Ein Phänomen, das nicht durch das IFR abgebildet werden kann, ist der Bodenanstieg im Pfahlinneren in Relation zur Geländeoberkante (GOK). Großmaßstäbliche Versuche von FUGRO [1996] an Stahlrohrpfählen zeigten beim Erreichen einer sehr dicht gelagerten Sandschicht einen Anstieg des Bodens im Pfahlinneren. Die Autoren führen den Anstieg des Bodenmaterials auf die Auflockerung und Entspannung infolge der dynamischen Einwirkung zurück. FORAY ET AL. [1998] haben ebenfalls einen Anstieg des Bodens im Pfahlinneren dokumentiert. In kleinmaßstäblichen Versuchen wurden Kornumlagerungen mit einer Reduzierung der Lagerungsdichte bei der Installation von Rohrpfählen festgestellt. Die Bewertung eines Pfropfs mit dem IFR kann demnach zu einer unzutreffenden Einordnung des Spannungszustands im Pfahlinneren führen.

Die in JARDINE ET AL. [2005] vorgestellte ICP-Methode nutzt zur Bestimmung des Reibungswiderstands im Pfahlinneren neben dem gerade beschriebenen IFR auch CPT-Ergebnisse, den Pfahlinnendurchmesser, die Einbindetiefe und den Lagerungszustand des Bodens. Die Autoren formulieren zwei Formeln für den Grenzzinnendurchmesser  $d_{ig}$  des Pfahls für eine Teil- oder Vollverspannung:

$$d_{ig} < 0,02 \cdot (D_r - 30) \quad 3-22$$

$$d_{ig} = 0,083 \cdot d_{CPT} \cdot \frac{q_{ca}}{p_a} \quad 3-23$$

|           |                                               |
|-----------|-----------------------------------------------|
| $d_{ig}$  | Grenzzinnendurchmesser                        |
| $D_r$     | bezogene Lagerungsdichte                      |
| $d_{CPT}$ | Durchmesser Drucksonde                        |
| $q_{ca}$  | äquivalenter Spitzenwiderstand der Drucksonde |
| $p_a$     | Luftdruck / atmosphärischer Druck             |

HENKE [2013] hat die Ergebnisse von JARDINE ET AL. [2005] grafisch dargestellt (s. Abbildung 3-10). Die Lagerungsdichte  $D_r$  für einen enggestuften Sand wurde nach DIN EN ISO 22476-1 | 2013-10 mit:

$$D_r = -0,33 + 0,73 \log(q_{ca}) \quad 3-24$$

ermittelt.

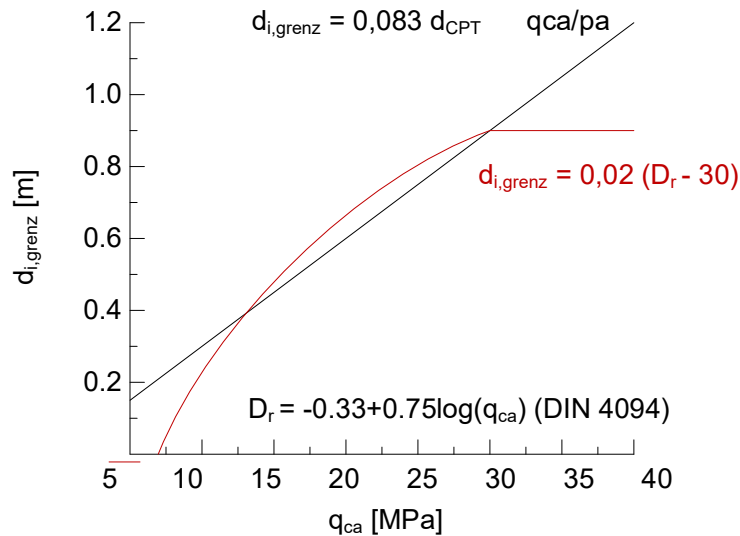


Abbildung 3-10: Grenzdurchmesser bei der Pfropfenbildung in Abhängigkeit der Lagerungsdichte [JARDINE ET AL., 2005]

Unterhalb der beiden Linien kann es zu einer Teil- oder Vollverspannung des Bodens im Pfahlinneren kommen. Wird der grafische Ansatz weitergeführt, ist die Entwicklung einer Verspannung im Pfahlinneren bei einem Pfahlinnendurchmesser von über 2,0 m trotz sehr hoher Lagerungsdichte als sehr unwahrscheinlich anzunehmen.

Diese Hypothese wird von LEHANE ET AL. [2005] bestätigt. Zudem wurde bei der Untersuchung des finalen Füllungsgrads (Final Filling Ratio) FFR im Pfahlinneren ein Mindestverhältnis abgeleitet:

$$FFR \approx \min \left[ 1; \left( \frac{d_i(m)}{1,5m} \right)^{0,2} \right] \quad 3-25$$

Nach Gleichung 3-25 kann es bis zu einem Pfahlinnendurchmesser von  $d_i = 1,5$  m zu einer Verspannung im Pfahlinneren kommen.

LÜKING [2010] hat anhand von Modellversuchen in nichtbindigem Boden und numerischen Simulationen festgestellt, dass ab einem Pfahldurchmesser von 2 bis 3 m die vorhandene Horizontalspannung im Inneren und Äußeren eines Rohrpfahls gleich ist. Daraus lässt sich ableiten, dass zumindest keine vollständige Verspannung des Bodens im Pfahlinneren ab einem Durchmesser von 2 bis 3 m vorherrscht.

## 3.2.3 Beschreibung der statischen Kontaktspannung zwischen Pfahlmantel und Boden

In den Kapiteln 3.2.1 und 3.2.2 wurde das Spannungsbild während einer steigenden Belastung beschrieben. Das Spannungs-Dehnungsverhalten zwischen Pfahlmantel und anstehendem Boden im Kontaktbereich wurde mit dem Mohr-Coulomb'schen Bruchkriterium beschrieben.

Der Pfahl erfährt eine Relativverschiebung, wenn im Bruchzustand infolge einer axialen Zugbelastung alle Widerstände des Bodens überwunden werden. Die Folge der Relativverschiebung sind Kornumlagerungen im Kontaktbereich Pfahl-Boden. Mit der Modellvorstellung von WERNICK [1978] zur begrenzten Dilatanz treten in der Scherzone Volumenveränderungen auf (s. Abbildung 3-11). Die Breite  $s$  der Scherzone wird dabei von WERNICK [1978] und DAVIS & PLUMELLE [1979] mit dem Zwei- bis Zehnfachen des mittleren Korndurchmessers  $D_{50}$  beschrieben. Außerhalb der Scherzone und damit des dilatanten Bereichs wird der Boden als quasi elastisches Bodenelement mittels Federn beschrieben.

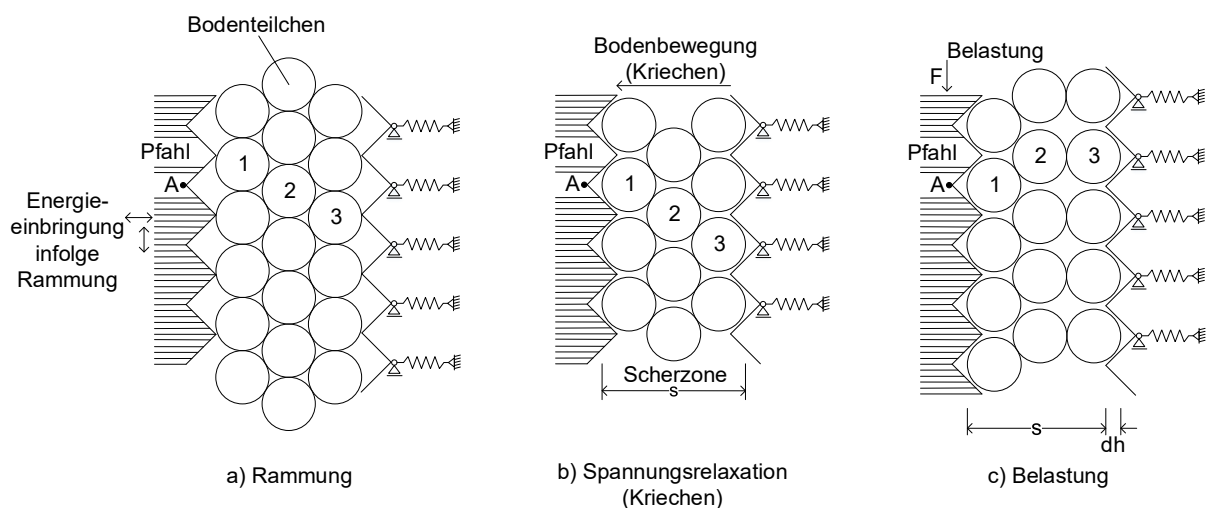


Abbildung 3-11: Begrenzte Dilatanz [WERNICK, 1978; AXELSSON, 2000]

Im Ausgangszustand eines dichtgelagerten Sandes weisen die Einzelkörner im Korngerüst ein sehr enges Korngefüge mit geringer Porenzahl auf. Infolge der Verschiebung der Pfahlwandung gegen den Boden werden Einzelkörner durch Reibung in der Scherzone bewegt. Der quasi elastische Zustand außerhalb der Scherzone lässt durch Stauchung die Kornumlagerung sowie eine

Volumenvergrößerung in der Scherzone zu (s. Abbildung 3-11 rechts). Die Stauchung der Federn beschreibt damit die Erhöhung der horizontalen Bodenspannungen  $\sigma_h$  und damit auch der Mantelreibung  $q_s$ .

### 3.2.3.1 Zeitliche Veränderung der axialen Tragfähigkeit – Setup-Effekt

Es ist hinreichend bekannt, dass die axiale Tragfähigkeit, insbesondere die Mantelreibung offener Stahlohrpfähle, in bindigen und nichtbindigen Böden mit zunehmender Standzeit nach der Installation zunimmt. CHOW [1996] unterscheidet im Zusammenhang der zeitlichen Veränderung der Tragfähigkeit zwischen kurzfristigen und langfristigen Effekten. Durch die Verschiebung des Pfahls während der Installation kann das dilatante Bodenverhalten zur Volumenveränderung und damit, zumindest kurzzeitig, zu Porenwasserdruckakkumulationen führen (s. Abbildung 3-11 links) [GRABE & KÖNIG, 2006]. In bindigen Böden wird dieser Porenwasserüberdruck langsamer abgebaut als in nichtbindigen Böden. Daher kann in bindigen Böden die zeitabhängige Zunahme der Mantelreibung mittels der Konsolidationstheorie beschrieben werden. Nach dem vollständigen Abbau des Porenwasserüberdrucks nehmen die Radialspannungen infolge von Kriechvorgängen zu.

In nichtbindigen Böden ist mit keinem Porenwasserüberdruck oder mit einem sehr schnellen Abbau des Überdrucks zu rechnen. Dennoch gilt eine kurzzeitige Entspannung im Kontaktbereich Pfahl-Boden in nichtbindigen Böden als ein wichtiger Einflussparameter für die Veränderung der Tragfähigkeit (s. Abbildung 3-11 Mitte).

Umfangreiche Feldversuche wurden bereits 1972 von TAVENAS & AUDY durchgeführt. Im Rahmen der Untersuchung wurde die Tragfähigkeit an 45 Betonpfählen in mitteldicht gelagertem Mittel- und Feinsand nachgewiesen. Statische Probelastungen wurden zwischen 12 Stunden und 20 Tagen nach der Installation durchgeführt. Die durchschnittliche Tragfähigkeitszunahme lag bei etwa 70 %. Aufgrund einer hohen Wasserdurchlässigkeit von  $k = 10^{-2} \text{ m/s}$  gehen die Autoren von keiner Porenwasserdruckumlagerung, sondern von einer Umstrukturierung des Bodengefüges infolge Kriechens aus.

Zu ähnlichen Ergebnissen kommen CHOW ET AL. [1998]. Die Auswertung einer Testreihe von Feldversuchen im französischen Dunkerque (Dunkirk) ergab eine

Zunahme der Tragfähigkeit zwischen 70 und 90 % verteilt über einen Zeitraum von bis zu 6 Monaten nach der Installation. In der Darstellung der ICP-Methode [JARDINE ET AL., 2005] werden die Ergebnisse weiterer Untersuchungen zum Setup-Effekt verglichen und normiert abgebildet (s. Abbildung 3-12). Die nach der Pfahlinstallation gemessenen Pfahltragfähigkeiten liegen in der Regel deutlich unter den Angaben der ICP-Methode und es dauert etwa 10 – 30 Tage, bis diese Werte erreicht werden.

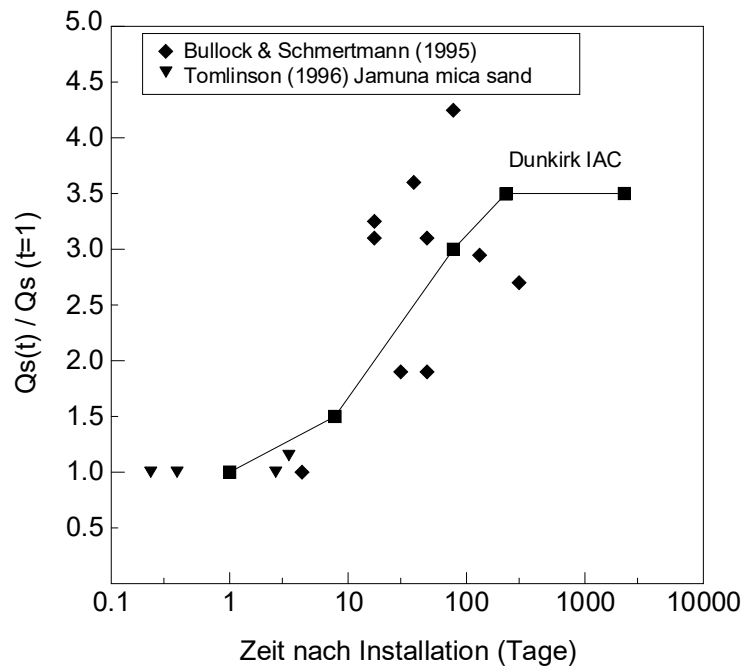


Abbildung 3-12: Normierte Trendlinien des Mantelwiderstands über die Zeit [CHOW, 1996]

CHOW [1996] und CHOW ET AL. [1998] haben für die Tragfähigkeitssteigerung die Relaxation der um den Pfahlmantel gebildeten Gewölbe infolge des Installationsprozesses und den damit verbundenen Anstieg der lokalen radialen effektiven Spannung als dominierenden Prozess identifiziert. Zudem begünstigt laut den Autoren eine verstärkte Grenzflächendilatanz den Anstieg der Radialspannung am Pfahlmantel.

Wie in Abbildung 3-13 dargestellt, werden die Radialspannungen außerhalb der Scherzone von Tangentialspannungen umgeben, die eine abschirmende Wirkung haben. In der Zeit nach der Installation verringert sich die Spannung im Gewölbe, wodurch die Tangentialspannungen der Scherzone zunehmen und einen Anstieg der Pfahlmantelreibung bewirken.

Weitere Ursachen für die Entstehung des Setup-Effekts in nichtbindigen Böden kann die Korrosion der Pfahloberfläche und eine Alterung des Sandes sein. In Kombination entsteht dabei eine Verkrustung des anstehenden Bodens mit der Pfahloberfläche [CHOW ET AL., 1998].

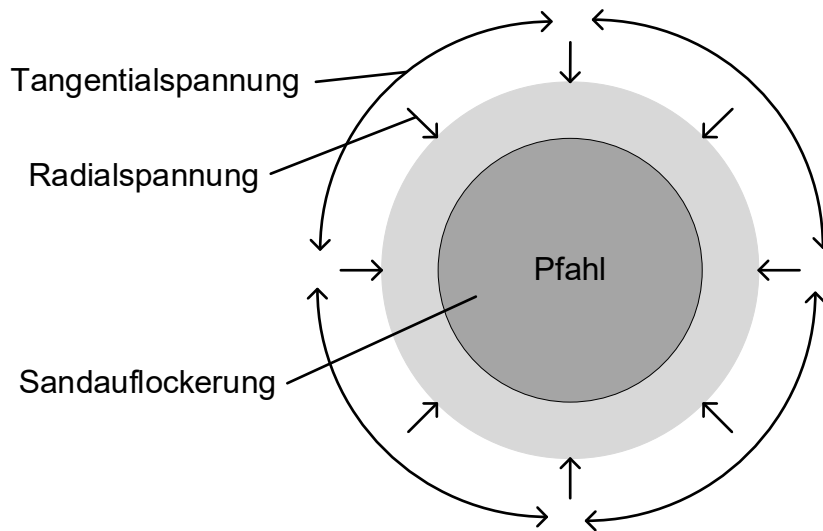


Abbildung 3-13: Gewölbewirkung kurz nach Pfahlinstallation [CHOW ET AL., 1998]

Eine Formel zur Bestimmung des Setup-Effekts in homogenen Sandböden haben SKOV & DENVER [1988] mit dem logarithmischen Ansatz verfasst:

$$\frac{Q_t}{Q_{t0}} = 1 + A \cdot \log \frac{t}{t_0} \quad 3-26$$

Das Verhältnis der Tragfähigkeit  $Q_t/Q_{t0}$  beschreibt dabei den Zusammenhang zwischen dem betrachteten Zeitpunkt  $t$  und einem Referenzzeitpunkt  $t_0$ . Der Dimensionierungsfaktor  $A$  beschreibt dabei den Anstieg der Tragfähigkeit und hat nach GRUNDBAU-TASCHENBUCH 3 [2018] einen durchschnittlichen Wert von 0,5 ( $\pm 0,25$ ).

ZHANG & WANG [2014] haben eine große Anzahl an Erkenntnissen aus den Versuchen über den Setup-Effekt zusammengefasst. Zudem haben die Autoren den Ansatz von SKOV & DENVER [1988] als Referenzlinie zur Darstellung der Streuung gewählt (s. Abbildung 3-14). Die zusammenfassende Abbildung illustriert die zuvor beschriebene Bandbreite aus der Literatur.



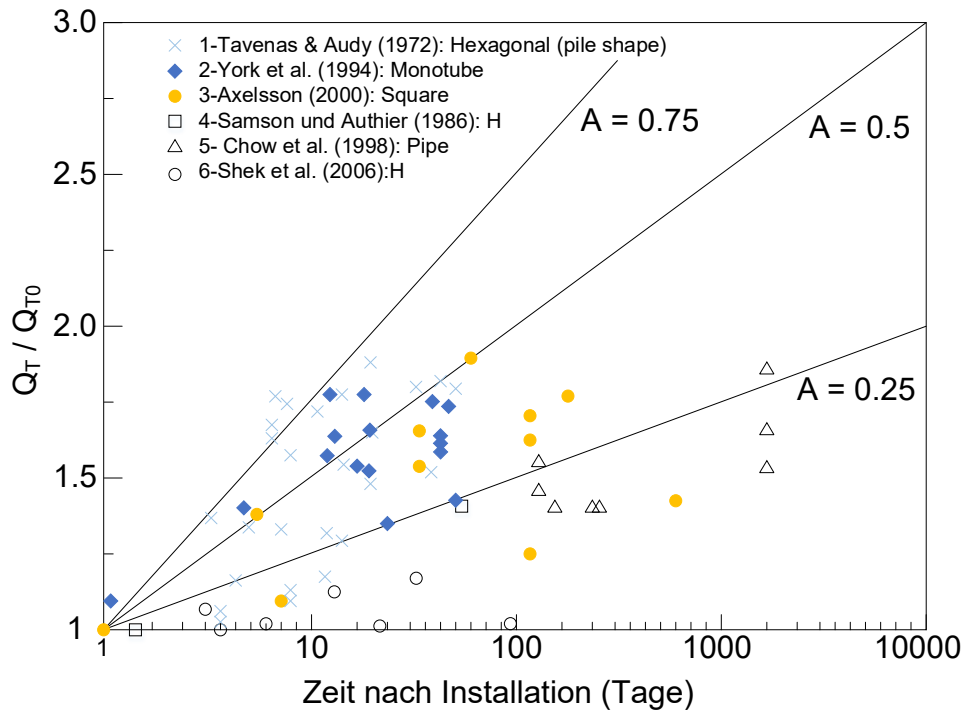


Abbildung 3-14: Zeitliche Entwicklung des Setup-Effekts für Pfähle in Sand [Zhang & Wang, 2014]

Im Rahmen von Untersuchungen an Zugpfählen hat BERGER [1986] einen Ansatz für die Bestimmung des Setup-Effekts entwickelt. Der aus den statischen Zugprobelastungen abgeleitete Zeitfaktor  $Z(t)$  beschreibt die Differenz zwischen der Tragfähigkeit nach der Rammung und dem betrachteten Zeitpunkt  $t$ . Der Reibungswiderstand  $R_s$  eines Zugpfahls kann zum Zeitpunkt  $t$  mit der folgenden Gleichung berechnet werden:

$$R_s = R_s(t_0) + \Delta R = R_s \cdot (Z(t) + 0,82) \leq 1,32 \cdot R_s \quad 3-27$$

$$Z(t) = 0,5 \cdot \frac{e^{at} - e^{-at}}{e^{at} + 0,5e^{-at}} \quad 3-28$$

Der Parameter  $a$  liegt konstant bei  $a = 1/45$ . Der Tragfähigkeitszuwachs innerhalb der ersten 14 Tage bleibt bei dem Ansatz nach BERGER [1986] unberücksichtigt.

Ein halblogarithmischer Ansatz zur Berechnung mit der Zeit steigenden Pfahlmantelwiderstands  $Q_T$  wurde von GAVIN ET AL. [2015] am Norwegian Geotechnical Institute (NGI) entwickelt:

$$Q_T = Q_{usref} + a \cdot \tanh[b * (t - t_{ref})] \quad 3-29$$

Wie auch in Gleichung 3-26 wird die Widerstandsänderung  $Q_T$  zum Zeitpunkt  $t$  in Relation zum Referenzwiderstand  $Q_{usref}$  zum Zeitpunkt  $t_{ref}$  betrachtet. Der Parameter  $a$  beschreibt dabei die Differenz zwischen  $Q_T - Q_{usref}$ . Für eine bessere Übereinstimmung wird der Fittingparameter  $b$  mit der Einheit  $[1/t]$  eingeführt.

### 3.3 Strömendes Wasser im Boden

Die Bewegung von Wasser im Boden ist auf einen Druckunterschied in Form eines hydraulischen Gefälles zurückzuführen. Das Wasser fließt dabei durch die Porenkanäle. Bewegt sich das Wasser entlang der Stromlinien geradlinig und parallel, wie bspw. im Inneren eines Pfahls, wird von einer eindimensionalen Strömung ausgegangen [TERZAGHI & JELINEK, 1954]. Im Übergangsbereich von Pfahlfuß und Boden erhöhen sich die Freiheitsgrade durch den unendlich ausgedehnten Halbraum, sodass das fließende Wasser als dreidimensionale Strömung ausgedrückt werden kann.

Die Fließ- oder auch Filtergeschwindigkeit  $v_f$  des Wassers durch den Boden kann unter Berücksichtigung des effektiven Porenanteils in Abhängigkeit der Abstandsgeschwindigkeit  $v_a$  mit:

$$v_f = n_{eff} \cdot v_a = \frac{V}{A} \quad 3-30$$

beschrieben werden. Das Verhältnis  $V/A$  beschreibt dabei den Volumenstrom  $V$  im Verhältnis zum Durchflussquerschnitt  $A$ .

Das Gesetz von Darcy beinhaltet zur Beschreibung der Filtergeschwindigkeit  $v_f$  den hydraulischen Gradienten  $i$ , welcher den proportionalen Zusammenhang zwischen der hydraulischen Druckhöhe  $\Delta h$  und dem durchflossenen Weg  $\Delta l$  beinhaltet. Unter Einbeziehung der Durchlässigkeitskonstante  $k_f$  lässt sich das Gesetz von DARCY durch die folgende Formel ausdrücken:

$$v_f = k_f \cdot i = k_f \cdot \frac{\Delta h}{\Delta l} \quad 3-31$$

Die Beschreibung der Fließgeschwindigkeit nach dem Gesetz von DARCY hat allerdings ihre Grenzen. So können ausschließlich lineare Zusammenhänge der Geschwindigkeit und der Gradienten wie bspw. die laminare Strömung in den Porenkanälen abgebildet werden. Abbildung 3-15 zeigt die möglichen Strömungsbereiche im Boden. Für den hydraulischen Gradienten werden dabei Grenzen im Übergang zwischen den unterschiedlichen Strömungsbereichen festgelegt.

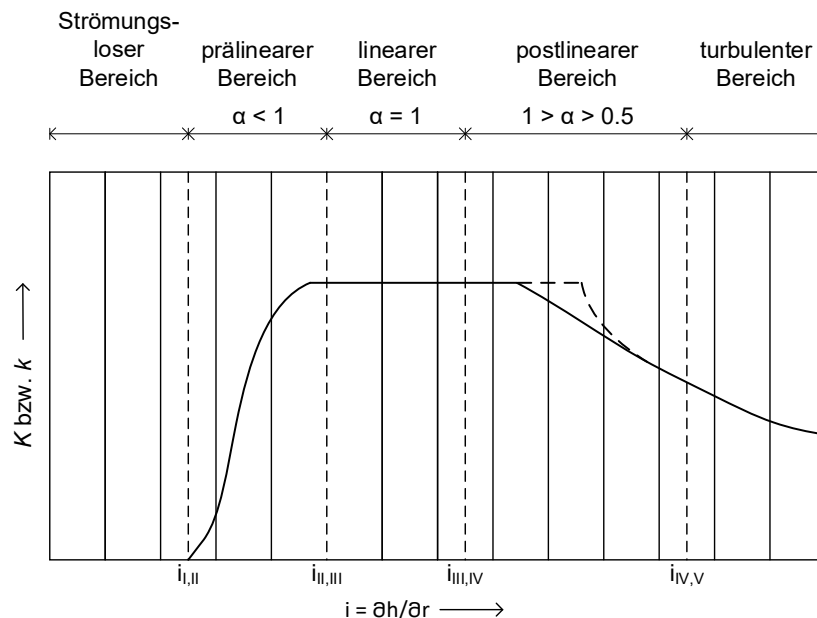


Abbildung 3-15: Filterströmung im Boden [BUSCH ET AL., 1993]

Der Wechsel zwischen einer linearen hin zu einer turbulenten Strömung erfolgt bei steigender Fließgeschwindigkeit in den Porenkanälen. Im Bereich der turbulenten Strömung sind die Trägheitskräfte nicht mehr vernachlässigbar klein. Zudem können bei der Herleitung mit dem Gesetz von DARCY vorhandene und bei steigender Fließgeschwindigkeit wachsende Haltekräfte an der Porenwandung nicht berücksichtigt werden. Nach BUSCH ET AL. [1993] gibt es für das Gesetz von DARCY keine harten Grenzen, dennoch verliert es bei steigendem Einfluss der Halte- und Trägheitskräfte seine Gültigkeit.

Zur Bestimmung der Fließgeschwindigkeit außerhalb des linearen Bereichs kann ein modifizierter Durchlässigkeitsbeiwert  $k^*$  genutzt werden. Bei hohen

Strömungsgeschwindigkeiten im postlinearen Bereich wird der steigende Einfluss der Trägheitskräfte mit einer Reduzierung des Durchlässigkeitsbeiwerts  $k^*$  berücksichtigt.

Zur Beschreibung des modifizierten Durchlässigkeitsbeiwerts  $k^*$  wird in der Praxis die Beurteilung des linearen und postlinearen Bereichs der Ansatz nach BUSCH ET AL. [1993] verwendet:

$$k^* = f(i) = k|i|^{\alpha-1} \quad 3-32$$

Die Größe des Parameters  $\alpha$  kann mithilfe der Abbildung 3-15 nach BUSCH ET AL. [1993] den einzelnen Strömungsbereichen zugeordnet werden.

### 3.3.1 Hydrodynamische Bodendeformation mit Kornumlagerung

Der Materialtransport im Boden kann die Tragfähigkeit im Baugrund eingebundener Bauteile stark beeinflussen. Die durch Strömung verursachte Kornumlagerung ist auf die hydromechanischen Vorgänge beim Durchfließen der Porenkanäle zurückzuführen und kann in Anlehnung an BUSCH ET AL. [1993] als hydrodynamische Bodendeformation mit Kornumlagerung definiert. Die Kornumlagerung und damit die Veränderung des ursprünglichen Korngerüsts kann sowohl im Inneren von Böden, im Kontaktbereich Bauteil-Boden als auch an Schichtgrenzen stattfinden. Bei der sogenannten (inneren) Suffusion werden Feinanteile des Bodens innerhalb des Kornggefüge transportiert und umgelagert.

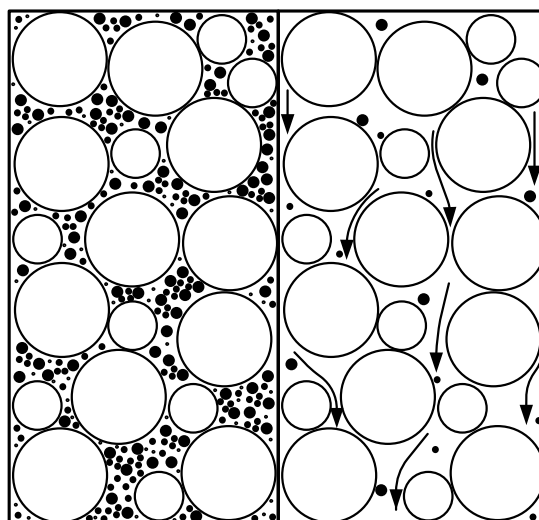


Abbildung 3-16: Materialtransport im Kornggefüge infolge innerer Suffusion  
[MMB, 2003]

Durch die Suffusion verändern sich die Dichte und die Durchlässigkeit des durchströmten Bodens, die Tragstruktur des Korngerüsts hingegen bleibt unverändert.

Die Umlagerung nahezu aller Kornfraktionen und damit die Veränderung der gesamten Bodenstruktur wird Erosion genannt. Grundsätzlich kann diese in die innere und die äußere Erosion unterschieden werden. Zudem kann im Kontaktbereich Bauwerk-Boden und in Schichtgrenzen eine Erosion auftreten. Eine Erosion kann auch eine Folge von Suffusion sein. Die infolge der Suffusion auftretende Erhöhung der Durchlässigkeit kann ab einem bestimmten Maße den Materialtransport aller Bestandteile des Korngerüsts ermöglichen. Der Übergang von Suffusion zu Erosion ist dabei fließend. Abbildung 3-17 zeigt die unterschiedlichen Erosionsarten.

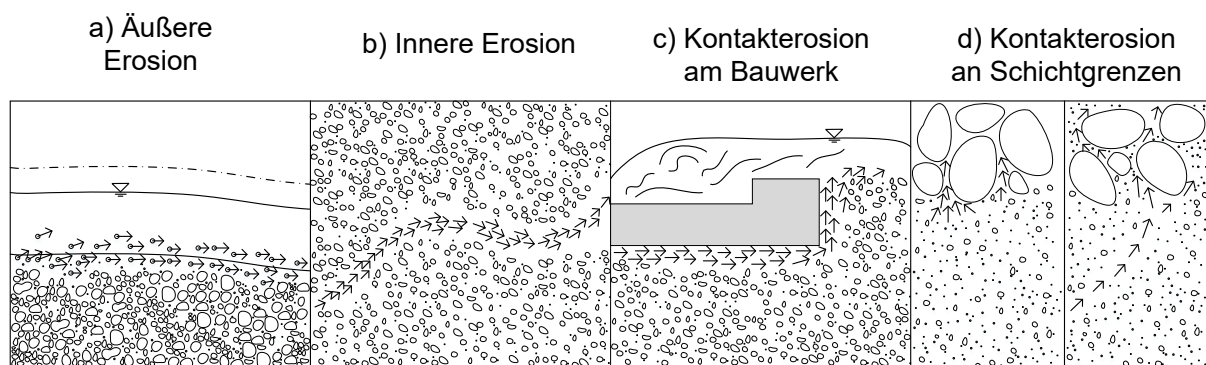


Abbildung 3-17: Erosionsarten [BUSCH ET AL., 1993]

### 3.3.2 Veränderung des Spannungszustands

Eine Veränderung des Korngefüges und damit der Tragstruktur kann den Gleichgewichtszustand eines Bauteils bzw. Bauwerks verändern. Hingegen lässt eine Erhöhung der Durchlässigkeit nicht direkt auf ein beeinflusstes Tragverhalten schließen [BUSCH ET AL., 1993]. Wenn, wie in Abschnitt 2.3 beschrieben, ein Rohrpfahl von innen mit Wasserdruck belastet wird, ergeben sich unterschiedliche Ausgangssituationen hinsichtlich einer Veränderung des Spannungszustands während der Belastung. Der innere und der äußere Bereich des Pfahls ist einer potenziellen hydromechanischen Kornumlagerung ausgesetzt. Die den Pfahl durchfließende Sickerströmung ist im Pfahlinneren nach unten gerichtet, wodurch sich die Effektivspannung erhöht. Auf der Pfahlausenseite ist die Richtung der Sickerströmung hingegen zur druckfreien GOK gerichtet und reduziert die vorhandene effektive Spannung.

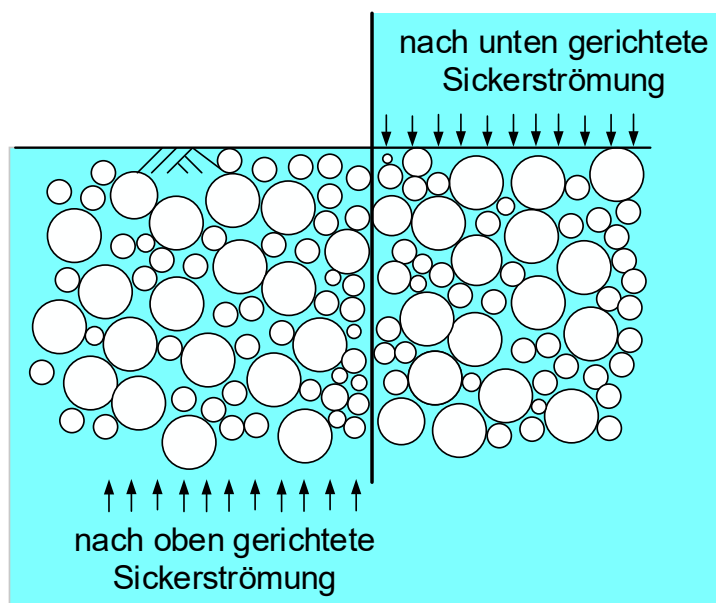
Erreicht der Wert der Sickerströmung  $f_s$  die Wichte des Bodens unter Auftrieb, wird nach TERZAGHI [1922] der betroffene Boden schwerelos:

$$f_s = i \cdot \gamma_w = \gamma'_b \quad 3-33$$

Der bereits in Gleichung 3-31 dargestellte hydraulische Gradient  $i$ , wird für den nach TERZAGHI [1922] definierten Zustand der Schwerelosigkeit als kritischer hydraulische Gradient  $i_{krit}$  bezeichnet. Durch die Umstellung der Gleichung 3-33 kann der kritische hydraulische Gradient  $i_{krit}$  mit der Gleichung 3-34 bestimmt werden:

$$i = \frac{\gamma'_b}{\gamma_w} \quad 3-34$$

Die aus dem Bodeneigengewicht resultierende Vertikalspannung sowie die Horizontalspannung wird durch den Verlust der Gewichtskraft des anstehenden Bodens verändert. Im Inneren des Pfahls wird das Korngerüst hingegen durch die aufgebrachte Sickerströmung belastet, was in einer vergrößerten Vertikalspannung resultiert. Die Abbildung 3-18 illustriert die Belastungszustände im Pfahlinneren (rechts) und auf der Pfahlausenseite (links).



*Abbildung 3-18: Belastungsrichtung infolge hydraulischem Innendruck  
Pfahlausenseite links, Pfahlinnenseite (rechts)*

### 3.4 Tragverhalten eines Rohrpfahls bei Innendruck

Das Tragverhalten eines mit Überdruck belasteten Rohrpfahls wurde bisher noch nicht untersucht. Hier können allerdings die Erkenntnisse aus den Betrachtungen im Rahmen der Extraktion von Suction Buckets genutzt werden. So haben LEHANE ET AL. [2014] in kleinmaßstäblichen Zentrifugen-Versuchen Untersuchungen zum Verhalten eines Suction Buckets während der Extraktion mit Überdruck durchgeführt. Die Herangehensweise ist vergleichbar mit der Extraktion eines Rohrpfahls durch Überdruck. In beiden Fällen wird im Inneren ein Überdruck erzeugt. Der Überdruck soll ein Herausdrücken der Konstruktion aus dem Boden bewirken.

Unter der Annahme, dass der eingeleitete Wasserdruck in alle Richtungen die gleiche Spannung hat, kann eine Druckbelastung gegen die Innenseite des Deckels als einwirkende Kraft  $F_P$  mobilisiert werden. Von der Innenfläche des Deckels wird vereinfacht die Querschnittsfläche  $D_{in}$  der Druckleitung abgezogen.

$$F_P = P \cdot \frac{\pi \cdot (D_i^2 - D_{in}^2)}{4} \quad 3-35$$

Die von LEHANE ET AL. [2014] im Maßstab 1:100 durchgeführten Versuche konzentrierten sich auf das Durchströmungsverhalten und die benötigte Wassermenge  $Q$  bzw. die Maximalbelastung  $P_{max}$  zur Extraktion der Suction Buckets. Anhand der Versuchsergebnisse sowie numerischer Simulation konnten LEHANE ET AL. [2014] ein vereinfachtes Verfahren zur Prognostizierung der für die Extraktion eines Suction Buckets benötigten Belastung  $P_{max}$  präsentieren.

In den Untersuchungen wurde eine Druckabnahme  $\Delta u$  bei steigender Tiefe im Inneren der Suction Buckets beobachtet. Mit dem Eingangsdruck  $P$ , der Tiefenvariable  $z$  und der Einbindetiefe  $L_b$  kann die Druckabnahme mit der Gleichung 3-36 beschrieben werden:

$$u = \gamma_w \cdot z + P \left( 1 - \frac{z}{L_b} \right) \quad 3-36$$

Im Gegensatz zur Installation von Rohrpfählen werden Suction Buckets verhältnismäßig schonend im Untergrund installiert. So kann eine Erhöhung der

Horizontalspannung, wie in Abschnitt 3.2.2 beschrieben, ausgeschlossen werden. Der Widerstand auf der Außenseite kann analog zum statischen Tragverhalten eines Pfahls als Integral über die Tiefenvariable  $z$  wie in Gleichung 3-3 bestimmt werden. Infolge der Druckbelastung im Inneren ist mit einer erhöhten Vertikalspannung zu rechnen. In Anlehnung an LEHANE ET AL. [2014] kann die Zunahme der Vertikalspannung mit:

$$\Delta\sigma'_v = \left( P - \frac{4 \cdot D_i^2 \cdot R_{s,EX\Delta z}}{\pi} \right) - u \quad 3-37$$

beschrieben werden.  $R_{s,EX\Delta z}$  sind dabei die Widerstandsanteile infolge Druckbeanspruchung auf den Boden im Tiefenbereich von  $z - \Delta z$  bis  $z$ . Mit den Gleichungen 3-36 und 3-37 kann die Pfahlmantelreibung  $q_{EX,i}$  auf der Pfahlinnenseite bei der Extraktion mit Überdruck zu:

$$q_{EX,i}(z) = (\Delta\sigma'_v + \gamma' * z) \cdot K_o \cdot \tan\delta \quad 3-38$$

zusammengefasst werden. Der Widerstand für  $R_{s,EX\Delta z}$  ergibt sich aus dem Integral von  $q_{EX,i}(z)$  zu:

$$R_{s,EX\Delta z} = \pi \cdot D_i \cdot \int_z^{z-\Delta z} q_{EX,i}(z) \cdot dz \quad 3-39$$

Gleichung 3-38 kann durch Iteration für ein Tiefensegment von  $\Delta z - z$  mit der Gleichung 3-37 als Näherungswert  $R_{s,EX\Delta z}$  in Gleichung 3-39 eingesetzt werden. Der druckabhängige Widerstandsanstieg im Pfahlinneren für ein Tiefensegment von  $\Delta z - z$  kann im Folgenden über die gesamte Einbindetiefe  $L_p$  mit Gleichung 3-40 ermittelt werden.

$$R_{s,EX,i} = \pi \cdot D_i \cdot \int_0^{L_p} q_{EX,i}(z) \cdot dz \quad 3-40$$



Aus der Gleichgewichtsbeziehung von mobilisierbaren Widerständen zu vorhandenen Einwirkungen kann der benötigte Druck  $P_{erf}$  abgeleitet werden:

$$P_{erf} = \frac{R_{s,a} + R_{s,EX,i} + G'_p}{\pi \cdot D_i^2 / 4} \quad 3-41$$

Das Pfahleigengewicht  $G_p$  wird bei einem wassergesättigten Boden durch das Pfahleigengewicht unter Auftrieb  $G'_p$  ersetzt.

### 3.5 Resümee der Literaturstudie

Die Erkenntnisse des Tragverhaltens offener Stahlrohrpfähle sind sehr umfangreich. Ansätze bspw. von JARDINE ET AL. [1993] oder KLOS & TEJCHMAN [1981] haben trotz weiterer Forschung ihre Gültigkeit nicht verloren und bilden die Grundlage neuer Untersuchungen und Formulierungen. Aktuellere Ansätze zur Bestimmung der Pfahlwiderstände wie bei LEHANE ET AL. [2005] oder auch bei LÜKING [2010] beschreiben das statische Tragverhalten bzw. die Spannungszustände an der Innen- und Außenseite von Pfählen. Dennoch konnten elementare Fragestellungen des Tragverhaltens wie insbesondere die sichere Prognose des Anwachseffektes bis heute nicht abschließend beantwortet werden. Die zusammengestellte Literatur bietet lediglich die Möglichkeit, gängige Ansätze für die Abschätzung der Tragfähigkeit zu nutzen.

Im Gegensatz zur statischen Tragfähigkeit eines Pfahls sind die Mechanismen und bodenmechanischen Vorgänge während der Extraktion in Kombination mit einem hydraulischen Überdruck bisher nicht hinreichend bekannt. Untersuchungen an Suction Buckets liefern zwar Anhaltswerte, die Vergleichbarkeit ist aufgrund der stark abweichenden Dimensionen der Randbedingungen aber infrage zu stellen [LEHANE ET AL., 2014]. Die unbekannte Korrelation zwischen der Veränderung des Spannungszustands im Kontaktbereich Pfahl-Boden und einer möglichen hydromechanischen Verformung im Korngerüst führt zu einer unzureichenden Modellbeschreibung.

## 4 Arbeitshypothesen

Die Erkenntnisse der Literaturstudie (s. Kapitel 3) erlauben eine erste Betrachtung der zu erwartenden Widerstände sowie der Pfahl-Boden-Interaktion eines auf Zug belasteten Pfahls. Zur Beschreibung der geotechnischen Phänomene während der Extraktion eines Pfahls mittels hydraulischen Überdrucks reichen die Erkenntnisse aus der Literatur nicht aus. Nachstehend erfolgt zunächst eine Systembeschreibung. Darauf aufbauend werden Arbeitshypothesen präsentiert, die sodann in Modellversuchen untersucht werden.

### **Systemvoraussetzungen**

Zur Beschreibung des Gesamtsystems werden Voraussetzungen definiert und in den späteren Versuchen abgebildet. Für die Modellbeschreibung wird eine vollständige Wassersättigung des anstehenden Bodens sowohl im Pfahlinneren als auch außerhalb des Pfahls vorausgesetzt. Des Weiteren wird in der theoretischen Modellbeschreibung und in den Modellversuchen ein homogener Bodenaufbau verwendet.

Der Ausgangszustand ist ein im Boden installierter Rohrpfahl. Der oberhalb des Bodens befindliche Teil des Pfahls wird im Folgenden als Druckkammer bezeichnet. Die Erzeugung eines Innendrucks in der Druckkammer setzt einen druckdichten Verschluss des Pfahlkopfs bspw. durch einen Deckel oder eine Haube (Kesselboden) voraus. Etwaige Öffnungen und Bohrungen müssen vor der Druckerzeugung geschlossen werden.

Der in der Druckkammer erzeugte Überdruck wirkt in alle Richtungen. Wird die innere Tragfähigkeit des Pfahlmaterials nicht überschritten, ist die einzige Verschiebungsrichtung aufwärts. Wie in Kapitel 3.4 dargestellt, kann die mobilisierbare Einwirkung über den Druck auf die Unterseite des Deckels beschrieben werden. Die Einwirkung steht damit in einem proportionalen Verhältnis zum Eingangsdruck. Übersteigt die Einwirkung die Summe der Widerstände, erfolgt die Extraktion des Pfahls.

## Stationärer Strömungszustand

Unter der Voraussetzung, dass das Pfahlmaterial starr ist, kann der Strömungszustand mit einer stationären Modellierung abgebildet werden. Der rotationssymmetrische Versuchsaufbau ermöglicht eine zweidimensionale Abbildung eines Pfahlsegments. Die Modellierung der Porenwasserdrücke erfolgte für den stationären Strömungszustand mit dem FE-Programm GGU-2D-SSFLOW. Der Detaillierungsgrad des Netzes wurde so gewählt, dass im Pfahlinneren die höchste Dichte an Knoten herrschte. In Abbildung 4-1 ist die Druckverteilung im rotationssymmetrischen 2D-Schnitt dargestellt. Die Randbedingungen der Modellierung sowie das Netz sind dem Anhang B zu entnehmen.

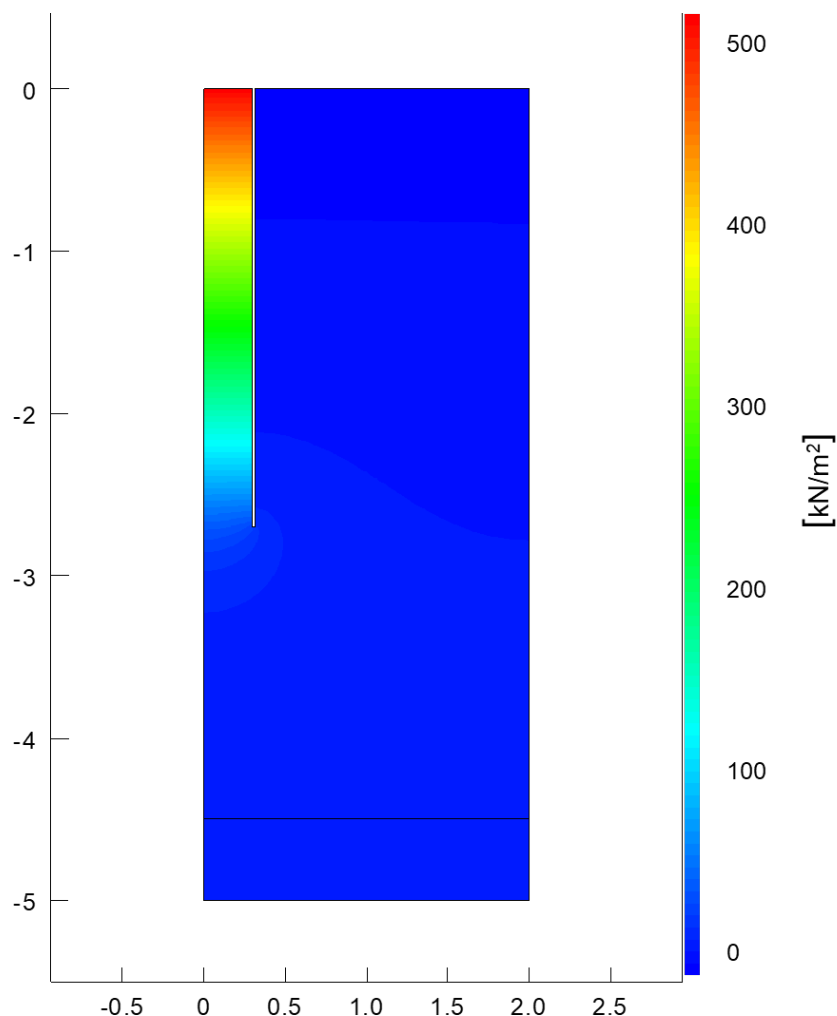


Abbildung 4-1: Druckverteilung infolge einer Druckbelastung von 500  $\text{kN/m}^2$  im rotationssymmetrischen 2D-Schnitt

Abbildung 4-1 zeigt für eine stationäre Strömung eine Abnahme der Drücke im Pfahlinnenen mit steigender Tiefe. Im Bereich des Pfahlfußes ist im Ansatz eine zwiebelartige Druckverteilung ersichtlich. Entlang der Pfahlausenseite sind nur sehr geringe Porenwasserdrücke zu erwarten.

### Spannungserhöhung im Pfahlinnenen infolge abwärts gerichteter Strömungskraft

Die im Pfahlinnenen erzeugte Strömungskraft verändert das initiale Spannungsniveau im Boden. Die vertikal nach unten gerichtete Strömungskraft erhöht die Vertikalspannung und über die Querdehnung die Horizontalspannungsanteile. Im Kontaktbereich Pfahl-Boden führen die erhöhten Spannungen im Korngerüst zu einer Steigerung der Pfahlmantelwiderstände. Die mobilisierbaren Widerstände stehen somit in einem Abhängigkeitsverhältnis zum Eingangsdruck. Abbildung 4-2 visualisiert die Belastung auf das Korngerüst der Pfahlinnenseite.

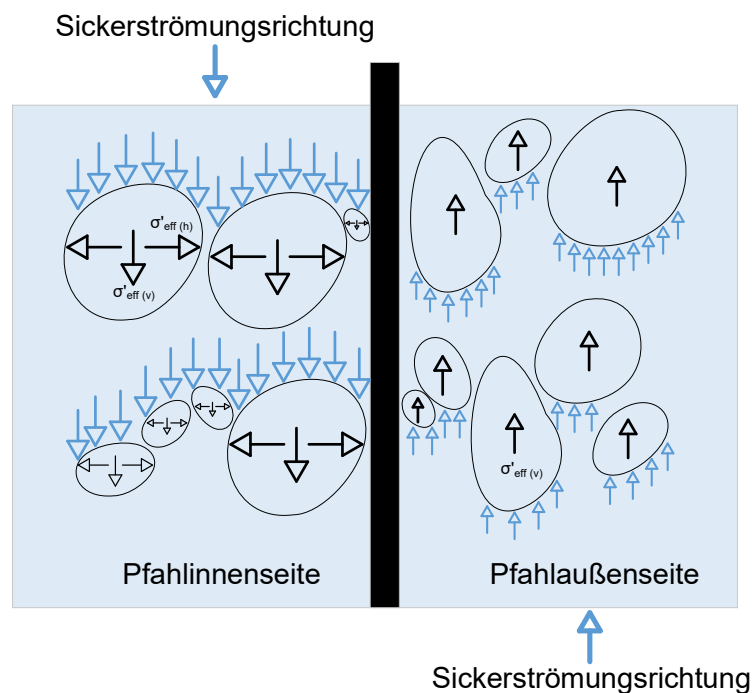
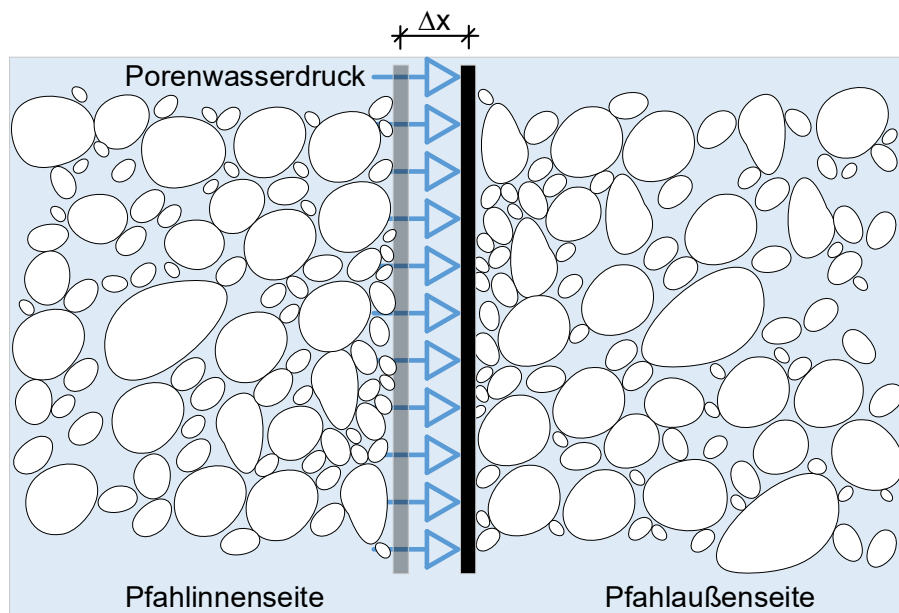


Abbildung 4-2: Schematische Darstellung der wirkenden Spannung im Korngerüst infolge der Sickerströmung

### Spannungsveränderung infolge lateraler Ausdehnung

Der im Pfahlinneren erzeugte Überdruck wirkt in alle Richtungen. Das Pfahlmaterial (Stahl) erfährt unter Belastung zunächst eine elastische und bei sehr hohen Lasten eine plastische Verformung. Einer radialen Ausdehnung bzw. Querschnittsaufweitung des Pfahls infolge des Innendrucks und der Spannungserhöhung infolge der Strömungskraft steht der außen anstehende Boden als Widerlager gegenüber.

Die laterale Querschnittsaufweitung kann in der Entstehung mehrerer Phänomene resultieren. Infolge der Querschnittsaufweitung wird der Erdwiderstand auf der Pfahlausenseite mobilisiert und eine Erhöhung der äußeren Pfahlmantelwiderstände ist zu erwarten. Gleichzeitig verringert sich aufgrund der Querschnittsaufweitung auf der Pfahlinnenseite die Kontaktspannung und damit die inneren Pfahlmantelwiderstände. Zudem ist davon auszugehen, dass der größere Innenquerschnitt die Veränderung des Bodengefüges durch eine hydrodynamische Bodendeformation mit Kornumlagerung begünstigt. Abbildung 4-3 zeigt grundlegend die Bewegung der Pfahlwandung infolge der Porenwasserdruckbelastung nach außen.



*Abbildung 4-3: Schematische Darstellung der Querschnittsaufweitung  $\Delta x$  infolge der Porenwasserdruckbelastung im Pfahlinneren*

## 5 Ziel der Arbeit

Der aktuelle Stand der Technik zum Rückbau von Offshore-Pfahlgründungen basiert seit mehreren Jahren darauf, den Gründungspfahl unterhalb des Meeresbodens von außen oder von innen abzutrennen. Eine rückstandslose Entfernung einer Offshore-Pfahlgründung nach dem Ende der Lebenszeit erfolgte bisher nicht. Wie die Erkenntnisse in Kapitel 3.5 nahelegen, sind die theoretischen Grundlagen sowie die bislang absolvierten Modellversuche nicht aussagekräftig genug, um die Extraktion eines Rohrpfahls mittels hydraulischen Überdrucks hinreichend zu beschreiben. Ausgehend von dem zuvor dargestellten Wissensstand lässt sich folgende Forschungsfrage formulieren:

*Wie ist die Spannungsänderung im Kontaktbereich Pfahl-Boden während der Pfahlextraktion mittels hydraulischen Überdrucks zu beschreiben, welche physikalischen Prozesse treten dabei auf und wie wirken sich diese auf die Interaktion Pfahl-Boden aus?*

Die Druckbelastung wird zu einer Erhöhung der Vertikal- und Horizontalspannung im Pfahlinnenen führen. Tendenziell ist mit einer Erhöhung der Pfahlwiderstände im Rahmen der Extraktion zu rechnen. Werden weitere bodenmechanische Phänomene einbezogen, ist eine Störung der Kontaktzone Pfahl-Boden infolge hoher Fließgeschwindigkeiten des eingeleiteten Wassers zu erwarten.

Der Druck gegen die Pfahlinnenseite kann die Erzeugung einer erhöhten Horizontalspannung auf der Pfahlaußenseite nach sich ziehen. Die Mobilisierung einer potenziellen Widerstandserhöhung auf der Pfahlaußenseite findet in der Literatur bisher keine Berücksichtigung und bedarf weiterer Untersuchungen.

Für die Entwicklung und Beurteilung eines geeigneten Ansatzes zur Beschreibung der Extraktion ist ein besseres Verständnis der auftretenden Phänomene notwendig. Sowohl die bodenmechanischen Aspekte als auch die technischen Möglichkeiten der Pfahlextraktion mit hydraulischem Überdruck sind bisher nicht hinreichend erforscht, um die Interaktion zwischen Pfahl und Boden ausreichend genau beschreiben zu können.

### Methodik

Im Rahmen von großmaßstäblichen Modellversuchen mit einem Maßstab von 1:10 wird die oben beschriebene Fragestellung beantwortet. Die physikalischen Modellversuche führen zu einer besseren Beschreibung der Vorgänge während der Extraktion. Die Kornverteilung des Versuchsbodens wird so gewählt, dass die Vergleichbarkeit zwischen in-situ- und Versuchsverhältnissen hoch ist.

Die Einbindung modifizierter Totalspannungsgeber, die nur minimal in den sehr kleinen Kontaktbereich Pfahl-Boden eingreifen, ermöglicht zudem eine Beschreibung der bodenmechanischen Mechanismen und somit der physikalischen Prozesse. Die Kombination von großmaßstäblichen Versuchen und weiterentwickelter Messtechnik wird das Gesamtverständnis der Extraktion mittels hydraulischen Überdrucks sowie die spätere Planung und Umsetzung der Rückbaumethode in situ verbessern.

Die formulierte Forschungsfrage wird in drei unterschiedlichen Versuchsreihen beantwortet. Neben unterschiedlichen Belastungsszenarien wird in einer Versuchsreihe die Simulierung einer Abdichtung durchgeführt. Jede Versuchsreihe wird durch die Wiederholung mehrerer Teilversuche mit identischen Abläufen validiert.

Um einen realitätsnahen Ablauf sowie die Vergleichbarkeit der einzelnen Versuchsreihen zu gewährleisten, wird in allen Teilversuchen die gleiche Versuchsvorbereitung und Installationsmethode (Schlagammung) verwendet.

Das Belastungsszenario wird variiert mit dem Ziel, den Einfluss der Belastungsgeschwindigkeit zu identifizieren. Es wird erwartet, dass die Veränderung der Durchlässigkeit aufgrund einer hydrodynamischen Bodendeformation mit Kornumlagerung einen wichtigen Parameter zur Beurteilung möglicher Spannungsänderungen im Inneren des Bodens darstellt. Zur Beurteilung der Spannungsänderung wird für die Modellversuche neben den modifizierten Totalspannungsgebern ein umfangreiches Messkonzept entwickelt.

## 6 Modellversuche

### 6.1 Versuchseinrichtung

Für eine bestmögliche Betrachtung der im Boden auftretenden Phänomene sind im Rahmen von Modellversuchen die Aspekte des möglichen Maßstabs, eventuelle Eingrenzungen der Versuchseinrichtung und die Wahl bzw. Anpassung geeigneter Sensorik zur repräsentativen Abbildung der bodenmechanischen Mechanismen zu berücksichtigen.

Die großmaßstäbliche Untersuchung des Spannungsverhaltens bei der Extraktion mittels hydraulischen Überdrucks wurde in der Versuchseinrichtung des IGG-TUBS durchgeführt. Der Versuchsstand während einer Pfahlinstallation ist in Abbildung 6-1 dargestellt.



*Abbildung 6-1: Geotechnischer Versuchsstand des IGG-TUBS während der Pfahlinstallation*

Die zwei identischen geotechnischen Versuchströge haben einen Durchmesser von 4 m und eine Tiefe von 5 m (s. Abbildung 6-2). Erfahrungen am IGG-TUBS sowie Vorversuche im Rahmen des Vorhabens DeCoMP haben gezeigt, dass sich durch



einen lagenweisen Einbau des Modellbodens die höchsten Lagerungsdichten erzielen lassen.

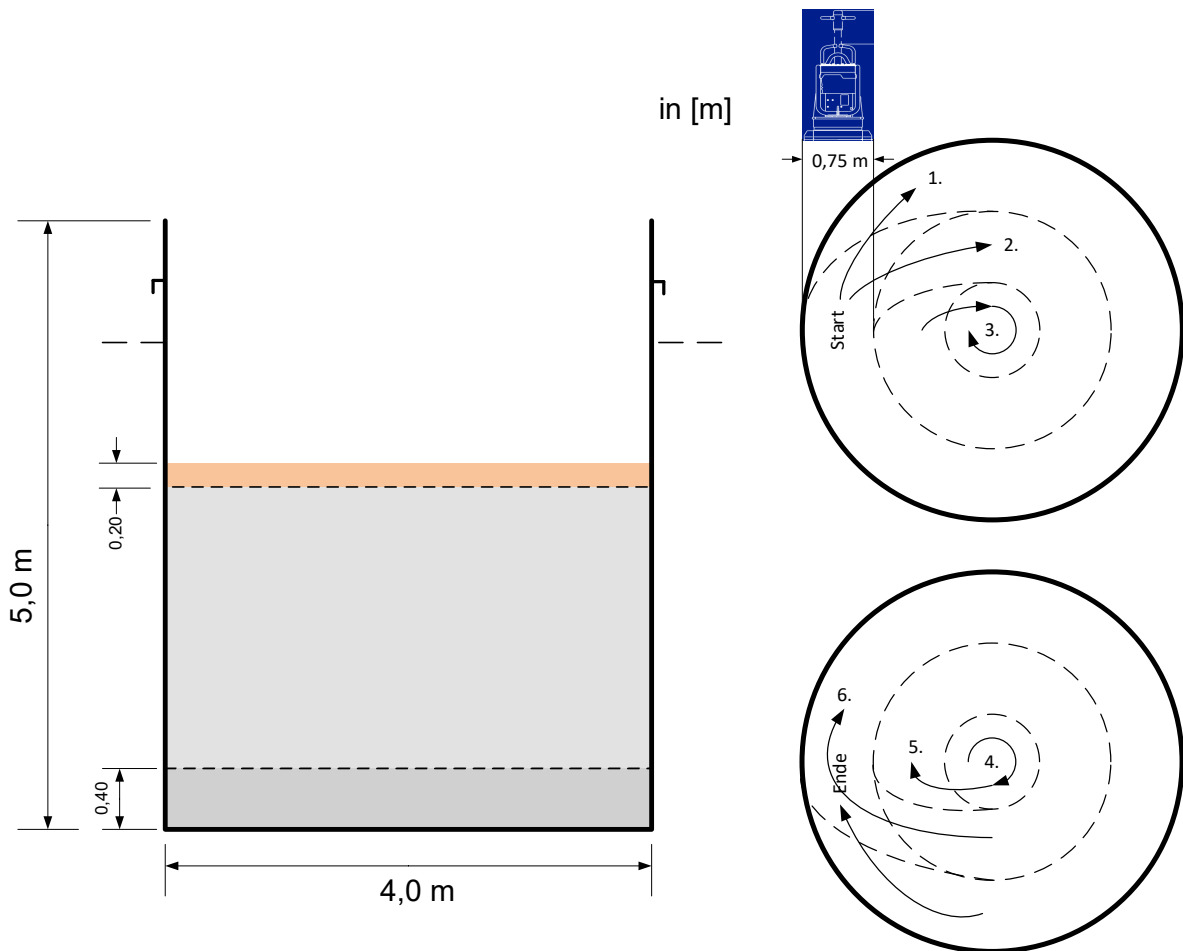


Abbildung 6-2: Schnitt Versuchsstand mit lagenweisem Sandeinbau

Für einen reproduzierbaren Einbau wurde für alle nachfolgend beschriebenen Teilversuche der gleiche Einbauprozess verwendet. Eine definierte Masse Modellsand wurde für jede Schicht mit einem Zweischalengreifer locker in den Versuchstrog eingebracht und verteilt. Anschließend erfolgten zwei Gesamtüberfahrten mit einer Vibrationsplatte zur Verdichtung des Modellsands (s. Abbildung 6-2 rechts). Aus der Verdichtung resultierte eine Schichtdicke von jeweils 20 cm. Je Versuch wurden 18 Schichten mit einer Gesamtmasse von ca. 75 t und einem Volumen von ca. 45 m<sup>3</sup> eingebaut. Durch die nebeneinander angeordneten Versuchströge konnte der Modellboden stets im Wechsel von dem einen in den anderen Trog eingebaut werden.

## 6.2 Versuchsplanung

Als Grundlage der Planung und Dimensionierung wurde ein generischer Prototyp basierend auf den Gründungspfählen des OWP AW in der deutschen Nordsee gewählt. Um die in-situ-Verhältnisse auf die Modellversuche zu übertragen, mussten einige Vereinfachungen vorgenommen werden. Limitierende Faktoren sind die Abmessungen des Versuchsstands, die Skalierung unter 1g-Bedingungen und keine Skalierungsmöglichkeit der hydraulischen Flüssigkeit (Wasser). In den folgenden Unterpunkten werden die Dimensionierung des Modellpfahls sowie der Modellboden näher betrachtet.

### 6.2.1 Modellboden

Als Modellboden wurde ein Quarzsand mit vergleichbaren Eigenschaften des Referenzprojekts OWP AW gewählt (s. Abbildung 6-3).

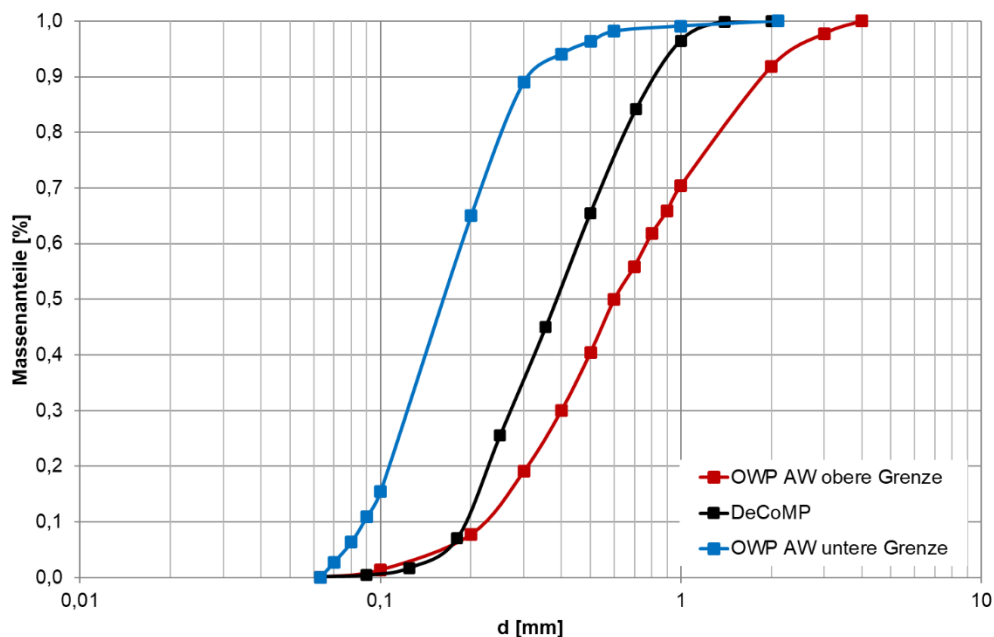
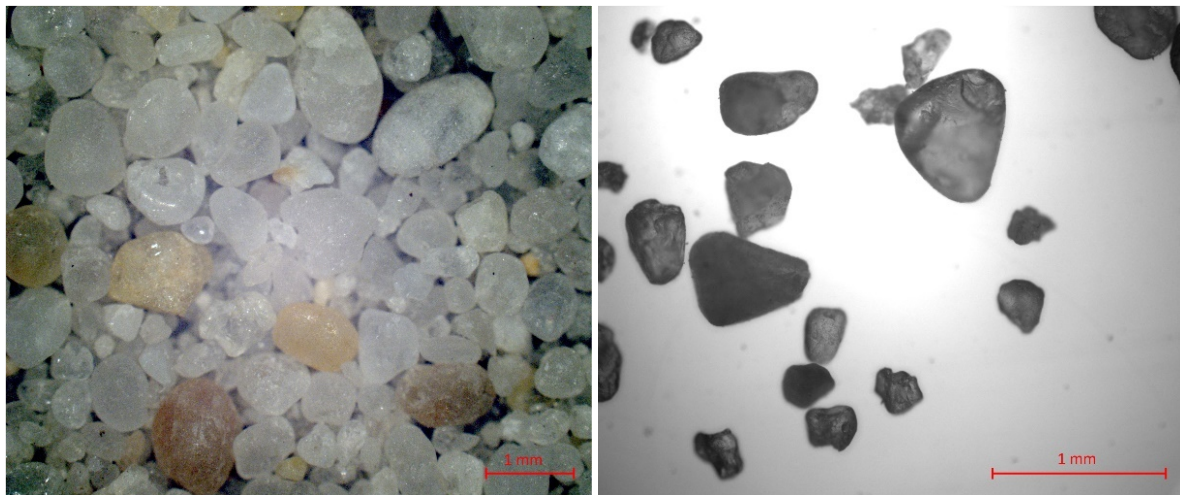


Abbildung 6-3: Körnungslinie des Modellbodens (schwarz), oberer (rot) und unterer (blau) Grenzbereich der Kornverteilung des OWP AW [STEIN ET AL., 2020]

Bei der Auswahl des Modellbodens wurde das Ziel verfolgt, die bodenmechanischen Prozesse wie die Veränderung des Spannungszustands und der hydromechanischen

Kornumlagerungen, die während der Druckerzeugung entstehen, in einem nahezu unskalierten Bereich zu erfassen.

Der aus Silica-Sand bestehende Quarzsand kann nach DIN EN ISO 14688-1:2020 in fein-/ mittelsandig sowie grobsandig klassifiziert werden. Wie in Abbildung 6-4 zu sehen, handelt es sich bei dem Modellsand um eine kompakte und runde Kornform.



*Abbildung 6-4: Mikroskopaufnahme des Modellsands [STEIN ET AL., 2020]*

Die Lagerungsdichte sowie der Spannungszustand im Korngerüst spielen bei der Spannungs- und vor allem bei der Kornumlagerung eine besondere Rolle. Da im Rahmen von maßstäblichen Versuchen der in-situ-Spannungszustand im Boden unter 1g-Bedingungen nicht abgebildet werden kann, wurde eine möglichst hohe Lagerungsdichte angestrebt. In Tabelle 6-1 sind neben der dichtesten und lockersten Lagerung weitere relevante Parameter des Modellbodens zusammengefasst.

Der Winkel der inneren Reibung wurde im Rahmen von drainierten Scherversuchen zu  $\varphi' = 41,7^\circ$  bestimmt. Der Durchlässigkeitsbeiwert des Bodens wurde in Laborversuchen zu  $k_f = 4,5 \cdot 10^{-4}$  [m/s] bestimmt.

Tabelle 6-1: Parameter des Modellbodens

| Parameter                                   | Kennwert                                 |                |                |
|---------------------------------------------|------------------------------------------|----------------|----------------|
| Bezeichnung nach DIN 18196:2022-02          | SE                                       |                |                |
| Bezeichnung nach DIN EN ISO 14688-1:2020-11 | mSa, csa, fsa'                           |                |                |
| mittlerer Korndurchmesser                   | $D_{50} = 0,39 \text{ [mm]}$             |                |                |
| Ungleichförmigkeitszahl                     | $C_u = 2,4 \text{ [-]}$                  |                |                |
| Korndichte                                  | $\rho_s = 2.650 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ |                |                |
| Lockerste Lagerung                          | $\rho_d = 1.492 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ | max n<br>0,322 | max e<br>0,475 |
| Dichteste Lagerung                          | $\rho_d = 1.796 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ | min n<br>0,437 | min e<br>0,776 |
| Lagerungsdichte nach Sandeinbau             | $\rho_d = 1.681 \text{ [kg/m}^3\text{]}$ |                |                |
| Durchlässigkeit                             | $k_f = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ [m/s]}$  |                |                |
| Reibungswinkel im Bruchzustand (drainiert)  | $\varphi' = 41,7^\circ$                  |                |                |

Unterhalb des Modellbodens in einer Tiefe von 4,6 m ist eine Filterschicht mit 0,4 m Dicke angeordnet. Das Eindringen von Modellboden in die Filterschicht wird durch ein Geotextil verhindert. Die Durchlässigkeit des Filters kann mit  $k_f = 4,18 \cdot 10^{-3} \text{ [m/s]}$  angenommen werden.

### 6.2.2 Modellpfahl

Wie eingangs beschrieben, wurde als Grundlage der Planung und Dimensionierung ein generischer Prototyp basierend auf den Gründungspfählen des OWP AW gewählt. Tabelle 6-2 kann ein Pfahldurchmesser von  $D = 6,0 \text{ m}$  und eine Einbindelänge von 29,5 m als Dimension der Monopfahlgründung des OWP AW entnommen werden. Mit den Abmessungen der vorhandenen Versuchseinrichtung ist eine Skalierung im Maßstab von etwa 1:10 möglich. Die Dimensionen sind in Tabelle 6-2 zusammenfasst.

Tabelle 6-2: Daten des generischen Prototyps und des Modellpfahls

| Parameter                    | generischer Prototyp                  | Modellpfahl                           |
|------------------------------|---------------------------------------|---------------------------------------|
| Pfahllänge                   | 54,8 [m]                              | 3,0 [m]                               |
| Einbindetiefe                | 29,5 [m]                              | 2,7 [m]                               |
| Durchmesser                  | 6,0 [m]                               | 0,61 [m]                              |
| Verhältnis Einbindetiefe L/D | 4,8 [-]                               | 4,4 [-]                               |
| Wandstärke                   | 75 [mm]                               | 8 [mm]                                |
| Querschnittsfläche           | 1,4 [m <sup>2</sup> ]                 | 0,016 [m <sup>2</sup> ]               |
| Mantelfläche                 | 556 [m <sup>2</sup> ]                 | 5,17 [m <sup>2</sup> ]                |
| E-Modul (S355)               | $2,1 \cdot 10^8$ [kN/m <sup>2</sup> ] | $2,1 \cdot 10^8$ [kN/m <sup>2</sup> ] |
| Eigengewicht $G_p$           | 800 - 3000 [kN]                       | 7,7 [kN]                              |

Der Modellpfahl erfüllt die Druckklasse PN 16 und kann durch einen Blindflansch am Kopf druckdicht verschlossen werden [DIN EN 1092-1:2018-12].

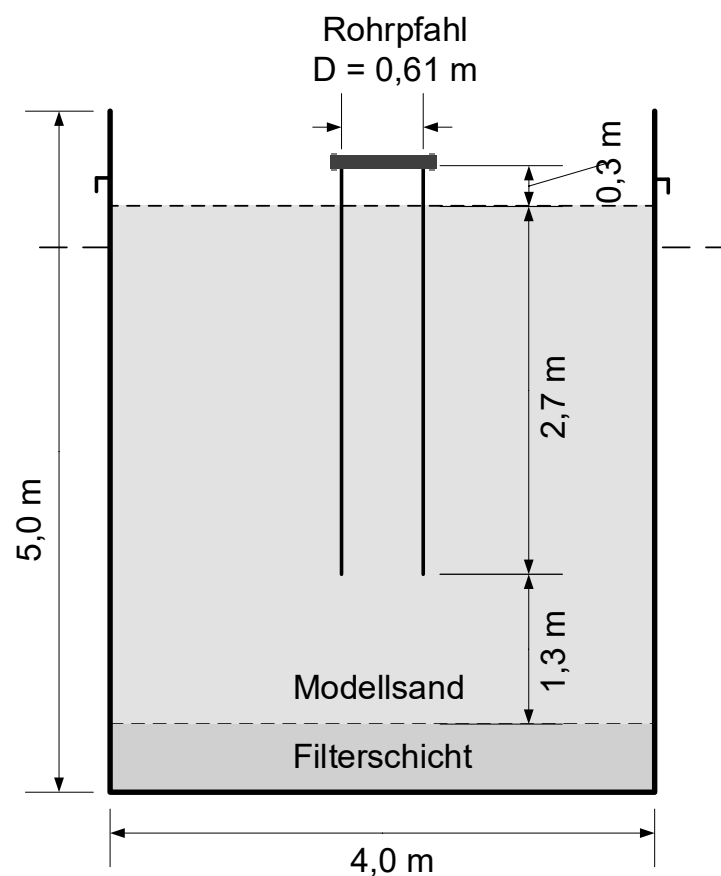


Abbildung 6-5: Dimensionen des Modellpfahls im Versuchstrog

### 6.2.2.1 Bestimmung Wandreibungswinkel

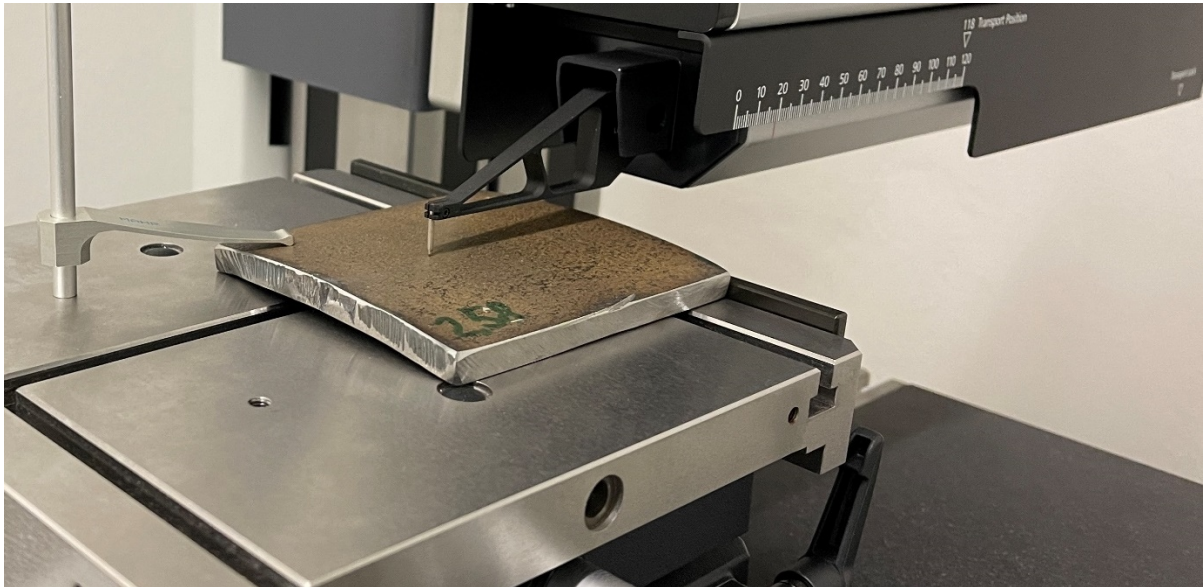
Wie in Kapitel 3.2 beschrieben, muss zur Beurteilung der vorhandenen Mantelwiderstände der Wandreibungswinkel  $\delta$  sowie der Kontaktreibungswinkel zwischen Pfahl und Boden berücksichtigt werden. Die aus der Literatur anzusetzenden Wandreibungswinkel variieren teilweise stark. In Tabelle 6-3 wird die Bandbreite an möglichen Wandreibungswinkeln für den genutzten Modellsand aus den unterschiedlichen Ansätzen der Literatur dargestellt.

Aus der Gegenüberstellung in Tabelle 6-3 wird eine Spannbreite bei der Bestimmung des Wandreibungswinkels von  $\delta = 25^\circ$  bis  $37^\circ$  ersichtlich. Für den Modellpfahl wurde daher der Wandreibungswinkel in Laborversuchen durch einen modifizierten Scherversuch bestimmt.

*Tabelle 6-3: Bestimmung des Wandreibungswinkels nach Ansätzen der Literatur*

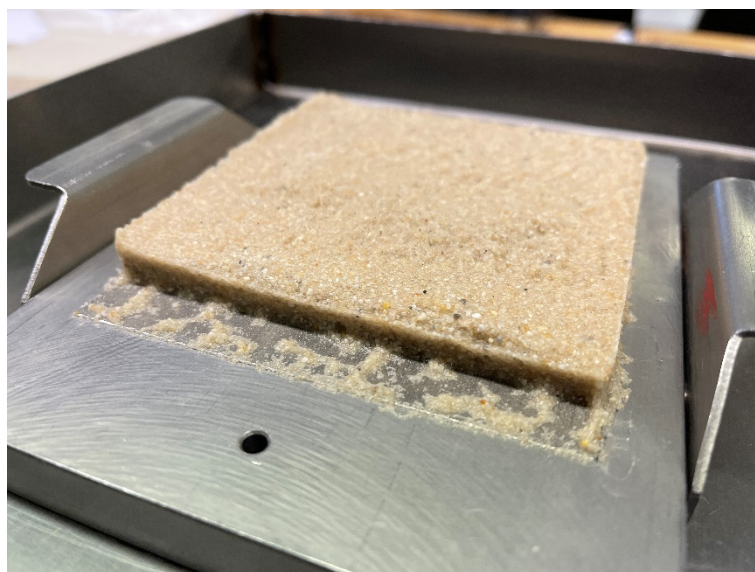
| Ansatz             | Parameter                | Wandreibungswinkel $\delta$ | Bemerkung                         |
|--------------------|--------------------------|-----------------------------|-----------------------------------|
| API                | Lagerungsdichte          | $30^\circ$                  |                                   |
| UESUGI & KISHIDA   | $\delta_{max} = \varphi$ | $37^\circ$                  |                                   |
| ICP-Methode        | $\delta_{cs}$ Diagramm   | $25^\circ$                  | Stahlrauigkeit $R_a = 6-10 \mu m$ |
| TIWARI & AL-ADHADH | $\delta$ konstant        | $28^\circ$                  |                                   |
| AKSOY ET AL.       | Diagramm                 | $29^\circ$                  | für Stahl                         |
| LEHANE ET AL.      | Obergrenze               | $29^\circ$                  |                                   |

Die Oberflächenrauigkeit der Pfahloberfläche wurde mittels Tastschrittverfahrens am Institut für Produktionsmesstechnik der Technischen Universität Braunschweig zu einer mittleren arithmetischen Rauheit von  $R_a = 1,8 \mu m$  bestimmt. Abbildung 6-6 zeigt die Rauheitsbestimmung mit dem Tastschrittverfahren anhand eines 10 cm x 10 cm großen Ausschnitts der Pfahlwand.



*Abbildung 6-6: Bestimmung der Oberflächenrauheit mit dem Tastschrittverfahren*

Für die Bestimmung des Wandreibungswinkels wurde, wie in FISCHER [2021], eine Stahlplatte mit vergleichbarer Rauheit gegen den Modellsand in einem modifizierten Rahmen-Scherversuch abgescher. Eine angepasste Stahlplatte wurde so in den Scherrahmen eingesetzt, dass sich die erzwungene Scherfuge zwischen der Stahlplatte und dem Modellboden ausbildete. Der Modellboden wird entsprechend der Lagerungsdichte im Versuchstrog in das Schergerät eingebaut. Die Normalspannung im Rahmen der Versuche betrug 50, 100 und 200 kN/m<sup>2</sup>. Abbildung 6-7 zeigt das Rahmenschergerät nach Beendigung des modifizierten Scherversuchs.



*Abbildung 6-7: Modifizierter Scherversuch bei maximalem Scherweg*

In Anlage C1 ist der Scherspannungsverlauf dargestellt. Aus den Versuchen konnte ein Wandreibungswinkel von  $\delta = 26,5^\circ$  ermittelt werden. Für den verwendeten Modellboden und die betrachtete Spannung liegt der Wandreibungswinkel somit etwas unter den Ansätzen in der Literatur.

### 6.3 Messkonzept

Zur Erfassung der relevanten Parameter wurde für die Modellversuche ein umfangreiches Messkonzept entwickelt. Ein besonderes Augenmerk wurde dabei auf die Kontaktfläche Pfahl-Boden gelegt. In Abbildung 6-8 ist das gesamte Messkonzept dargestellt. Im Modellboden wurden insgesamt 17 Totalspannungsgeber und 9 Porenwasserdruckgeber verwendet. Am Modellpfahl wurde in fünf Tiefenebenen die Pfahldehnung redundant mit Dehnungssensoren erfasst. Zudem wurden Totalspannungsgeber mit minimalem Eingriff in den Pfahlquerschnitt entwickelt.

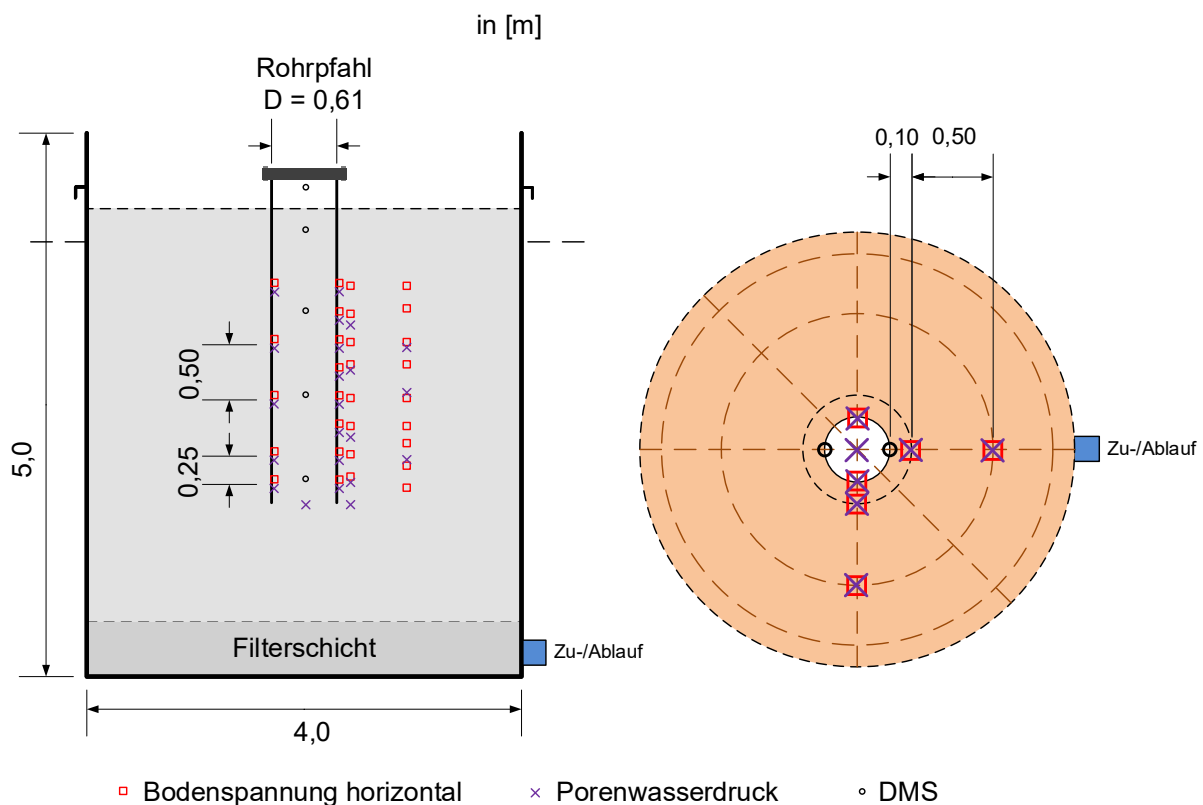


Abbildung 6-8: Lage aller Sensoren – Teilversuch HO6



Auf der Außenseite wurden acht Totalspannungsgeber sowie acht Porenwasserdruckgeber appliziert. Auf der Innenseite wurden fünf Totalspannungsgeber und fünf Porenwasserdruckgeber angebracht. Zur Erfassung des Innendrucks oberhalb der Geländeoberkante wurde ein Druckaufnehmer des Herstellers Festo verwendet.

Zur zeitsynchronen Messdatenerfassung wurden alle verwendeten Sensoren mit einem Datenerfassungsgerät (DAQ) der Firma National Instruments erfasst. Gemessen wurde mit einer Frequenz von 100 Hz, was 100 Messwerten pro Sekunde entspricht.

Im Folgenden wird das Messkonzept in die zwei Bereiche Pfahlmesstechnik und Spannungsmessung im Boden unterteilt und näher beschrieben.

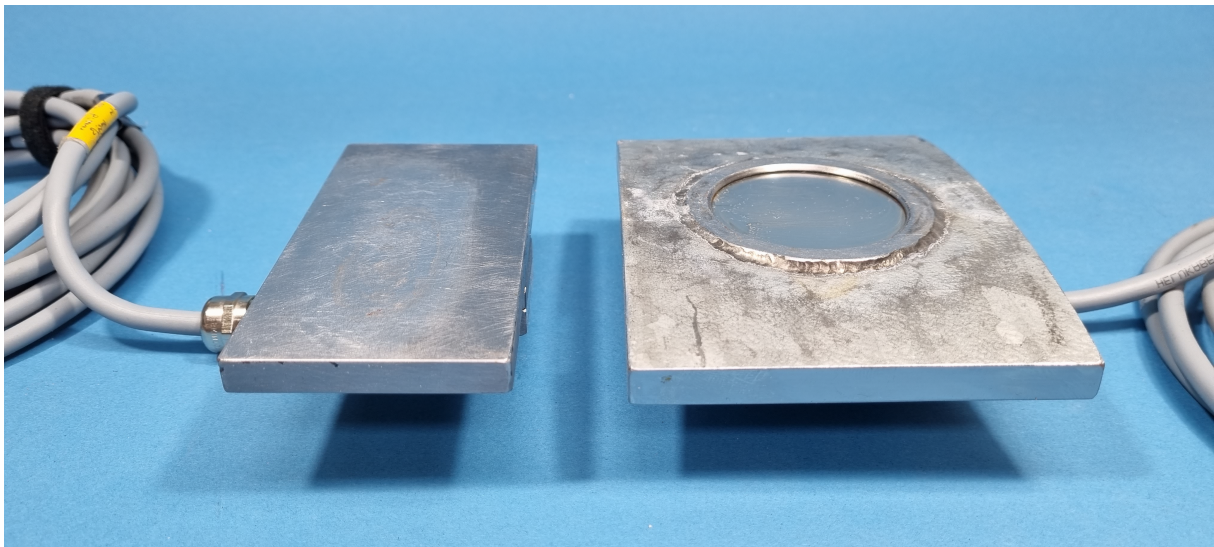
### 6.3.1 Pfahlmesstechnik

Die Sensorik am Pfahl wurde so konzipiert, dass alle auftretenden Ereignisse bestmöglich erfasst werden können. Totalspannungsgeber an der Oberfläche eines Pfahls zu applizieren oder diese dort einzulassen, wurde in der Vergangenheit mehrmals durchgeführt [HENKE, 2013]. Der Vorteil eines Totalspannungsgebers auf der Pfahlwand ging jedoch stets mit einer zum Teil deutlichen Querschnittsveränderung bzw. Störung des Verformungsverhaltens des Pfahls einher. So wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens DeCoMP modifizierte Totalspannungsgeber der Firma Glötzl genutzt, die aufgrund eines sehr geringen Auftrags die Pfahlaußenseite weitestgehend unbeeinflusst ließen [HINZMANN ET AL., 2023]. Der hinter der Messmembran befindliche Aufbau des Sensors sowie die Sensorleitung stellten allerdings eine nicht zu vernachlässigende Querschnittsveränderung im Pfahlinneren dar.

Im Rahmen dieser Arbeit wurde daher die Möglichkeit realisiert, einen mit Öl gefüllten Totalspannungsgeber direkt auf die Pfahlwandung zu applizieren und den Sensor in die Wandung des Pfahls einzulassen. In einer ersten Prototypen-Studie wurden zwei Sensoren angefertigt und anschließend in einem Druckbehälter auf Genauigkeit und Dichtigkeit getestet.

### 6.3.1.1 Prototypen Totalspannungsgeber

Abbildung 6-9 zeigt eine Draufsicht der beiden Prototypen. Der wesentliche Unterschied zwischen den beiden Sensoren, neben einer runden und einer rechteckigen Membran, liegt in der Membranbefestigung. Die Schweißnähte der rechteckigen Membran des Prototyps Nr. 2 wurden nach der Applizierung nachbehandelt, sodass hier eine minimale Querschnittsänderung vorliegt. Die Membran des auf der linken Seite abgebildeten Prototyps Nr. 1 wurde an allen Seiten mit der dahinterliegenden Stahlplatte verschweißt. Die Membran des Prototyps Nr. 2 wurde unter einen aufgeschweißten Ring gelegt und rückseitig durch das Einschrauben einer Halterung fixiert. Als Übertragungsmedium wurde für beide Prototypen Silikon-Öl in den Hohlraum zwischen die Membran und das Stahlstück gepresst. Der verwendete Druckmessgeber der Firma Keller Druckmesstechnik wurde in beiden Prototypen von der Rückseite angebracht.



*Abbildung 6-9: Prototyp Nr. 1 eckig (links), Nr. 2 rund (rechts)*

In Abbildung 6-10 sind die mit den Prototypen gemessenen Druckverläufe dem mit dem Referenzempfänger gemessenen Druckverlauf gegenübergestellt. Die Prototypen zeigen eine sehr gute Übereinstimmung mit dem Referenzsensor. Lediglich bei einem Druck von über 7 bar wurde eine Abweichung von 0,092 bar für den Prototypen Nr. 1 und von 0,066 bar für den Prototypen Nr. 2 festgestellt. Die Abweichung beider Sensoren beträgt ca. 1 %, was innerhalb der vom Hersteller

angegebenen Genauigkeit liegt. Zur Plausibilität wurde ein im Rahmen des Vorhabens DeCoMP verwendeter modifizierter Totalspannungsgeber der Firma Glötzl analog zu den beiden Prototypen im Druckbehälter getestet. Auch hier fiel eine Abweichung in der höchsten Druckstufe auf. Die Abweichung ist damit konsistent und kann nicht auf die unterschiedliche Bauart zurückgeführt werden.

Für die Integration in das angestrebte Messkonzept war ein möglichst minimaler Eingriff in den Pfahlquerschnitt schließlich ausschlaggebend. Die Wahl fiel auf Prototyp Nr. 1.

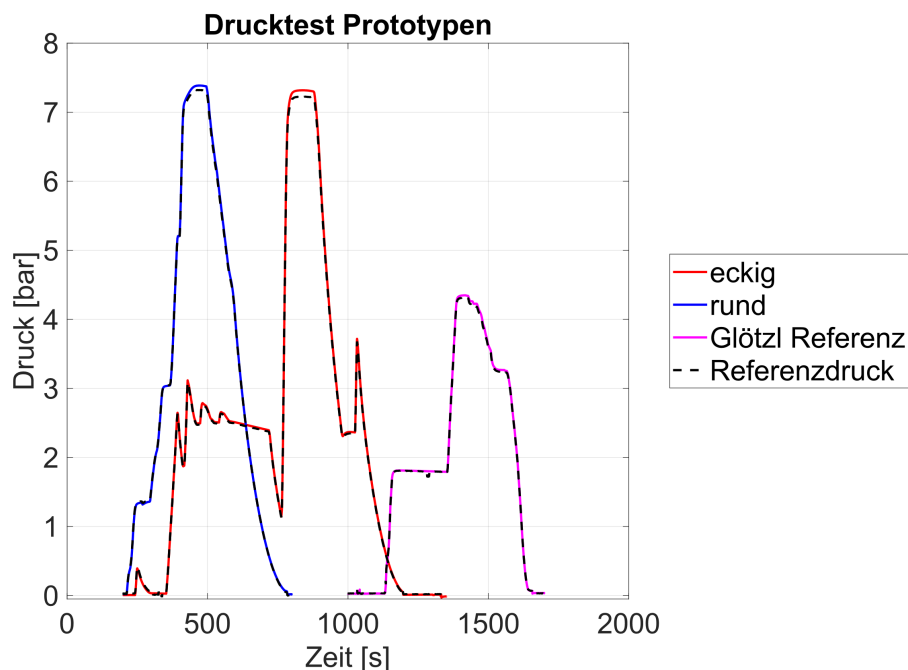


Abbildung 6-10: Druckverlauf der Prototypen mit Referenzdruck (Festo, Glötzl Drucksensor)

#### 6.3.1.2 Applizierung Totalspannungsgeber auf Modellpfahl

Die Modifizierung des Prototypen Nr. 1 für die Applizierung auf dem Modellpfahl bedurfte einer zweiten Entwicklungsstufe, denn sowohl im Inneren als auch auf der Außenseite des Pfahls sollte mit den Totalspannungsgebern eine Bestimmung der Bodenspannung möglich sein.

Da eine maschinelle Nachbehandlung der Schweißnähte auf der Pfahlausseite nicht möglich war, wurden die 0,5 mm dicken Membrane direkt auf die Oberfläche des

Pfahls ohne Materialzugabe geschweißt (s. Abbildung 6-11). Die Schweißarbeiten wurden vom Institut für Füge- und Schweißtechnik der Technischen Universität Braunschweig durchgeführt. Das Schweißverfahren ohne Materialzugabe (WIG-Schweißverfahren) ermöglicht eine Querschnittserweiterung von lediglich 0,5 mm Dicke (Membrandicke). Zur Vermeidung von Lufteinschlüssen in der Schweißnaht wurde eine Schablone kraftschlüssig auf die Oberfläche gedrückt (s. Abbildung 6-11).

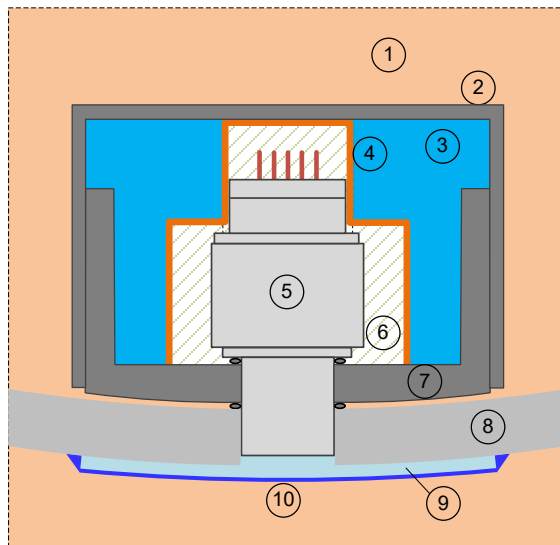


*Abbildung 6-11: Anschweißen der Membran mittels WIG-Schweißverfahren*

Um die Querschnittsveränderung auf der Pfahlinnenseite ebenfalls möglichst gering zu halten, wurde zur Abdeckung der eingeschraubten Sensoren und Kabelführung ein U-Profil als Abdeckung genutzt. Abbildung 6-12 zeigt den Schnitt durch die Sensorabdeckung, den Pfahl und die Membran.

Wie der Systemskizze entnommen werden kann, wird der Drucksensor durch das U-Profil in die Pfahlwand geschraubt. Zur Befüllung des Hohlraums zwischen der Membran und dem Pfahl wurde zunächst ein Vakuum hergestellt und anschließend Silikonöl bis zu einem Druck von ca. 1 bar eingefüllt.





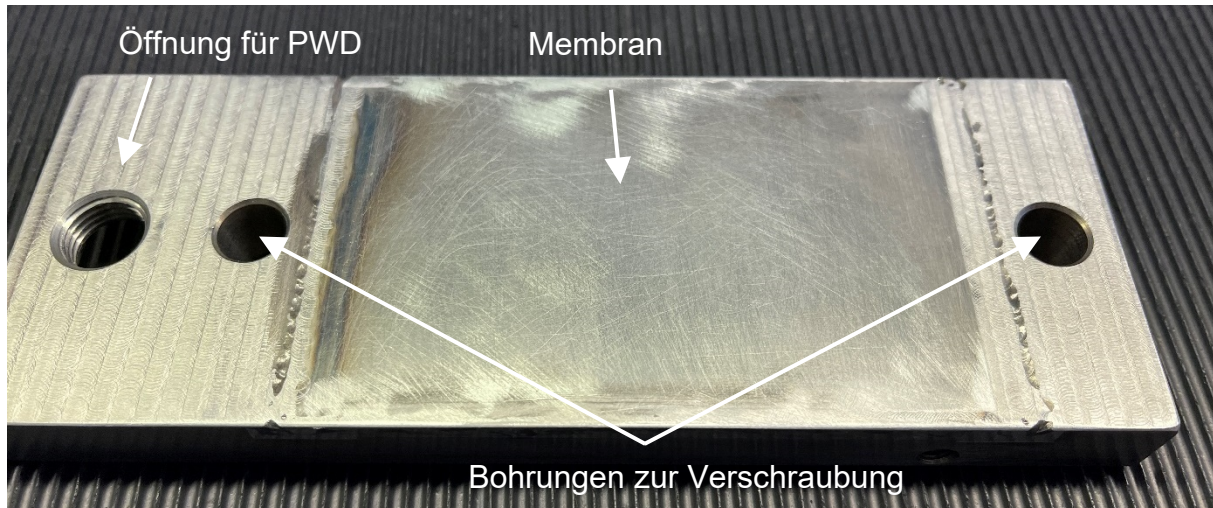
- ① Anstehender Modellsand
- ② Cover-Profil gegen den Boden
- ③ Wasser infolge Versuchsdurchführung
- ④ Wasserdichte Abdeckkappe
- ⑤ Keller-Sensor
- ⑥ Epoxidharz-Vergussmasse
- ⑦ Sensoraufnahme
- ⑧ Pfahlwand
- ⑨ Silikonöl
- ⑩ Membran des Druckkissens  
(von außen aufgeschweißt)

Abbildung 6-12: Systemskizze des entwickelten Totspannungsgebers

Als Schutz vor dem anstehenden Boden diente ein Cover-Profil. Abbildung 6-13 zeigt auf der linken Seite das installierte U-Profil als Sensoraufnahme sowie die Kabelführung während der Öl-Befüllung eines Totspannungsgebers.



Abbildung 6-13: Befüllung Totspannungsgeber von innen (links), installiertes Cover-Profil (rechts / oben) und installierte Totspannungsgeber innen (rechts / unten)



*Abbildung 6-14: Rohling mit aufgeschweißter Membran der Innenachse Oberseite*

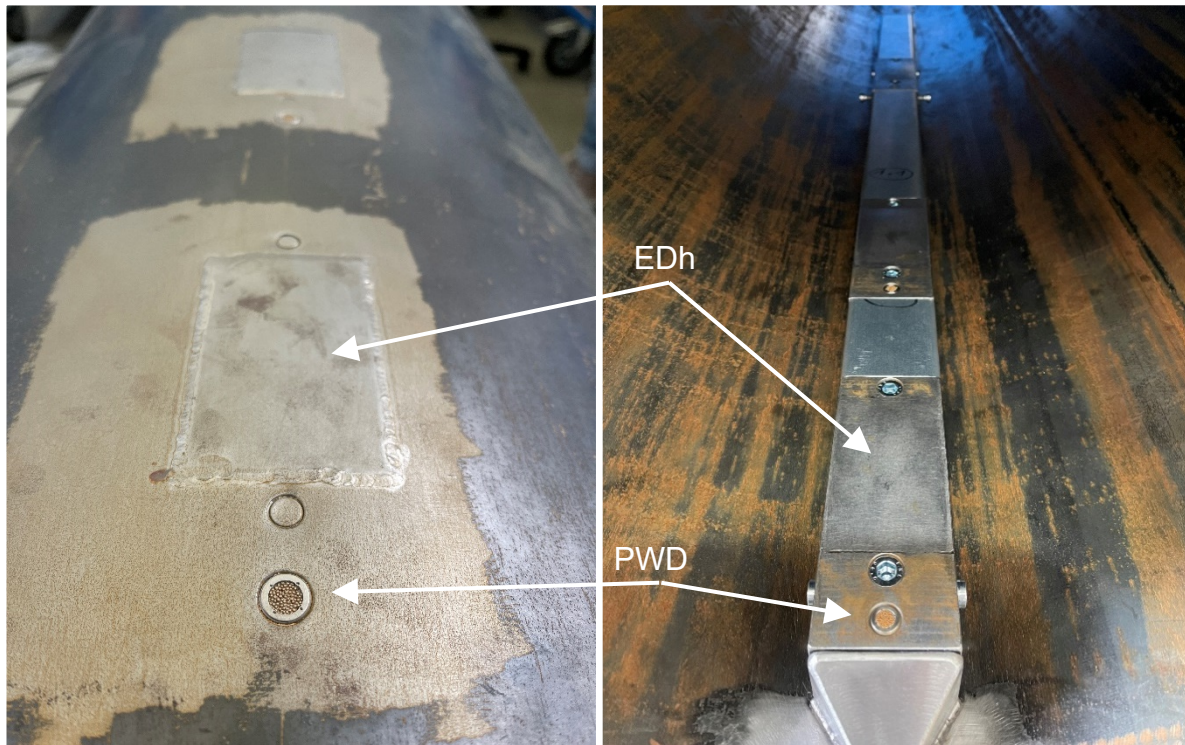
Auf der rechten Seite ist oben das abschließende Cover-Profil angeschraubt und unten ist die innen liegende Messachse zu sehen.

Die Abmessungen der innen liegenden Messachse sind identisch mit dem gegenüberliegenden Cover-Profil der äußeren Messachse. Abbildung 6-14 zeigt die Oberseite eines gefertigten Rohlings der Messachse mit verschweißter Membran und nachbearbeiteten Schweißnähten. Für die Fertigstellung des Totalspannungsgebers wurde rückseitig der Druckaufnehmer eingeschraubt und der Hohlraum zwischen Membran und Pfahlwand anschließend mit Silikonöl befüllt.

### 6.3.1.3 Porenwasserdruckgeber

Zur Beurteilung des Spannungszustands im Korngerüst kann aus der Totalspannung des Bodens unter Einbeziehung des Porenwasserdrucks die effektive Spannung berechnet werden. Dazu wurde unterhalb jedes am Pfahl verbauten Totalspannungsgebers ein Porenwasserdruckgeber (PWD) integriert. In Abbildung 6-15 sind die Messebenen der beiden Messachsen dargestellt. Im weiteren Verlauf werden die Totalspannungsgeber zur Erfassung der horizontalen Spannung als Erddruckgeber orizontal (EDh) bezeichnet.

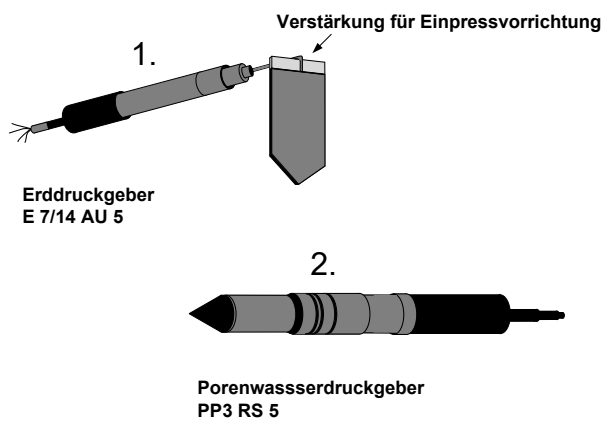




*Abbildung 6-15: Äußere Messachse (links), innere Messachse (rechts)*

### 6.3.2 Spannungsmessung im Boden

Zur Erfassung der horizontalen Totalspannung im Boden wurden EDh der Firma Glötzl eingesetzt. Die als Spaten ausgeführten EDh wurden in definierten Positionen nach der Verdichtung einer Bodenschicht in den Boden gepresst (s. Abbildung 6-16). Um aus den gemessenen Totalspannungen die effektive Spannung des Korngerüsts bestimmen zu können, wurden in unmittelbarer Nähe zu den EDh-Sensoren PWD-Sensoren installiert.



*Abbildung 6-16: 1. Horizontale Totalspannungsgeber, 2. Porenwasserdruckgeber, 3. Einpressen der Totalspannungsgeber*

Nach Positionierung der Sensoren in der jeweiligen Schicht wurde die nächste Sandlage locker eingebaut und verdichtet. Um etwaige Wasserwegigkeiten und Störungen des Modellbodens zu verringern, wurden die Sensorkabel jeweils horizontal direkt zum Trogrand geführt und dort gebündelt vertikal zur Datenerfassung verlegt.



*Abbildung 6-17: EDh- und Porenwasserdrucksensoren beim Bodeneinbau*

Die Lage der Sensorik wurde während der Versuche nicht verändert, sodass ein hohes Maß an Vergleichbarkeit besteht. Zur möglichst detaillierten Erfassung der



Spannungsänderung im Nahbereich des Pfahls orientierte sich die Anordnung der Bodensensoren an den Pfahlsensoren. Für jeden am Pfahl applizierten Totalspannungsgeber wurde ein EDh in unmittelbarer Nähe im Boden platziert (Abstand = 10 cm).

Abbildung 6-17 zeigt die beispielhafte Anordnung zweier EDh und eines PWD während der Versuchsvorbereitung. Die Membran der EDh ist zum Mittelpunkt des Trogs und damit auch zur späteren Pfahlwandung ausgerichtet. Die Lage aller Sensoren für die jeweiligen Versuche ist Anlage D zu entnehmen.

### 6.3.3 Druckerzeugung

Die regelbare Kreislpumpe ZL 1000 des Herstellers Johstadt wurde zur Druckerzeugung zwischen dem Wasserzulauf und dem Modellpfahl installiert. Der Modellpfahl wurde am Pfahlkopf mit einem Blindflansch als Deckel druckdicht verschlossen. Die insgesamt 26 Sensorkabel der innen liegenden Sensoren mussten ebenfalls druckdicht durch den Deckel nach außen geführt werden. Dazu wurden druckdichte Steckerverbindungen des Herstellers Lemo V-Serie in den Deckel eingelassen. Bedingt durch den festen Verbau der Sensorkabel im Deckel konnte dieser für die Pfahlinstallation nicht demontiert werden. Der Deckel fungiert somit als Rammhaube und als Abdichtung. Für eine problem- und beschädigungslose Installation mit einer Schlagramme (s. Kapitel 6.6) musste der Innenbereich des Deckels frei bleiben.



Abbildung 6-18: Johstadt ZL 1000 vor Versuchsbeginn

Zur Realisierung einer möglichst hohen Durchflussmenge wurde ein abnehmbares Storz Übergangstück mit einem Durchmesser von 75 mm seitlich integriert. Die Erfassung des Innendrucks erfolgte, wie in Kapitel 6.3.1 beschrieben, mit einem durch eine Druckkupplung im Außenbereich angeschlossenen Drucksensor der Firma Festo. Abbildung 6-19 zeigt den Deckel nach der Fertigstellung und zu Versuchsbeginn.

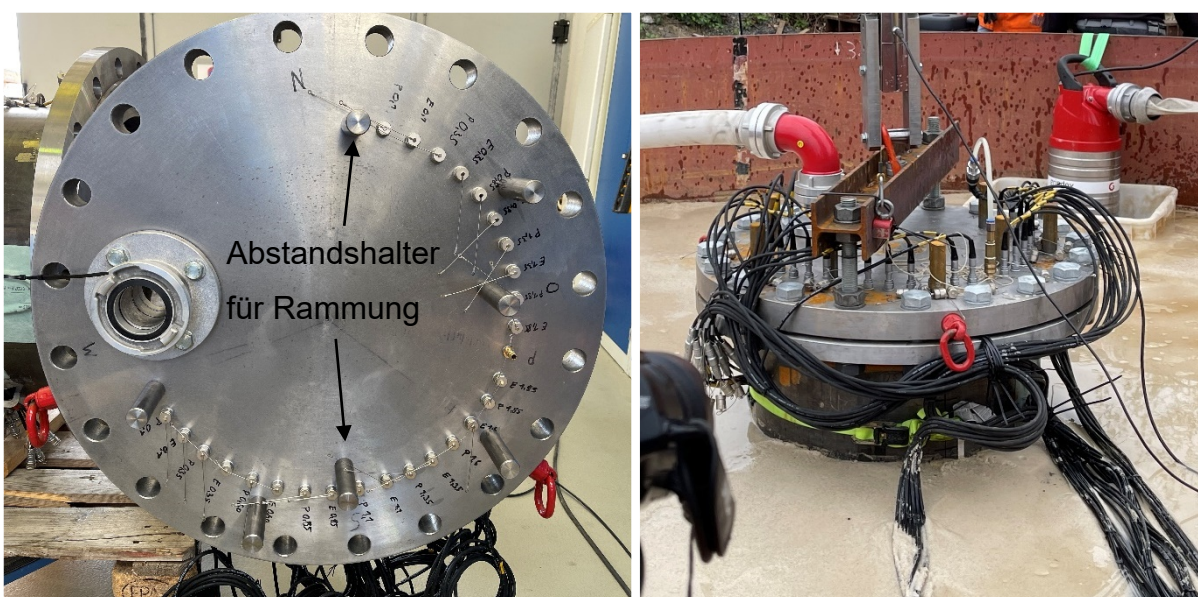


Abbildung 6-19: Ausstattung des Deckels im Labor (links) und bei der Durchführung eines Überdruckversuchs (rechts)

Für eine konstante Druckhöhe ohne Schwankungen des Vordrucks wurde ein federbelasteter Druckminderer verwendet. Neben dem Druckminderer wurde ein Durchflusszähler zur Erfassung der Durchflussmenge in die Versuchssteuerung integriert.

### 6.4 Versuchsprogramm

Wie in den Kapiteln 6.1 und 6.2 aufgezeigt, ist ein reproduzierbarer Versuchsablauf sehr anspruchsvoll. Um die Vergleichbarkeit und die Reproduzierbarkeit der Abläufe zu gewährleisten, wurden die zeitlichen Abstände bzw. Startpunkte der Arbeitsschritte vorab festgelegt und in allen Teilversuchen eingehalten. Ein vollständiger Versuchsablauf beinhaltete folgende Arbeitsschritte:

1. Lagenweiser Sandeinbau mit lagegenauer Bodensensorik
2. Fluten des Versuchstrogs von der Trogunterseite nach oben
3. Sondierung vor Pfahlinstallation
4. Pfahlinstallation
5. Versuchsdurchführung Extraktion
6. Sondierung nach Extraktion
7. Rückbau Versuchseinrichtung und Bodensensorik
8. Ggf. Reparaturen der Sensorik

Der durchschnittliche Versuchsablauf betrug drei Wochen. Dabei bildete ein fester zeitlicher Abstand von 24 Stunden zwischen dem Ende der Installation und dem Beginn der Extraktion den Fokus.

Zur Überprüfung der in Kapitel 4 aufgestellten Arbeitshypothesen wurde das Versuchsprogramm entsprechend strukturiert. Dazu wurde in der Versuchsreihe 1 der Eingangsdruck in unterschiedlichen Stufen aufgebracht. In jeder Druckstufe wurde der Eingangsdruck 5 Minuten konstant gehalten. Ziel war es, den Unterschied zwischen instationären und stationären Druckzuständen im Pfahlinneren festzustellen.

Für eine aus bauverfahrenstechnischer Sicht gebräuchlichere Methode der Druckerzeugung wurde in der Versuchsreihe 2 der Eingangsdruck linear gesteigert.

In der Versuchsreihe 3 wurde eine PVC Folie in das Innere der Druckkammer eingelegt und eine verringerte Durchströmung des Modellpfahls erzielt. Ziel war zum einen die Simulation einer Bodenschicht mit geringer Durchlässigkeit wie bspw. einer Tonschicht. Zum anderen wird bei einer verringerten Durchströmung eine geringere Wassermenge zur Druckerzeugung benötigt, was bei der Dimensionierung der Wasserpumpe von Vorteil ist.

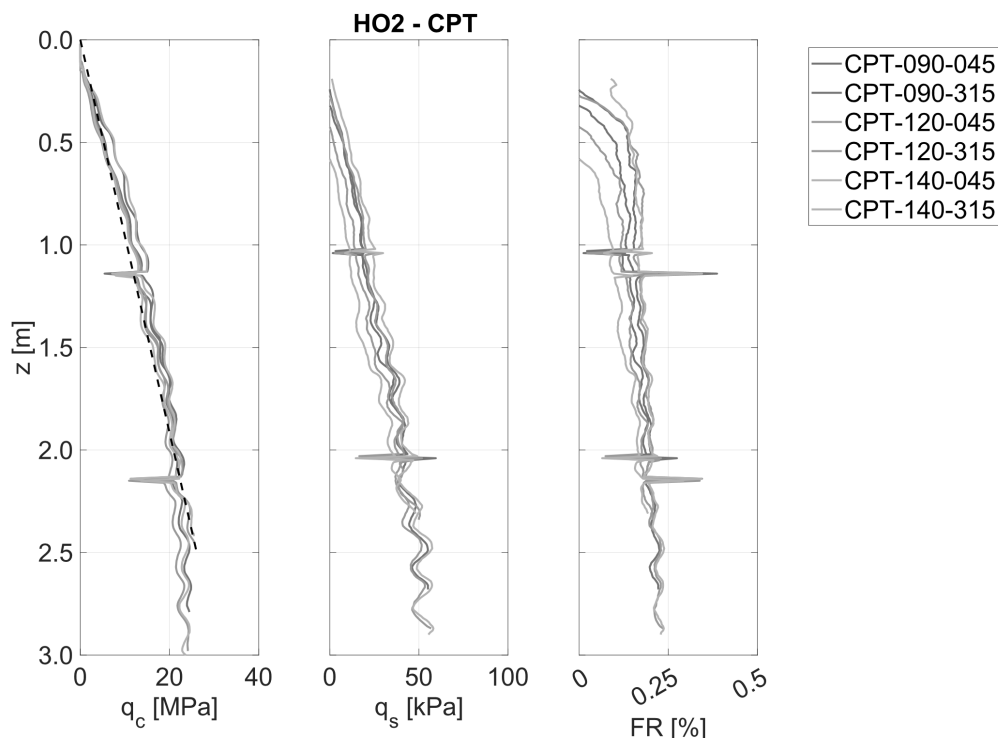
In Tabelle 6-4 sind die Modellversuche dargestellt. Zur Bestätigung der Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit untereinander wurde jeder Teilversuch mehrfach mit dem gleichen Ausgangszustand durchgeführt. Zur Bestimmung des Gesamtwiderstands wurden drei statische Zugprobelastungen (Static Tensile Test – STT) durchgeführt.

*Tabelle 6-4: Übersicht durchgeführter Modellversuche*

| Reihe | Versuch | $v_{\text{Druck}}$ [kN/m <sup>2</sup> /min] | Belastungsdauer   | Last-<br>steigerung | Bemerkung             |
|-------|---------|---------------------------------------------|-------------------|---------------------|-----------------------|
| 1     | HO1     | 800                                         | 5 min/Druckstufe  | stufenweise         | /                     |
|       | HO2     | 800                                         | 5 min/ Druckstufe | stufenweise         | /                     |
|       | HO3     | 800                                         | 5 min/ Druckstufe | stufenweise         | /                     |
| 2     | HO4     | 800                                         | 60 s              | Linear              | /                     |
|       | HO5     | 800                                         | 60 s              | Linear              | /                     |
|       | HO6     | 800                                         | 60 s              | Linear              | /                     |
| 3     | HO7     | ≈ 520                                       | 2 min             | Linear              | simulierte Abdichtung |
|       | HO8     | ≈ 520                                       | 2 min             | Linear              | simulierte Abdichtung |
| 4     | STT1    | /                                           | /                 | /                   | /                     |
|       | STT2    | /                                           | /                 | /                   | /                     |
|       | STT3    | /                                           | /                 | /                   | /                     |

## 6.5 Sondierung

Die Validierung des vergleichbaren Sandeinbaus erfolgte mit Drucksondierungen (Cone Penetration Test – CPT) an verschiedenen Positionen im Versuchstrog. Die Position erfolgte durch den radialen Abstand zum Zentrum des Trogs und den Winkel gegen die Nordrichtung (Nord = 0°). Es konnte ausschließlich in Bereichen ohne Bodensensorik sondiert werden. In Abbildung 6-20 sind die CPT-Ergebnisse des Teilversuchs HO2 exemplarisch dargestellt. Die Verläufe zeigen einen annähernd linearen Anstieg des Sondierwiderstands über die Tiefe. Die im Kurvenverlauf in den Tiefen von ca. 1,1 m und 2,1 m enthaltenen Peaks sind auf die Arbeiten zur Verlängerung des Sondiergestänges und nicht auf Inhomogenitäten im Boden zurückzuführen.



**Abbildung 6-20: Drucksondiererergebnisse in den jeweiligen Abständen zum Trogzentrum (erste Zahl) und Winkel zur Nordrichtung (zweite Zahl) – Teilversuch HO2**

In Abbildung 6-21 sind die gemittelten CPT-Ergebnisse aller Teilversuche zusammengeführt. Ersichtlich ist die hohe Übereinstimmung der Teilversuche. Ausreißer sind nicht zu identifizieren. Vergleichbare Ausgangszustände sind damit für alle Teilversuche gegeben.

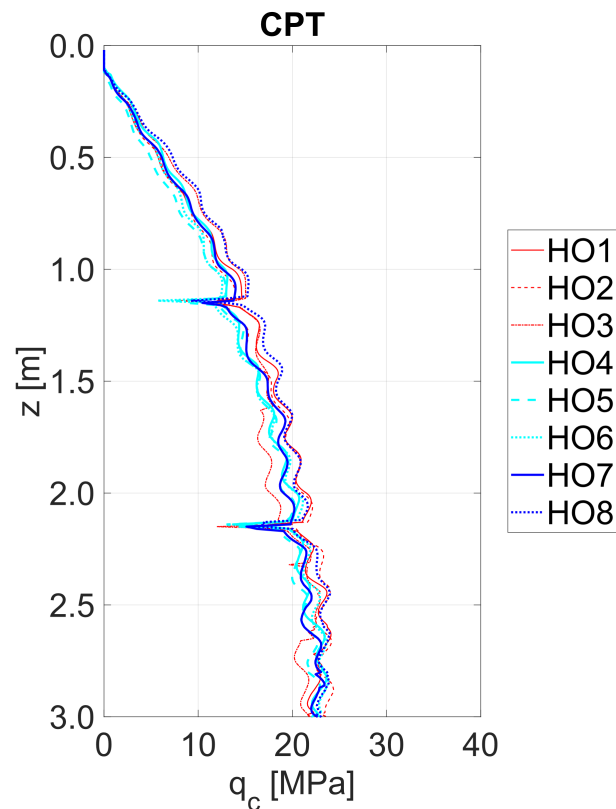


Abbildung 6-21: CPT-Ergebnisse aller untersuchten Teilversuche

## 6.6 Pfahlinstallation

Der Modellpfahl wurde in allen Teilversuchen mit einem Dieselhammer D2 des Herstellers Delmag installiert (s. Abbildung 6-22). Als Rammhaube wurde ein fest verschraubter Blindflansch verwendet (s. Abbildung 6-19), der auch als Verschlussdeckel für die Überdruckversuche genutzt wurde. Der Modellpfahl wurde durch eine Rammführung mit verstellbaren Führungsrollen geführt. Die technischen Parameter des Hammers sind in Tabelle 6-5 zusammengefasst.



Tabelle 6-5: Technische Parameter Delmag D2 [DELMAG, 2002]

| Parameter                     | Werte         |
|-------------------------------|---------------|
| Fallgewicht                   | 220 kg        |
| Gesamtgewicht                 | 360 kg        |
| Gesamthöhe                    | 205 cm        |
| Fallhöhe (stufenlos regelbar) | 60 - 130 cm   |
| Rammschläge                   | 60 - 70 / min |
| Explosionskraft               | 11.300 kg     |
| max. Energie pro Schlag       | 2,8 kNm       |



Abbildung 6-22: Installation Modellpfahl mit Delmag D2 (links mit Rammführung)

Sowohl über die rambbegleitende Messung als auch über eine Videodokumentation wurde die Schlagzahl im Installationsprozess erfasst. Die Schlagzahl  $N_{10}$  [-] stellt dabei die Anzahl an Schlägen pro 10 cm Penetration des Pfahls dar.

Die Schlagzahlen der in Abbildung 6-23 dargestellten Teilversuche zeigen eine gute Übereinstimmung. Die Abweichungen im Penetrationsbereich ab 2,40 m können auf

unterschiedliche Fallhöhen des Rammjärens zurückerföhrt werden. Grundsätzlich ist eine hohe Übereinstimmung in der Versuchsvorbereitung nachgewiesen.

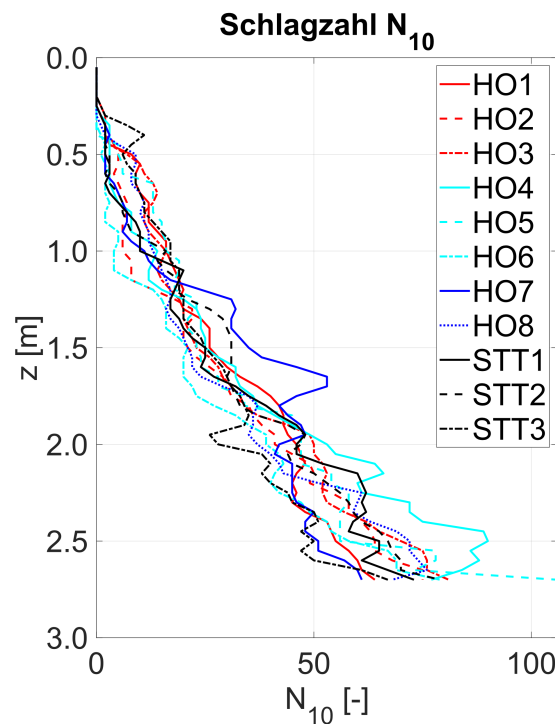


Abbildung 6-23: Schlagzahl  $N_{10}$  über die Eindringung des Pfahls

Eine rambbegleitende Messung der Bodensäule im Pfahlinneren war durch die Vielzahl an Steckern der Sensoren im Pfahlinneren nicht möglich. Wie in Kapitel 3.2.2 beschrieben, kann der IFR am Ende einer Pfahlinstallation Aussagen über den Verspannungsgrad des Bodens im Pfahlinneren liefern.

Nach Beendigung der Pfahlinstallation wurde der Blindflansch geöffnet und am Kran hängend neben dem Pfahl positioniert. Abbildung 6-24 zeigt den geöffneten Pfahl. Die Ergebnisse einer Messung der Bodensäule ist der Zeichnung in Abbildung 6-25 zu entnehmen. In den Bereichen der Pfahlwandung wurde sowohl innen als auch außen eine Setzung des Bodens zwischen 2,5 cm und 5,0 cm festgestellt. Im Mittelpunkt wurde eine Hebung um 4,0 cm bis 5,0 cm zur Ausgangslage der GOK diagnostiziert. Damit liegt der IFR nach Gleichung 3-21 bei  $\gamma = 100\%$  und eine Vollverspannung des Bodens, definiert als Phase 3 nach KLOS & TEJCHMAN [1981], kann ausgeschlossen werden.





Abbildung 6-24: Hebung des Bodens im Pfahlinneren nach Pfahlinstallation

Die Ausbildung der Bodenhebung in der Pfahlmitte kann durch Auflockerungsprozesse während der Installation hervorgerufen werden. Auch ein ausgeprägter konvexer Spannungsverlauf der Phase 1 nach KLOS & TEJCHMAN [1981] lässt auf eine Hebung schließen, da die Spannungskonzentration im Scherbereich höher als in der Pfahlmitte ist. Die Setzungen direkt an der Pfahlwandung sind sowohl an der Außen- als auch an der Innenseite im Mittel vergleichbar, sodass von gleichen Spannungszuständen im Scherbereich ausgegangen werden kann.

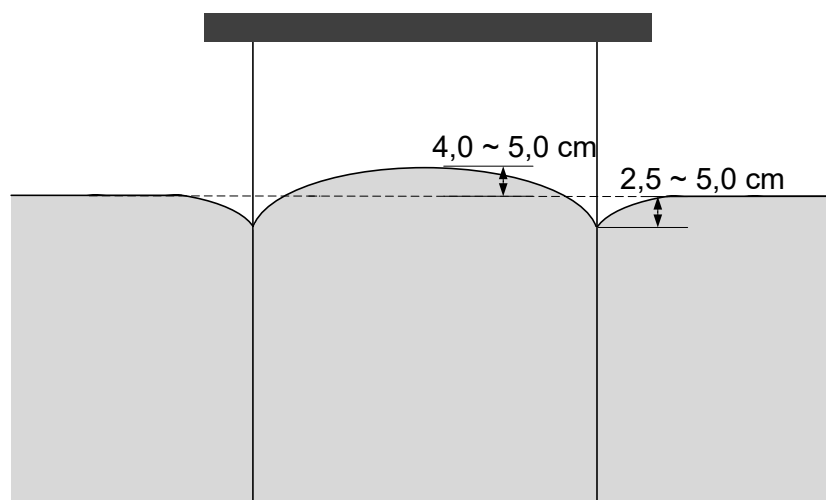


Abbildung 6-25: Schnitt durch den Pfahlkopf nach Installation

## 6.7 Axiale Pfahltragfähigkeit

Um die untersuchten Rückbauverfahren zur Widerstandsreduktion zu bewerten, wurde der Gesamtwiderstand des Modellpfahls in drei statischen Probelastungen auf Zug ermittelt. Die Versuchsvorbereitung (s. Kapitel 6.4) wurde dabei identisch zu den Überdruckversuchen gehalten.



*Abbildung 6-26: Versuchsaufbau statische Probelastung auf Zug*

Die Lastabtragung erfolgte über ein in den Versuchsstand integriertes Stützkreuz. Bedingt durch den Versuchsaufbau sowie die Konzeption des Modellpfahls wurde die Lastaufbringung auf der Oberseite des Stützkreuzes angeordnet und über Gewindestangen zum Modellpfahl transferiert (s. Abbildung 6-26). Die Durchführung der statischen Probelastungen erfolgte in Anlehnung an die Vorgaben der EA-PFÄHLE [2012] mit der Besonderheit, dass nach dem Erreichen des maximalen Widerstands die Belastungsgeschwindigkeit stark erhöht wurde. Durch die starke Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit sollte der mögliche Einfluss eines erhöhten dilatanten Verhaltens während der Extraktion eruiert werden.

Die Belastung während der Versuche wurde mit einer Kraftmessdose C2 des Herstellers HBM erfasst. Die Pfahlkopfverschiebung wurde mit drei symmetrisch im äußeren Bereich des Pfahlkopfs positionierten Wegsensoren gemessen.

### 6.7.1 Durchführung der statischen Probelastungen

Um den kraftschlüssigen Kontakt sowie die lotrechte Ausrichtung des Hydraulikzylinders sicherzustellen, wurde eine Vorlast von 5 kN aufgebracht. Wie von der EA-PFÄHLE [2012] für eine statische Probelastung gefordert, wurde die Belastung in zwei Zyklen aufgebracht.

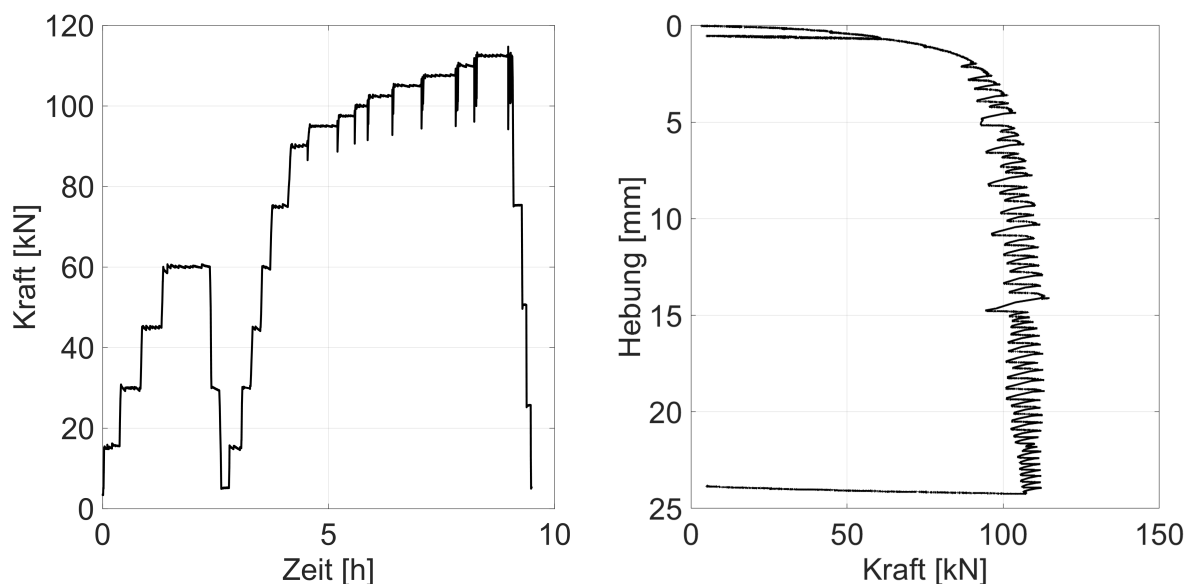


Abbildung 6-27: Belastungsstufen (links) und WSL der statischen Probelastungen (rechts)

Die Belastung im ersten Lastzyklus ist so zu wählen, dass ca. 50 % der prognostizierten Grenztragfähigkeit erreicht werden. Die Belastungsstufen und die Widerstands-Setzungs-Linie (WSL) sind exemplarisch für den Teilversuch STT2 in Abbildung 6-27 dargestellt.

Als Abbruchkriterium wurde eine plastische Hebung von 10 % des Pfahlaufenddurchmessers verwendet. Das Kriechmaß wurde in den jeweiligen Belastungsstufen beachtet, stellte allerdings kein Abbruchkriterium dar, weil die Zielsetzung die Ermittlung des Widerstands gegen das Herausziehen war.

### 6.7.2 Auswertung der statischen Probelbelastungen

Die WSL in Abbildung 6-28 zeigen die Ergebnisse der drei statischen Probelbelastungen. Obwohl die Probelbelastungen auf Zug durchgeführt wurden, unterscheiden die EA-PFÄHLE [2012] nicht zwischen Setzungen und Hebungen bei der Bezeichnung der Belastungsergebnisse.

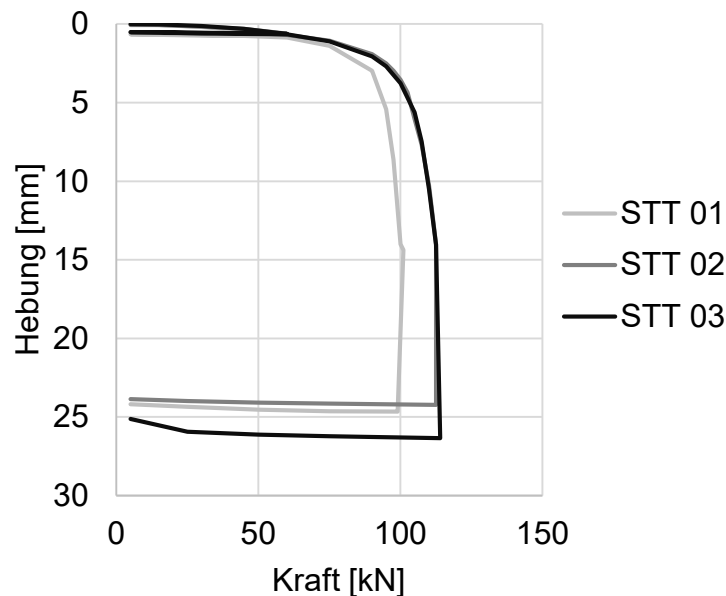


Abbildung 6-28: Gegenüberstellung der statischen Probelbelastungen

Im ersten Belastungszyklus wurde bei allen Versuchen bei der Last von ca. 60 kN eine Verformung von unter 1,0 mm festgestellt. Im zweiten Belastungszyklus wurde die Grenztragfähigkeit vor dem Erreichen des Abbruchkriteriums von  $0,1 \cdot D_a$  erreicht. Trotz weiterer plastischer Hebung des Pfahls wurde keine Laststeigerung erfasst. Die Erhöhung der Belastungsgeschwindigkeit bewirkte lediglich eine Steigerung der maximalen Belastung von unter 2 %.

Die Verläufe der Versuche STT2 und STT3 zeigen im zweiten Belastungszyklus eine hohe Übereinstimmung. Somit kann von einem maximalen Widerstand gegen das Herausziehen (Pullout Resistance POR) von ca.  $POR = 112 \text{ kN}$  ausgegangen werden.

Die Maximalbelastung des Versuchs STT1 liegt mit 100 kN geringfügig unter den Versuchen STT2 und STT3. Die Abweichung von ca. 10 % befindet sich in einem vertretbaren Rahmen. Für die Beurteilung der Überdruck-Versuche wird der ungünstigste Fall betrachtet, sodass die Ergebnisse der Versuche STT2 und STT3 als Vergleichsgröße herangezogen werden.

## 7 Auswertung und Interpretation der Messergebnisse

### 7.1 Grundlegendes zur Ergebnisdarstellung

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der in Kapitel 6.4 beschriebenen Modellversuche vorgestellt und diskutiert. Die durchgeführten Extraktionsversuche, die in Tabelle 6-4 abgebildet sind, können grundlegend in drei Versuchsreihen unterschieden werden:

1. Stufenweise Drucksteigerung
2. Kontinuierliche Drucksteigerung
3. Kontinuierliche Drucksteigerung mit verringerter Durchströmung

Die im Folgenden dargestellten Versuchsergebnisse werden analog zu den einzelnen Versuchsreihen abgebildet. Die Versuchsvorbereitung war bis zum Zeitpunkt der Erstbelastung bzw. Befüllung des Modellpfahls mit Wasser zur Druckerzeugung identisch, sodass in Bezug auf die initiale Pfahltragfähigkeit von identischen Verhältnissen ausgegangen werden kann.

### 7.2 Versuchsreihe 1 – Stufenweise Drucksteigerung

#### 7.2.1 Versuchsparameter der Versuchsreihe 1

Die Abläufe und Eingangsparameter der Teilversuche in der Versuchsreihe 1 waren identisch. Bei Teilversuch HO2 bestand eine sehr hohe Messqualität, sodass die Auswertung anhand dieses Teilversuchs detailliert präsentiert wird. Die gesamten Versuchsergebnisse der Versuchsreihe 1 sind den Anhängen D1 bis D3 zu entnehmen.

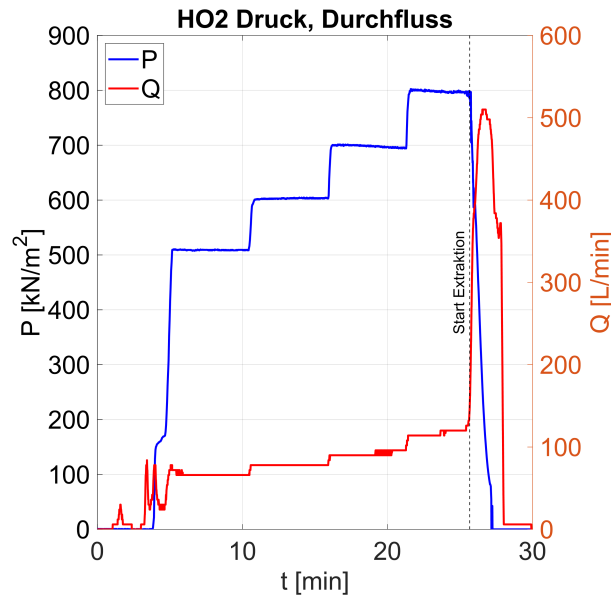


Abbildung 7-1: Eingeleiteter Druck  $P$  mit dem Durchfluss  $Q$  – Teilversuch HO2

Die Drucksteigerung der Versuchsreihe 1 erfolgte stufenweise in  $100 \text{ kN/m}^2$  Schritten mit einer Dauer von jeweils 5 Minuten pro Druckstufe. Abbildung 7-1 zeigt den eingeleiteten Druck  $P$  im Pfahlkopf mit dem dazugehörigen Durchfluss  $Q$ .

### 7.2.2 Spannungsmessungen am Pfahl der Versuchsreihe 1

In Abbildung 7-2 sind die am Pfahl gemessenen Porenwasserdrücke zusammen mit dem Eingangsdruck und der Pfahlpenetration dargestellt. Die Bezeichnungen in der Legende bspw. *PWD 240-030-180* beschreiben die *Tiefenlage unter GOK – Abstand vom Pfahlmittelpunkt – Winkel bezogen zur Nordrichtung*. Diese Bezeichnungen wurden für alle Spannungssensoren sowohl am Pfahl als auch im Boden gewählt und erlauben damit eine zweifelsfreie Zuordnung und konsistente Lagebezeichnung aller Sensoren. Die farbliche Schattierung der abgebildeten Sensoren orientiert sich von hell (oberster Sensor) – zu dunkel (unterster Sensor). Zusätzlich ist der Eingangsdruck in der Druckkammer  $P$  und die Einbindetiefe  $U$  des Pfahls abgebildet.

Die nahe des Pfahlfußes applizierten PWD 266-030-180 und PWD 266-030-000 mussten in Versuchsreihe 1 als defekt identifiziert werden und konnten nicht ersetzt werden. Die Bestimmung der effektiven Spannung ist damit für die Sensoren EDh 258-030-180 und EDh 258-030-000 nicht möglich.



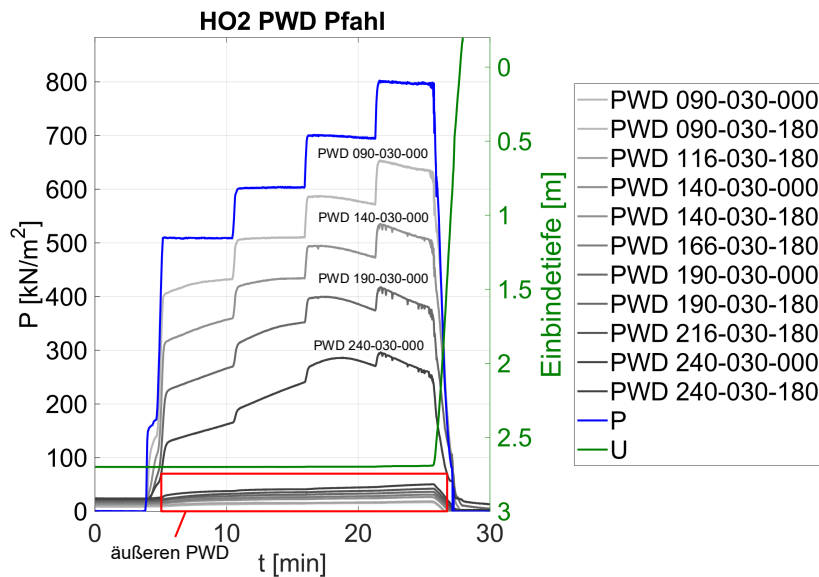


Abbildung 7-2: Gemessene PWD am Pfahl – Teilversuch HO2

Wie Abbildung 7-2 entnommen werden kann, nimmt der eingeleitete Wasserdruck über die Tiefe hinweg ab. Im Pfahlinneren sind die höchsten Porenwasserdrücke erfasst worden. Die Querschnittserweiterung unterhalb des Pfahlfußes führt zu geringeren Porenwasserdrücken im äußeren Pfahlbereich.

Die Drücke im Pfahlinneren sinken zeitgleich mit dem Einsetzen der Hebung des Pfahls, bis die Drücke bei vollständiger Extraktion auf null fallen. Mit dem Beginn der Extraktion des Pfahls wird eine Vergrößerung der Strömungskanäle erwartet. Zudem erfolgt eine Lageänderung der am Pfahl befindlichen Sensoren. Aus versuchstechnischen Gründen können die Vorgänge ab dem Zeitpunkt der beginnenden Extraktion nicht hinreichend beobachtet werden. Es wird davon ausgegangen, dass mit dem Einsetzen der Extraktion die maximalen Widerstände überwunden wurden.

Der Einleitungsdruck und die Durchflussmenge in Abbildung 7-1 lassen in den ersten beiden Druckstufen eine stationäre Strömung im Pfahlinneren erwarten. Der zeitliche Anstieg und Abfall der Porenwasserdrücke in Abbildung 7-2 zeigt hingegen in allen Druckstufen einen instationären Zustand der Sickerströmung. Abbildung 7-3 visualisiert den Verlauf der in einer stationären Modellierung zu erwartenden Porenwasserdruck im Pfahlinneren. Die Hypothese, dass im Rahmen der Versuchsdurchführung stationäre Strömungsverhältnisse vorherrschen, kann durch die Messergebnisse der Porenwasserdrücke im Pfahlinneren nicht bestätigt werden.

Der Verlauf der modellierten Porenwasserdrücke zeigt im Gegensatz zu den Messergebnissen in den jeweiligen Belastungsstufen einen konstanten Verlauf. So konnten in der stationären Strömungsmodellierung keine zeitabhängigen bodenmechanischen Einflüsse implementiert werden.

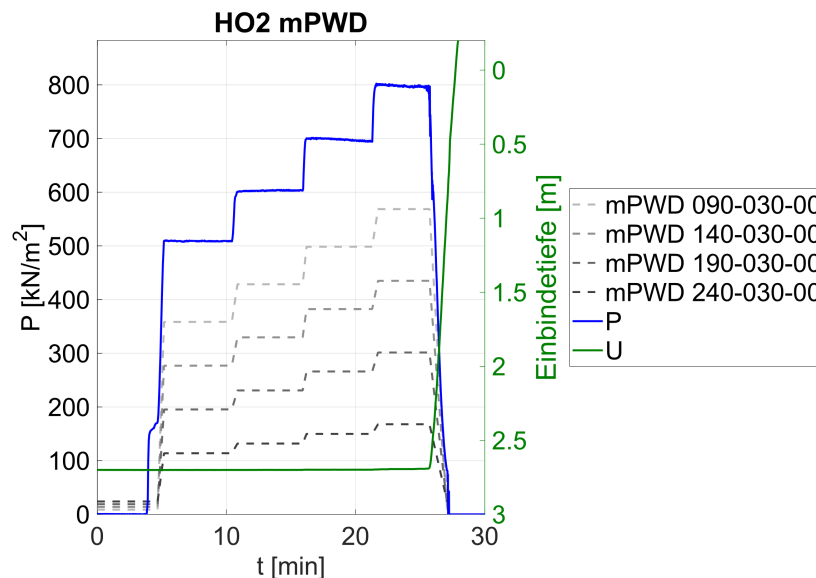


Abbildung 7-3: modellierte Porenwasserdrücke an der Pfahlinnenseite – Teilversuch HO2

Der Spannungsanstieg der EDh im Pfahlinnenen ist wie auch bei den PWD größer als im äußeren Pfahlbereich (s. Abbildung 7-4). Die Differenz ist hier jedoch geringer.

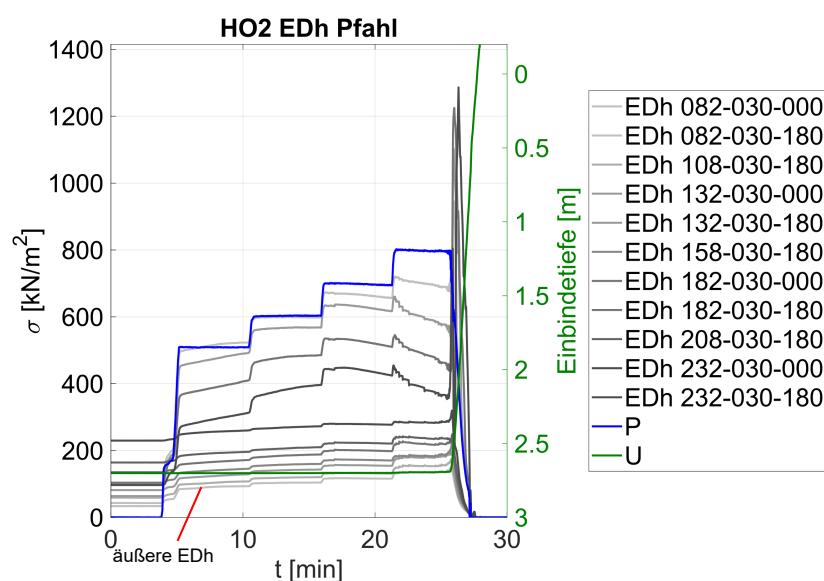


Abbildung 7-4: Gemessene EDh am Pfahl – Teilversuch HO2



Für eine übersichtlichere Darstellung sind in Abbildung 7-5 und Abbildung 7-6 die PWD- und EDh-Verläufe auf der Pfahlinnenseite separat abgebildet.

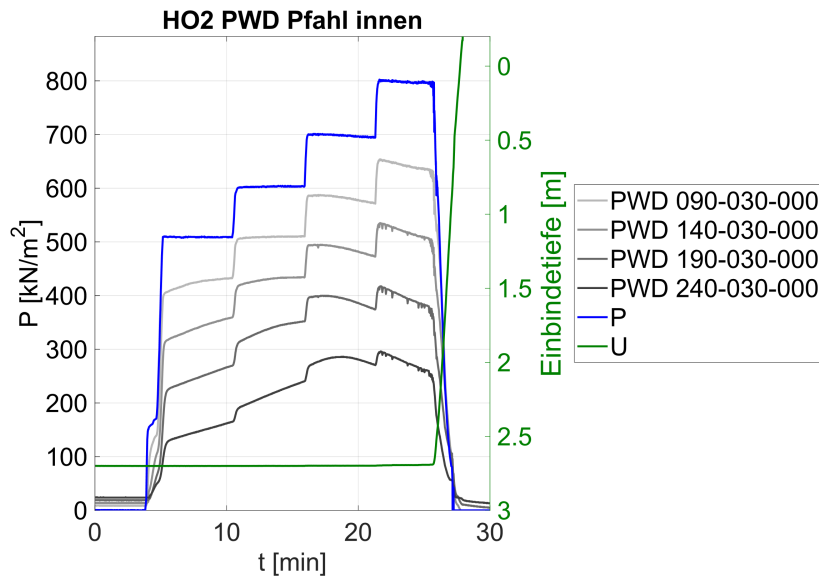


Abbildung 7-5: PWD an der Pfahlinnenseite – Teilversuch HO2

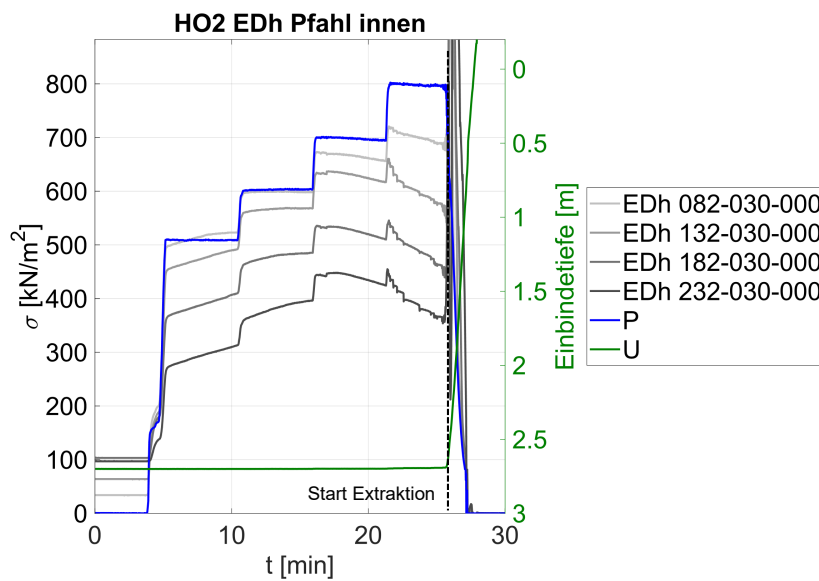


Abbildung 7-6: EDh an der Pfahlinnenseite – Teilversuch HO2

Anhand der PWD- und EDh-Verläufe in Abbildung 7-5 und Abbildung 7-6 lassen sich unterschiedliche physikalische Prozesse infolge der Druckbelastung identifizieren. Wie bereits in den in Kapitel 4 aufgestellten Arbeitshypothesen vermutet, ist im Rahmen der Druckbelastung in der Versuchsreihe 1 mit einer Spannungsänderung im Kontaktbereich Pfahl-Boden zu rechnen.

Der Spannungsanstieg in den Druckstufen  $500 \text{ kN/m}^2$  und  $600 \text{ kN/m}^2$  kann auf die zusätzliche Belastung im Korngerüst infolge Sickerströmung zurückgeführt werden. Zeitgleich kommt es mit der Druckaufbringung zu einer Druckbelastung auf die Pfahlinnenwand, welche die erhöhte Horizontalspannung überlagert. In den ersten beiden Druckstufen ist jedoch die Spannungszunahme infolge Sickerströmung dominierend.

Zwischen den Druckstufen  $600 \text{ kN/m}^2$  und  $700 \text{ kN/m}^2$  ist eine Art Wendepunkt im Spannungsverlauf der PWD- und EDh-Verläufe erkennbar (vgl. Abbildung 7-5 und Abbildung 7-6). In den Druckstufen  $700 \text{ kN/m}^2$  und  $800 \text{ kN/m}^2$  wird der Einfluss der Belastung auf die Pfahlinnenwand infolge weiterer Steigerung des Porenwasserdrucks dominierend. Die hier auftretende Aufweitung des Pfahlquerschnitts resultiert in einer Abnahme der horizontalen Totalspannung auf der Pfahlinnenseite (s. Abbildung 7-6). Gefestigt wird die Hypothese durch die Zunahme der horizontalen Totalspannung auf der Pfahlausenseite (s. Abbildung 7-7). Infolge der auf der Pfahlausenseite nach oben gerichteten Sickerströmung sollten die horizontalen Totalspannungen sinken. Wie in Abbildung 7-7 ersichtlich ist, steigt die Totalspannung in allen Messebenen und zeigt damit einen dominierenden Einfluss der lateralen Dehnung des Pfahls gegenüber dem Einfluss der nach oben gerichteten Sickerströmung auf der Pfahlausenseite. Die ebenfalls in Verbindung mit der lateralen Dehnung des Pfahls stehende Veränderung des Bodengefüges durch eine hydrodynamische Kornumlagerung kann durch das Abfallen der Porenwasserdrücke im Pfahlinneren erkannt werden.

In den PWD-Verläufen auf der Pfahlausenseite kann kein Abfall der Porenwasserdrücke identifiziert werden.

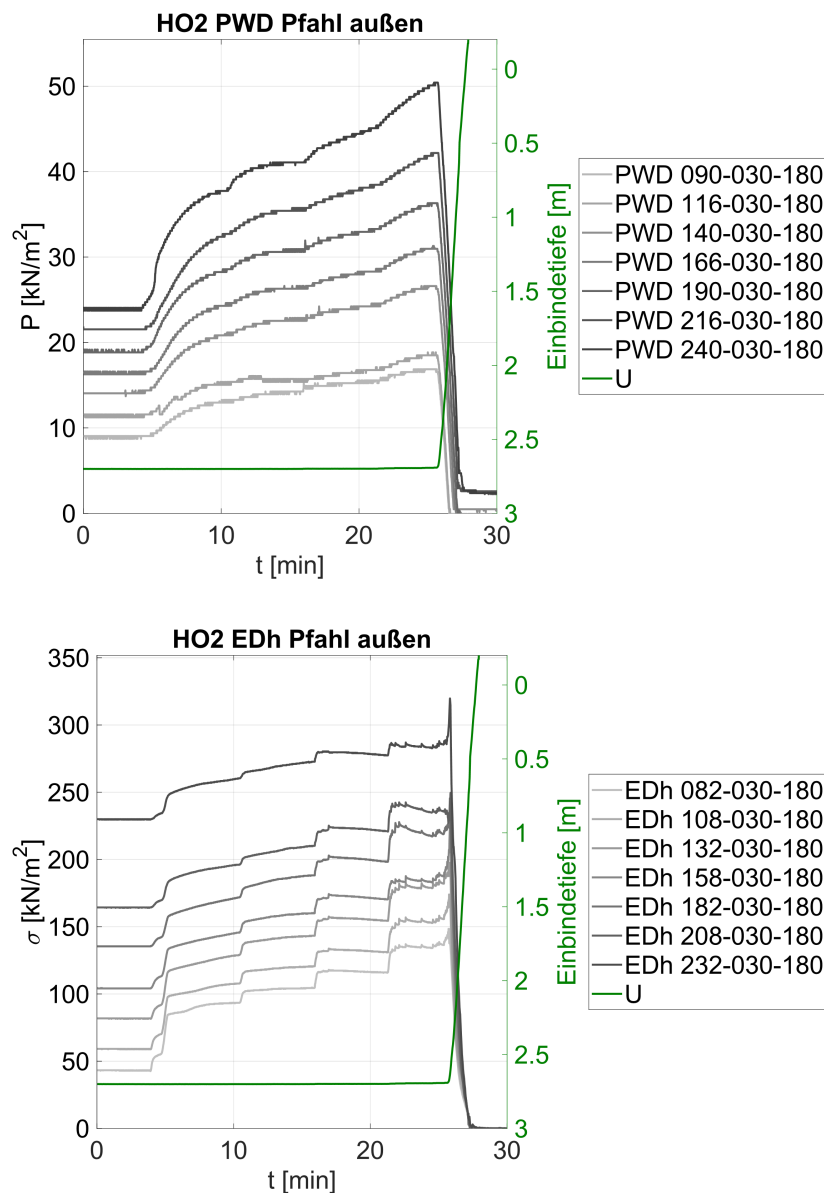


Abbildung 7-7: PWD und EDh an der Pfahlausenseite – Teilversuch HO2

Im Gegensatz zu den PWD-Verläufen in Abbildung 7-5 fällt die Spannung der EDh in Abbildung 7-6 bei Beginn der Extraktion (gestrichelte Linie) nicht sofort ab. Mit Beginn der Extraktion verändert sich die Lage der Sensoren, sodass für die Beurteilung der Vorgänge eine weitere Dimension einbezogen werden muss. Auf einen Versuch der Interpretation wird aufgrund der ungewissen Eingangsparameter verzichtet. Zudem endet der für die Auswertung relevante Bereich mit dem Beginn der Extraktion des Modellpfahls.

### 7.2.3 Spannungsmessungen im Boden der Versuchsreihe 1

Die Messung der Spannungen im anstehenden Boden zeigt die Veränderung des Spannungszustands infolge der Extraktion. Die Sensoren im Boden sind 40 cm und 90 cm vom Pfahlmittelpunkt entfernt. Der Abstand zur Pfahlwand beträgt damit 10 cm und 60 cm.

Das am Pfahlkopf eingeleitete Wasser zur Druckerzeugung durchfließt den unten offenen Pfahl. Der messbare Porenwasserdruck auf der Pfahlausenseite ist daher teilweise deutlich geringer als der Porenwasserdruck im Pfahlinnenen (s. Abbildung 7-8), denn der in der Druckkammer eingeleitete Druck wird im Übergang vom Pfahldurchmesser zum Durchmesser des Versuchstrogs auf eine größere Fläche verteilt.

Die Verläufe der gemessenen Porenwasserdrücke im Boden (s. Abbildung 7-8) zeigen eine hohe Ähnlichkeit mit den Porenwasserdrücken an der Pfahlausenseite (s. Abbildung 7-7).

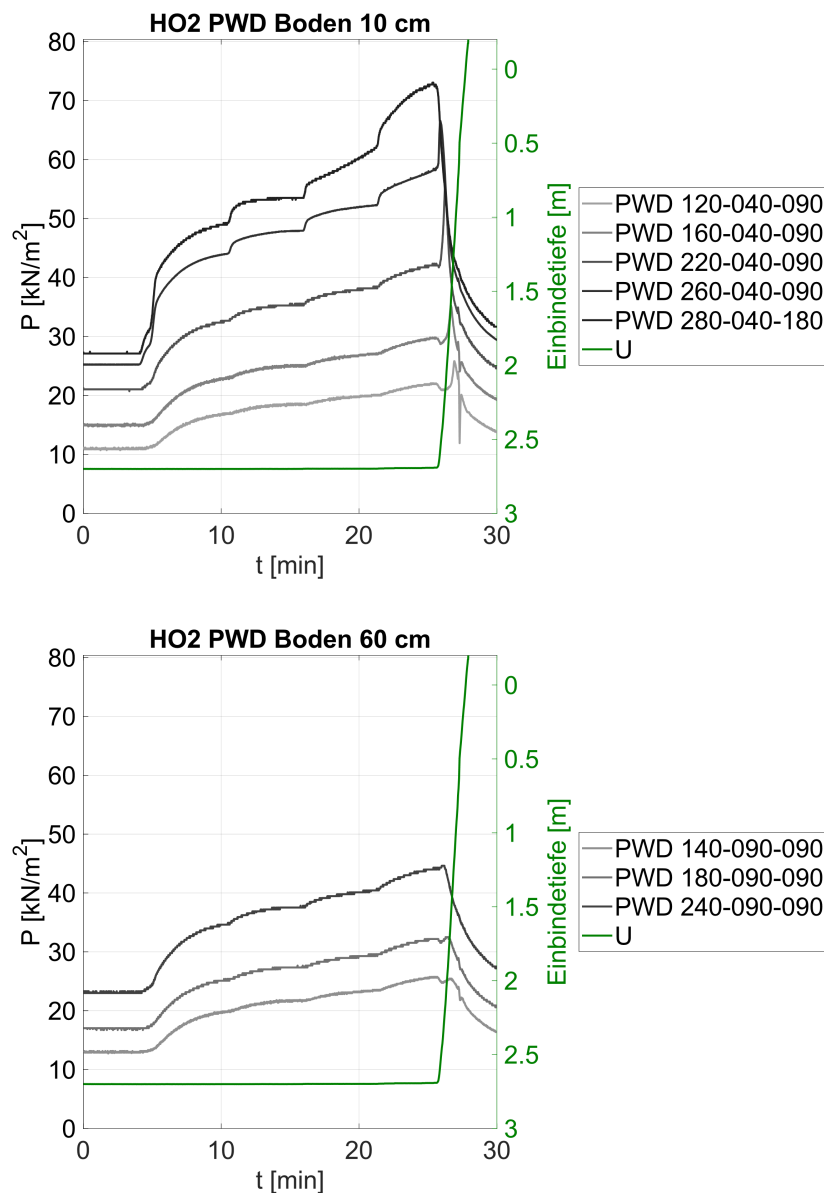


Abbildung 7-8: PWD im Boden mit Abstand 10 cm (oben) und 60 cm (unten) zum Pfahl – Teilversuch HO2

Der Einfluss und die Größenordnung der Porenwasserdrücke im Boden wurden in Vorversuchen als gering eingeordnet, sodass nicht an jeder Lokation eines EDh im Boden ebenfalls ein PWD angeordnet wurde. Vorversuche haben gezeigt, dass die Porenwasserdruckentwicklung während der Versuchsdurchführung an der Pfahlwand und in einem Abstand von 10 cm nahezu identisch ist (s. Abbildung 7-9). Somit können für die Betrachtung der Effektivspannung im Nahbereich des Pfahls die am Pfahlmantel gemessenen Porenwasserdrücke genutzt werden.

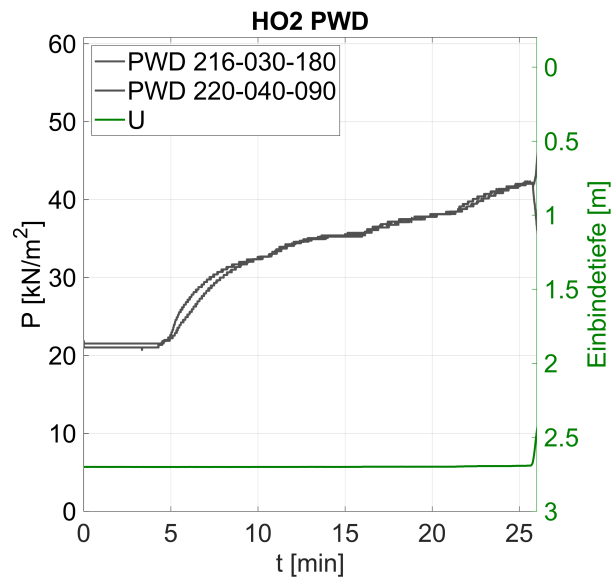


Abbildung 7-9: Vergleich PWD im Boden in 220 cm und PWD an der Pfahlaußenwand in 216 cm Tiefe – Teilversuch HO2

Für die Betrachtung der gemessenen Totalspannung werden zunächst die Sensoren mit einem Abstand von 10 cm zur Pfahlaußenwand respektive 60 cm zum Pfahlmittelpunkt in Abbildung 7-10 und Abbildung 7-11 dargestellt.

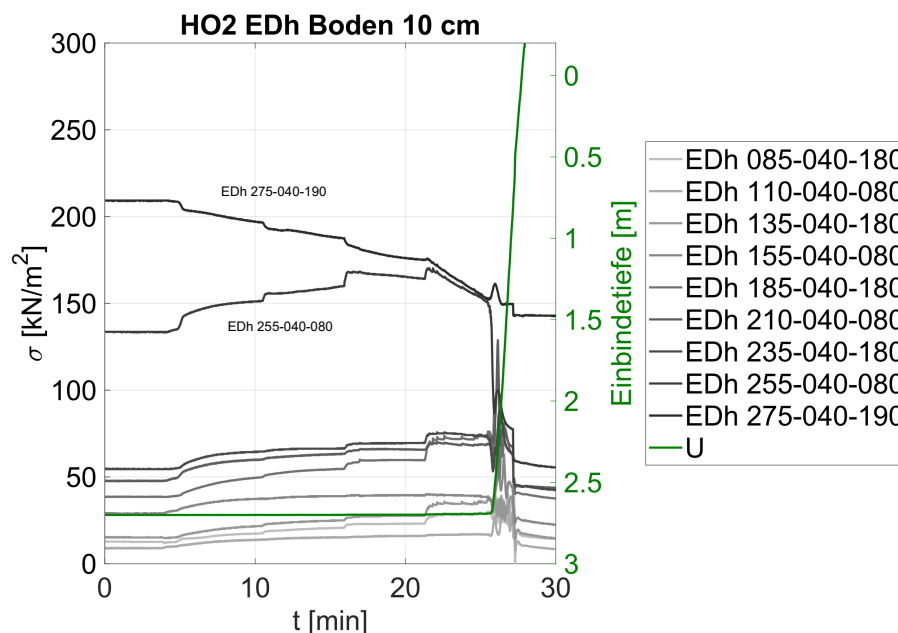


Abbildung 7-10: EDh im Boden mit Abstand 10 cm zum Pfahl – Teilversuch HO2

Die erhöhte Initialspannung der Sensoren EDhb 255 und EDhb 275 ist nach FISCHER [2021] auf eine erhöhte Bodenspannung infolge des Installationsvorgangs

zurückzuführen. Der Sensor EDhb 275 in 275 cm Tiefe liegt ca. 5 cm unterhalb des Pfahlfußes und zeigt einen entgegengesetzten Verlauf der Totalspannung am Modellpfahl. Der Einfluss aus lateraler Dehnung infolge Druckbelastung kann hier durch die Lage unterhalb des Pfahlfußes ausgeschlossen werden. Die Spannungsabnahme ist auf die nach oben gerichtete Sickerströmung zurückzuführen. EDhb 255 zeigt hingegen eine hohe Gemeinsamkeit mit den Sensoren an der Pfahlaußenseite.

Die Drucksteigerung während der Versuchsdurchführung ist auch in den EDh mit einem Abstand von 60 cm zum Modellpfahl erkennbar. Bei Beginn der Extraktion ist unmittelbar nach der Hebung des Modellpfahls ein Anstieg der lokalen Totalspannung ersichtlich.

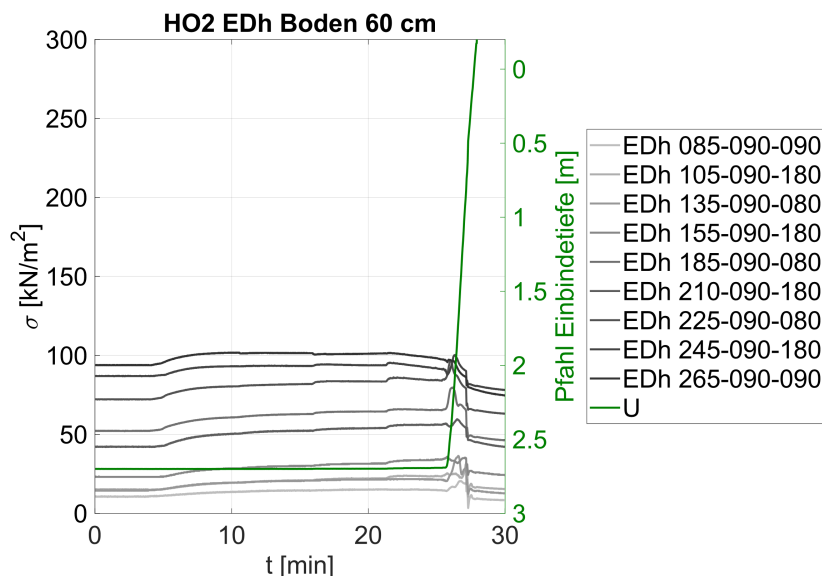


Abbildung 7-11: EDh im Boden mit Abstand 60 cm zum Pfahl – Teilversuch HO2

### 7.2.4 Effektivspannung der Versuchsreihe 1

Der Abstand zwischen den Mittelpunkten eines PWD- und EDh-Sensorpaars beträgt 8,0 cm. Der Abstand zwischen den Rändern der jeweiligen Sensoren beträgt hingegen nur 2,5 cm. Für die Berechnung der Effektivspannung im Boden wird der geringe Abstand zwischen PWD und EDh nicht einbezogen, sodass die Messergebnisse direkt miteinander verrechnet werden.

Für eine detaillierte Betrachtung und einen Vergleich der Effektivspannung in unterschiedlichen Tiefenebenen wird in Abbildung 7-12 eine konstante, für den zeitlichen Bereich der Druckerzeugung relative Skalierung gewählt und somit der Spannungsanstieg zum Ende des Versuchs ausgeblendet.

In Abbildung 7-12 sind in Grün die Effektivspannungen am Pfahl und in Magenta die Effektivspannungen in 10 cm entfernt zur Außenwand dargestellt.

Die Effektivspannung vor Versuchsbeginn stellt die Initialspannung nach Pfahlinstallation dar. Wie bereits u.a. FISCHER [2021] festgestellt hat, ist im Rahmen der Pfahlinstallation mittels Schlagrammung mit einer signifikanten Spannungserhöhung im Bereich des Pfahlfußes zu rechnen. Oberhalb des Pfahlfußes fällt die Spannung am Pfahlmantel auf eine Residualspannung zurück.

Anhand von Abbildung 7-12 kann zudem ein unterschiedlicher Initialspannungszustand an der Pfahlausen- und der Pfahlinnenseite festgestellt werden. Die Spannung auf der Außenseite ist in allen Sensorebenen höher. Dieser Zustand konnte in allen Versuchsreihen diagnostiziert werden. In Kapitel 6.6 wurde die Hebung des Bodens im Pfahlinneren im Rahmen einer punktuellen Untersuchung des inkrementellen Füllungsgrads (Incremental Filling Ratio) IFR dokumentiert. Somit wird zumindest im oberflächennahen Bereich von einer reduzierten Lagerungsdichte bzw. Auflockerung ausgegangen.

Die Effektivspannung auf der Innenseite (EDhi eff 82) in der Tiefe von 82 cm zeigt in der Druckstufe  $500 \text{ kN/m}^2$  eine fallende Tendenz. In der Druckstufe  $700 \text{ kN/m}^2$  verringert sich der Abfall und ein nahezu konstantes Spannungsniveau wird erreicht. In der Druckstufe  $800 \text{ kN/m}^2$  ist bereits nach dem Erreichen der maximalen Belastung eine deutliche Reduktion der Effektivspannung ersichtlich.

EDha eff zeigt hingegen bis zur Extraktion des Modellpfahls ein überwiegend konstantes Spannungsniveau, wobei nach jeder Druckstufenänderung ein klarer Sprung zu erkennen ist. In einer Tiefe von 82 cm (EDhb eff 82) sind im Boden mit einem Abstand von 10 cm vom Pfahl kaum effektive Spannungen festzustellen.

In den Tiefenebenen EDhi eff 132, EDhi eff 182 und EDhi eff 232 ist zu Beginn jeder Druckstufe ein Peak im Spannungsverlauf mit sofortigem Abfall ersichtlich.

Wie auch in der Betrachtung der PWD- und EDh-Verläufe in Kapitel 7.2.2 können die Ereignisse im Effektivspannungsverlauf unterschiedlichen physikalischen Prozessen



zugeordnet werden. Die Erhöhung der Horizontalspannung infolge Sickerströmungsbelastung kann durch die Spannungszunahme bei Veränderung der Druckbelastung beschrieben werden. Während eines konstanten Drucks in den Druckstufen zeigen die Effektivspannungsverläufe auf der Pfahlinnen- und Pfahlaußenseite eine gegenläufige Tendenz, was für eine Dehnung und damit Aufweitung des Pfahlquerschnitts spricht.

Es kann davon ausgegangen werden, dass eine hydrodynamische Bodendeformation mit Kornumlagerung bereits ab der ersten Druckstufe einsetzt. Deutlich sichtbar werden die Umlagerungsprozesse in der dritten Druckstufe bei  $700 \text{ kN/m}^2$ , hier nimmt der Durchfluss zu und die gegenläufige Tendenz zwischen Innen- und Außenseite verändert sich.

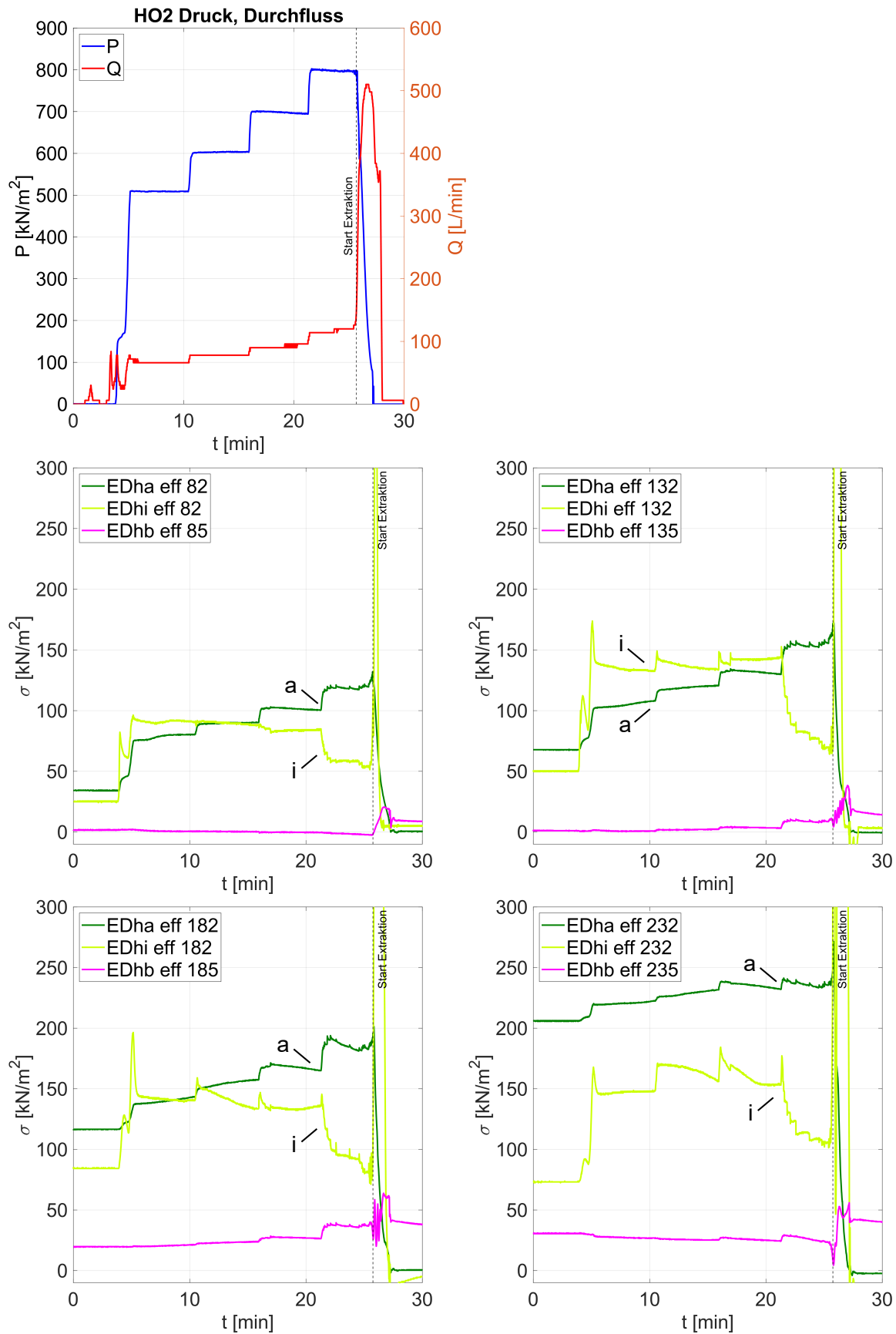


Abbildung 7-12: Versuchssparameter P und Q, Effektivspannung an der Pfahlaußen- (EDha eff) und Pfahlinnenseite (EDhi eff) sowie im Boden (EDhb eff) 10 cm zum Pfahl – Teilversuch HO2

In den Tiefenebenen EDhi eff 132 und EDhi eff 182 zeigen die Verläufe wie auch in der Tiefenebene EDhi eff 82 in den Druckstufen 500 kN/m<sup>2</sup> und 600 kN/m<sup>2</sup> eine abnehmende Tendenz. Der Abfall in der Effektivspannung scheint in der Stufe 700 kN/m<sup>2</sup> zu stagnieren, bis lokal ein geringer Anstieg zu erkennen ist. In der Stufe 800 kN/m<sup>2</sup> kommt es in allen Tiefenebenen zu einer sofortigen Reduktion der Effektivspannung, was einem Bodenversagen gleichkommt.

Die Verläufe von EDha eff in den Tiefenebenen EDha eff 132, EDha eff 182 und EDha eff 232 zeigen in den Druckstufen 500 kN/m<sup>2</sup> und 600 kN/m<sup>2</sup> einen Anstieg, bevor in den Stufen 700 kN/m<sup>2</sup> und 800 kN/m<sup>2</sup> ein leichter Abfall beobachtet werden kann. Der in den Totalspannungsverläufen ersichtliche Wendepunkt ist auch in den Effektivspannungsverläufen festzustellen.

Der quantitative Anstieg der Effektivspannung ist bereits nach der Aufbringung der ersten Druckstufe erreicht. Danach kommt es bei EDhi eff zwar während jedes Stufenwechsels zu einer Zunahme, die jedoch unmittelbar abgebaut wird. Auf der Außenseite zeigt EDha eff einen initial verlustfreien Anstieg nach jedem Stufenwechsel. Jedoch kommt es mit größerer Tiefe und höherer Druckstufe auch hier zu einem Abfall der Spannung.

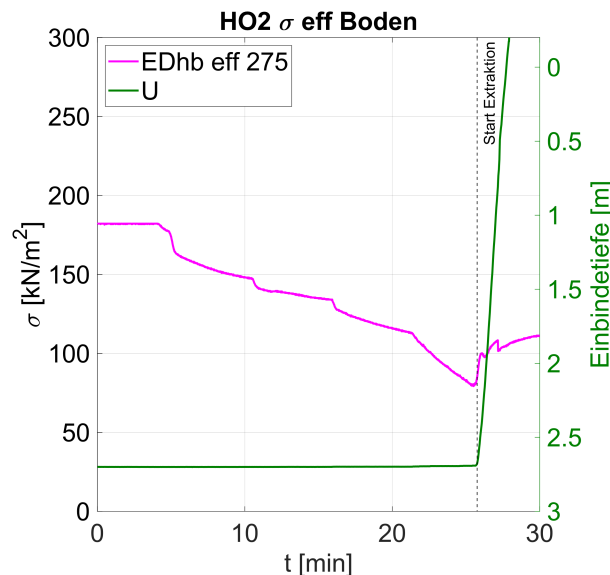
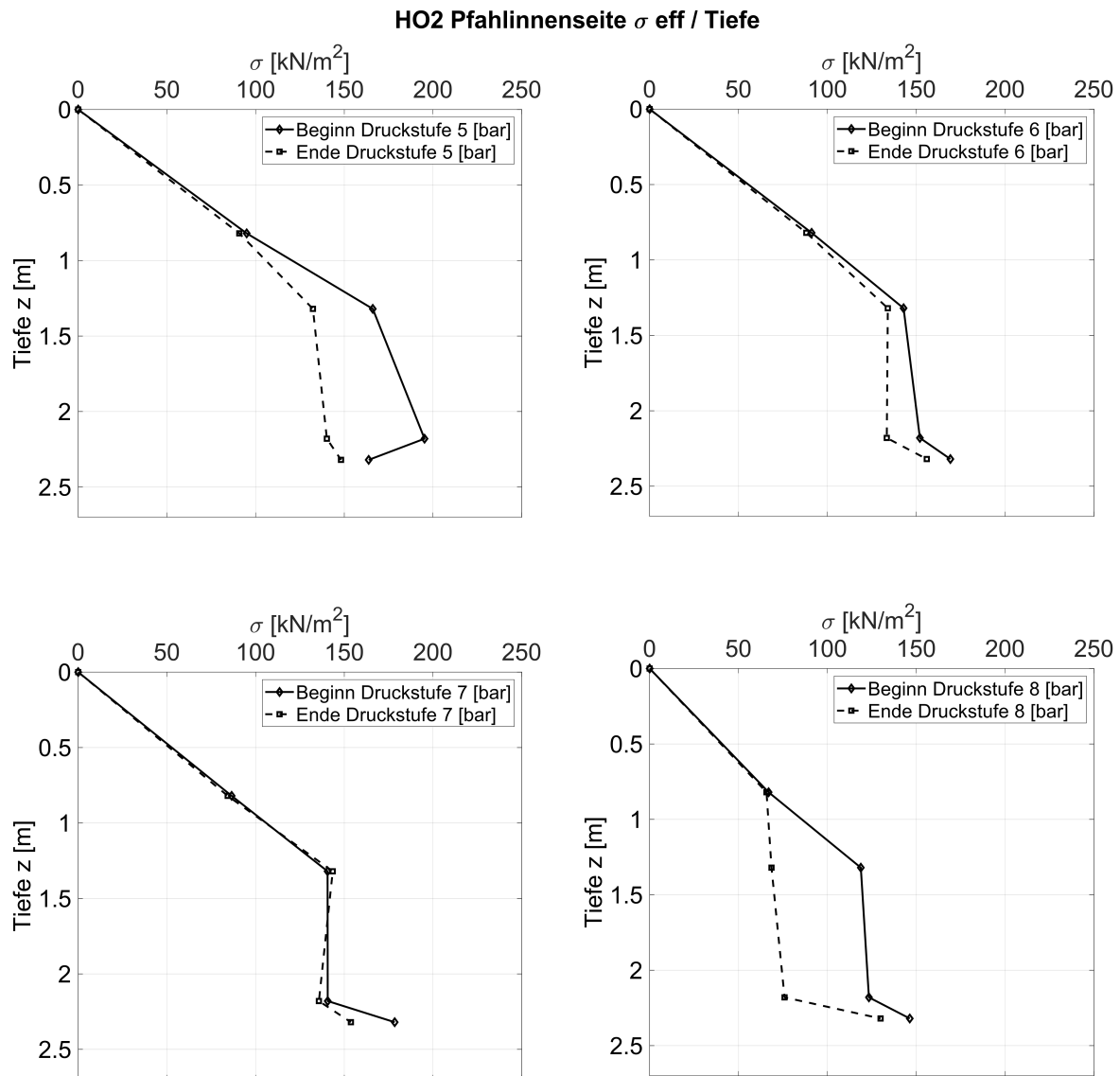


Abbildung 7-13: Effektivspannung im Boden (EDhb eff) unter dem Pfahlfuß, mit 10 cm Abstand zum Pfahl – Teilversuch HO2

Die Effektivspannung im Boden zeigt in den Tiefen EDhb eff 135 und EDhb eff 185 einen Anstieg in den letzten Druckstufen. In der Tiefe EDhb eff 235 ist ab dem

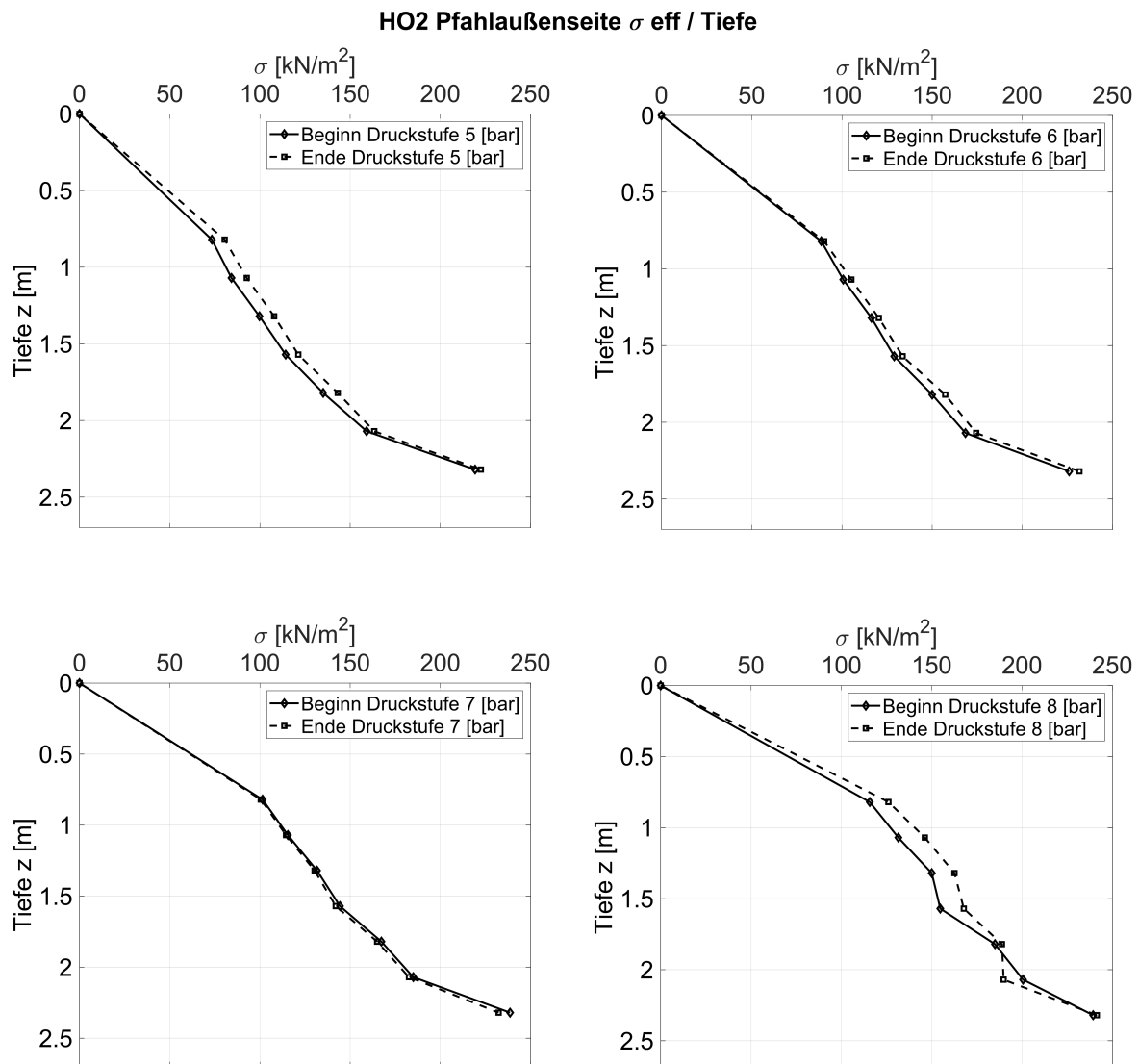
Versuchsbeginn eine Abnahme der Effektivspannung ersichtlich. Diese Abnahme wird, wie aus Abbildung 7-13 hervorgeht, mit steigender Tiefe größer. Direkt unterhalb des Pfahlfußes in der Tiefe EDhb eff 275 ist eine deutliche Abnahme der effektiven Spannung erkennbar.



**Abbildung 7-14: Entwicklung Effektivspannung Pfahlinnenseite über Tiefe  $z$  zu Beginn und zum Ende jeder Druckstufe – Teilversuch HO2**

In Abbildung 7-14 und Abbildung 7-15 sind die Effektivspannungen am Pfahl über die Tiefe zu Beginn und zum Ende einer jeden Druckstufe abgebildet. Abbildung 7-14 zeigt dabei die Spannung an der Pfahlinnenseite und Abbildung 7-15 die Pfahlausenseite. Die Effektivspannungsänderung zwischen dem Beginn und dem Ende einer Druckstufe ist auf der Pfahlinnenseite ausgeprägter. In der Druckstufe 500 kN/m<sup>2</sup> ist

das Delta deutlich erkennbar. In den Druckstufen 600 kN/m<sup>2</sup> und 700 kN/m<sup>2</sup> ist eine Verringerung der Spannungsabnahme zwischen dem Beginn und dem Ende der Druckstufen zu erkennen. Dies ist ebenfalls in den Verläufen laut Abbildung 7-12 ersichtlich. In der Stufe 800 kN/m<sup>2</sup> wird die Spannungsabnahme bis zum Versagen wieder deutlicher.



*Abbildung 7-15: Entwicklung Effektivspannung Pfahlaußenseite über Tiefe  $z$  zu Beginn und zum Ende jeder Druckstufe – Teilversuch HO2*

Die Spannungsänderung auf der Pfahlaußenseite zeigt zwischen dem Beginn und dem Ende einer Druckstufe eine geringe Zunahme. Der Betrag der Zunahme ist im Verhältnis zur Abnahme auf der Außenseite kleiner. Ebenfalls ersichtlich ist eine Art der Konsolidation in den Druckstufen 600 kN/m<sup>2</sup> und 700 kN/m<sup>2</sup>. Es ist daher zu

vermuten, dass die Zunahme der Spannung auf der Pfahlaußenseite mit der Spannungsabnahme auf der Pfahlinnenseite korreliert.

### 7.2.5 Kurzzusammenfassung Ergebnisse Versuchsreihe 1

Der stufenweise Anstieg der Belastung in der Versuchsreihe 1 zeigt umfangreiche Vorgänge im betrachteten Boden. Die Gesamtwiderstände des Modellpfahls wurden bei einer Druckbelastung von  $800 \text{ kN/m}^2$  überwunden. Die Spannungsverläufe während der Druckaufrechterhaltung zeigen eine Veränderung des Kontaktbereichs Boden-Pfahl. Die Reduzierung der Effektivspannung ist auf eine hydrodynamische Bodendeformation und damit eine Gefügeänderung infolge der aufgetragenen Belastung zurückzuführen. Der Abfall der Porenwasserdrücke und die Zunahme des Durchflusses in den Druckstufen  $700 \text{ kN/m}^2$  und  $800 \text{ kN/m}^2$  belegt die Erhöhung der Durchlässigkeit und Veränderung der Wasserwegigkeit innerhalb des Pfahls.

Der Vergleich der Spannungsverläufe auf der Pfahlinnen- und der Pfahlaußenseite zeigt den Zusammenhang zwischen der Spannungserhöhung auf der Außenseite und der Spannungsverringerung auf der Innenseite infolge Aufweitung des Pfahlquerschnitts. Die Effektivspannung in einer Entfernung von 10 cm zum Modellpfahl zeigt ein vergleichbares Spannungsbild wie die äußeren Pfahlsensoren. Es ist eine Abnahme des Spannungszustands unterhalb des Pfahlfußes zu erkennen. Oberhalb des Pfahlfußes ist bereits in einer Entfernung von 10 cm zur Pfahlaußenwand ein deutlich geringerer Einfluss der Extraktion ersichtlich.

Die Spannungen im Boden nehmen bei größerer Entfernung zum Modellpfahl schnell ab. In einer Entfernung von 60 cm zum Modellpfahl ist lediglich eine geringe Änderung der Totalspannung erkennbar.

## 7.3 Versuchsreihe 2 – Kontinuierliche Drucksteigerung

### 7.3.1 Versuchsparameter der Versuchsreihe 2

Die einzelnen Teilversuche der Versuchsreihe 2 zeigen eine hohe Übereinstimmung, sodass im Folgenden die Auswertung anhand des Teilversuchs HO5 mit der höchsten Signalqualität detailliert präsentiert wird. Die gesamten Versuchsergebnisse der Versuchsreihe 2 sind Anhang D4 bis D6 zu entnehmen.

Die Drucksteigerung der Versuchsreihe 2 erfolgte kontinuierlich. In Abbildung 7-16 ist das Belastungsszenario mit dem Eingangsdruck  $P$  und dem Durchfluss  $Q$  dargestellt. Die zur Druckerzeugung genutzte Pumpe verfügt über eine manuelle Regelung. Eine lineare Steigerung des Eingangsdrucks war näherungsweise möglich.

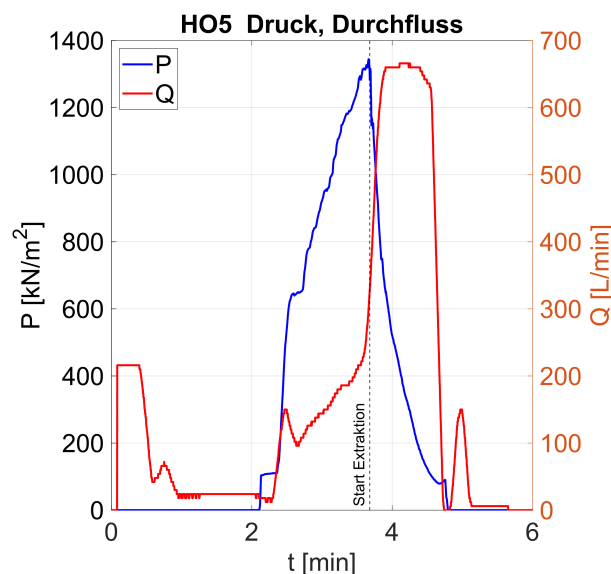


Abbildung 7-16: Eingeleiteter Druck  $P$  mit dem Durchfluss  $Q$  – Teilversuch HO5

Bei etwa 650  $\text{kN/m}^2$  wurde der Leitungsdruck, ersichtlich durch ein zeitlich begrenztes Plateau, durchfahren. Im Anschluss wurde der Druck mit einer Geschwindigkeit von ca. 800  $\text{kN/m}^2$  pro Minuten bis zum Versagen des Pfahls bei 1.350  $\text{kN/m}^2$  aufgebracht. Erfährt der Pfahl eine Relativverschiebung, fällt der Innendruck schlagartig ab und die Extraktion beginnt. Infolge der Hebung wird das verfügbare Volumen im Pfahlinneren oberhalb der GOK größer. Dieses vergrößerte Volumen füllt sich mit Wasser, was durch den Anstieg des Durchflusses bei gleichzeitigem Abfall des Innendrucks ersichtlich wird.

### 7.3.2 Spannungsmessungen am Pfahl der Versuchsreihe 2

In Abbildung 7-17 sind die am Modellpfahl gemessenen Porenwasserdrücke zusammen mit dem Eingangsdruck und der Pfahleinbindetiefe dargestellt.

Der Druckanstieg vor dem eigentlichen Versuchsbeginn bei ca. 2 min ist auf die Befüllung der Druckkammer mit Wasser zurückzuführen. Erst nach vollständiger Befüllung kann der Druckaufnehmer zur Bestimmung des Eingangsdrucks angeschlossen werden.

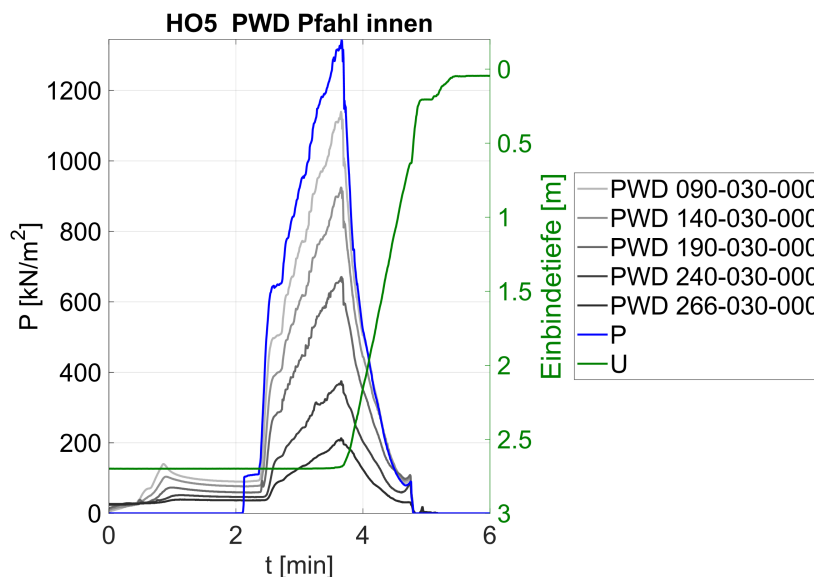


Abbildung 7-17: Gemessene PWD an der Pfahlinnenseite – Teilversuch HO5

Die Drucksteigerung in der Druckkammer spiegelt sich in den PWD-Verläufen wider. Die Drücke im Pfahlinneren sinken zeitgleich mit dem Einsetzen der Hebung des Pfahls, bis die Drücke bei vollständiger Extraktion auf null fallen.

Die Ergebnisse der Totalspannungsgeber EDh auf der Pfahlinnenseite (s. Abbildung 7-18) zeigen zu Beginn ebenfalls die Befüllung der Druckkammer und danach einen Anstieg bis zum Start der Extraktion. Beginnt der Modellpfahl eine Relativverschiebung zu erfahren, steigen die Totalspannungen trotz fallenden Innendrucks, wie in Abbildung 7-18 nach etwa 3,5 min erkennbar.



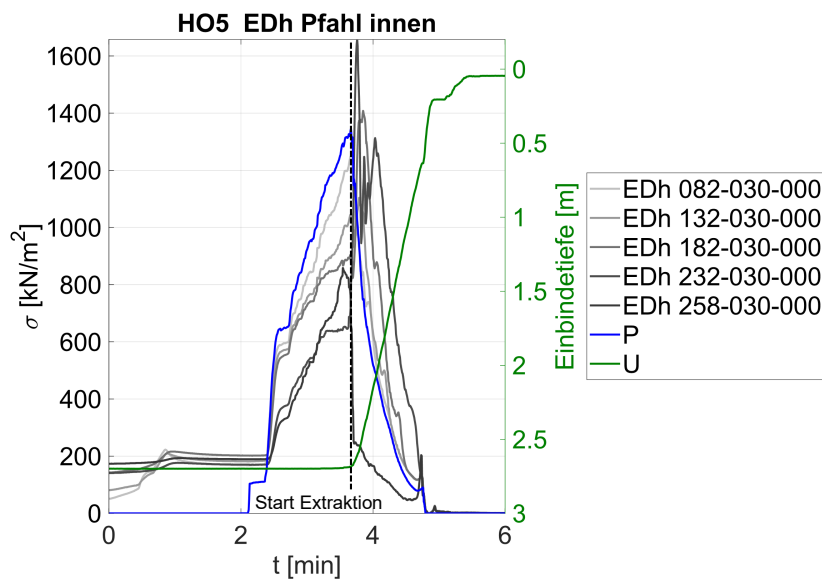


Abbildung 7-18: Gemessene EDh an der Pfahlinnenseite – Teilversuch HO5

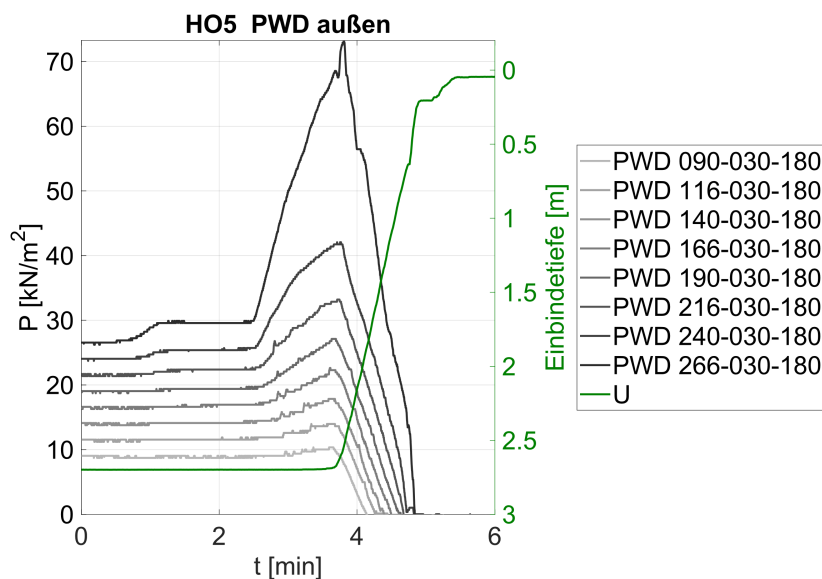


Abbildung 7-19: Gemessene PWD an der Pfahlaußenseite – Teilversuch HO5

Der qualitative Verlauf der PWD an der Pfahlaußenseite (s. Abbildung 7-19) ist vergleichbar mit dem Eingangsdruck (s. Abbildung 7-17) in der Druckkammer, betragsmäßig jedoch deutlich kleiner. Auch hier kann mit dem Start der Extraktion eine sofortige Abnahme der Porenwasserdrücke erkannt werden.

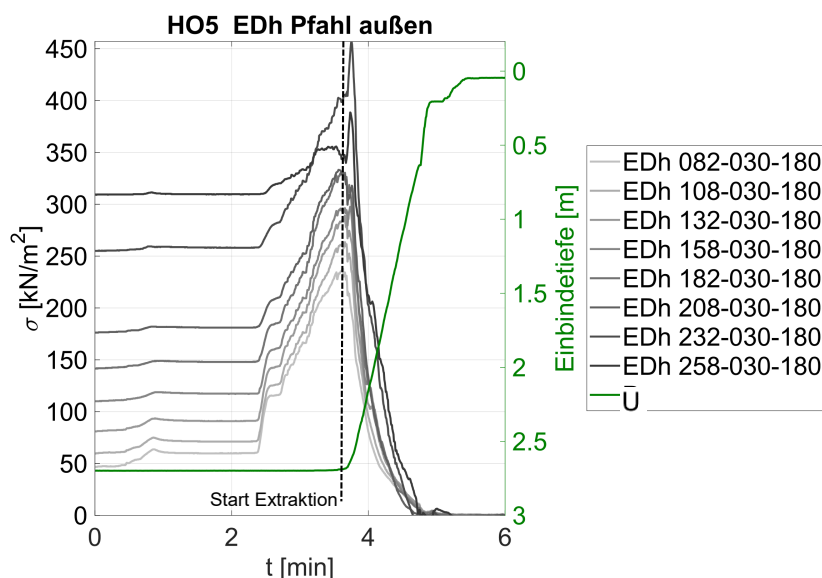


Abbildung 7-20: EDh an der Pfahlausenseite – Teilversuch HO5

In den EDh an der Pfahlausenseite ist ein Anstieg der Spannungen bis zum Beginn der Relativverschiebung des Pfahlkopfs erkennbar. Nach dem Einsetzen der Extraktion ist in den tieferen Sensorebenen EDh 258 und EDh 232 ein Anstieg der Totalspannung zu beobachten. Wie auch in der Betrachtung der Totalspannung auf der Pfahlinnenseite wird hier auf die Darstellung der Effektivspannung in den Abbildung 7-26 ff. verwiesen.

### 7.3.3 Spannungsmessungen im Boden der Versuchsreihe 2

Die gemessenen Porenwasserdrücke im Boden (s. Abbildung 7-22) zeigen eine hohe Ähnlichkeit mit den Porenwasserdrücken an der Pfahlausenseite (s. Abbildung 7-19).

Die Tiefenlage der Sensoren variiert zwischen 120 cm und 280 cm unter der GOK. Der Peak, der den Maximalwert und den Start der Extraktion zeigt, findet durch die unterschiedlichen Entfernungen zum Pfahlfuß (Druckauslass) zeitlich versetzt statt.

Lokal kann es durch die Umströmung des Wassers am Pfahlfuß zu veränderten Strömungswegen kommen. So ist bspw. der Porenwasserdruck des Sensors PWD 260-40-090 höher als am äußeren Pfahlmantel (PWD 266-030-180).

Für eine bessere Vergleichbarkeit werden die Messergebnisse der Bodensensoren mit einem Abstand von 10 cm und 60 cm zur Pfahlwand separat dargestellt.

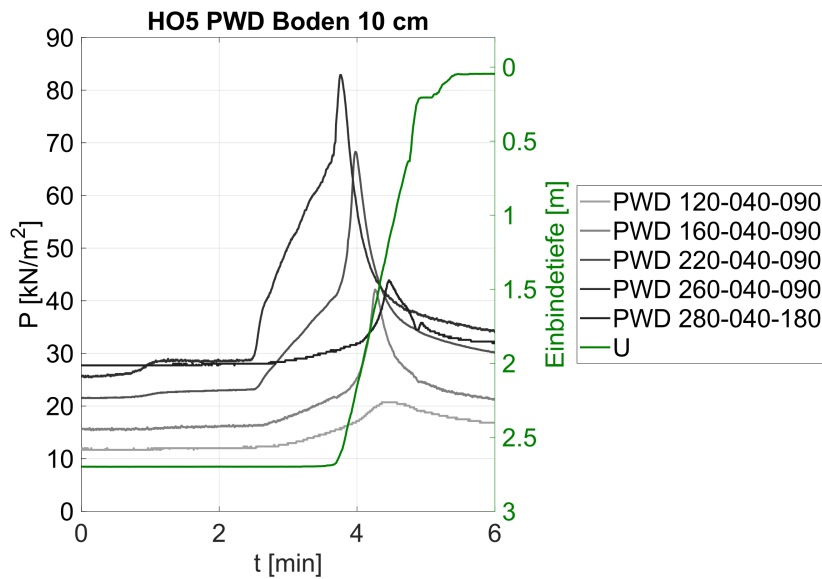


Abbildung 7-21: PWD im Boden mit 10 cm Abstand zum Pfahl – Teilversuch HO5

Die Porenwasserdruckänderung in einer Entfernung von 60 cm zum Pfahl zeigt lediglich einen geringen Ausschlag (s. Abbildung 7-21).

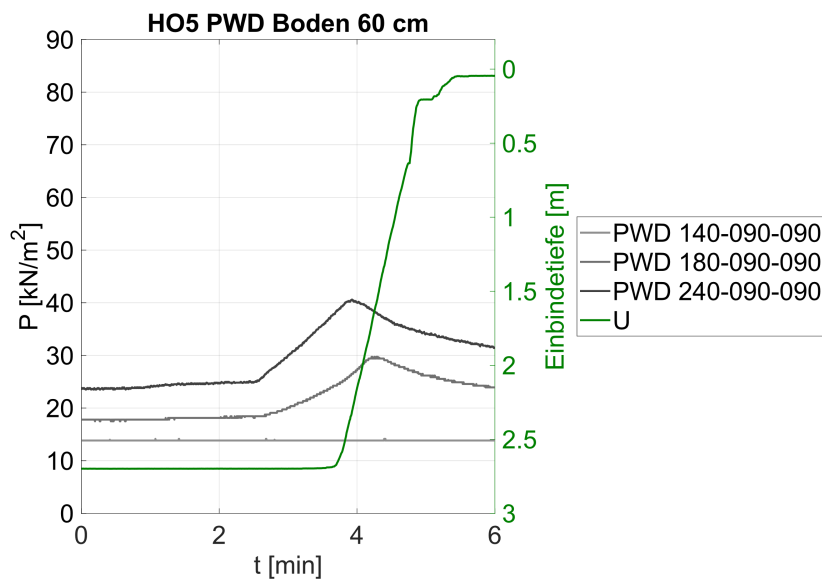


Abbildung 7-22: PWD im Boden mit 60 cm Abstand zum Pfahl – Teilversuch HO5

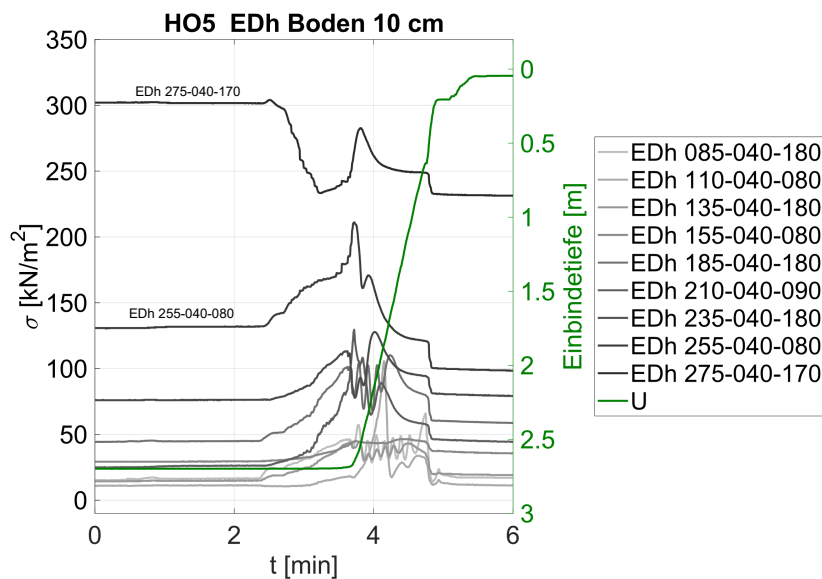


Abbildung 7-23: EDh im Boden mit 10 cm Abstand zum Pfahl – Teilversuch HO5

Der am tiefsten liegende Sensor EDh 275 befindet sich etwas unterhalb des Pfahlfußes und bildet damit das Spannungsverhalten des Bodens im Pfahlfußbereich ab. Anders als in den darüber liegenden Sensorebenen ist hier ein Abfall der Totalspannung während des Versuchs zu erkennen.

Die Sensorlage EDh 255 zeigt wie auch die übrigen Sensoren einen Anstieg der Totalspannung. Nach der Extraktion zeigen alle Sensoren einen konstanten und teilweise verringerten Wert der Totalspannung. Eine Störung des Bodengefüges im Nahbereich des Pfahls kann somit festgehalten werden.

Die Totalspannungen in einer Entfernung von 60 cm zur Pfahlwand zeigen einen verringerten Einfluss der Extraktion. Trotz der kleinen Absolutwerte ist auch hier ein charakteristischer Anstieg der Totalspannung ersichtlich. Die Sensorebene EDh 275-090 zeigt im Vergleich zum Nahbereich EDh 275-040 keinen Abfall, sondern einen geringen Anstieg der Totalspannung. Auch die Spannungsniveaus vor und nach der Extraktion sind auf einem vergleichbaren Wert, sodass ein begrenzter Einfluss der Extraktion auf den Nahbereich um den Modellpfahl festgestellt werden kann.

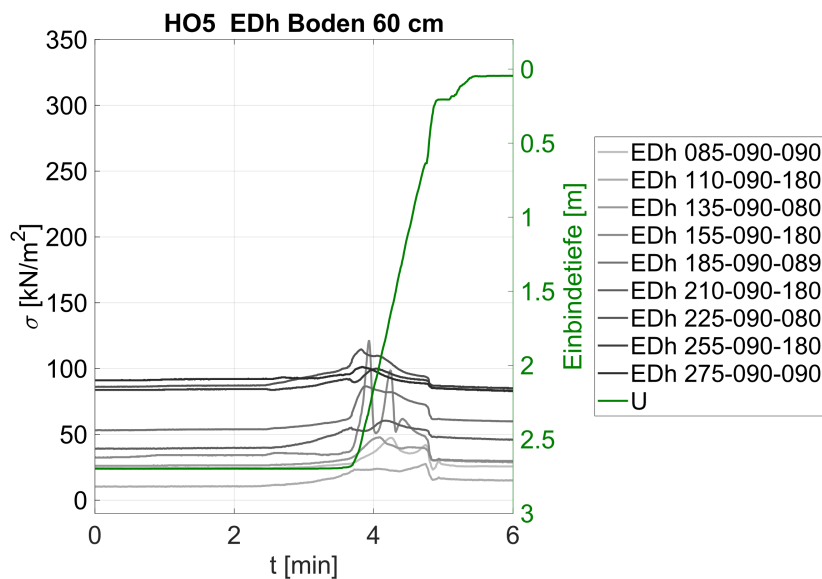


Abbildung 7-24: EDh im Boden mit 60 cm Abstand zum Pfahl – Teilversuch HO5

### 7.3.4 Effektivspannung der Versuchsreihe 2

Abbildung 7-25 zeigt die berechneten Effektivspannungen auf der Pfahlinnen- und der Pfahlausenseite sowie im Boden in 10 cm Entfernung in vergleichbaren Tiefen.

Wie bereits bei der Betrachtung der Totalspannung an der Pfahlinnen- und -außenseite erkannt werden konnte, erfolgt mit dem Beginn der Pfahlhebung ein Anstieg, welcher nach der Betrachtung der Effektivspannung der Spannungssteigerung im Korngerüst zuzuordnen ist. Wie bereits in der Versuchsreihe 1 wird auf die Interpretation nach dem Beginn der Extraktion verzichtet.

Zur Beurteilung der Pfahl-Boden-Interaktion wird bei der Darstellung der Effektivspannung die Skalierung in Abbildung 7-25 so angepasst, dass die Verläufe vor der Extraktion besser zu deuten sind.

Die Effektivspannung im Pfahlinnenen steigt zu Beginn der Belastung in allen Tiefenebenen. Die Spannungszunahme stagniert zeitlich versetzt bei weiterer Drucksteigerung in der Druckkammer. In der Tiefe von EDhi eff 82 steigt die Spannung kurz und fällt danach. Der Abfall degradiert vor dem Beginn der Extraktion unter das initiale Spannungsniveau vor der Belastung.

In der Tiefe von EDhi eff 132 fällt die Effektivspannung während der Drucksteigerung ebenfalls unterhalb des initialen Spannungsniveaus. In den Tiefen EDhi eff 182 und

EDhi eff 232 ist zunächst ein linearer Anstieg der Effektivspannung zu erkennen. Sobald der Spannungsanstieg nachlässt, stellt sich eine Spannungsdegradation in den Messebenen ein. Vor der Extraktion fällt die Effektivspannung in beiden Tiefenebenen ab und steigt beim Start der Extraktion deutlich an.

In der Messebene EDhi eff 258 ist ein linearer Anstieg der Effektivspannung zu erkennen. Das Versagen des Modellpfahls kündigt sich durch den Abfall der Effektivspannung an. Beim Start der Extraktion fällt die Effektivspannung schließlich abrupt ab.

Die Effektivspannung an der Pfahlausenseite steigt in den Messebenen zwischen EDha eff 82 und EDha eff 232 vergleichbar. In der Messebene EDha eff 258 ist keine signifikante Veränderung der Effektivspannung vor Extraktion zu erkennen. In den Messebenen EDha eff 232 und EDha eff 258 steigt die Effektivspannung beim Start der Extraktion kurz an.

Die Identifizierung der in Versuchsreihe 1 gezeigten Prozesse ist in der Versuchsreihe 2 aufgrund der linearen Drucksteigerung schwieriger. Der Anstieg auf der Pfahlausenseite zeigt den Einfluss der Aufweitung des Pfahlquerschnitts. Die Reduktion der Effektivspannung auf der Pfahlinnenseite erfolgt über die Tiefe versetzt, dies zeigt eine hydrodynamische Bodendeformation von der Druckkammer zum Pfahlfuß.

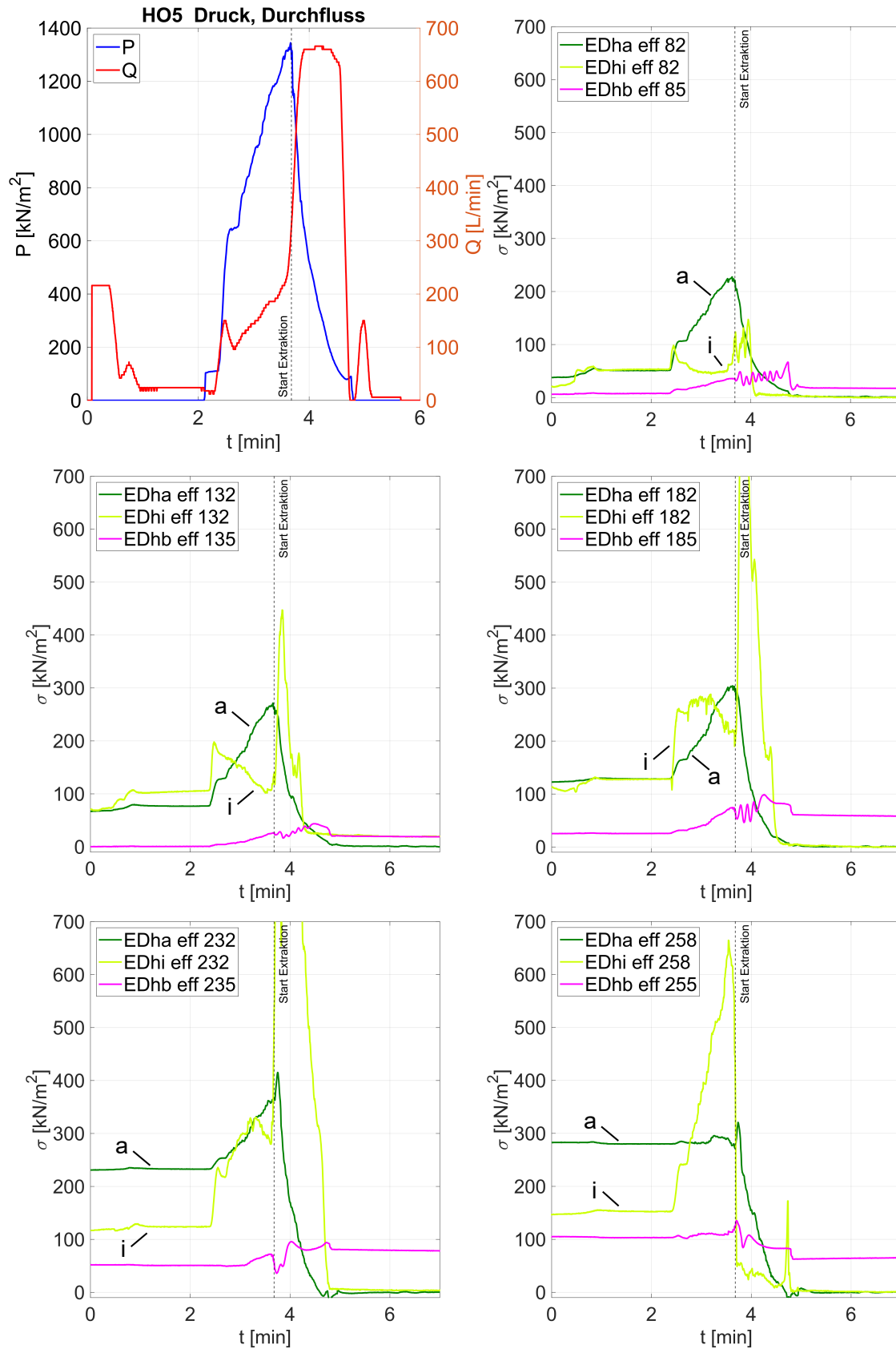


Abbildung 7-25: Versuchsp Parameter  $P$  und  $Q$ , Effektivspannung an der Pfahlaußen- (EDha eff) und Pfahlinnenseite (EDhi eff) sowie im Boden (EDhb eff) in 10 cm Abstand zum Pfahl – Teilversuch HO5

Die Effektivspannung im Boden mit einem Abstand von 10 cm zum Modellpfahl zeigt einen geringen Einfluss. In allen Messebenen ist ein geringer Anstieg mit anschließendem Abfall der Spannung ab dem Start der Extraktion erkennbar. In einer Tiefe von EDhb eff 258 liegt die Spannung nach der Extraktion unter der initialen Spannung zu Versuchsbeginn.

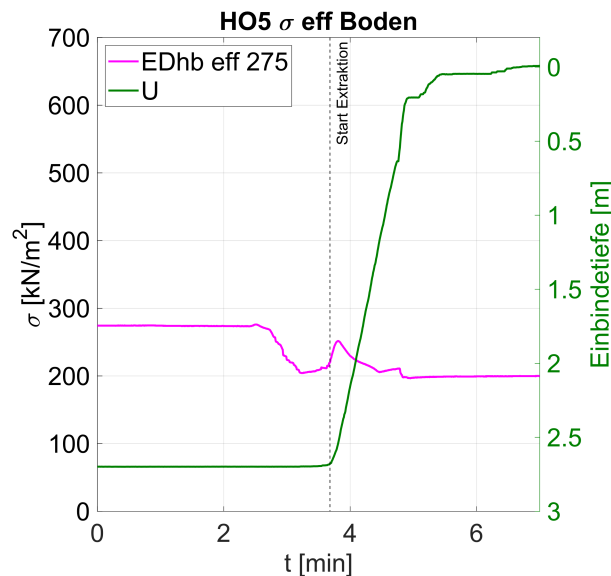


Abbildung 7-26: Effektivspannung im Boden (EDhb eff) unter dem Pfahlfuß mit 10 cm Abstand zum Pfahl – Teilversuch HO5

In Abbildung 7-26 ist die Effektivspannung im Nahbereich und unterhalb des Pfahlfußes dargestellt. In einer Tiefe von EDhb eff 275 ist eine klare Abnahme während der Drucksteigerung erkennbar. Mit dem Start der Extraktion steigt die Effektivspannung kurz und fällt mit fortschreitender Extraktion auf ein konstantes Niveau unterhalb der initialen Spannung. Somit wird zumindest ein Teil der installationsbedingten Spannungserhöhung unterhalb des Pfahlfußes nach der Extraktion abgebaut.

### 7.3.5 Kurzzusammenfassung Ergebnisse Versuchsreihe 2

Die Lastaufbringung in der Versuchsreihe 2 erfolgte durch eine lineare Steigerung des Eingangsdrucks. Die Porenwasserdrücke an der Pfahlinnen- und der Pfahlausenseite bilden den Einleitungsdruck sehr gut ab.



Bei einer Maximalbelastung von  $1.350 \text{ kN/m}^2$  wurde der Ausbruchwiderstand überwunden und der Modellpfahl wurde kontrolliert aus dem Boden gedrückt. Die Verläufe der Effektivspannung zeigen bis in eine Tiefe von 132 cm (EDhb eff 132) nach anfänglichem Anstieg einen raschen Abfall. In allen Tiefenebenen ist vor dem Beginn der Extraktion des Modellpfahls eine Reduzierung der Effektivspannung ersichtlich. Die Spannungsverläufe auf der Pfahlinnen- und Pfahlaußenseite lassen keinen direkten Zusammenhang erkennen.

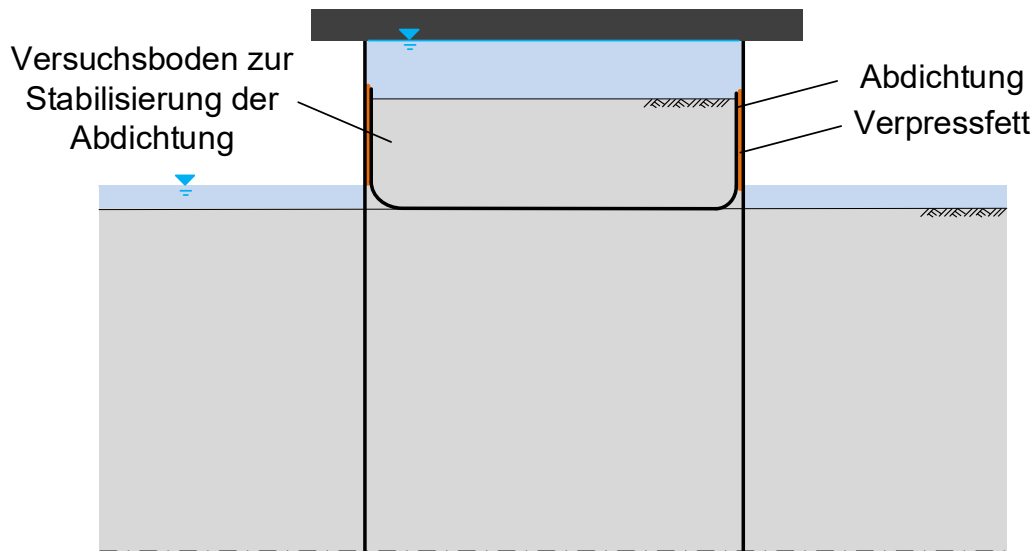
Im Vergleich zur Versuchsreihe 1 ist in Versuchsreihe 2 die Trennung der identifizierten physikalischen Prozesse schwierig. Die lineare Drucksteigerung überlagert auftretende Spannungszustände. Dennoch ist in den Tiefen von 0,82 – 2,32 m eine Reduktion der Effektivspannungen infolge hydrodynamischer Bodendeformation sichtbar. Des Weiteren ist die Ausdehnung des Pfahlquerschnitts durch den Anstieg der Spannungen auf der Pfahlaußenseite erkennbar.

Die Effektivspannung im Boden 5 cm (EDhb eff 275) unterhalb des Pfahlfußes zeigt eine unmittelbare Abnahme ab dem Versuchsbeginn. Oberhalb des Pfahlfußes konnte eine geringe Zunahme festgestellt werden.

## 7.4 Versuchsreihe 3 – Simulierte Abdichtung

### 7.4.1 Versuchsparameter der Versuchsreihe 3

Im Rahmen der Versuchsreihe 3 wurde nach der Installation der Deckel des Modellpfahls geöffnet und eine PVC-Folie auf den Boden in das Pfahlinnere eingelegt. Die Folie wurde anschließend mit Wasser und Sand bedeckt, um ihr Einklappen von der Pfahlwand zu verhindern. Der Spalt zwischen hochgeklappter Folie und Pfahlinnenwand wurde mit Fett verpresst. Abbildung 7-27 zeigt den Schnitt durch den Pfahlkopf mit eingesetzter Abdichtung, Fett und Befüllung.



*Abbildung 7-27: Schnitt Pfahlkopf mit eingesetzter Abdichtung und Befüllung*

Ziel der installierten Abdichtung war es vor dem Hintergrund der Weiternutzung des Standortes einer OEWA zum einen, die Durchströmung und Störung des Bodens zu verhindern. Der Modellpfahl sollte sich ausschließlich durch die mobilisierte Druckkraft gegen den Deckel und den Untergrund herausdrücken.

Das zweite Ziel war die Simulierung einer Bodenschicht mit geringer Durchlässigkeit wie bspw. Ton oder Kalk, die bei der Installation durchörtert wurde. Eine solche Schicht verändert den Durchfluss innerhalb des Pfahls und beeinträchtigt damit den Extraktionsprozess.

Die Drucksteigerung erfolgte analog zur Versuchsreihe 2 linear mit einer konstanten Geschwindigkeit (s. Abbildung 7-28). Der Pfahlkopf bzw. die Druckkammer wurde in der Zeit von etwa 2,5 min bis 5 min gefüllt und im Anschluss der Drucksensor angeschlossen. Nachdem der Leitungsdruck von ca.  $670 \text{ kN/m}^2$  durchfahren wurde, erfolgte die Drucksteigerung kontinuierlich bis zu einer maximalen Belastung von  $1.900 \text{ kN/m}^2$ . Nachdem der Druck kurzzeitig auf  $1.600 \text{ kN/m}^2$  abgelassen wurde, erfolgte eine zweite Belastung auf  $1.940 \text{ kN/m}^2$ . Nach den Erkenntnissen der Versuchsreihe 2 wurde erwartet, dass durch die Verringerung der Sickerströmungskraft im Pfahlinnenen die Extraktion mit einer geringeren Druckbelastung realisiert werden kann. Der Modellpfahl erfuhr jedoch keine Relativverschiebung, sodass trotz der hohen Belastung keine Extraktion erfolgte. In den folgenden Ergebnisdarstellungen des Kapitels 7.4 wird auf die Abbildung der Pfahleinbindetiefe in den einzelnen Messergebnissen verzichtet.

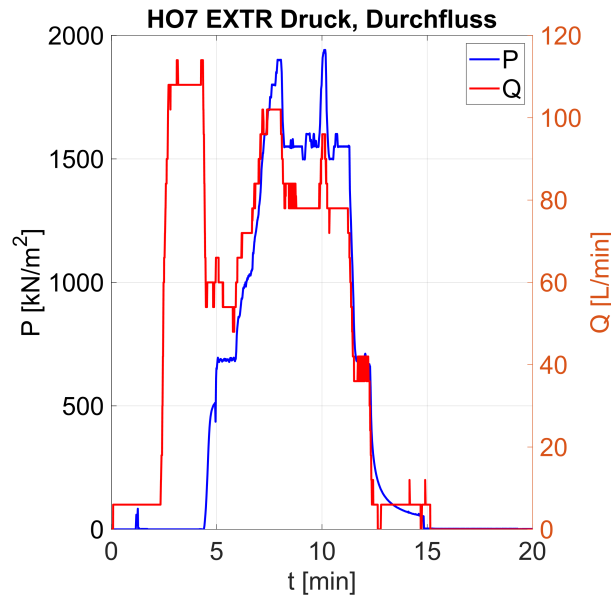


Abbildung 7-28: Eingeleiteter Druck  $P$  mit dem Durchfluss  $Q$  – Teilversuch HO7 (keine Extraktion)

Wie Abbildung 7-28 entnommen werden kann, lag der Durchfluss zu den Maximaldrücken der beiden Belastungen bei ca. 100 L/min. Im Vergleich dazu wurde in der Versuchsreihe 2 zum Zeitpunkt der Extraktion ein Durchfluss von ca. 300 L/min gemessen. Somit konnte der Durchfluss und damit die Sickerströmungskraft im Pfahlinneren reduziert, aber nicht vollkommen unterbunden werden.

Der zweite Teilversuch HO8 der Versuchsreihe 3 wurde analog zu Teilversuch HO7 vorbereitet. Es wurde jedoch noch einmal die Maximalbelastung von 2.000 kN/m<sup>2</sup> aufgebracht. Der Modellpfahl konnte auch in dem Teilversuch HO8 nicht extrahiert werden. Eine detaillierte Betrachtung der Spannungsverläufe am Modellpfahl und im Boden findet im Folgenden anhand des Versuchs HO7 statt. Die Spannungsverläufe des Versuchs HO8 sind Anhang D8 zu entnehmen.

#### 7.4.2 Spannungsmessungen am Pfahl der Versuchsreihe 3

Besonders aufgrund der gescheiterten Extraktion können die Spannungsverläufe an der Pfahlinnen- und der Pfahlaußenseite Erkenntnisse über die Pfahl-Boden-Interaktion während des Versuchs HO7 liefern. Abbildung 7-29 zeigt die Porenwasserdrücke an der Pfahlinnenseite. In allen Messebenen ist der Verlauf des Einleitungsdrucks zu erkennen. Die gemessenen Porenwasserdrücke unterhalb der

Abdichtung im Pfahlinneren zeigen eine Abminderung. Anders als in den Versuchsreihen 1 und 2 wird bei der Versuchsreihe 3 ein Teil der Belastung als Auflast auf den Boden im Pfahlinneren aufgebracht. In den Versuchsreihen 1 und 2 ist der Drucktransfer auf die Sickerströmungskraft im Porenwasser zurückzuführen.

Die Differenz aus Druck in der Druckkammer und der obersten Messebene (PWD 090-030-000) kann demnach näherungsweise als Auflast betrachtet werden. Somit kann eine Belastung von  $P_a = 1.300 \text{ kN/m}^2$  identifiziert werden.

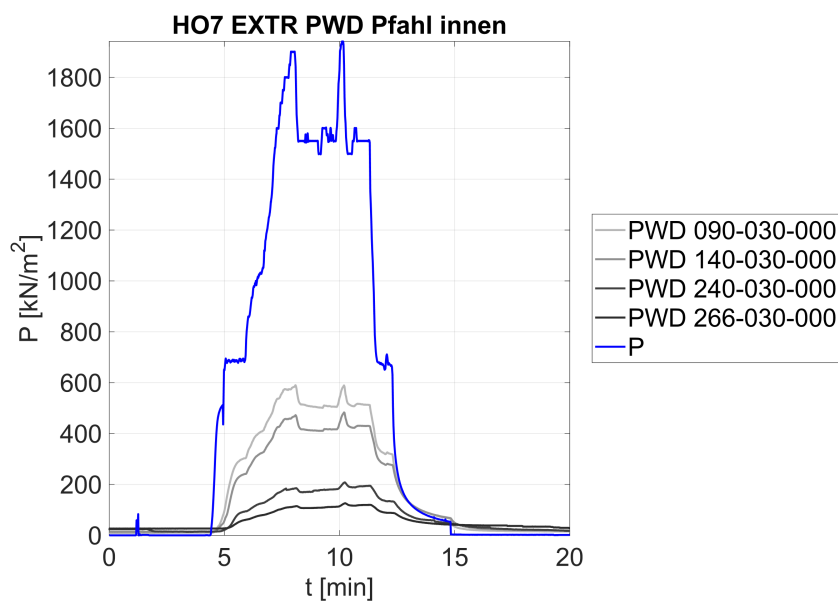


Abbildung 7-29: Gemessene PWD an der Pfahlinnenseite – Teilversuch HO7

Auch die Totalspannungen auf der Pfahlinnenseite bilden wie die PWD innen das Belastungsszenario der Drucksteigerung bei verringerter Spannungsübertragung repräsentativ ab (s. Abbildung 7-30). Während der Drucksteigerung zur ersten Maximalbelastung ist wie auch in der Versuchsreihe 2 die Identifizierung eines stationären oder instationären Strömungszustands nicht möglich. Die Signalverläufe der PWD und EDh in den oberen Messebenen zwischen den zwei Maximalbelastungen zeigen hingegen einen konstanten Verlauf und deuten damit auf einen stationären Strömungszustand hin. Besonders in der untersten Messebene ist wiederum ein leichter Anstieg in den PWD- und EDh-Verläufen zu erkennen.

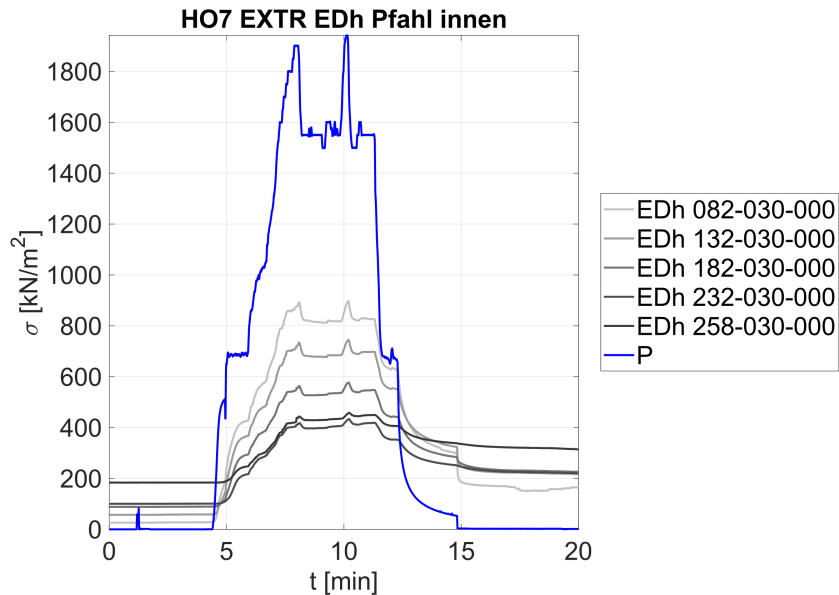


Abbildung 7-30: EDh an der Pfahlinnenseite – Teilversuch HO7

Das Spannungsniveau nach der Belastung fällt nicht auf die initiale Spannung wie vor der Belastung zurück. Dies könnten Restdrücke infolge der fehlenden Extraktion des Modellpfahls sein, die über die Zeit abgebaut werden.

Die Spannungsverläufe der PWD- und EDh-Sensoren auf der Pfahlausenseite (s. Abbildung 7-31) liefern aussagekräftige Ergebnisse. Der PWD 116-030-180 ist während des Versuchs ausgefallen.

Der Ausschlag der PWD auf der Pfahlausenseite ist auf noch vorhandene Umströmung des eingeleiteten Wassers im Pfahlinneren zurückzuführen. Hier sind die Absolutwerte im Vergleich zur den Versuchsreihen 1 und 2 wieder deutlich geringer. Im Verhältnis zum gemessenen Porenwasserdruck sind die Totalspannungen hoch. Hierfür wird die Druckbelastung auf die Folie im Pfahlinneren und damit die zusätzliche Flächenlast auf den Boden im Pfahlinneren verantwortlich gemacht.

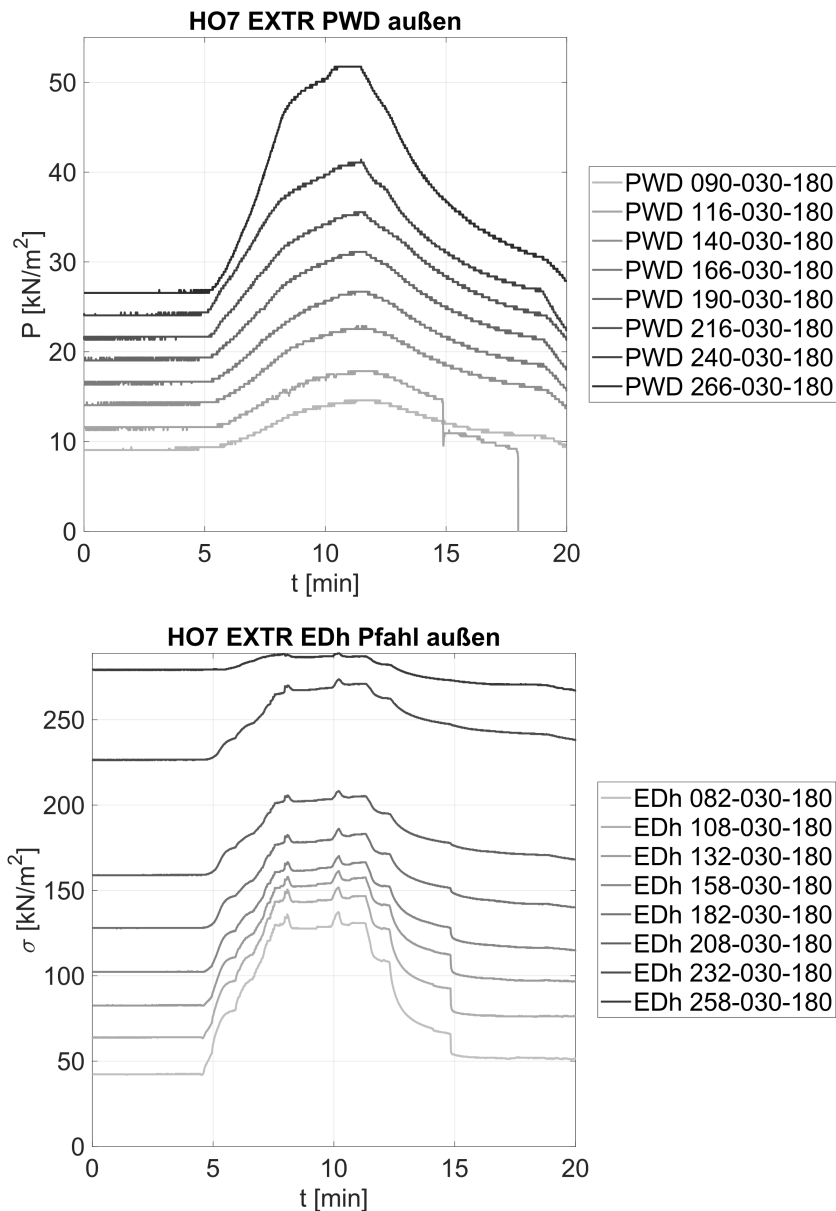


Abbildung 7-31: PWD und EDh an der Pfahlaußenseite – Teilversuch HO7

#### 7.4.3 Spannungsmessungen im Boden der Versuchsreihe 3

Die gemessenen PWD und EDh im Boden zeigen ebenfalls einen Einfluss der Versuchsdurchführung. Die charakteristischen Peaks der Maximalbelastung sind in der Tiefenlage 260 zu erkennen (s. Abbildung 7-32).

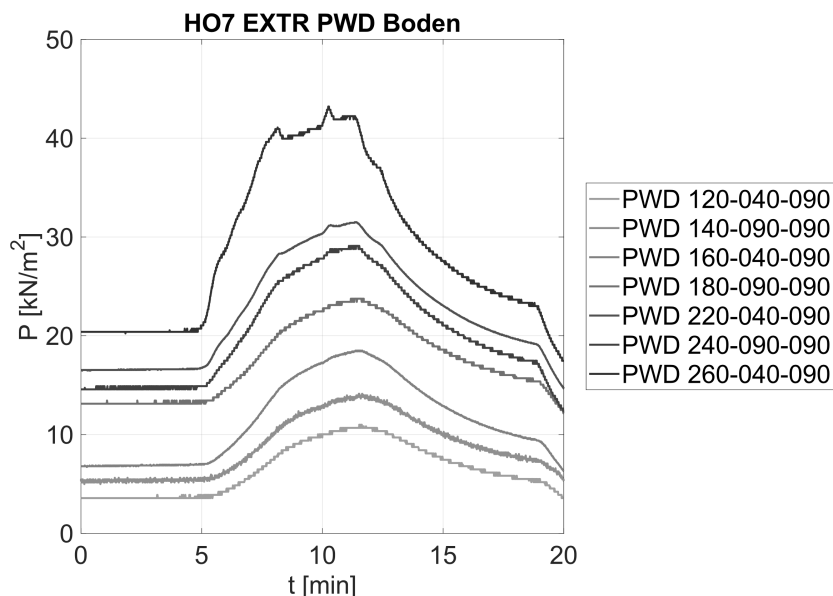


Abbildung 7-32: Gemessene PWD im Boden – Teilversuch HO7

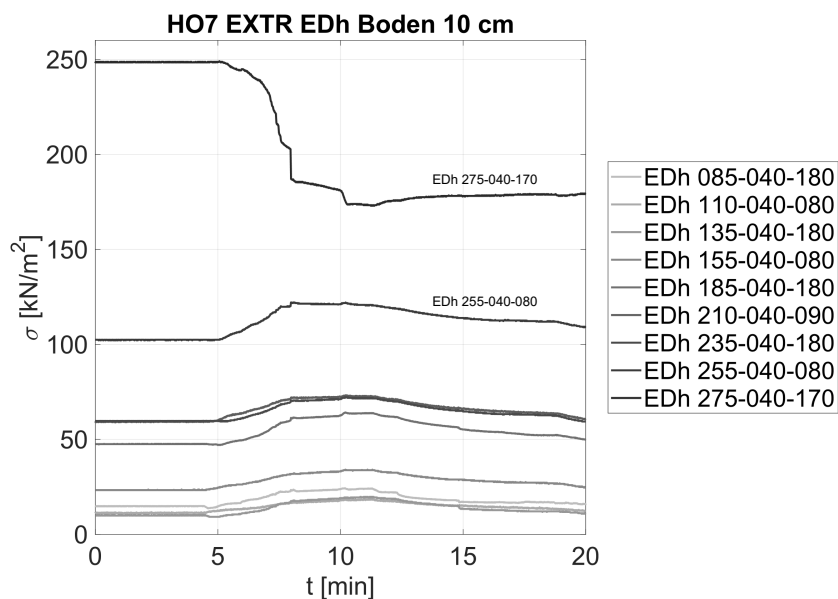


Abbildung 7-33: EDh im Boden mit 10 cm Abstand zum Pfahl – Teilversuch HO7

Die Totalspannung (EDh 275) nimmt unterhalb des Pfahlfußes infolge der Drucksteigerung ab (s. Abbildung 7-33). Die höher liegenden Sensoren zeigen eine Zunahme während der Versuchsdurchführung.

### 7.4.4 Effektivspannung der Versuchsreihe 3

Der PWD 190 in einer Tiefe von 190 cm zeigte im Teilversuch HO7 einen Defekt. Die Effektivspannung  $ED_{h\text{ eff}}$  in der Tiefe von 182 cm kann daher nicht dargestellt werden.

Die Effektivspannung an der Pfahlinnenseite zeigt einen kontinuierlichen Anstieg in allen Tiefenebenen (s. Abbildung 7-34). Auf der Pfahlaufenseite ist bis auf die Ebene  $ED_{ha\text{ eff } 258}$  ein analoger Anstieg der Effektivspannungen zu erkennen. Die Effektivspannungen im Boden zeigen nur eine geringe Veränderung ohne signifikante Merkmale.

Weder an der Kontaktfläche auf der Pfahlinnenseite noch auf der Pfahlaufenseite des Modellpfahls kann eine Spannungsreduktion beobachtet werden. Die Extraktion des Modellpfahls konnte nicht erreicht werden.



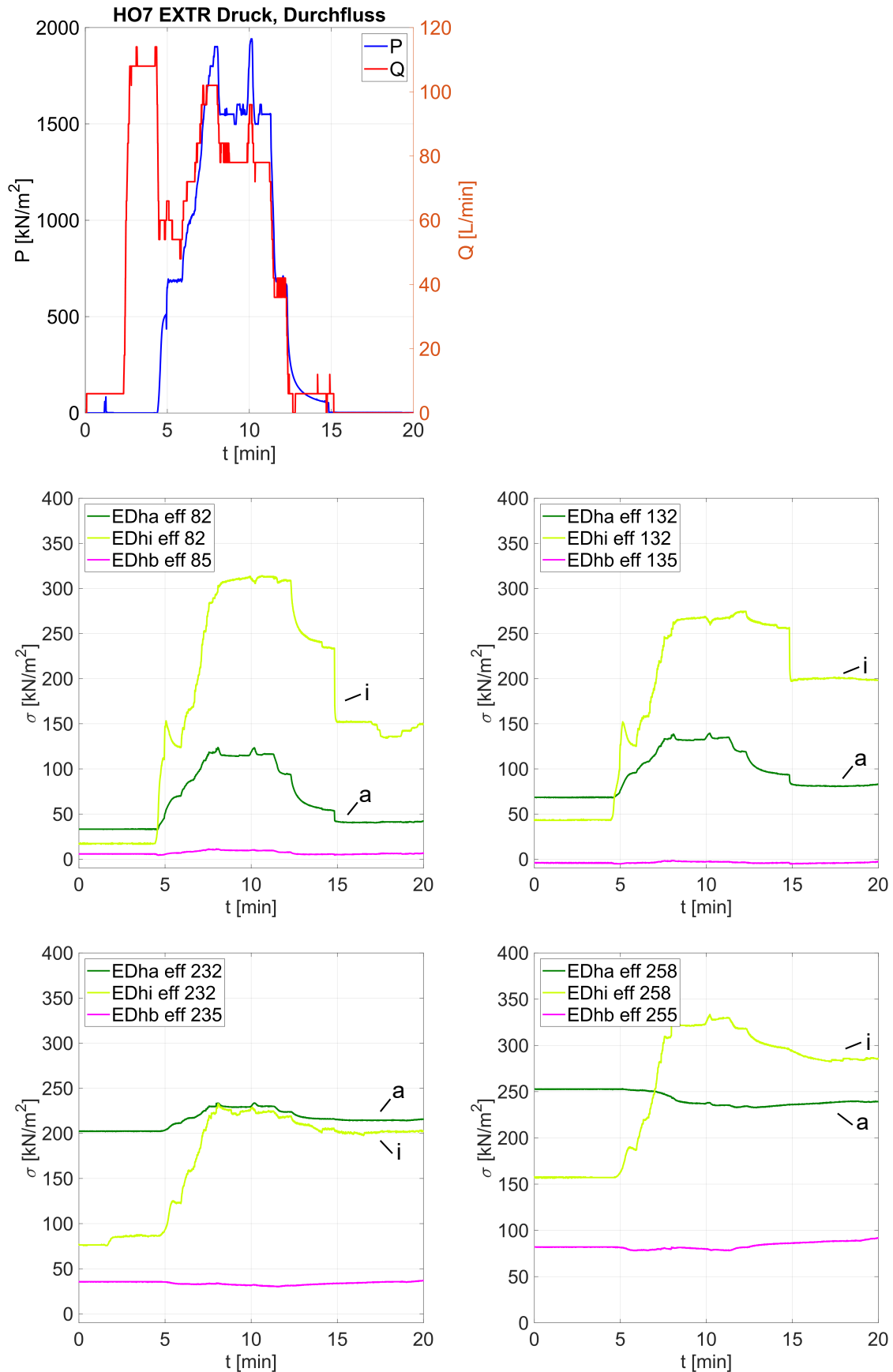


Abbildung 7-34: Versuchsparameter  $P$  und  $Q$ , Effektivspannung an der Pfahlaußen- (EDha eff) und Pfahlinnenseite (EDhi eff) sowie im Boden (Edhb eff) in 10 cm Abstand zum Pfahl – Teilversuch HO7 (keine Extraktion)

Neben den in der Versuchsreihe 1 festgestellten Auswirkungen auf das Spannungsverhalten im Kontaktbereich Pfahl-Boden wird das Spannungsbild der Versuchsreihe 3 von einer zusätzlichen Auflast auf den Boden im Pfahlinneren überlagert. So resultiert die installierte Abdichtung in der Übertragung des Innendrucks als Auflast direkt auf das Korngerüst.

In Abbildung 7-35 ist die schematische Spannungsübertragung mit und ohne Abdichtung dargestellt. In den Versuchsreihen 1 und 2 wird der Eingangsdruck in der Druckkammer als Sickerströmung an den Boden weitergegeben. Die Abdichtung in der Versuchsreihe 3 verändert das Spannungsbild im Pfahlinneren. Die Übertragung über das Porenwasser ist behindert, sodass ein Großteil des Eingangsdrucks als Auflast an das Korngerüst weitergegeben wird.

Wie den Eingangsparametern der Abbildung 7-34 entnommen werden kann führte die Abdichtung zu einer Verringerung der Durchflussmenge, aber nicht zu einer vollständigen Unterbindung der Durchströmung des Pfahls. Neben der Auflast auf die Abdichtung kommt es infolge der Sickerströmung, wie in den Versuchsreihen 1 und 2, zu einer Erhöhung der Horizontalspannung auf der Pfahlinnenseite. Aufgrund der Erhöhung des Porenwasserdrucks (s. Abbildung 7-29) kommt es auch bei der Versuchsreihe 3 zu einer, wenn auch kleineren, Aufweitung des Pfahlquerschnitts und damit Spannungserhöhung auf der Pfahlausenseite.

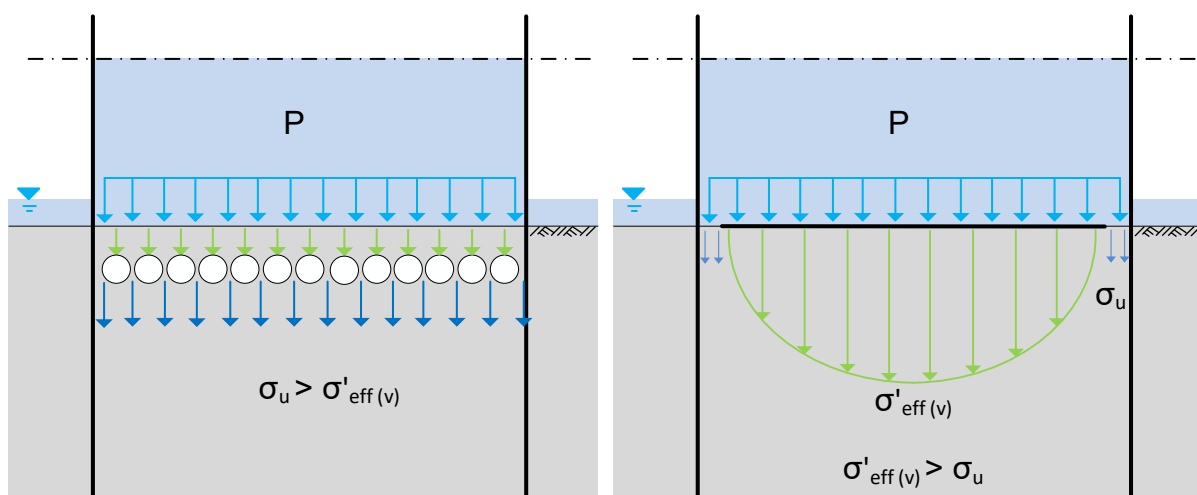


Abbildung 7-35: Schematische Spannungsübertragung ohne Abdichtung (links) und mit Abdichtung (rechts)

### 7.4.5 Kurzzusammenfassung Ergebnisse Versuchsreihe 3

Der Einfluss der Abdichtung im Inneren des Modellpfahls ist in den Versuchsergebnissen deutlich zu erkennen. Eine vollständige Abdichtung konnte zwar nicht hergestellt werden, jedoch zeigt bereits die reduzierende Wirkung der eingelegten Folie ein verändertes Spannungsbild im Boden. Somit kommt es zu einer stärkeren Belastung des Korngerüsts, was wiederum zu höheren Pfahlwiderständen führt. Aufgrund der reduzierten Durchströmung findet entlang der Pfahlwandung keine Reduzierung der Spannungszustände statt. Die verringerte Durchströmung zeigt nur unterhalb des Pfahlfußes einen Einfluss auf die Effektivspannung im Boden.

In beiden Teilversuchen der Versuchsreihe 3 konnte der Pfahl trotz eines vergleichsweise sehr hohen Eingangsdrucks nicht extrahiert werden.

## 7.5 Zusammenfassung der Auswertung und Interpretation

Die dargestellten Ergebnisse der durchgeführten Modellversuche zeigen im Hinblick auf die Spannungsreduktion infolge hydrodynamischer Bodendeformation teilweise unbekannte physikalische Prozesse und können zu einem vertieften Verständnis hinsichtlich der Pfahl-Boden-Interaktion während der Extraktion eines Rohrpfahls durch die Erzeugung eines hydraulischen Überdrucks im Pfahlinneren führen. So ermöglicht die Spannungsmessung direkt am Pfahlmantel, den Prozessablauf der Spannungsänderungen im Verlauf der Belastung sehr gut zu beschreiben.

Im Rahmen der Modellversuche konnten infolge der hydraulischen Druckerzeugung folgende physikalische Prozesse belegt werden:

1. Die im Pfahlinneren nach unten gerichtete Sickerströmung erhöht infolge des hydraulischen Widerstands die Vertikalspannung und über Querdehnung die Horizontalspannung im Korngerüst. Die Erhöhung der Horizontalspannung im Kontaktbereich Pfahl-Boden führt zu einer Steigerung der Pfahlmantelreibung und somit des Ausbruchwiderstands.
2. Die Erhöhung der Horizontalspannung im Korngerüst und ein erhöhter Porenwasserdruck belasten die Innenseite des Pfahls, was zu einer Querschnittsaufweitung des Pfahls und damit zu einer Erhöhung der

Pfahlmantelwiderstände auf der Pfahlaußenseite führt. Gleichzeitig werden die Spannungen auf der Pfahlinnenseite aufgrund der Querschnittsaufweitung des Pfahls reduziert.

3. Auf der Pfahlinnenseite im Kontaktbereich Pfahl-Boden führen Umlagerungsprozesse im Korngerüst infolge der Querschnittsaufweitung und Durchströmung des Pfahls zu einer Reduktion der Spannungen und Pfahlmantelwiderstände.
4. Die in der Versuchsreihe 3 installierte Abdichtung überträgt die Druckbelastung im Wesentlichen als Auflast, was zu einer Erhöhung der Spannung im Korngerüst und somit der Pfahlmantelwiderstände führt.

Die Versuchsreihe 1 zeigt die Spannungsdegradation zu jeder Druckstufe. Hier wurde in unterschiedlichen Messebenen die Abnahme der Spannungen auf eine Mindestspannung beobachtet. Erst bei der Druckerhöhung einer folgenden Druckstufe veränderte sich die Spannung abermals.

Bei der Betrachtung der PWD-Verläufe in den letzten beiden Druckstufen der Versuchsreihe 1 ist ein Abfall trotz eines (idealisierten) konstanten Eingangsdrucks ersichtlich. Der Abfall des Wasserdrucks innerhalb des Pfahls ist auf die Erhöhung der Durchlässigkeit und den damit verringerten hydraulischen Widerstand des Bodens zurückzuführen.

In den Versuchsreihen 1 und 2, in denen keine Abdichtung verwendet wurde, ist ein Abfall der Effektivspannung zu unterschiedlichen Zeitpunkten vor dem Start der Extraktion zu erkennen. Die Effektivspannung und damit der Ausbruchwiderstand wird durch das Durchströmen des Pfahls zwar zunächst erhöht, fällt danach jedoch sukzessive ab. Erreicht die Reduktion auf der Innenseite den Pfahlfuß, folgt ein rasches Versagen des Gesamtsystems.

Findet wie in der Versuchsreihe 3 eine verringerte oder überhaupt keine hydrodynamische Verformung des Korngerüsts infolge der Durchströmung des Pfahls statt, werden die Pfahlwiderstände weniger oder gar nicht reduziert. Die künstliche Abdichtung im Inneren des Modellpfahls in der Versuchsreihe 3 führt neben der Reduzierung der Durchströmung und damit der hydrodynamischen Kornumlagerung zu einer weiteren Erhöhung der Spannung im Korngerüst. Infolge der Druckbelastung auf die Abdichtung wird ein Großteil der Belastung als Auflast direkt an das Korngerüst übertragen. Die aus der zusätzlichen Auflast resultierende Erhöhung der

Pfahlmantelwiderstände hat einen negativen Einfluss auf die mögliche Extraktion des Pfahls. Das Gesamtsystem aus Modellpfahl und Druckerzeugung wurde in der Versuchsreihe 3 bis an die Belastungsgrenze gefahren. Bei einer weiteren Drucksteigerung wäre die innere Tragfähigkeit des Modellpfahls nicht mehr gewährleistet.

In Tabelle 7-1 sind die Ergebnisse aller Teilversuche zusammengefasst. In allen Teilversuchen der Versuchsreihe 1 wurden vier Druckstufen aufgebracht. Die Versuchsdauer der einzelnen Teilversuche lag zwischen 21 min und 32 min. In Teilversuch HO6 wurde bis zur Extraktion die Druckstufe vier mit der Belastung  $P = 800 \text{ kN/m}^2$  für 15 min aufrechterhalten. Die maximale Druckbelastung lag in der Versuchsreihe 1 zwischen  $P_{\max, \text{HO2}} = 800 \text{ kN/m}^2$  und  $P_{\max, \text{HO3}} = 810 \text{ kN/m}^2$ .

Die Versuchsdauer in der Versuchsreihe 2 lag zwischen 64 s und 88 s. Die Druckbelastung zum Zeitpunkt der Extraktion lag im Teilversuch HO4 bei  $P_{\max, \text{HO4}} = 1.279 \text{ kN/m}^2$ . Innerhalb der Versuchsreihe 2 wurde im Teilversuch HO6 die höchste Druckbelastung mit  $P_{\max, \text{HO6}} = 1.352 \text{ kN/m}^2$  erreicht.

Im Teilversuch HO7 der Versuchsreihe 3 wurde der Maximaldruck von  $P_{\max, \text{HO7}} = 1.940 \text{ kN/m}^2$  zweimal direkt nacheinander aufgebracht. Im Teilversuch HO8 erfolgte die maximale Druckbelastung von  $P_{\max, \text{HO8}} = 2.000 \text{ kN/m}^2$  nur einmal. In beiden Teilversuchen der Versuchsreihe 3 ist die Extraktion gescheitert.

*Tabelle 7-1: Zusammenfassung der Teilversuche*

| Nr. | Reihe | Versuchs-<br>dauer | $P_{\max}$                 | Last-<br>steigerung              | Bemerkung                | Extraktion  |
|-----|-------|--------------------|----------------------------|----------------------------------|--------------------------|-------------|
| HO1 | 1     | 22 [min]           | 803 [kN/m <sup>2</sup> ]   | 4 Druckstufen                    | /                        | erfolgreich |
| HO2 |       | 21 [min]           | 800 [kN/m <sup>2</sup> ]   | 4 Druckstufen                    | /                        | erfolgreich |
| HO3 |       | 32 [min]           | 810 [kN/m <sup>2</sup> ]   | 4 Druckstufen                    | /                        | erfolgreich |
| HO4 | 2     | 64 [s]             | 1.279 [kN/m <sup>2</sup> ] | linear                           | /                        | erfolgreich |
| HO5 |       | 79 [s]             | 1.345 [kN/m <sup>2</sup> ] | linear                           | /                        | erfolgreich |
| HO6 |       | 88 [s]             | 1.352 [kN/m <sup>2</sup> ] | linear                           | /                        | erfolgreich |
| HO7 | 3     | 310 [s]            | 1.940 [kN/m <sup>2</sup> ] | linear mit 2 x max.<br>Belastung | simulierte<br>Abdichtung | gescheitert |
| HO8 |       | 179 [s]            | 2.000 [kN/m <sup>2</sup> ] | linear                           | simulierte<br>Abdichtung | gescheitert |

Der Vergleich zwischen den modellierten Porenwasserdrücken für stationäre Strömungsverhältnisse mit den gemessenen Porenwasserdrücken zeigt, dass mit den Versuchsbedingungen instationäre Strömungsverhältnisse vorherrschen. Dies wird durch den Anstieg und das Abfallen der Porenwasserdrücke innerhalb der Druckstufen der Versuchsreihe 1 sichtbar. Aufgrund der instationären Verhältnisse ist nicht auszuschließen, dass die Extraktion bereits bei niedrigeren Druckstufen aufgetreten wäre, wenn die Druckaufrechterhaltung länger bestanden hätte.

Die Spannungsverläufe der PWD- und EDh-Sensoren im Boden zeigen einen geringeren Einfluss des Einleitungsdrucks als die Sensoren am Modellpfahl. Der Einfluss nimmt mit steigender Entfernung zum Modellpfahl weiter ab. Die Verläufe der Bodensensoren parallel zum Modellpfahl zeigen eine hohe Vergleichbarkeit mit den Pfahlsensoren.

Die Totalspannungsgeber unterhalb des Modellpfahls zeigen hingegen einen entgegengesetzten Spannungsverlauf. In allen Versuchsreihen kommt es mit dem Start der Druckerzeugung zu einer Abnahme der Effektivspannung im Boden unterhalb des Pfahlfußes. Die Verläufe können Abbildung 7-13 und Abbildung 7-26 entnommen werden. Die Abnahme der Effektivspannung unterhalb des Pfahlfußes könnte auf die nach oben gerichteten Sickerströmungskräfte zurückgeführt werden. Nachdem das durchfließende Wasser den Modellpfahl am Pfahlfuß verlässt ändert sich die Richtung der Sickerströmung von einer Vertikalrichtung nach unten hin zur druckfreien Oberfläche.

## 8 Vergleich der Messergebnisse mit Erkenntnissen aus der Literatur

Der Vergleich der gewonnenen Ergebnisse mit vorhandenen Untersuchungen bietet die Möglichkeit, die Forschungsergebnisse zu validieren. Wurden bisher keine adäquaten bzw. vergleichbaren Untersuchungen publiziert, können ggf. Erkenntnisse aus Untersuchungen mit vergleichbaren Randbedingungen herangezogen werden.

Im Jahr 2014 haben LEHANE ET AL. Extraktionsversuche an Suction Buckets in der Zentrifugeneinrichtung an der Western University in Perth, Australien, durchgeführt. Das Tragverhalten eines Suction Buckets und eines Rohrpfahls kann über die Reibungsinkremente im Kontaktbereich Wand-Boden beschrieben werden. Erfolgt die Vereinfachung, dass die Widerstandsanteile ausschließlich aus der Reibung im Kontaktbereich Wand-Boden bestehen, ist zumindest ein grober Vergleich zwischen dem statischen Tragverhalten eines Suction Buckets mit dem eines Rohrpfahls möglich.

Die Installation eines Suction Buckets ist hingegen nicht mit der eines Rohrpfahls zu vergleichen. Die Installationsvariante, im Speziellen die Schlagrammung, hat nach FISCHER [2021] oder LÜKING [2010] einen großen Einfluss auf die Spannungsänderung in der Scherzone. Nach FISCHER [2021] kann von einer Steigerung der Horizontalspannung in der Scherzone oberhalb des Pfahlfußes infolge der Schlagrammung ausgegangen werden.

In der Versuchseinrichtung des IGG-TUBS wird eine dichte bis sehr dichte Lagerungsdichte mit einem  $q_c > 20$  MPa im Bereich des Pfahlfußes erreicht. Nach FISCHER [2021] ist in der Versuchseinrichtung des IGG-TUBS mit einer Überkonsolidation des Modellbodens zu rechnen. In Kombination mit den Dimensionen des Modellpfahls von  $D_a = 0,61$  m und  $L_p = 2,7$  m sowie der Schlaganzahl  $N_{10}$  pro 10 cm Eindringung während der Pfahlinstallation (vgl. Abbildung 6-23) ist von einer erhöhten Spannung und damit einem erhöhten Ausbruchwiderstand infolge der Installation auszugehen.

Tabelle 8-1 zeigt die prognostizierte Tragfähigkeit der in Kapitel 3.2 beschriebenen Berechnungsansätze. Die auf Erfahrungswerten basierenden Methoden des erdstatischen Ansatzes und der API GEO- $\beta$ -Methode unterschätzen die

nachgewiesene Tragfähigkeit. Die CPT basierende ICP-Methode für auf Zug beanspruchte Rohrpfähle zeigt eine gute Übereinstimmung mit den erzielten Ergebnissen der STT.

*Tabelle 8-1: Vergleich Literaturansätze zur Tragfähigkeitsbestimmung mit Modellversuchen*

| Ansatz                         | Gleichung    | Tragfähigkeit     |
|--------------------------------|--------------|-------------------|
| Erdstatistischer Ansatz        | 3-3, 3-4     | 33 kN             |
| API GEO - $\beta$ -Methode     | 3-8          | 78 kN             |
| ICP-Methode für Zugbelastungen | 3-9 bis 3-14 | 121 kN            |
| Statische Probelastungen       |              | 100 kN bis 112 kN |

Werden die in den Versuchen aufgebrachten Eingangsdrücke in der Druckkammer wie in Kapitel 3.4 mit der Gleichung 3-35 in eine einwirkende Kraft  $F_p$  umgerechnet, kann die Belastung auf den Modellpfahl betrachtet werden. In Tabelle 8-2 sind die erzeugten Druckkräfte auf die Unterseite des Pfahldeckels zusammengeführt.

*Tabelle 8-2: Mobilisierte Druckkraft  $F_p$  aus max. Eingangsdruck  $P_{max}$*

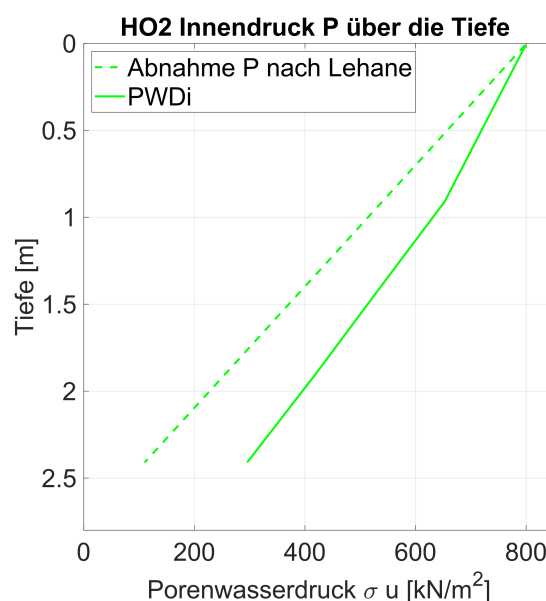
| Versuch                | Reihe | $P_{max}$                  | $F_p$    |
|------------------------|-------|----------------------------|----------|
| HO1                    | 1     | 803 [kN/m <sup>2</sup> ]   | 230 [kN] |
| HO2                    |       | 800 [kN/m <sup>2</sup> ]   | 229 [kN] |
| HO3                    |       | 810 [kN/m <sup>2</sup> ]   | 232 [kN] |
| HO4                    | 2     | 1.279 [kN/m <sup>2</sup> ] | 367 [kN] |
| HO5                    |       | 1.345 [kN/m <sup>2</sup> ] | 386 [kN] |
| HO6                    |       | 1.352 [kN/m <sup>2</sup> ] | 388 [kN] |
| HO7 (keine Extraktion) | 3     | 1.940 [kN/m <sup>2</sup> ] | 556 [kN] |
| HO8 (keine Extraktion) |       | 2.000 [kN/m <sup>2</sup> ] | 573 [kN] |



Die in den Teilversuchen mobilisierten Druckkräfte sind im Vergleich zu den statischen Pfahlwiderständen aus Tabelle 8-1 im Faktor 2 bis 5 größer (vgl. Tabelle 8-2).

Die in Kapitel 7 präsentierten Ergebnisse zeigen eine Zunahme der Effektivspannung infolge der Druckerzeugung. Die Erhöhung der Vertikalspannung  $\Delta\sigma'_v$  und damit auch der Horizontalspannung  $\Delta\sigma'_h$  im Pfahlinneren führt zu einer Erhöhung des Gesamtwiderstands. Das wird von LEHANE ET AL. [2014] in den Untersuchungen an Suction Buckets bestätigt. Erfährt der Pfahl infolge der Druckbelastung eine laterale Dehnung, kann das, wie die Ergebnisse in Kapitel 7 zeigen, eine Spannungszunahme auf der Pfahlaußenseite erzeugen.

Zur Beurteilung der Spannungszunahme haben LEHANE ET AL. [2014] die steigenden Vertikalspannungen in Abhängigkeit des Eingangsdrucks formuliert. An kleinmaßstäblichen Versuchen und in numerischen Simulationen wurde der Zusammenhang zwischen der Druckabnahme im Inneren der Suction Buckets mit steigender Tiefe festgestellt. Nach Gleichung 3-36 in Kapitel 3.4 besteht ein linearer Zusammenhang zwischen der Tiefe  $z$  und dem Druck  $u$ .

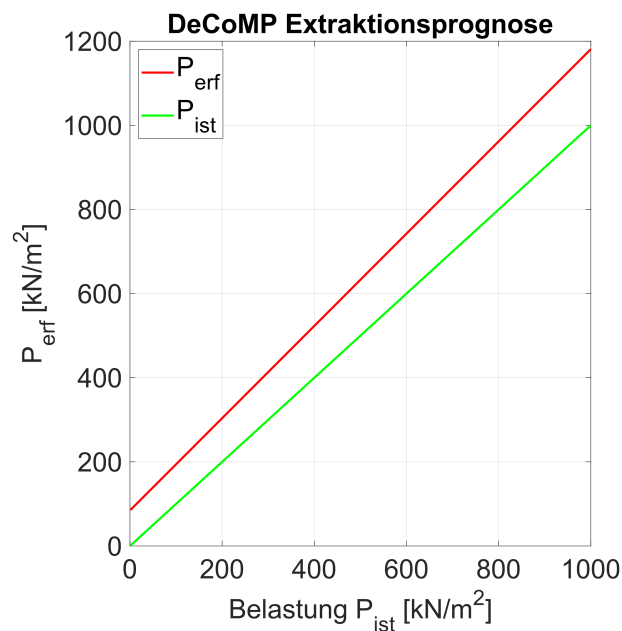


**Abbildung 8-1: Modellierter Druckabnahme im Pfahlinneren nach LEHANE ET AL. [2014] und gemessene PWDi – Teilversuch HO2**

Abbildung 8-1 verdeutlicht die prognostizierte Abnahme des Eingangsdrucks und die Messergebnisse der PWDi über die Tiefe. Der gemessene Druckverlauf im Pfahlinneren zeigt einen Knick zwischen dem Einleitungsdruck in der Druckkammer und der obersten Sensorebene PWDi 82. Der gemessene Wasserdruck fällt

anschließend näherungsweise linear. Der Verlauf des Wasserdrucks nach LEHANE ET AL. [2014] prognostiziert eine stärkere Abnahme. Dies wird auf das größere L/D-Verhältnis von ca.  $L/D = 1,8$  eines Suction Buckets zurückgeführt.

Wie den Kapiteln 6.3 und 7 zu entnehmen ist, konnte der Kontaktbereich zwischen Modellpfahl und Boden messtechnisch erfasst werden. Die auf den Messergebnissen basierende Beschreibung der physikalischen Prozesse in Kapitel 7 zeigt eine Degradation der horizontalen Effektivspannung bei ausreichender Durchströmung des Modellpfahls. Diese Degradation findet in der Formulierung von LEHANE ET AL. [2014] keine Berücksichtigung. Die Berechnung des zu erwartenden Gesamtwiderstands im Rahmen einer Extraktion durch hydraulischen Überdruck führt daher zu einer Überschätzung. Wie der Gleichung 3-41 in Kapitel 3.4 entnommen werden kann, wird die erforderliche Belastung  $P_{\text{erf}}$  zum Belastungszeitpunkt  $P_{\text{ist}}$  ermittelt. Werden für die möglichen Druckbelastungen  $P_{\text{ist},(n=\infty)}$  die jeweiligen erforderlichen Drücke  $P_{\text{erf}}$  bestimmt, kann der Verlauf der Prognose visualisiert werden. In Abbildung 8-2 sind die Verläufe der Belastung  $P_{\text{ist}}$  und die zum Belastungszeitpunkt benötigte Druckbelastung  $P_{\text{erf}}$  dargestellt. Die Eingangsgrößen sind Tabelle 6-1 und Tabelle 6-2 zu entnehmen.



*Abbildung 8-2: Erforderliche Druckbelastung  $P_{\text{erf}}$  zum Belastungszeitpunkt  $P_{\text{ist}}$*

Schneiden sich die beiden Geraden nicht, bzw. laufen diese wie in Abbildung 8-2 bei steigender Belastung weiter auseinander, ist die Summe der Widerstände aus Mantelreibung und Spannungserhöhung infolge der Druckbelastung auf die innere

Bodensäule immer größer als der Einleitungsdruck. Nach der Prognose für die absolvierten Modellversuche in Abbildung 8-2 ist die Extraktion mittels hydraulischen Überdrucks ohne Einbeziehung der Durchströmung und Spannungsreduktion nicht möglich.

Für die Versuchsreihe 3 mit künstlicher Abdichtung ist die Prognose hingegen als treffend anzusehen. Die Ergebnisse der Versuchsreihen 1 und 2 zeigen jedoch eine Widerstandsreduktion infolge hydrodynamischer Verformungen, die von LEHANE ET AL. [2014] nicht berücksichtigt wird. Die Widerstandsreduktion wird im Folgenden als  $\Delta\sigma'_{h,HB}$  definiert. Wie die Versuchsergebnisse zeigen, hat  $\Delta\sigma'_{h,HB}$  einen maßgeblichen Anteil an einer möglichen Extraktion.

Die Prognose der Extraktion und damit die Bestimmung der erforderlichen Druckbelastung  $P_{\text{eff}}$  zeigt ohne Berücksichtigung der Spannungsreduktion eine Überschätzung der mobilisierbaren Gesamtwiderstände. Unter Einbeziehung der Versuchsreihe 3, bei der eine reduzierte Durchlässigkeit infolge einer künstlichen Abdichtung vorherrschte, kann der Ansatz nach LEHANE ET AL. [2014] dennoch für eine erste Abschätzung und Dimensionierung einer geplanten Extraktion genutzt werden.

Die Formulierung eines Ansatzes zur Berücksichtigung der Spannungsreduktion  $\Delta\sigma'_{h,HB}$  ist anhand der Versuchsergebnisse nicht möglich. Sowohl in den Ergebnissen der Versuchsreihe 1 als auch der Versuchsreihe 2 ist eine ausreichende Reduktion der Pfahlwiderstände erzielt worden. Der jeweilige Versuchsablauf zeigt allenfalls eine übereinstimmende Tendenz, aber keine direkten Abhängigkeiten zwischen Eingangsdruck, Durchflussmenge und Widerstandsreduktion. Für die Erfassung und Beschreibung der Spannungsreduktion sollten Versuche mit einer sofortigen Druckerzeugung und Aufrechterhaltung ohne Stufenwechsel absolviert werden. Die daraus resultierenden Verläufe können eine Möglichkeit zur Modellierung der Spannungsreduktion bieten.

## 9 Auswirkung der Extraktion auf die Lagerungsdichtung des anstehenden Bodens

Die Standorte in der deutschen AWZ, an denen OWP errichtet werden können, sind begrenzt. Die derzeit genutzten Standorte sollten daher so behandelt werden, dass auch in der Zukunft die Neuerrichtung von Offshore-Gründungsstrukturen möglich ist. Ein wesentlicher Punkt ist dabei die Störung des Untergrunds infolge der Veränderung des Spannungszustands im Boden nach der Pfahlextraktion. In diesem Kapitel werden die Erkenntnisse aus den durchgeführten Modellversuchen bzgl. der Beeinträchtigung des Untergrunds dargestellt und Lösungen für eine Weiternutzung präsentiert.

Wie der Versuchsbeschreibung in Kapitel 6.4 entnommen werden kann, erfolgten im Rahmen der Versuchsdurchführung verschiedene Untersuchungen zur Bestimmung der Ausgangssituationen. So wurde in allen Teilversuchen die Lagerungsdichte vor der Pfahlinstallation mittels CPT-Sondierungen bestimmt. Auf der Basis der Sondierungen konnte eine hohe Vergleichbarkeit nachgewiesen werden.

Neben der Validierung der Eingangsgrößen im Rahmen der Versuchsvorbereitung wurden auch CPT-Sondierungen nach den erfolgreichen Extraktionen durchgeführt. Um Wasserwegigkeiten während der Versuchsdurchführung zu vermeiden, wurden die Sondierungen vor der Extraktion außerhalb des Pfahlbereichs durchgeführt. Abbildung 9-1 zeigt exemplarisch die CPT-Ergebnisse der Versuchsreihen 1 (HO2) und 2 (HO5). Die Einzelverläufe zeigen leichte Abweichungen, generell aber eine hohe Übereinstimmung.

Abbildung 9-2 zeigt die durchgeführten CPT-Sondierungen nach der Extraktion im Teilversuch HO2. Die Störung bzw. die Auflockerung im ehemaligen Standbereich des Modellpfahls ist deutlich erkennbar. Wie der Vergleich von Abbildung 9-1 mit Abbildung 9-2 verdeutlicht, ist bereits in einer Entfernung von 60 cm zur ursprünglichen Pfahlwand kaum ein Unterschied zwischen den CPT-Verläufen vor und nach der Extraktion ersichtlich.

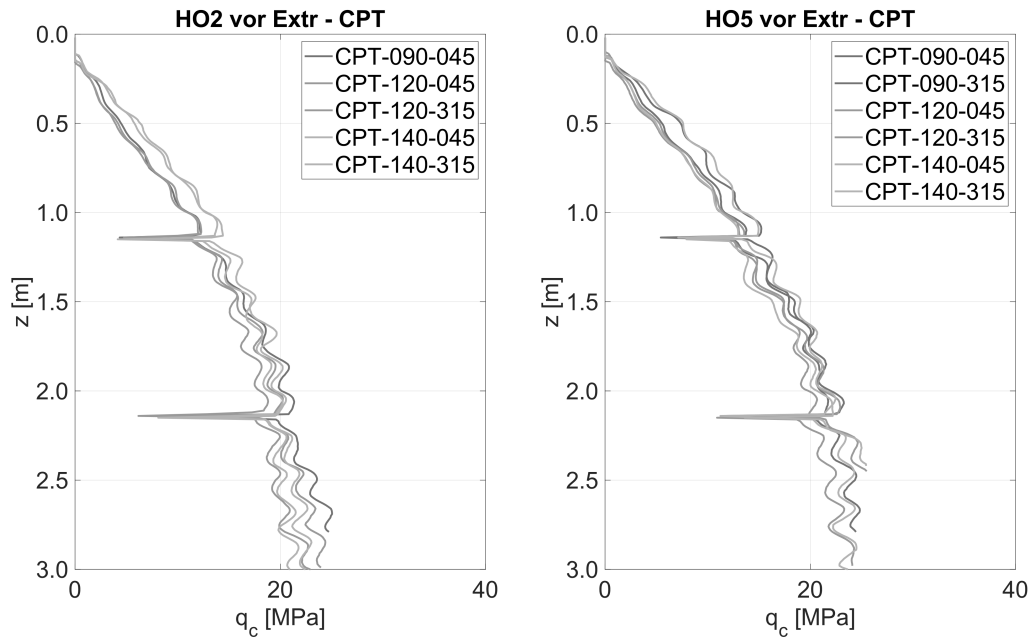


Abbildung 9-1: Zusammengefasste CPTs vor Extraktion der Teilversuche HO2 (links) und HO5 (rechts)

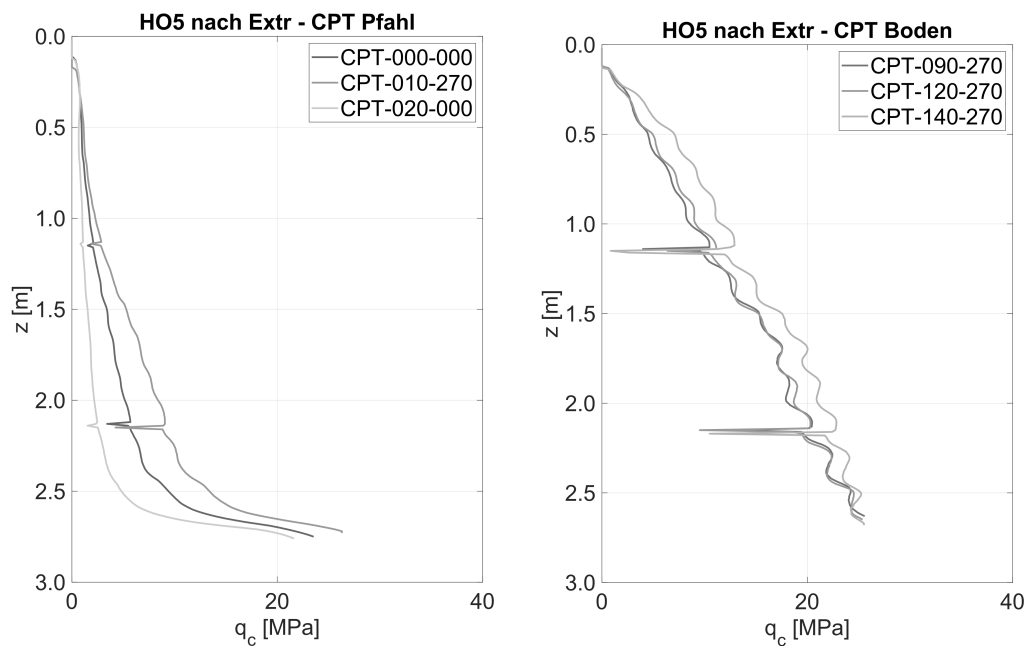


Abbildung 9-2: CPT-Verläufe im Bereich des Pfahls (links) und außerhalb (rechts) nach der Extraktion – Teilversuch HO5

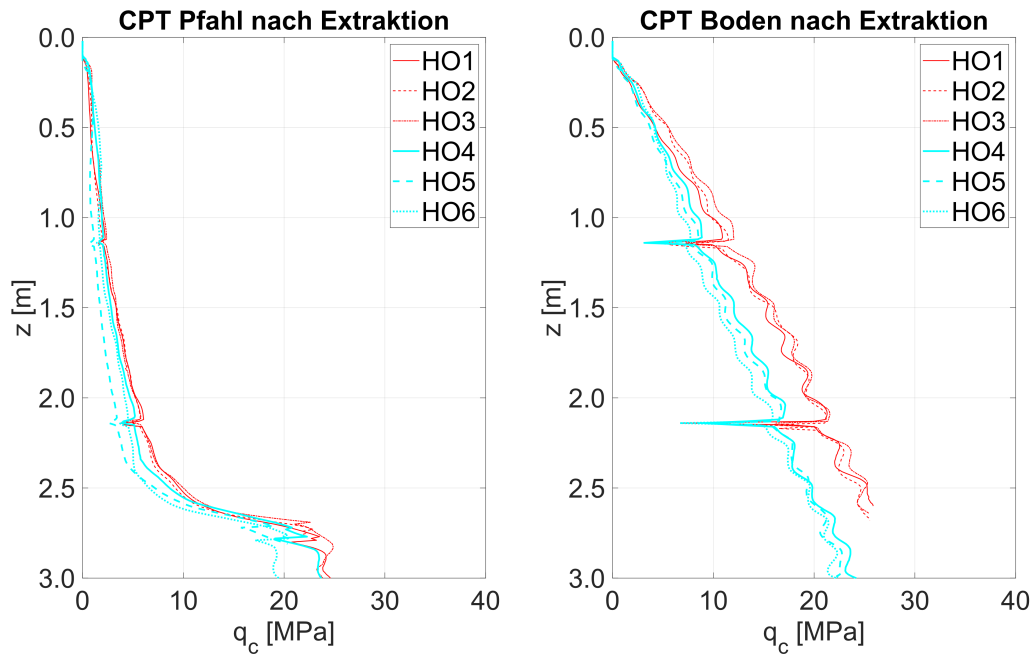


Abbildung 9-3: Gemittelte CPT-Verläufe aller Extraktionen im Bereich des Pfahls (links) und außerhalb (rechts) nach der Extraktion

Anhand der gemittelten CPT-Sondierungen können nun Vergleiche über die Einwirkung auf den Boden der Versuchsreihen 1 und 2 angestellt werden. So ist eine starke Auflockerung des Bodens im ehemaligen Standbereich des Modellpfahls nach allen Extraktionen zu erkennen. Unterhalb des Pfahlfußes ist ein Anstieg der Bodenwiderstände zu beobachten. Außerhalb des ehemaligen Standbereichs des Modellpfahls scheinen die CPT-Verläufe der Versuchsreihe 1 eine größere Störung zu erfahren. Dies bedeutet, dass bei längerer Belastung bzw. Durchströmung ein größerer Störungsbereich zu erwarten ist.

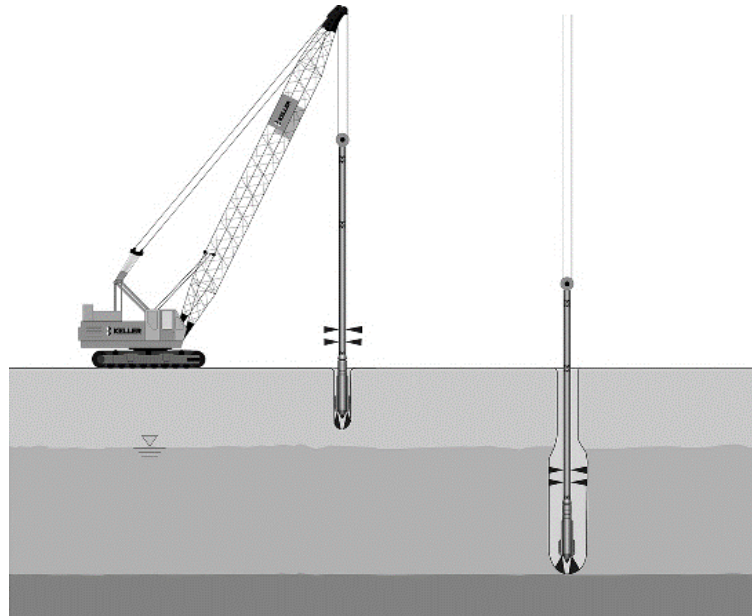
Die in den Versuchen festgestellte Reduktion der Lagerungsdichte infolge der Pfahlextraktion kann zu Beeinträchtigungen in der Wiedernutzung des Standorts führen. Zur Stabilisierung und Verbesserung des Untergrunds gibt es aus dem herkömmlichen Spezialtiefbau ein breites Angebot an Verfahren [WEHR & TRUNK, 2019]. Unter Einbeziehung von Offshore-Randbedingungen bieten Variationen des Tiefenrüttelverfahrens hohe Erfolgsaussichten für eine Baugrundverbesserung in großen Tiefen. Nach THURNER ET AL. [2020] deckt die Rütteldruckverdichtung für nichtbindige Böden und die Rüttelstopfverdichtung für bindige Böden einen Großteil der in Deutschland anzutreffenden Untergründe ab. Das lässt sich ebenfalls auf die Böden der deutschen Nordsee übertragen.

Wie den CPT-Ergebnissen im Bereich des extrahierten Pfahls und im umgebenden Boden nach der Extraktion (s. Abbildung 9-2) entnommen werden kann, ist die Störung des Bodens auf den Standort des Pfahls beschränkt. Bereits in einer Entfernung von 0,30 m ( $0,5 \times D_{P\text{fahl}}$ ) ist lediglich eine geringe Reduktion des Sondierwiderstands festgestellt worden. In einer Entfernung von 0,8 m ( $2,33 \times D_{P\text{fahl}}$ ) zum Modellpfahl war keine signifikante Veränderung der Lagerungsdichte festzustellen. Für die Randbedingungen der absolvierten Modellversuche kann die Fläche  $A_{red}$  mit einer reduzierten Lagerungsdichte mit der folgenden Formel bestimmt werden:

$$A_{red} = \pi \cdot \left( \frac{7 \cdot D_{P\text{fahl}}}{3} \right)^2 / 4 \quad 9-1$$

In Abbildung 9-4 ist der systematische Ablauf einer Rütteldruckverdichtung dargestellt. Der Rüttler wird freihängend und im angeschalteten Zustand bis in die erforderliche Tiefe abgeteuft. Zur Verdichtung des anstehenden Bodens wird der Rüttler anschließend in 0,5 – 1,0 m Schritten gezogen.

Im Gegensatz zu den Vibratoren für die Pfahlinstallation respektive die Extraktion ist die Bewegungsrichtung der Unwuchtmassen beim Tiefenrüttler horizontal ausgerichtet [THURNER ET AL., 2020]. Die Verdichtung erfolgt durch die Auflösung des Kontaktbereichs im Korngerüst. Die durch den Rüttler verursachten Vibrationen werden in den anstehenden Boden ausgestrahlt. Werden die Bodenpartikel auf etwa 0,5 g (Gravitationskraft) beschleunigt, erfolgt eine Verdichtung durch Umlagerung und Verkleinerung des Porenvolumens des Bodens [NENDZA, 2006].



*Abbildung 9-4: Rütteldruck mit Kranführung [WEHR & TRUNK, 2019]*

Nach WEHR & TRUNK [2019] kann ein nichtbindiger Boden mit einer Rütteldruckverdichtung bis in Tiefen von über 65 m wirkungsvoll verdichtet werden. Der im Rahmen der Verdichtung entstehende Trichter kann durch die Zugabe zusätzlichen Materials geschlossen werden.

Für eine weitergehende Betrachtung der Funktionsweise sowie der Randbereiche wird auf [WABERSECK, 2013] und [WEHR & TRUNK, 2019] verwiesen.



### 10 Resümee

Die in den kommenden Jahren steigende Anzahl zurückzubauender Offshore-Pfahlgründungen zeigt die Notwendigkeit, hierfür geeignete Verfahren zu entwickeln und zu erproben. Die bisherigen Kenntnisse und Forschungsergebnisse auf dem Gebiet der Extraktion von Rohrpfählen mittels hydraulischen Überdrucks bieten nur oberflächliche Beschreibungen, ohne die Interaktion aus Pfahl, Boden und Wasserdruck zu berücksichtigen.

Bisherige Untersuchungen der Pfahl-Boden-Interaktion konnten das Spannungsverhalten im Kontaktbereich Pfahl-Boden nicht adäquat erfassen. Die validierten Ergebnisse der im Rahmen des Vorhabens DeCoMP entwickelten Totalspannungsgeber auf der Pfahloberfläche lieferten einen Einblick in die Pfahl-Boden-Interaktion. So war es möglich, sowohl die Spannungszunahme als auch die Spannungsabnahme während der Extraktionsversuche zu erfassen und zu beurteilen.

Die Auswirkung der Belastungsgeschwindigkeit sowie die Übertragung auf das Korngerüst im Pfahlinnenen wurde mittels großmaßstäblicher Modellversuche untersucht. Dabei wurde gezielt der Einfluss auf die Spannungsreduktion mit Blick auf die Erfolgsaussichten betrachtet. Die Versuche unterschieden sich zum einen durch die Belastungsgeschwindigkeit und zum anderen durch die Simulation einer Schicht mit geringer Durchlässigkeit im Pfahlinnenen. In der Versuchsreihe 1 wurden einzelne Druckstufen angefahren und jeweils 5 min aufrechterhalten. Die Lastaufbringung der Versuchsreihen 2 und 3 erfolgte hingegen kontinuierlich mit einer konstanten Geschwindigkeit. In der Versuchsreihe 3 wurde eine PVC-Folie zur Simulierung einer Schicht mit geringer Durchlässigkeit nach der Pfahlinstallation im Inneren auf dem Boden installiert. So konnte das Verhalten bei einer limitierten Durchströmung des Pfahlinnenen beobachtet werden.

In allen Versuchsreihen konnte ein Anstieg der Effektivspannung infolge der aufgebrachten Sickerströmungskraft und des Porenwasserdrucks sowohl auf der Pfahlinnen- als auch auf der Pfahlaußenseite festgestellt werden. Bei höherer Steifigkeit des Systems ist ein geringerer Anstieg der Effektivspannung auf der Pfahlaußenseite zu erwarten.

Es zeigt sich, dass die Durchströmung des Pfahlinnenen einen entscheidenden Einfluss auf den Pfahlwiderstand gegen die Extraktion hat. So konnte in den Versuchsreihen 1 und 2 ein Abfall der Effektivspannung auf der Pfahlinnenseite in allen Messebenen beobachtet werden. Als Ursache der Spannungsdegradation wurde die Querschnittsaufweitung des Pfahls infolge der Belastung gegen die Pfahlinnenseite und die hydrodynamische Verformung des Korngerüsts identifiziert, welche die Scherzone, also den Kontaktbereich Pfahl-Boden, verändert. Die dargestellten Ergebnisse bei einer stufenweisen Druckerhöhung zeigen eine Abhängigkeit zwischen der Spannungsabnahme infolge der hydrodynamische Verformungen und der Druckerhöhung. Die Spannung degradiert während der Druckaufrechterhaltung auf ein fast konstantes Niveau. Unmittelbar vor der Extraktion fällt die Spannung wieder und ein anschließendes Versagen des Modellpfahls war zu beobachten.

Ohne diese Phasen der Spannungsdegradation muss, wie in Versuchsreihe 2 gezeigt, für eine erfolgreiche Extraktion eine höhere Druckbelastung aufgebracht werden. Daneben ist die Erkenntnis zu erwähnen, dass zeitliche Komponenten bei der Gefügeänderung auf der Pfahlinnenseite und der damit verbundenen Reduktion der Effektivspannung eine Rolle spielen. Diese Reduktion der Effektivspannung und damit des Pfahlwiderstands konnte bei einer linearen Druckerzeugung nicht im gleichen Maße nachgewiesen werden, sodass in der Versuchsreihe 2 höhere Drücke für die Extraktion des Modellpfahls benötigt wurden.

Die Versuchsreihe 3 hat gezeigt, dass eine Abdichtung innerhalb des Pfahls die Spannungsreduktion stark behindert. Eine solche Schicht mit geringer Durchlässigkeit könnte entweder wie in den Versuchen künstlich installiert werden, oder eine bindige Bodenschicht sein. Der Pfahl konnte in der Versuchsreihe 3 trotz einer Druckbelastung von bis zu  $2.000 \text{ kN/m}^2$  nicht extrahiert werden. Der Erfolg der Extraktion ist in diesem Fall ungewiss.

Vergleichsrechnungen zur Prognostizierung der erforderlichen Druckbelastung haben die fehlende Einbeziehung der Widerstandsreduktion durch die Umlagerungsprozesse im Kontaktbereich Pfahl-Boden gezeigt. Die Prognose nach LEHANE ET AL. [2014] lässt keine Extraktion für die absolvierten Modellversuche des Vorhabens DeCoMP erwarten. Diese Prognose wird von der Versuchsreihe 3 bestätigt, in der eine reduzierte Durchströmung simuliert wurde. Wird eine hydrodynamische

Bodenumlagerung infolge der Durchströmung des Modellpfahls erreicht, verliert die Prognose allerdings ihre Anwendbarkeit. Eine Erweiterung des bestehenden Ansatzes von LEHANE ET AL. [2014] war mit dem gewählten Versuchsaufbau nicht möglich. Hierfür sind weitere Untersuchungen zur Identifizierung der Spannungsreduktion und schließlich der Formulierung der Abnahme nötig.

Der vorhandene Untergrund erfährt durch die Extraktion eine lokale Beeinträchtigung der Lagerungsdichte. Durch CPT-Sondierungen des ungestörten Bodens konnte der Einfluss der Extraktion betrachtet werden. Dazu wurden die CPT-Ergebnisse im ungestörten Zustand vor der Pfahlinstallation mit den Ergebnissen nach der Extraktion verglichen. An der Stelle, an der der Pfahl zuvor gestanden hatte, kam es zu einer lokalen Auflockerung des Bodens. Die Auflockerung nimmt mit steigendem Abstand zum Pfahl ab, sodass in einer Entfernung von 60 cm ( $1 \cdot D$ ) lediglich eine geringe Veränderung der Lagerungsdichte festgestellt werden konnte.

Die präsentierten Ergebnisse zeigen bisher unbekannte Phänomene, die in Verbindung mit den aufgestellten Hypothesen erklärt werden konnten. Für zukünftige Fragestellungen bei dem Rückbau von Pfahlgründungen werden diese Erkenntnisse im Dimensionierungs- und Durchführungsprozess sehr hilfreich sein.

Zur Beschreibung der Widerstandsabnahme und Formulierung eines Berechnungsansatzes könnten die genutzten Versuchsparameter in numerischen Simulationen implementiert werden.

## 11 Literatur

**Aksoy, H. S., Gor, M., Inal, E., 2016**

*A new design chart for estimating friction angle between soil and pile materials.*

**API GEO, 2011**

*Geotechnical and Foundation Design Considerations.*

**API, 2007**

*Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Off-shore Platforms – Working Stress Design.* RP 2A-WSD. Washington.

**Axelsson, G., 2000**

*Long-Term set-up of driven piles in sand.* Schweden.

**Berger, G., 1986**

*Einfluss der Standzeit auf die Tragfähigkeit gerammter Zugpfähle.*

**BMWK, 2022**

*Eröffnungsbilanz Klimaschutz* [online]. Verfügbar unter:

[https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111\\_eroeffnungsbilanz\\_klimaschutz.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=22](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=22)

**Bolton, M. D., 1986**

*The strength and dilatancy of sands.* 36.

**BSH, 2021**

*Standard Konstruktion - Mindestanforderungen an die konstruktive Ausführung von Offshore-Bauwerken in der ausschließlichen Wirtschaftszone (AWZ).* BSH-Nr. 7005.

**BSH, 2022**

*Entwurf Flächenentwicklungsplan.*

**Bundesregierung, 2022**

*Klimaschutzpaket der EU-Kommission* [online] [Zugriff am: 29. Juni 2022]. Verfügbar unter: <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/europa/fit-for-55-eu-1942402>

**Busch, K.-F., Luckner, L., Tiemer, K., Mattheß, G., 1993**

*Geohydraulik.* 3., neubearb. Aufl. Berlin: Borntraeger. Lehrbuch der Hydrogeologie. Bd. 3. ISBN 3443010040.

**Chow, F. C., 1996**

*Investigations into the behaviour of displacement piles for offshore foundations.*  
London UK.

**Chow, F. C., Jardine, R. J., Brucy, F., Nauroy, J. F., 1998**

*Effects of Time on Capacity of Pipe Piles in Dense Marine Sand.* 124.

**Coronel, M., Elkadi, A., Slot, H., Hendriks, C., 2020**

*HyPE-ST. Hydraulic pile extraction scale tests for testing the removal of piles from the soil at the end of their operational life.*

**Davis, A., Plumelle, C., 1979**

*Comportement des tirants d'ancrage dans un sable fin.*

**Delmag, 2002**

*Betriebsanweisung Dieselramme Delmag D2.*

**Deutsche Windguard, 2022**

*Status des Offshore-Windenergieausbaus in Deutschland, Jahr 2022.*

**Dührkop, J., Siegl, K., Heins, E., Pucker, T., 2019**

*Bemessung von XXL-Monopiles. Aktuelle Erfahrungen und Herausforderungen im Geotechnischen Design.* Braunschweig: Institut für Grundbau und Bodenmechanik Technische Universität Braunschweig. Mitteilung des Instituts für Grundbau und Bodenmechanik, Technische Universität Braunschweig. Heft Nr. 107. ISBN 3927610992.

**EA-Pfähle, 2012**

*Empfehlungen des Arbeitskreises "Pfähle".* 2., erg. und erw. Aufl. Berlin: Ernst & Sohn. ISBN 978-3-433-60156-3.

**Eckardt, S., Spielmann, V., Ebojie, M., Vajhøj, J., Varmaz, A., Abée, S., Bösche, J., Klein, J., Scholz, L., Köhler, B., Tremer, P., Rausch, S., 2022**

*Handbuch zum Rückbau von Offshore-Windparks - Rahmenbedingungen, Technik, Logistik, Prozesse, Szenarien und Nachhaltigkeit:* Hochschule Bremen.

**Fischer, J., 2021**

*Ramminduzierte Spannungsfeldänderungen im Nahbereich von Rohrprofilen großen Durchmessers.* Braunschweig. Mitteilung des Instituts für Geomechanik und

Geotechnik, Technische Universität Braunschweig. Heft Nr. 111. ISBN 9783948141035.

**Foray, P., Balachowski, L., Colliat, J.-L., 1998**

*Bearing capacity of model piles driven into dense overconsolidated sands.* 35.

**Fraunhofer IWES, 2022**

*Weiterentwicklung der Rahmenbedingungen zur Planung von Windenergieanlagen auf See und Netzanbindungssystemen.*

**Fugro, 1996**

*EURIPIDES database report, Vol. 1 - 5.* Leidschendam, Niederlande.

**GAVIN, K., R.J. JARDINE, K. KARLSRUD und B. LEHANE, Hg., 2015**

*The effect of pile ageing on the shaft capacity of offshore piles in sand:* Frontiers in Offshore Geotechnics III - Proceedings of the 3rd International Symposium on Frontiers in Offshore Geotechnics, ISFOG 2015.

**Gjødvad, J. F., Ibsen, M. D., 2016**

*MARE-WINT.* Cham: Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-39094-9.

**Grabe, J., König, F., 2006**

*Zeitabhängige Traglaststeigerung von Pfählen am Beispiel der Elbphilharmonie.* 83.

**Grundbau-Taschenbuch 3, 2018**

*Grundbau-Taschenbuch* [online]. 8. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn. ISBN 978-3-433-03153-7. Verfügbar unter: <http://www.ernst-und-sohn.de/grundbau-taschenbuch-teil-3-gr%C3%BCndungen-und-geotechnische-bauwerke>

**Henke, S., 2013**

*Untersuchungen zur Pfropfenbildung infolge der Installation offener Profile in granularen Böden.* Zugl.: Hamburg-Harburg, Techn. Univ., Institut für Geotechnik und Baubetrieb, Habil.-Schr., 2013. Erstaussg. Hamburg: Techn. Univ. Hamburg-Harburg Inst. für Geotechnik und Baubetrieb. Veröffentlichungen des Instituts für Geotechnik und Baubetrieb. 29. ISBN 978-3-936310-31-3.

**Hinzmann, N., Lehn, P., Gattermann, J., Stahlmann, J., 2023**

*Großmaßstäbliche Untersuchungen technischer Lösungen zum Rückbau von Gründungspfählen von Offshore-Windenergieanlagen. Abschlussbericht* [online]. Verfügbar unter: <https://www.tu-braunschweig.de/igb/forschung/decomp>

**Hinzmann, N., Stein, P., Gattermann, J., Bachmann, J., Duff, G., 2017**  
*Measurements of hydro sound emissions during internal jet cutting during monopile decommissioning.*

**Hinzmann, N., Stein, P., Gattermann, J., Stahlmann, J., 2019**  
*DeCoMP - Großmaßstäbliche Modellversuche zur Widerstandsreduktion für den vollständigen Rückbau von Offshore Monopfählen.* Mitteilung des Instituts für Geomechanik und Geotechnik, Technische Universität Braunschweig. 107, S 469-485. ISBN 3-927 610-99-2.

**Jardine, R. J., Lehane, B. M., Everton, S. J., 1993**  
*Friction Coefficients for Piles in Sands and Silts.* 28.

**Jardine, R., Chow, F., Overy, R., Standing, J., 2005**  
*ICP design methods for driven piles in sands and clays.* London: Thomas Telford; Imperial College. ISBN 9780727732729.

**Klos, J., Tejchman, A., 1981**  
*Bearing Capacity Calculation for Pipe Piles.*

**Lehane, B. M., ELKHATIB, S., TERZAGHI, S., 2014**  
*Extraction of suction caissons in sand.* 64.

**Lehane, B. M., Gavin, K. G., 2001**  
*Base Resistance of Jacked Pipe Piles in Sand.* 127.

**Lehane, B. M., Schneider, J. A., Xu, X., 2005**  
*The UWA-05 method for prediction of axial capacity of driven piles in sand.*

**Lüking, J., 2010**  
*Tragverhalten von offenen Verdrängungspfählen unter Berücksichtigung der Pfropfenbildung in nichtbindigen Böden:* Universität Kassel. Schriftenreihe Geotechnik. H. 23. ISBN 978-3-86219-046-1.

**MMB, 2003**  
*Merkblatt Materialtransport im Boden. BAW Merkblatt.*

**Nendza, M., 2006**  
*Untersuchungen zu den Mechanismen der dynamischen Bodenverdichtung bei Anwendung des Rütteldruckverfahrens.* Braunschweig. Mitteilung des Instituts für Geomechanik und Geotechnik, Technische Universität Braunschweig. Heft Nr. 81.

**Paikowsky, S. G.**, 1990

*The Mechanism of Pile Plugging in Sand.*

**Paikowsky, S. G., Whitman, R. V.**, 1990

*The effects of plugging on pile performance and design.* 27.

**Paikowsky, S. G., Whitman, R. V., Baligh, M. M.**, 1989

*A new look at the phenomenon of offshore pile plugging.* 8.

**Rausche, F., Webster, S.**, 2007

*Behavior of Cylinder Piles During Pile Installation: Contemporary Issues.*

**Richwien, W.**, 1986

*Pfropfenbildung in offenen Stahlprofilen: Mitteilungen des Instituts für Grundbau, Boden- und Felsmechanik der TH Darmstadt.*

**Rodger, A. A., Littlejohn, G. S.**, 1980

*A study of vibratory driving in granular soils.*

**Skov, R., Denver, H.**, 1988

*Time-dependence of Bearing Capacity of Piles.* BC, Canada.

**Stein, P., Gattermann, J., Daumlechner, E., Hinzmann, N., Stahlmann, J.**, 2020

*Abschlussbericht Forschungsvorhaben ZyKLaMP. Großmaßstäbliche Modellversuche zur lateralen Tragfähigkeit offener Stahlrohrpfähle unter zyklischer Belastung bei verschiedenen Einbringverfahren.*

**Stiftung Offshore Windenergie**, 2021

*STATUS QUO OFFSHORE-WINDENERGIE* [online]. 31.12.2021. Verfügbar unter: <http://www.offshore-stiftung.de/status-quo-offshore-windenergie>

**Tavenas, F., Audy, R.**, 1972

*Limitations of the Driving Formulas for Predicting the Bearing Capacities of Piles in Sand.*

**Terzaghi, K.**, 1922

*Der Grundbruch an Stauwerken und seine Verhütung.*

**Terzaghi, K., Jelinek, R.**, 1954

*Theoretische Bodenmechanik.* Berlin/Göttingen/Heidelberg: Springer-Verlag.



**Thurner, R., Kummerer, C., Marte, R., 2020**

*Baugrundverbesserung.*

**Tiwari, B., Al-Adhah, A. R., 2014**

*Influence of Relative Density on Static Soil–Structure Frictional Resistance of Dry and Saturated Sand.* 32.

**Topham, E., McMillan, D., 2017**

*Sustainable decommissioning of an offshore wind farm.* 102.

**Uesugi, M., Kishida, H., 1986**

*Influential Factors of Friction Between Steel and Dry Sands.* 26.

**Viking, K., 2006**

*The Vibratory Pile Installation Method.* Paris, S. 65-85.

**Waberseck, T., 2013**

*Ground Improvement. Von Klaus Kirsch und Alan Bell (Hrsg.).* 36.

**Wehr, W., Trunk, U., 2019**

*Baugrundverbesserung.*

**Wernick, E., 1978**

*Skin friction of cylindrical anchors in non-cohesive soils.* Sydney, Australien.

**Wind Europe, 2020**

*Offshore Wind in Europe. Key trends and statistics, Repot 2019* [online]. Verfügbar unter: <https://windeurope.org/wp-content/uploads/files/about-wind/statistics/WindEurope-Annual-Offshore-Statistics-2019.pdf>

**Wind Europe, 2022**

*European Offshore Wind arms Map, Report 2021* [online]. Verfügbar unter: <https://windeurope.org/intelligence-platform/product/dashboard-european-offshore-wind-farms-map-public/>

**Zhang, Z., Wang, Y. H., 2014**

*Examining Setup Mechanisms of Driven Piles in Sand Using Laboratory Model Pile Tests.*

## Verwendete Normen und Richtlinien

API RP 2A-WSD (2007):

Recommended Practice for Planning, Designing and Constructing Fixed Offshore Platforms – Working Stress Design; 21st Edition, American Petroleum Institute, Washington

API GEO (2011). ISO 19901-4:2003:2011, Geotechnical and Foundation Design Considerations.

DIN EN 1092-1:2018-12

Flansche und ihre Verbindungen\_ - Runde Flansche für Rohre, Armaturen, Formstücke und Zubehörteile, nach PN\_bezeichnet\_ - Teil\_1: Stahlflansche;

DIN EN ISO 14688-1:2020-11

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

DIN DIN 18196:2022-02

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

DIN EN ISO 22476-1 | 2013-10

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

## Verwendete Software

LabView 2017, National Instruments

Matlab R2021b, Mathworks

DewesoftX 2021.5, Dewesoft

FE-Programm GGU-2D-SSFLOW

## Anhang

### A1 Abkürzungsverzeichnis

| Abkürzung | Bedeutung                                                                    |
|-----------|------------------------------------------------------------------------------|
| API       | American Petroleum Institute                                                 |
| API GEO   | American Petroleum Institute Geotechnical                                    |
| AW        | Amrumbank West                                                               |
| AWZ       | Ausschließliche Wirtschaftszone                                              |
| BMWK      | Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit            |
| BSH       | Bundesamt für Seeschifffahrt und Hydrographie                                |
| CLA       | Oberflächenrauheit (center line average)                                     |
| CPT       | Cone Penetration Test / Drucksondierung                                      |
| DAQ       | Data Acquisition                                                             |
| DMS       | Dehnungsmessstreifen                                                         |
| EDh       | Erddrucksensor Horizontal                                                    |
| FFR       | Finaler Füllungsgrad (final filling ratio)                                   |
| GOK       | Geländeoberkante                                                             |
| HO        | Hydraulic-Overpressure                                                       |
| ICP       | Imperial College Pile                                                        |
| IFR       | Inkrementeller Füllungsgrad (incremental filling ratio)                      |
| IGG-TUBS  | Institut für Geomechanik und Geotechnik, Technische Universität Braunschweig |
| GOK       | Geländeoberkante                                                             |
| OWEA      | Offshore-Windenergieanlage                                                   |
| OWP       | Offshore Windpark                                                            |
| PWD       | Porenwasserdruck                                                             |
| STT       | Statische Probelastung (static tensile test)                                 |

**A2 Lateinische Buchstaben**

| Formelzeichen | Einheit (Beispiele)  | Benennung                                        |
|---------------|----------------------|--------------------------------------------------|
| $a$           | [ - ]                | Parameter für Tragfähigkeitszuwachs              |
| $A$           | [m <sup>2</sup> ]    | Querschnittsfläche                               |
| $b$           | [1/t]                | Fittingparameter                                 |
| $C_U$         | [ - ]                | Ungleichförmigkeitszahl                          |
| $c'$          | [kN/m <sup>2</sup> ] | Kohäsion                                         |
| $D$           | [ - ]                | Lagerungsdichte                                  |
| $D_a$         | [m]                  | Pfahlaufenddurchmesser                           |
| $D_i$         | [m]                  | Pfahlinnendurchmesser                            |
| $d_{ig}$      | [m]                  | Grenzinnendurchmesser                            |
| $d_{CPT}$     | [m]                  | Durchmesser Drucksonde                           |
| $D_r$         | [ - ]                | Bezogene Lagerungsdichte                         |
| $D_{50}$      | [mm]                 | Mittlerer Korndurchmesser                        |
| $d_{15}$      | [mm]                 | Korndurchmesser bei 15 % Massenanteil            |
| $d_{85}$      | [mm]                 | Korndurchmesser bei 85 % Massenanteil            |
| $E$           | [kN/m <sup>2</sup> ] | Elastizitätsmodul                                |
| $F_P$         | [kN]                 | Resultierende Druckkraft gegen den Deckel        |
| $F_s$         | [kN]                 | Pfahlwiderstand                                  |
| $f_s$         | [kN]                 | Strömungskraft                                   |
| $g$           | [m/s <sup>2</sup> ]  | Erdbeschleunigung                                |
| $G_P$         | [kN]                 | Gewichtskraft Pfahl                              |
| $G'_P$        | [kN]                 | Gewichtskraft Pfahl unter Auftrieb               |
| $G_B$         | [kN]                 | Gewichtskraft Boden (Pfropfen)                   |
| $h$           | [m]                  | Abstand / Höhe                                   |
| $I_c$         | [ - ]                | Konsistenzzahl                                   |
| $i$           | [ - ]                | Hydraulischer Gradient                           |
| $k_f$         | [m/s]                | Durchlässigkeitsbeiwert                          |
| $K / K_0$     | [ - ]                | Erdruhedruckbeiwert                              |
| $L$           | [m]                  | Länge des Pfahls                                 |
| $L_p$         | [m]                  | Pfahleinbindetiefe unter GOK / Position Pfahlfuß |
| $N$           | [Anz.]               | Anzahl                                           |
| $N_{10}$      | [Anz.]               | Anzahl der Rammschläge bei 10 cm Eindringung     |
| $n$           | [%]                  | Porenanteil                                      |

|              |                      |                                                                               |
|--------------|----------------------|-------------------------------------------------------------------------------|
| $n_{eff}$    | [%]                  | Effektiver Porenanteil                                                        |
| $P$          | [kN/m <sup>2</sup> ] | Eingangsdruck                                                                 |
| $P_{max}$    | [kN/m <sup>2</sup> ] | Maximaler Eingangsdruck                                                       |
| $P_a$        | [kN/m <sup>2</sup> ] | Luftdruck / Atmosphärischer Druck                                             |
| $q_c$        | [MN/m <sup>2</sup> ] | Spitzenwiderstand der Drucksonde                                              |
| $q_{ca}$     | [MN/m <sup>2</sup> ] | Äquivalenter Spitzenwiderstand der Drucksonde                                 |
| $q_{EX,i}$   | [kN/m <sup>2</sup> ] | Pfahlmantelreibung bei Extraktion innen                                       |
| $q_s$        | [kN/m <sup>2</sup> ] | Pfahlmantelreibung                                                            |
| $q_{s,i}$    | [kN/m <sup>2</sup> ] | Pfahlmantelreibung innen                                                      |
| $q_{s,a}$    | [kN/m <sup>2</sup> ] | Pfahlmantelreibung außen                                                      |
| $Q_T/Q_{T0}$ | [ - ]                | Tragfähigkeitsverhältnis zw. Zeitpunkt T und Referenzzeitpunkt T <sub>0</sub> |
| $Q_{usref}$  | [kN]                 | Referenzwiderstand                                                            |
| $R_a$        | [m]                  | Außenradius des Pfahls                                                        |
| $R_{CLA}$    | [mm]                 | Oberflächenrauheit des Pfahls                                                 |
| $R_{außen}$  | [m]                  | Pfahlradius außen                                                             |
| $R_{innen}$  | [m]                  | Pfahlradius innen                                                             |
| $R_s$        | [kN]                 | Mantelwiderstand eines Einzelpfahls                                           |
| $R_{s,a}$    | [kN]                 | Äußerer Mantelwiderstand eines Rohrpfahls                                     |
| $R_{s,i}$    | [kN]                 | Innerer Mantelwiderstand eines Rohrpfahls                                     |
| $R_{ges}$    | [kN]                 | Gesamter Pfahlwiderstand gegen die Extraktion                                 |
| $R^*$        | [kN]                 | Effektives Flächenverhältnis, unverspannter Pfahlfuß                          |
| $s$          | [m]                  | Scherzone                                                                     |
| $S_r$        | [ - ]                | Sättigungszahl                                                                |
| $t$          | [min]                | Zeit                                                                          |
| $t_0$        | [Tage]               | Referenzzeitpunkt                                                             |
| $U$          | [m]                  | Umfang                                                                        |
| $u$          | [kN/m <sup>2</sup> ] | Porenwasserdruck                                                              |
| $v$          | [m/s]                | Geschwindigkeit                                                               |
| $v_{eff}$    | [m/s]                | Filtergeschwindigkeit                                                         |
| $v_a$        | [m/s]                | Abstandsgeschwindigkeit                                                       |
| $w$          | [%]                  | Wassergehalt                                                                  |
| $x$          | [m]                  | Verschiebung                                                                  |
| $x_F$        | [m]                  | Normierte, einheitliche Verschiebung                                          |
| $y$          | [%]                  | Prozentualer Verspannungsgrad des Bodens im Pfahl                             |
| $z$          | [m]                  | Tiefe unter GOK                                                               |

**A3 Griechische Buchstaben**

| Formelzeichen        | Einheit (Beispiele)  | Benennung                                                                                          |
|----------------------|----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|
| $\alpha$             | [ - ]                | Parameter der Filterströmung                                                                       |
| $\beta$              | [ - ]                | Mantelreibungsfaktor                                                                               |
| $\gamma$             | [kN/m <sup>3</sup> ] | Wichte des feuchten Bodens                                                                         |
| $\gamma'$            | [kN/m <sup>3</sup> ] | Wichte des Bodens unter Auftrieb                                                                   |
| $\gamma_w$           | [kN/m <sup>3</sup> ] | Wichte des Wassers                                                                                 |
| $\delta$             | [ ° ]                | Wandreibungswinkel                                                                                 |
| $\delta_{cs}$        | [ ° ]                | Kritischer Wandreibungswinkel im Versagensfall                                                     |
| $\delta_{max}$       | [ ° ]                | Oberer Grenzwert des Wandreibungswinkels                                                           |
| $\Delta_D$           | [mm]                 | Inkrementelle Pfahleindringung                                                                     |
| $\Delta_L$           | [mm]                 | Inkrementeller Anstieg der Bodensäule im Pfahl                                                     |
| $\Delta\sigma_n$     | [kN/m <sup>2</sup> ] | Veränderung der Normalspannung                                                                     |
| $\varepsilon$        | [ - ]                | Dehnung                                                                                            |
| $\lambda$            | [ - ]                | Maßstabsfaktor                                                                                     |
| $\rho$               | [t/m <sup>3</sup> ]  | Dichte                                                                                             |
| $\rho_s$             | [t/m <sup>3</sup> ]  | Korndichte                                                                                         |
| $\rho_d$             | [t/m <sup>3</sup> ]  | Trockendichte                                                                                      |
| $\sigma_h$           | [kN/m <sup>2</sup> ] | Horizontalspannung                                                                                 |
| $\sigma'_h$          | [kN/m <sup>2</sup> ] | Effektive Horizontalspannung                                                                       |
| $\sigma'_{hc}$       | [kN/m <sup>2</sup> ] | Effektive Horizontalspannung nach Abklingen Porenwasserdruckakkumulation                           |
| $\Delta\sigma'_h$    | [kN/m <sup>2</sup> ] | Effektive Horizontalspannungsänderung Dilatanz und elastischer <i>Poisson</i> -Radialkontraktionen |
| $\sigma'_r$          | [kN/m <sup>2</sup> ] | Radialspannung                                                                                     |
| $\sigma'_v$          | [kN/m <sup>2</sup> ] | Effektive Vertikalspannung                                                                         |
| $\Delta\sigma'_v$    | [kN/m <sup>2</sup> ] | Effektive Vertikalspannungsänderung                                                                |
| $\sigma_{h,total}$   | [kN/m <sup>2</sup> ] | Totalspannung horizontal                                                                           |
| $\psi$               | [ ° ]                | Dilatanzwinkel                                                                                     |
| $\tau_s / \tau_{sp}$ | [kN/m <sup>2</sup> ] | Schubspannung am Pfahlmantel                                                                       |
| $\varphi'$           | [ ° ]                | Effektiver Reibungswinkel im Bruchzustand                                                          |
| $\varphi'_p$         | [ ° ]                | Maximaler effektiver Reibungswinkel                                                                |

## B Modellierungsparameter der stationären Sickerströmungsberechnung

Der rotationssymmetrische Versuchsaufbau ermöglicht eine zweidimensionale Abbildung eines Pfahlsegmentes. Die Modellierung der Potentiallinien erfolgte für einen stationären Strömungszustand mit dem FE-Programm GGU-2D-SSFLOW. Der Detaillierungsgrad des Netzes wurde so gewählt, dass im Pfahlinneren die höchste Dichte an Knoten herrscht (s. Abbildung B1 - 1)

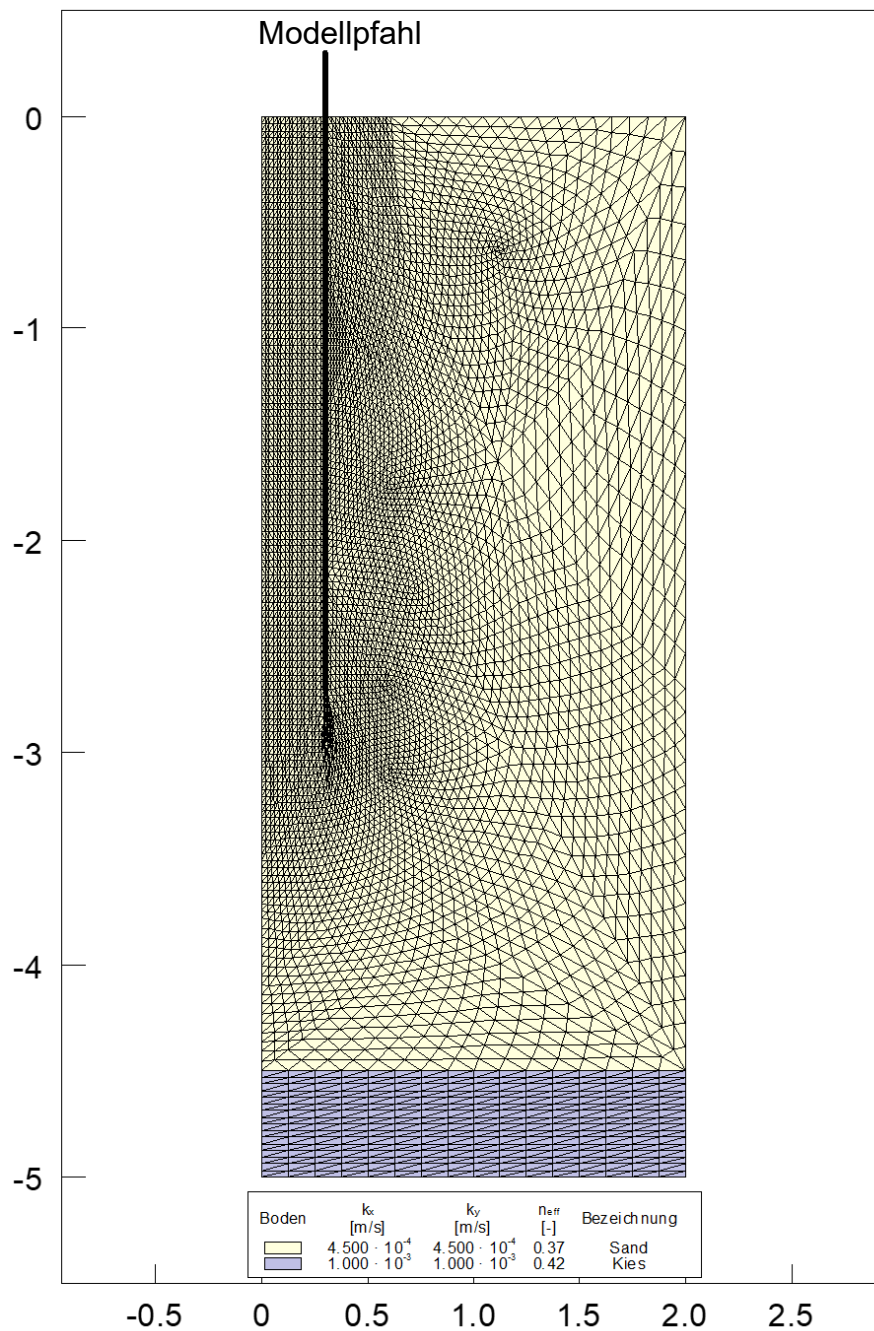


Abbildung B1 - 1: Netz der FE-Modellierung im rotationssymmetrischen Schnitt durch den Modellpfahl



Die Modellierungsparameter wurden aus den Bodenparametern der Modellversuche abgeleitet. In der Tabelle B-1 sind die für die Modellierung verwendeten Parameter abgebildet.

*Tabelle B-1: Parameter des Modellbodens*

| Parameter                | Sand                                    | Kies                                     |
|--------------------------|-----------------------------------------|------------------------------------------|
| Durchlässigkeit          | $k_f = 4,5 \cdot 10^{-4} \text{ [m/s]}$ | $k_f = 4,18 \cdot 10^{-3} \text{ [m/s]}$ |
| effektive Porenraum Sand | $n_{\text{eff}} = 0,37 \text{ [-]}$     | $n_{\text{eff}} = 0,42 \text{ [-]}$      |

## C Laboruntersuchungen

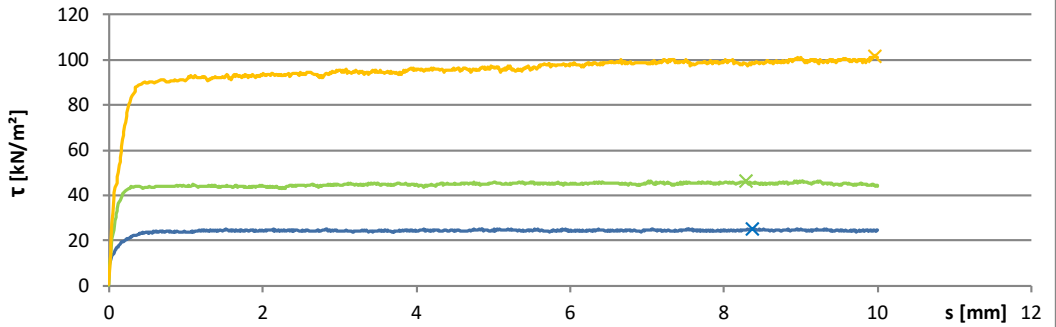
|                                                                                   |         |                                                                                                                                                                              |                      |                                                  |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------|--|
|  |         | <b>Technische Universität<br/>Braunschweig</b><br>Institut für Geomechanik und Geotechnik<br>Beethovenstraße 51b Fon 0531/391-62000<br>38106 Braunschweig Fax 0531/391-62040 |                      | <b>Rahmenscherversuch</b><br>DIN EN ISO 17892-10 |  |
| Projekt                                                                           | DeCoMP  | Entnahmeort:                                                                                                                                                                 | Versuchstrog         |                                                  |  |
| Auftraggeber                                                                      | IGG     | Tiefe:                                                                                                                                                                       |                      |                                                  |  |
| Auftragsnummer                                                                    |         | Probengefäß:                                                                                                                                                                 |                      |                                                  |  |
| Labornummer                                                                       | 7-89    | Bodenart:                                                                                                                                                                    |                      |                                                  |  |
| Entnahmedatum                                                                     |         | Bodengruppe:                                                                                                                                                                 |                      |                                                  |  |
| Probennummer                                                                      | MP1     | Probeneinbau:                                                                                                                                                                |                      |                                                  |  |
| Art                                                                               | gestört | Bemerkung:                                                                                                                                                                   | Sand auf Stahlplatte |                                                  |  |

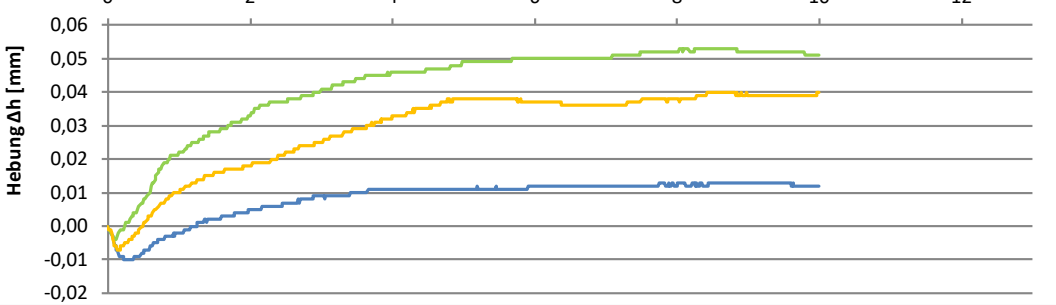
|                                 |       |                                          |       |       |       |   |   |
|---------------------------------|-------|------------------------------------------|-------|-------|-------|---|---|
| Probenhöhe h <sub>0</sub> [mm]  | 10    | Teilversuch                              | 1     | 2     | 3     | 4 | 5 |
| Probenfläche [cm <sup>2</sup> ] | 100,0 | Wassergehalt w <sub>A</sub> [%]          | 0,000 | 0,000 | 0,000 |   |   |
|                                 |       | Wassergehalt w <sub>E</sub> [%]          |       |       |       |   |   |
|                                 |       | Einbaudichte [g/cm <sup>3</sup> ]        | 1,710 | 1,710 | 1,710 |   |   |
|                                 |       | Einbautrockendichte [g/cm <sup>3</sup> ] | 1,710 | 1,710 | 1,710 |   |   |

**Scherspannung - Scherweg**



**Hebung Δh - Scherweg**



| Versuch | σ<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | τ<br>[kN/m <sup>2</sup> ] | Scherweg s<br>[mm] | Hebung Δh<br>[mm] | Schergeschw.<br>[mm/min] |
|---------|---------------------------|---------------------------|--------------------|-------------------|--------------------------|
| 1 X     | 50                        | 25,00                     | 8,375              | 0,012             | 0,500                    |
| 2 X     | 100                       | 46,14                     | 8,288              | 0,053             | 0,500                    |
| 3 X     | 200                       | 101,45                    | 9,960              | 0,039             | 0,500                    |
| 4 X     |                           |                           |                    |                   |                          |
| 5 X     |                           |                           |                    |                   |                          |

Modifizierter Rahmenscherversuch Sand gegen Stahlplatte, Versuchsdocumentation

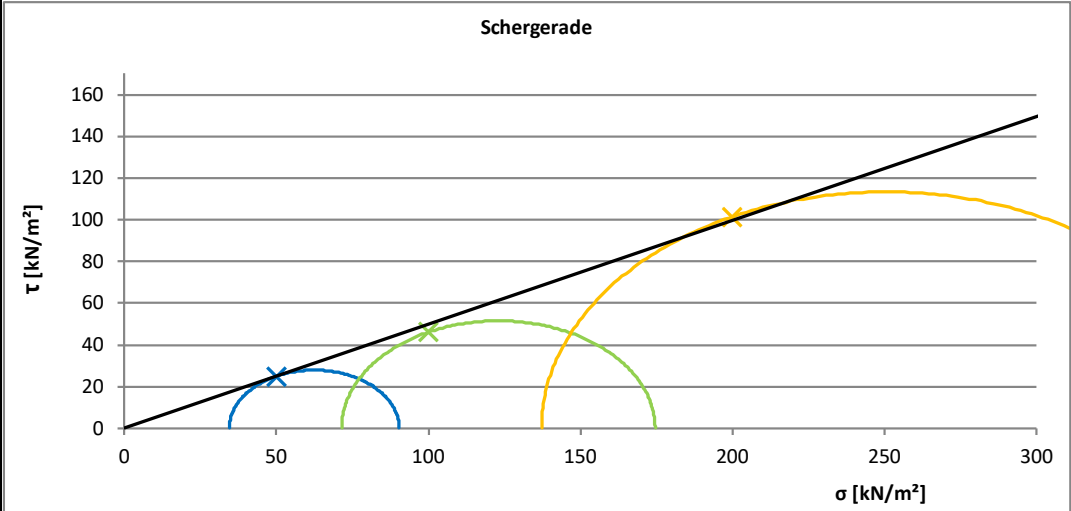
|                                                                                   |         |                                                                                                                                                                                    |                      |                                                  |  |
|-----------------------------------------------------------------------------------|---------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------|--------------------------------------------------|--|
|  |         | <b>Technische Universität<br/>Braunschweig</b><br>Institut für Geomechanik und Geotechnik<br>Beethovenstraße 51b    Fon 0531/391-62000<br>38106 Braunschweig    Fax 0531/391-62040 |                      | <b>Rahmenscherversuch</b><br>DIN EN ISO 17892-10 |  |
| Projekt                                                                           | DeCoMP  | Entnahmeort:                                                                                                                                                                       | Versuchstrog         |                                                  |  |
| Auftraggeber                                                                      | IGG     | Tiefe:                                                                                                                                                                             |                      |                                                  |  |
| Auftragsnummer                                                                    |         | Probengefäß:                                                                                                                                                                       |                      |                                                  |  |
| Labornummer                                                                       | 7-89    | Bodenart:                                                                                                                                                                          |                      |                                                  |  |
| Entnahmedatum                                                                     |         | Bodengruppe:                                                                                                                                                                       |                      |                                                  |  |
| Probennummer                                                                      | MP1     | Probeneinbau:                                                                                                                                                                      |                      |                                                  |  |
| Art                                                                               | gestört | Bemerkung:                                                                                                                                                                         | Sand auf Stahlplatte |                                                  |  |

|                                 |       |                                          |       |       |       |   |   |
|---------------------------------|-------|------------------------------------------|-------|-------|-------|---|---|
| Probenhöhe h <sub>0</sub> [mm]  | 10    | Teilversuch                              | 1     | 2     | 3     | 4 | 5 |
| Probenfläche [cm <sup>2</sup> ] | 100,0 | Wassergehalt w <sub>A</sub> [%]          | 0,000 | 0,000 | 0,000 |   |   |
|                                 |       | Wassergehalt w <sub>E</sub> [%]          |       |       |       |   |   |
|                                 |       | Einbaudichte [g/cm <sup>3</sup> ]        | 1,710 | 1,710 | 1,710 |   |   |
|                                 |       | Einbautrockendichte [g/cm <sup>3</sup> ] | 1,710 | 1,710 | 1,710 |   |   |

**Schergerade**



Schergerade:  $\tau = 0,4982 \cdot \sigma + 0$

|                               |       |
|-------------------------------|-------|
| Reibungswinkel [°]            | 26,5  |
| Kohäsion [kN/m <sup>2</sup> ] | 0,0   |
| Korrelation                   | 0,999 |

Bemerkungen:

Datum: 26.04.2022
Prüfer: E. Daumlechner



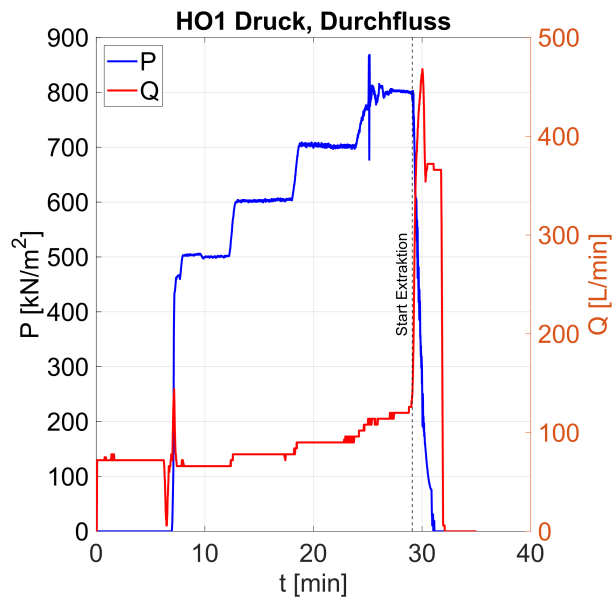


Abbildung D1 - 3: Eingeleiteter Druck  $P$  mit dem Durchfluss  $Q$  – Teilversuch HO1

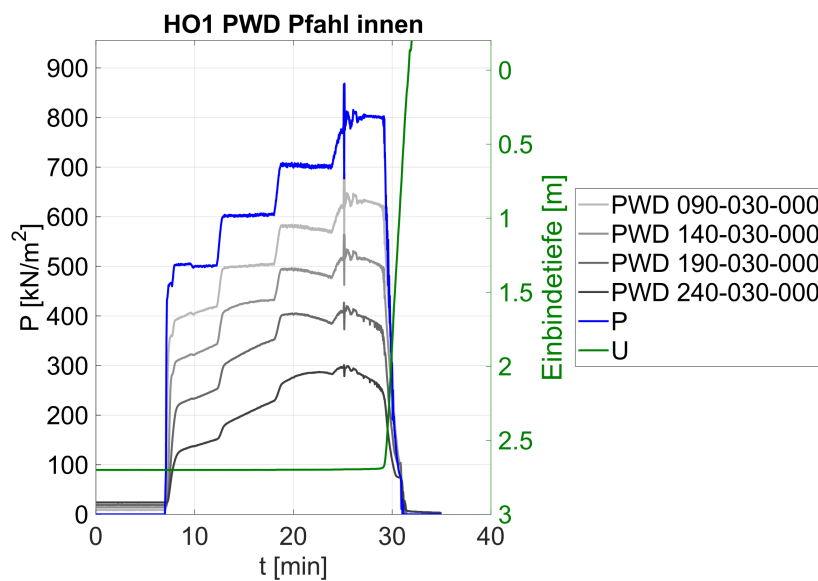


Abbildung D1 - 4: Gemessene PWD an der Pfahlinnenseite HO1

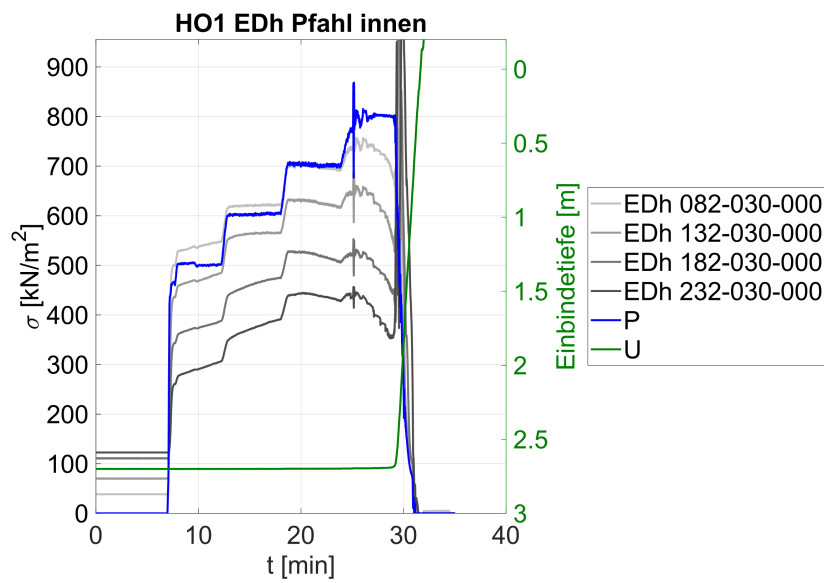


Abbildung D1 - 5: Gemessene EDh an der Pfahlinnenseite HO1

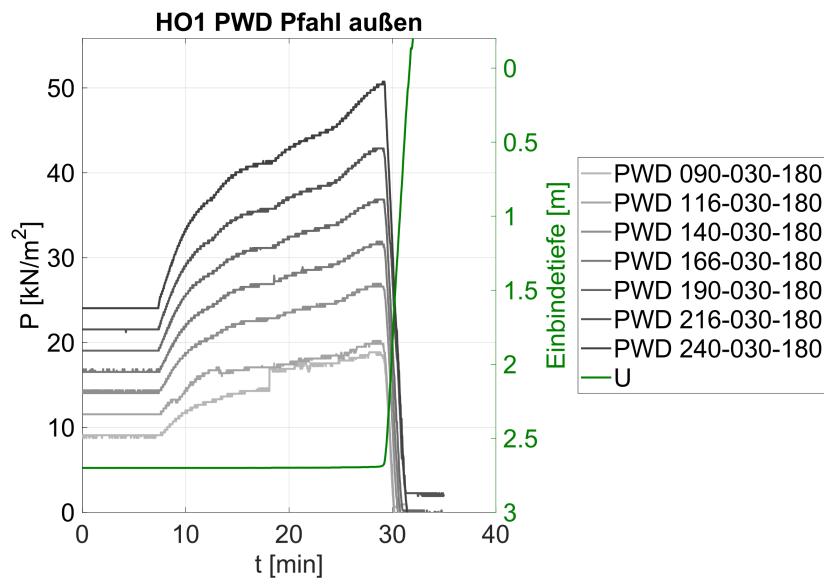


Abbildung D1 - 6: Gemessene PWD an der Pfahlaußenseite HO1

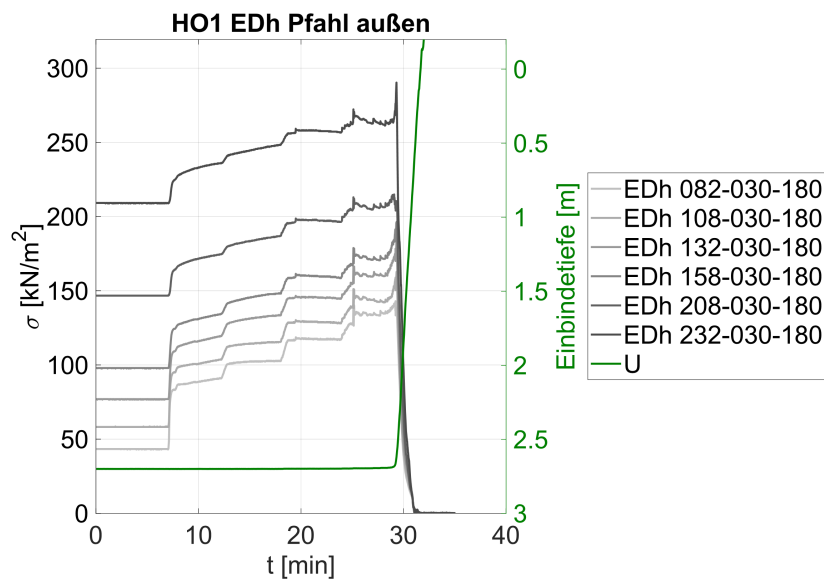


Abbildung D1 - 7: EDh an der Pfahlaußenseite HO1

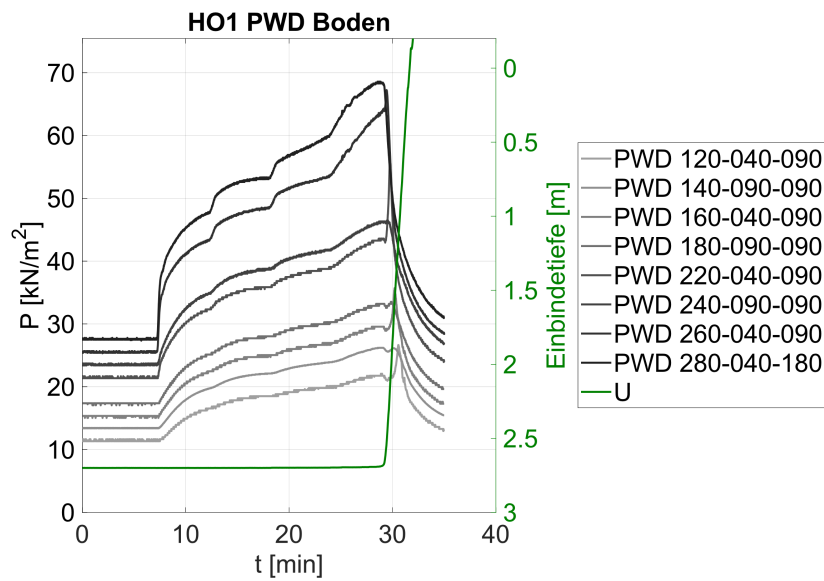


Abbildung D1 - 8: Gemessene PWD im Boden HO1

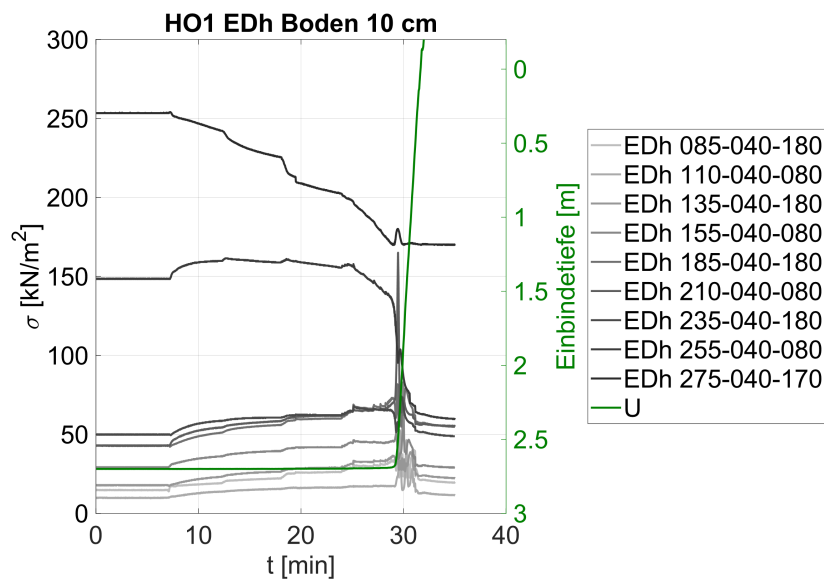


Abbildung D1 - 9: EDh im Boden Abstand 10 cm vom Pfahl HO1

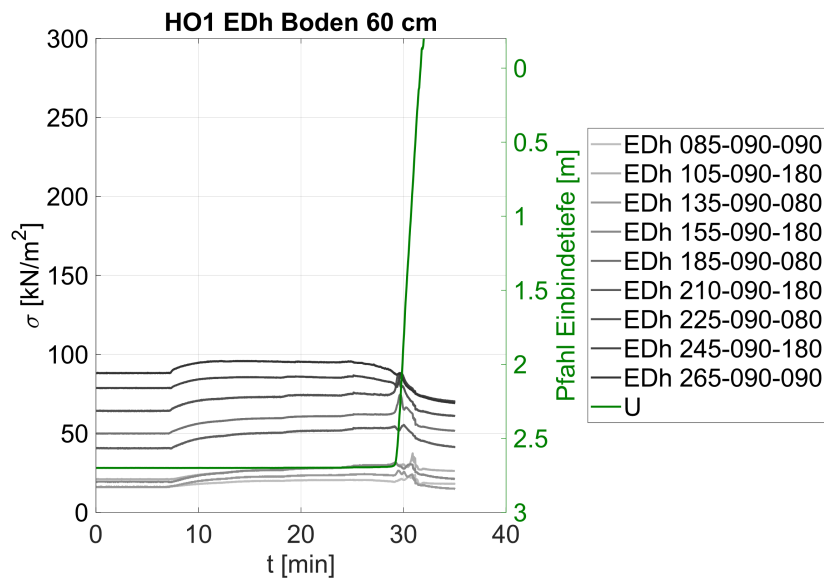


Abbildung D1 - 10: EDh im Boden Abstand 60 cm vom Pfahl HO1



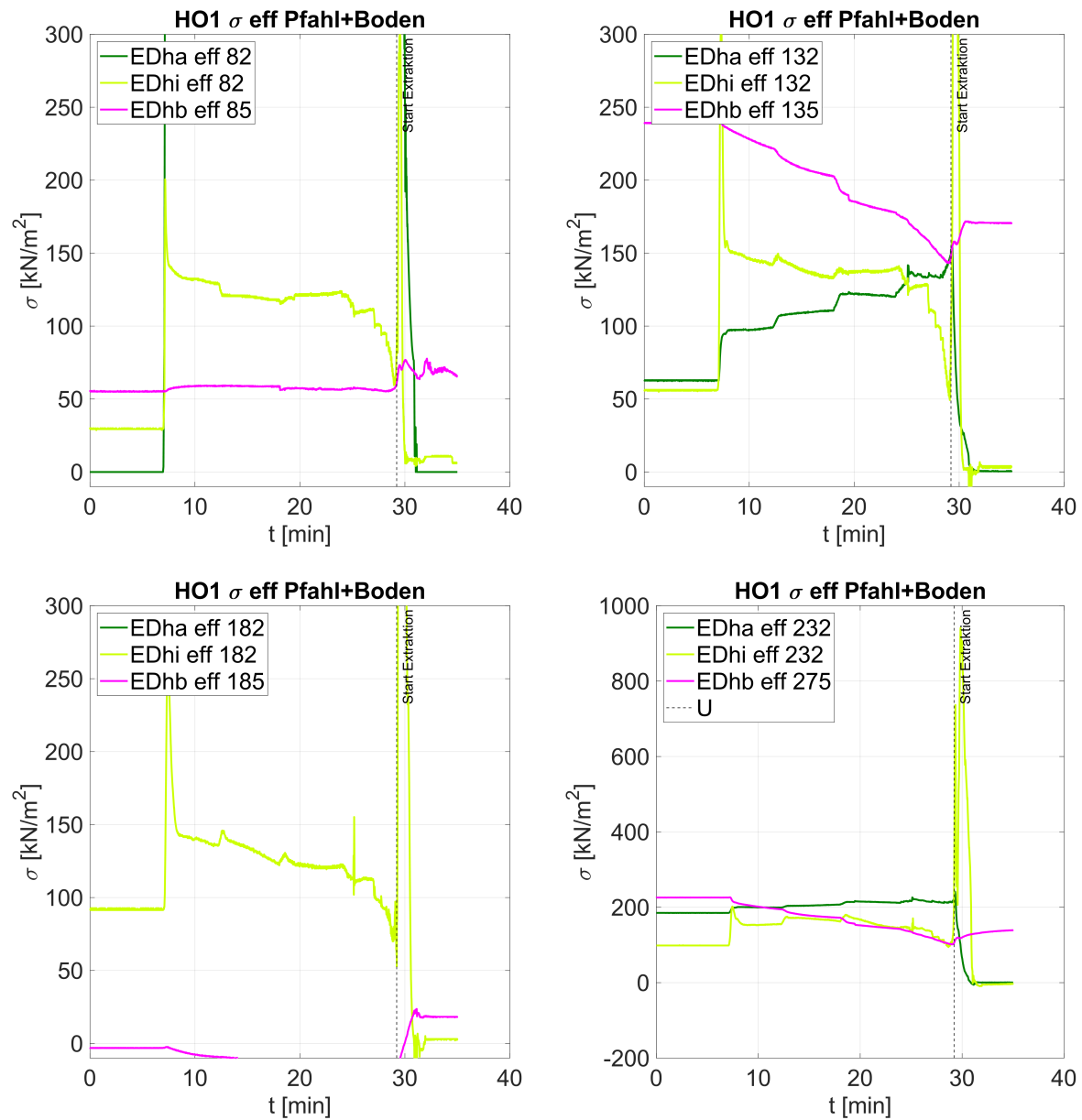


Abbildung D1 - 11: Versuchsparameter P und Q, Effektivspannung an der Pfahlaußen- (EDha eff) und Pfahlinnenseite (EDhi eff) sowie im Boden (EDhb eff) 10 cm vom Pfahl beim Versuch HO1

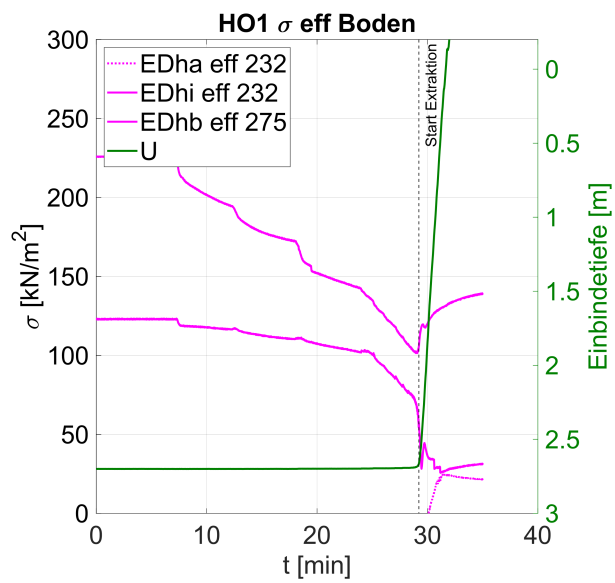


Abbildung D1 - 12: Effektivspannung im Boden (EDhb eff) unter dem Pfahlfuß, mit 10 cm Abstand zum Pfahl HO1

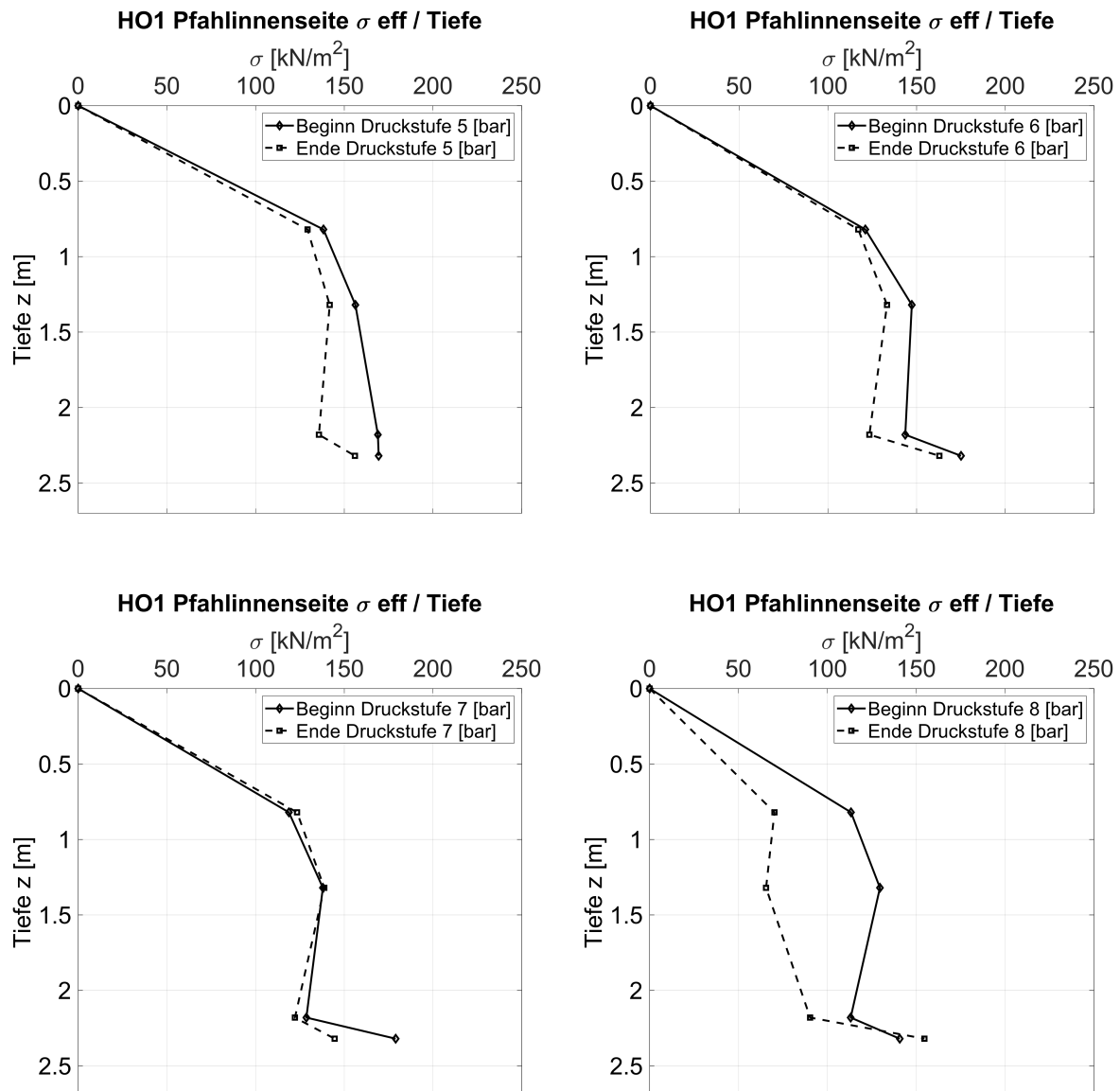


Abbildung D1 - 13 Entwicklung Effektivspannung Pfahlinnenseite über Tiefe  $z$  zu Beginn und zum Ende jeder Druckstufe HO1

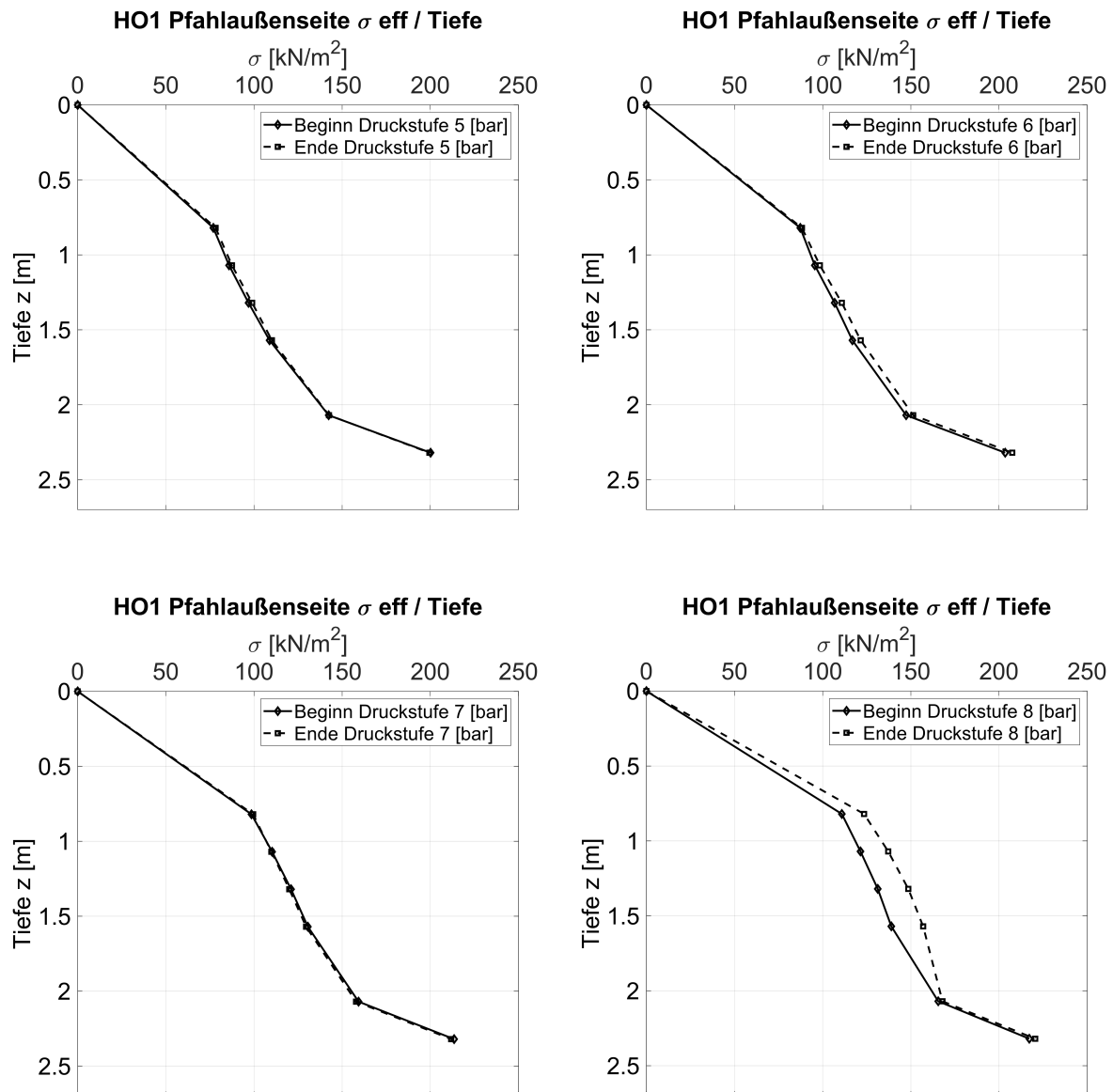


Abbildung D1 - 14: Entwicklung Effektivspannung Pfahlaußenseite über Tiefe z zu Beginn und zum Ende jeder Druckstufe HO1



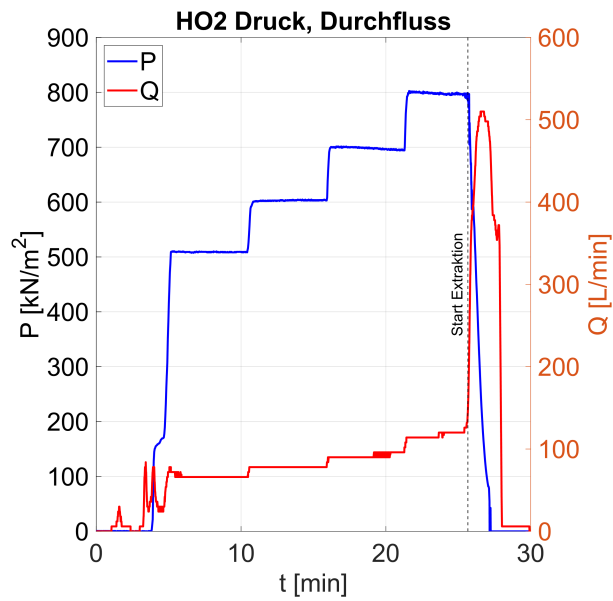


Abbildung D2 - 2: Eingeleiteter Druck  $P$  mit dem Durchfluss  $Q$  – Teilversuch HO2

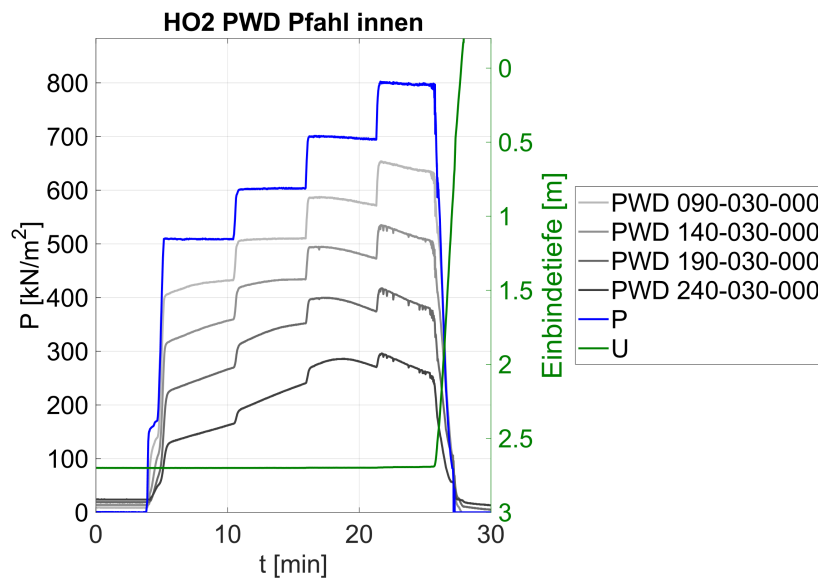


Abbildung D2 - 3: Gemessene PWD an der Pfahlinnenseite HO2

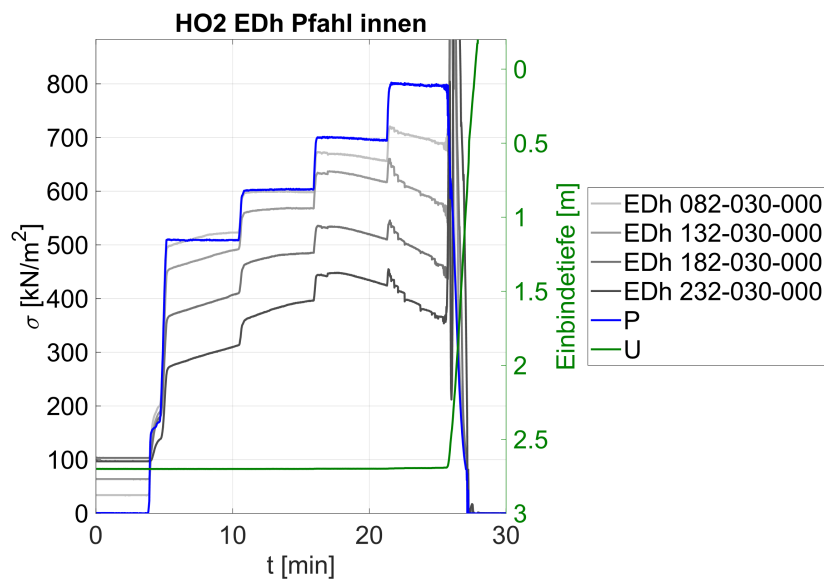


Abbildung D2 - 4: Gemessene EDh an der Pfahlinnenseite HO2

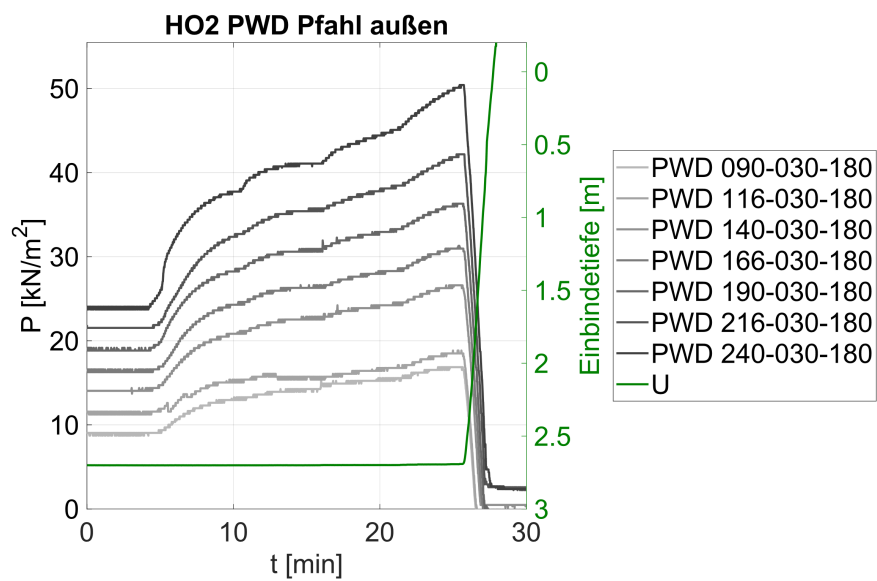


Abbildung D2 - 5: Gemessene PWD an der Pfahlaußenseite HO2

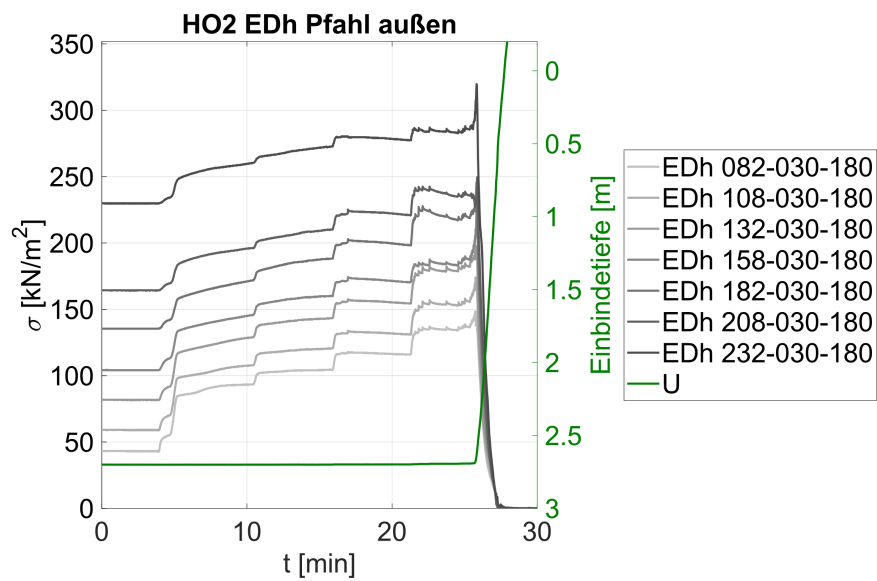


Abbildung D2 - 6: EDh an der Pfahlaußenseite HO2

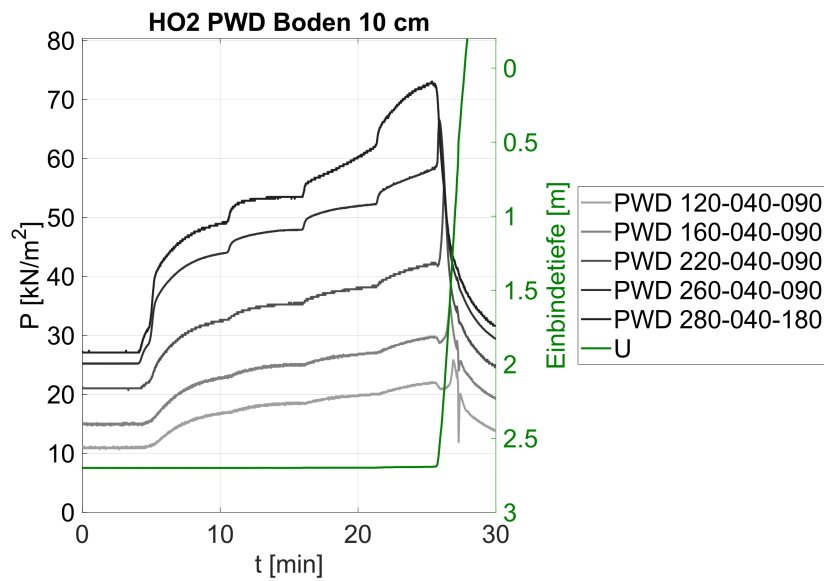


Abbildung D2 - 7: Gemessene PWD im Boden Abstand 10 cm vom Pfahl HO2



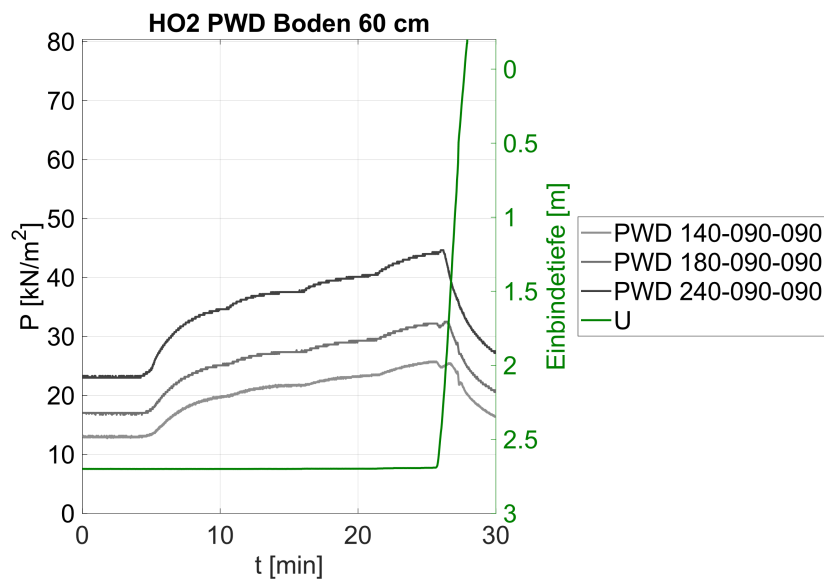


Abbildung D2 - 8: Gemessene PWD im Boden Abstand 60 cm vom Pfahl HO2

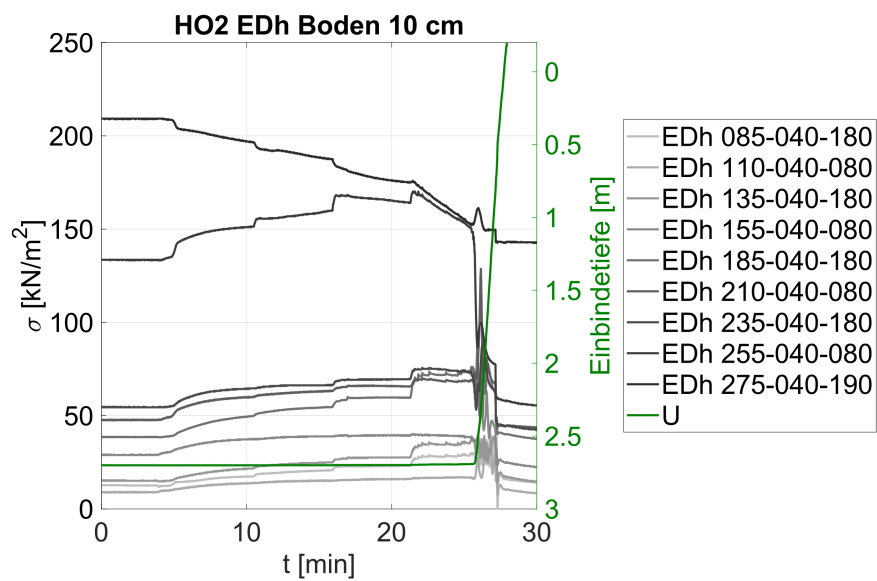


Abbildung D2 - 9: EDh im Boden Abstand 10 cm vom Pfahl HO2

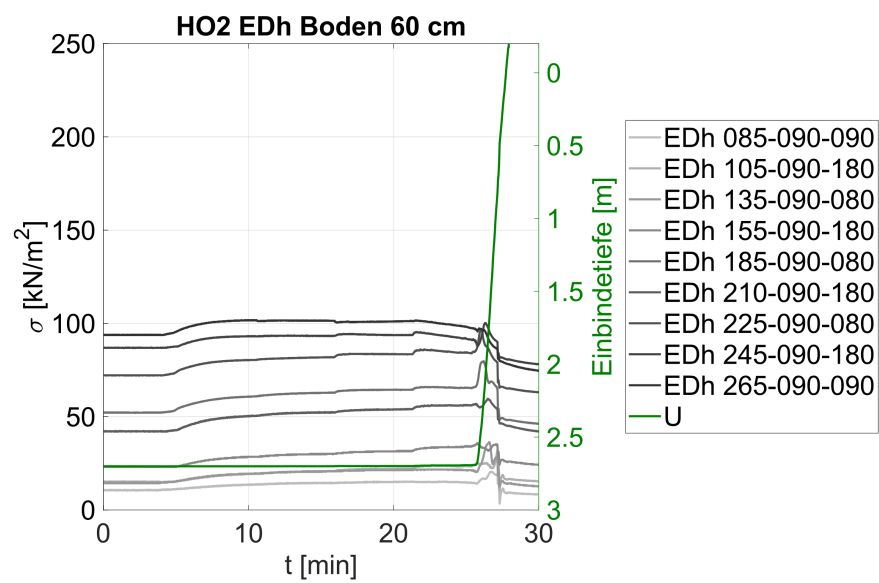


Abbildung D2 - 10: EDh im Boden Abstand 60 cm vom Pfahl HO2

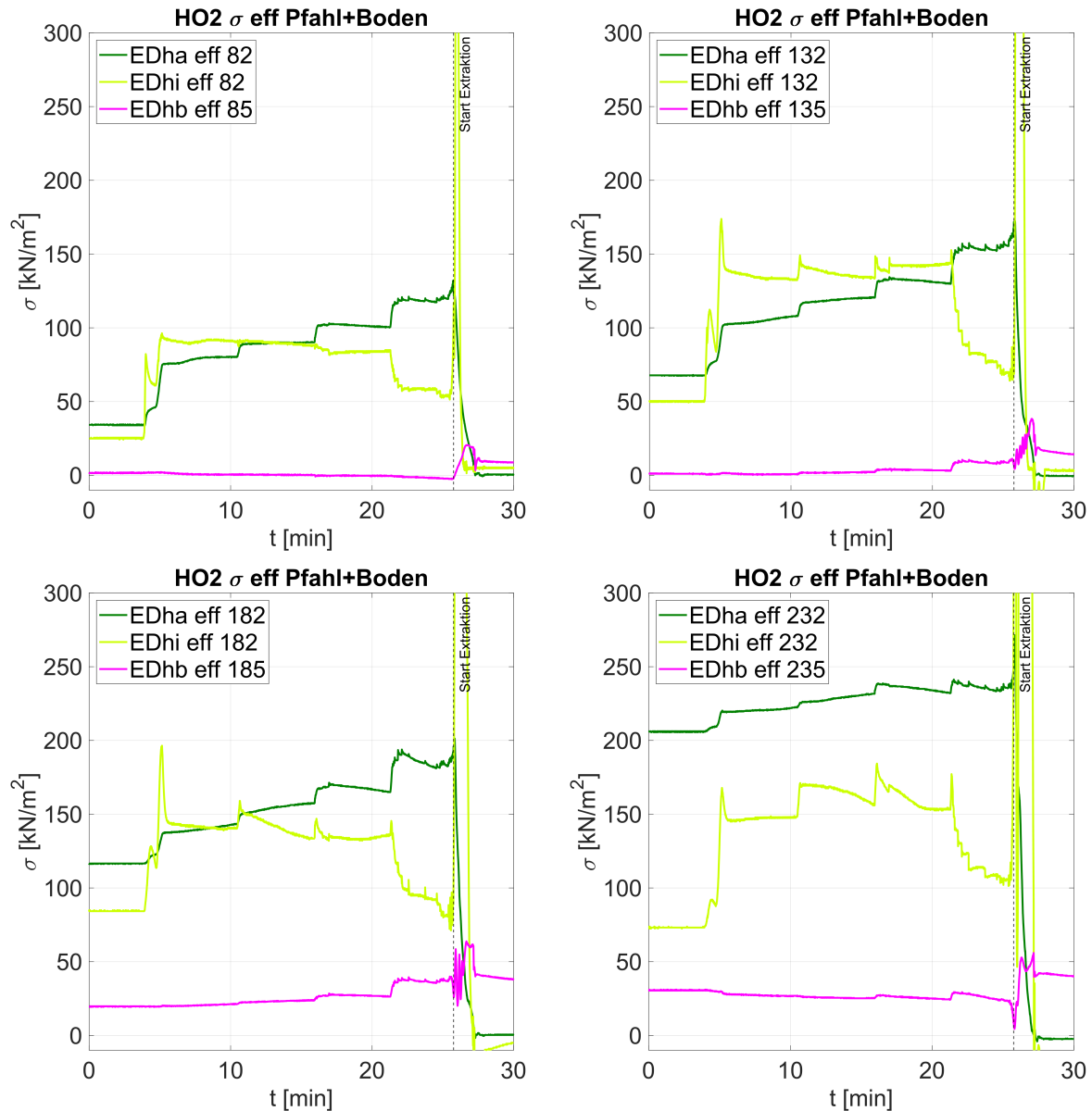


Abbildung D2 - 11: Versuchsparameter  $P$  und  $Q$ , Effektivspannung an der Pfahlaußen- (EDha eff) und Pfahlinnenseite (EDhi eff) sowie im Boden (EDhb eff) 10 cm vom Pfahl beim Versuch HO2

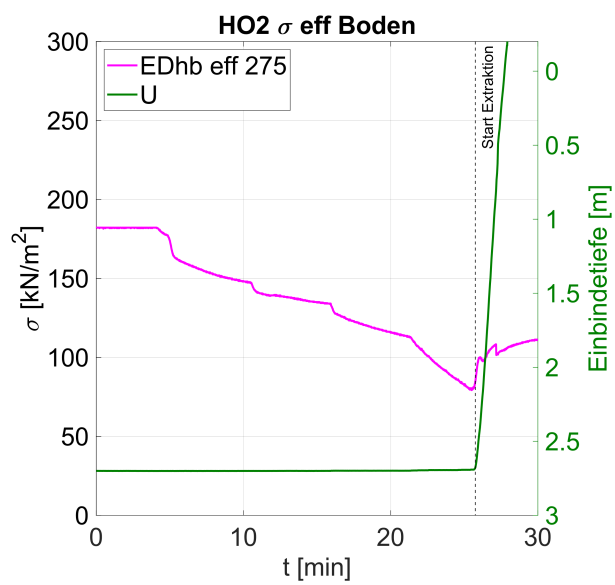


Abbildung D2 - 12: Effektivspannung im Boden (EDhb eff) unter dem Pfahlfuß, mit 10 cm Abstand zum Pfahl HO2

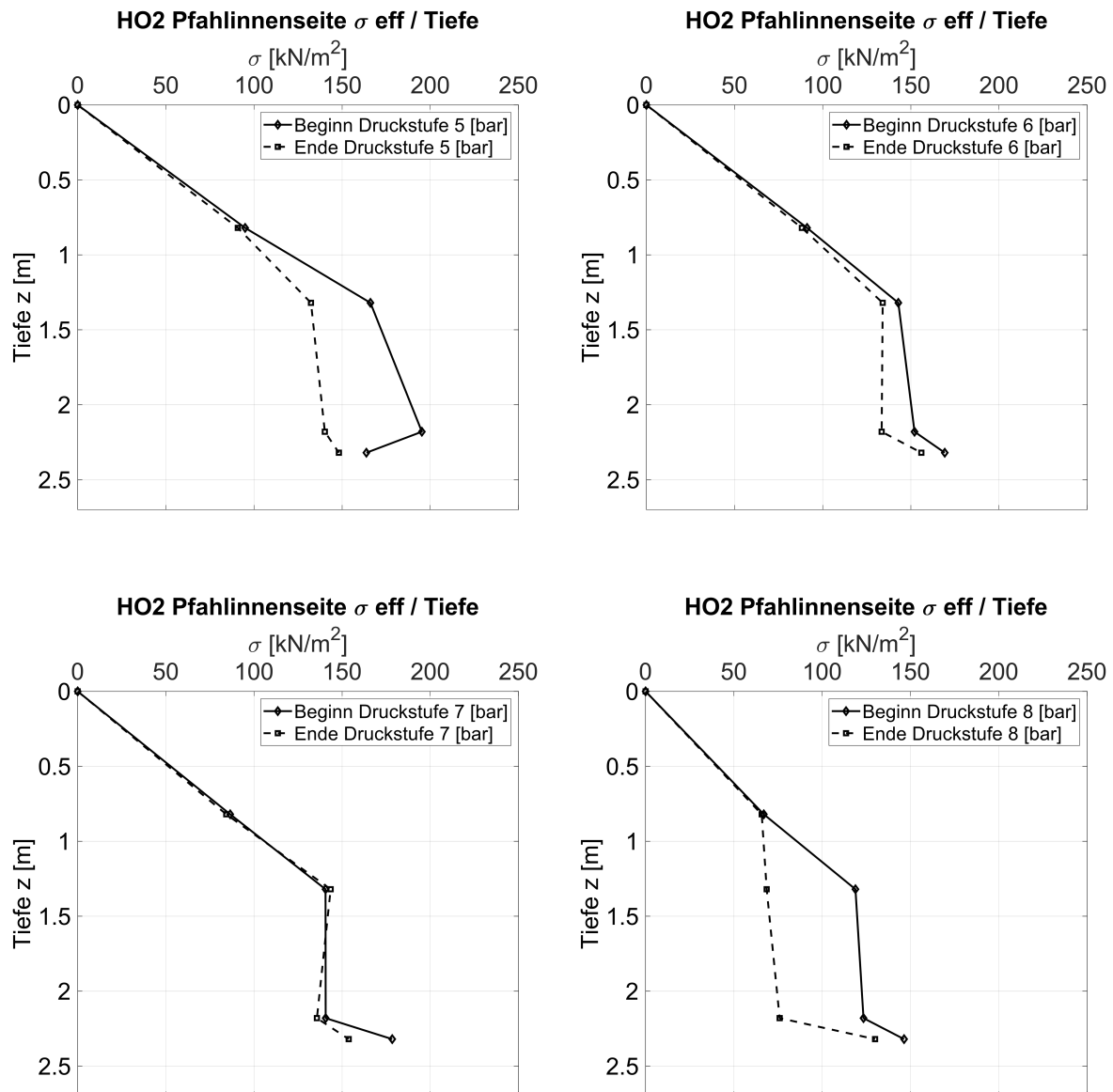


Abbildung D2 - 13 Entwicklung Effektivspannung Pfahlinnenseite über Tiefe  $z$  zu Beginn und zum Ende jeder Druckstufe HO2

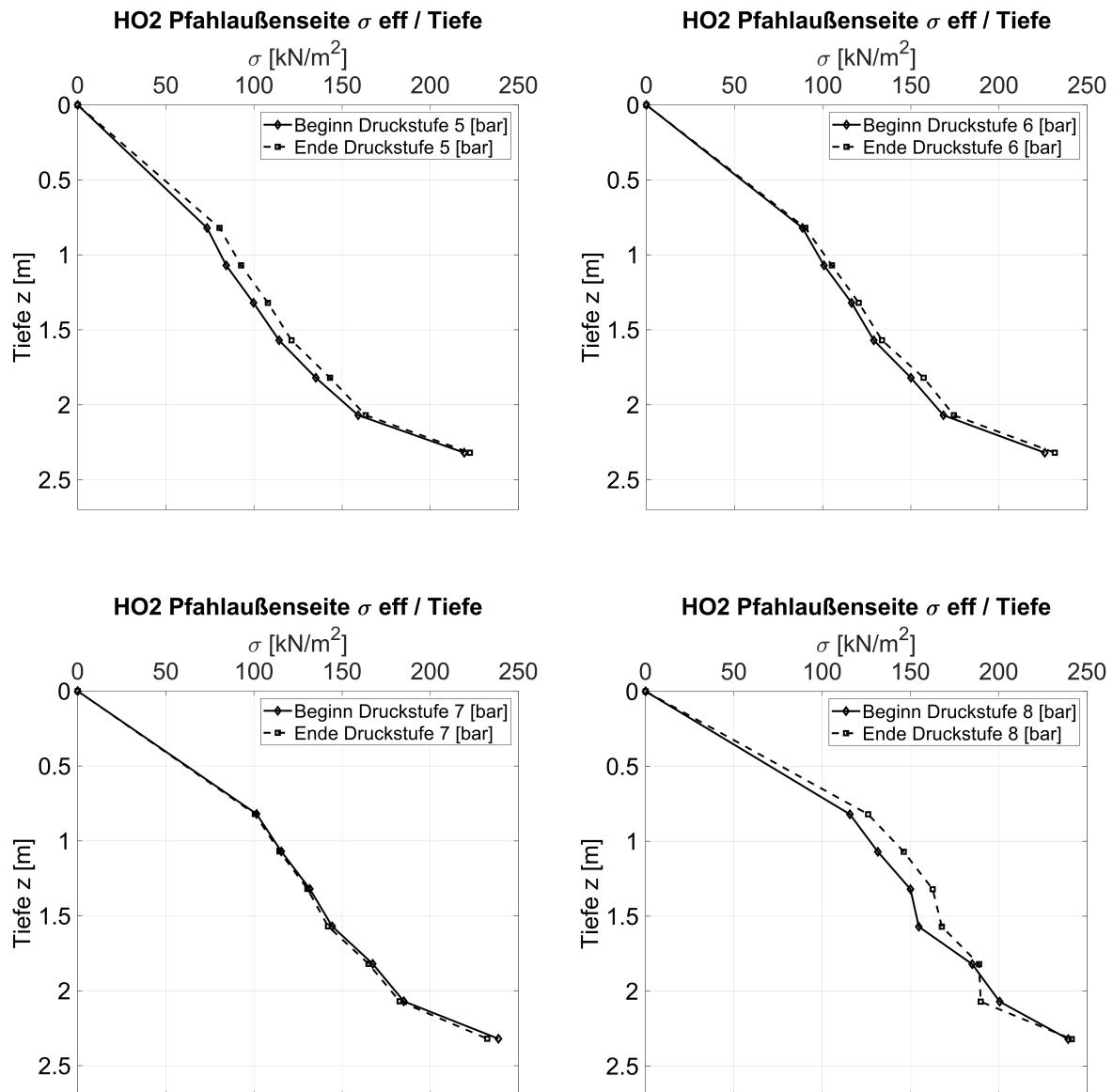


Abbildung D2 - 14: Entwicklung Effektivspannung Pfahlaußenseite über Tiefe z zu Beginn und zum Ende jeder Druckstufe HO2

## D3 Versuchsergebnisse HO3

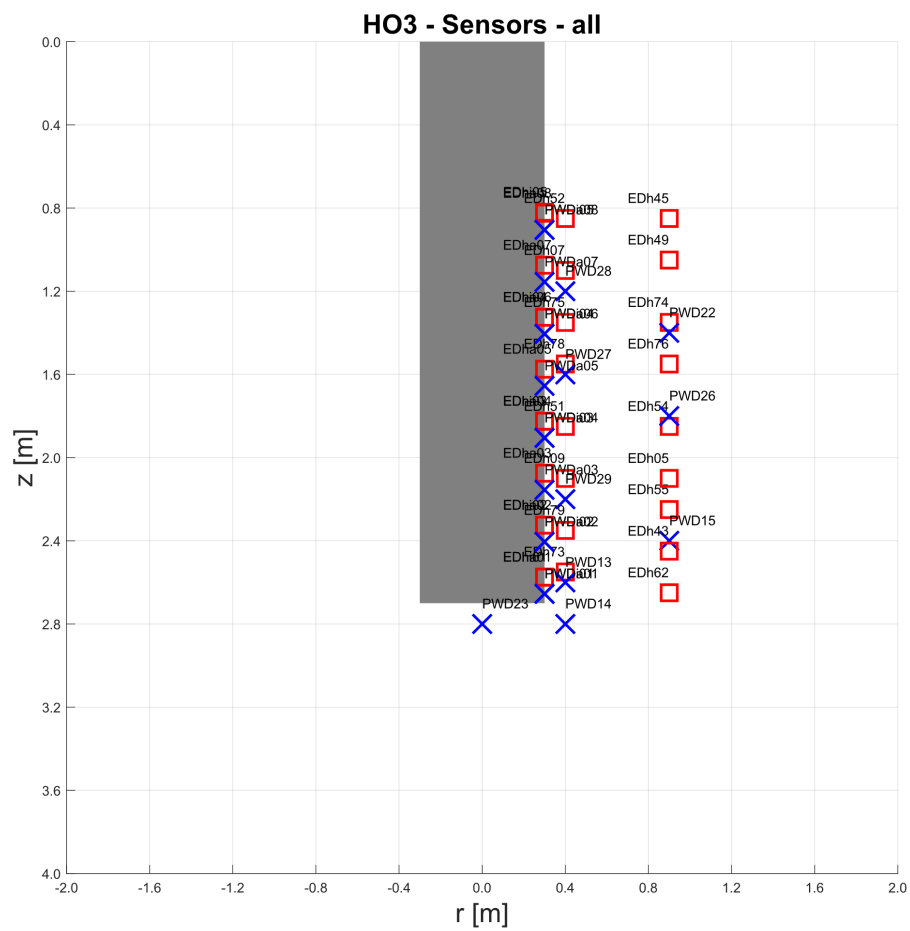


Abbildung D3 - 1: Lage Sensorik Versuch HO3

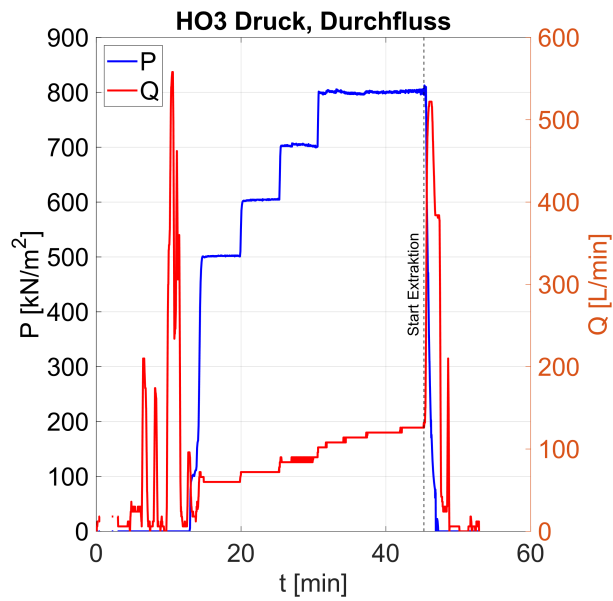


Abbildung D3 - 2: Eingeleiteter Druck  $P$  mit dem Durchfluss  $Q$  – Teilversuch HO3

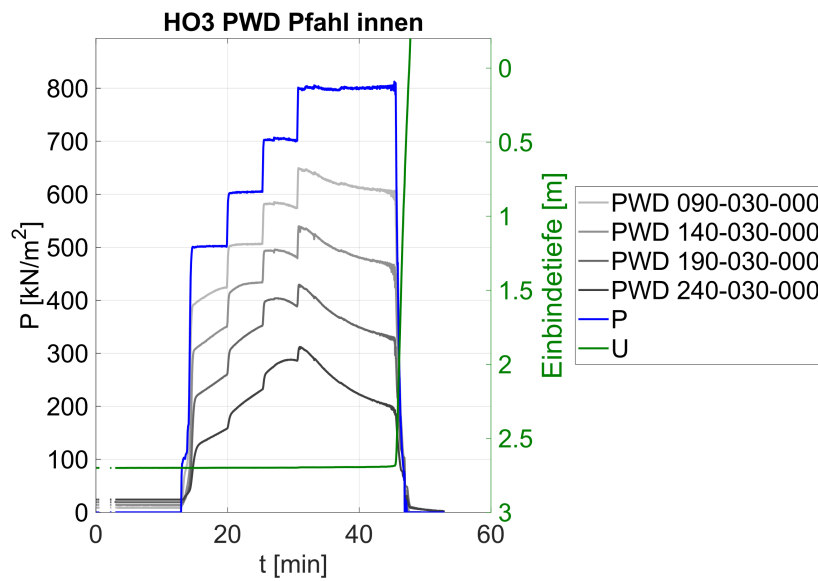


Abbildung D3 - 3: Gemessene PWD an der Pfahlinnenseite HO3



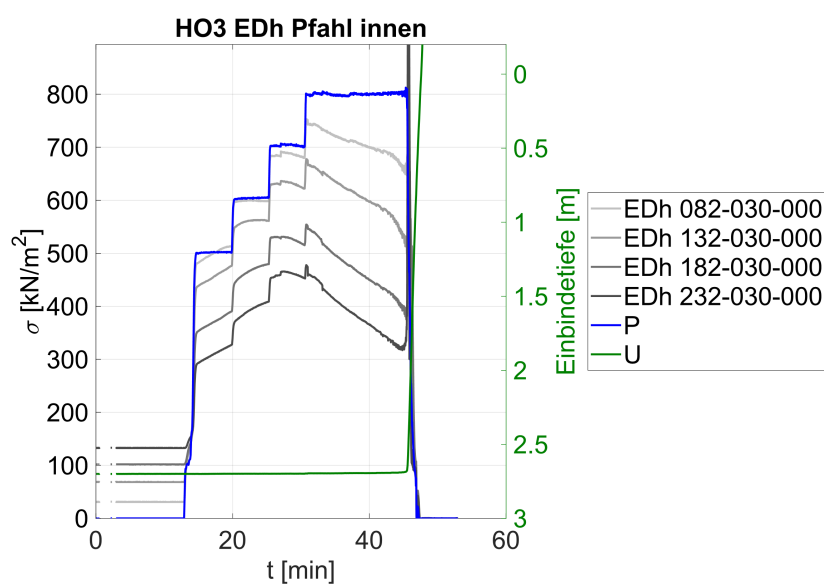


Abbildung D3 - 4: Gemessene EDh an der Pfahlinnenseite HO3

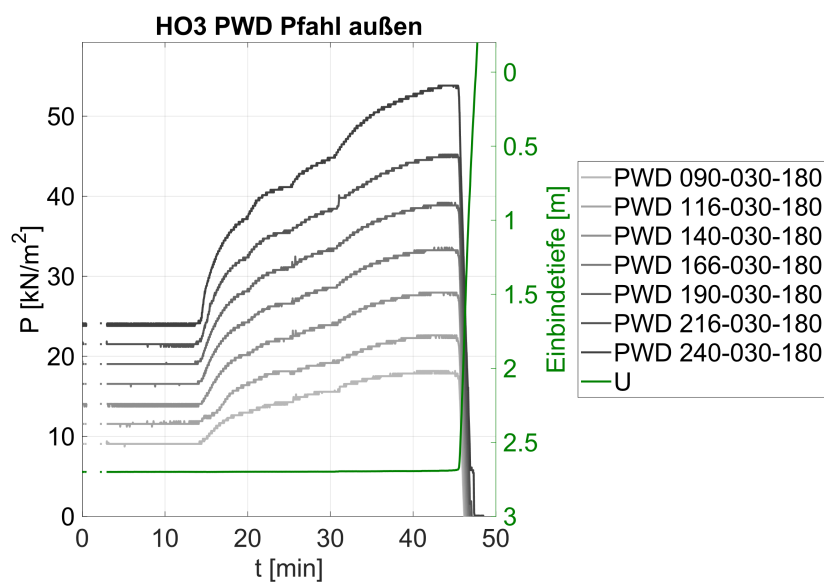


Abbildung D3 - 5: Gemessene PWD an der Pfahlaußenseite HO3

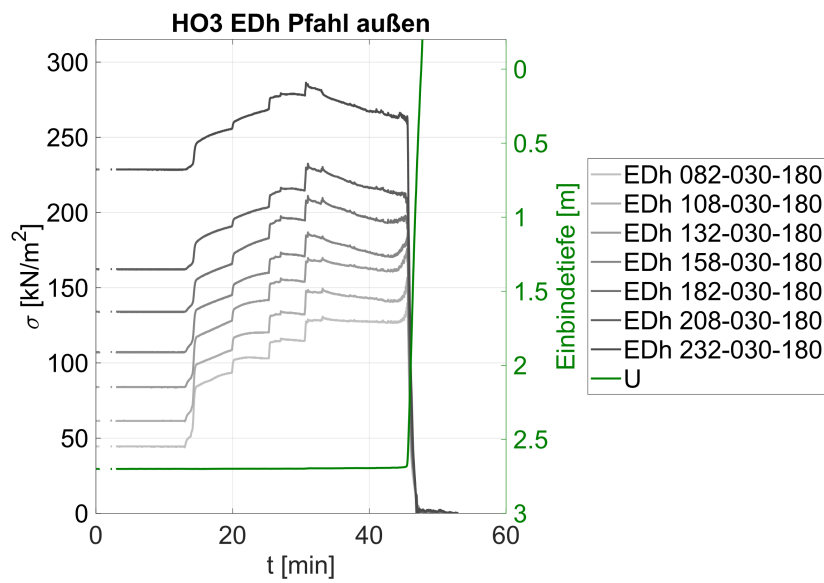


Abbildung D3 - 6: EDh an der Pfahlaußenseite HO3

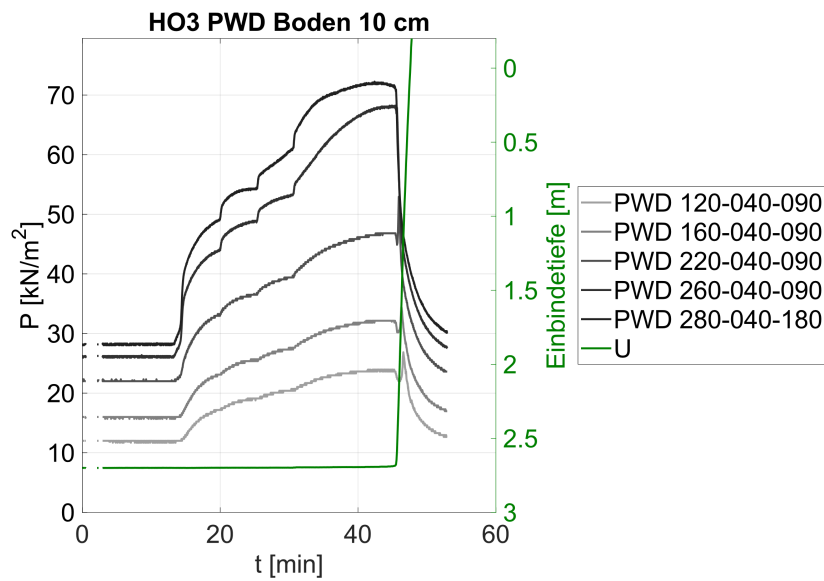


Abbildung D3 - 7: Gemessene PWD im Boden Abstand 10 cm vom Pfahl HO3

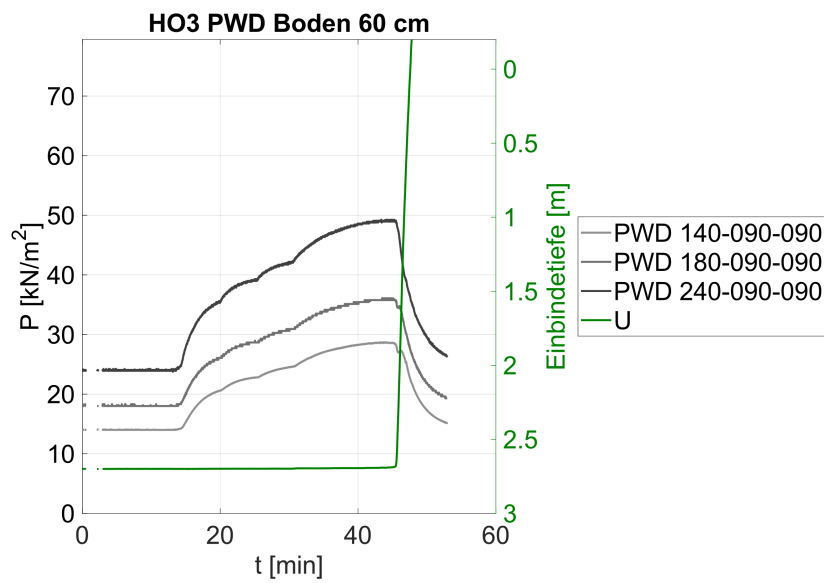


Abbildung D3 - 8: Gemessene PWD im Boden Abstand 60 cm vom Pfahl HO3

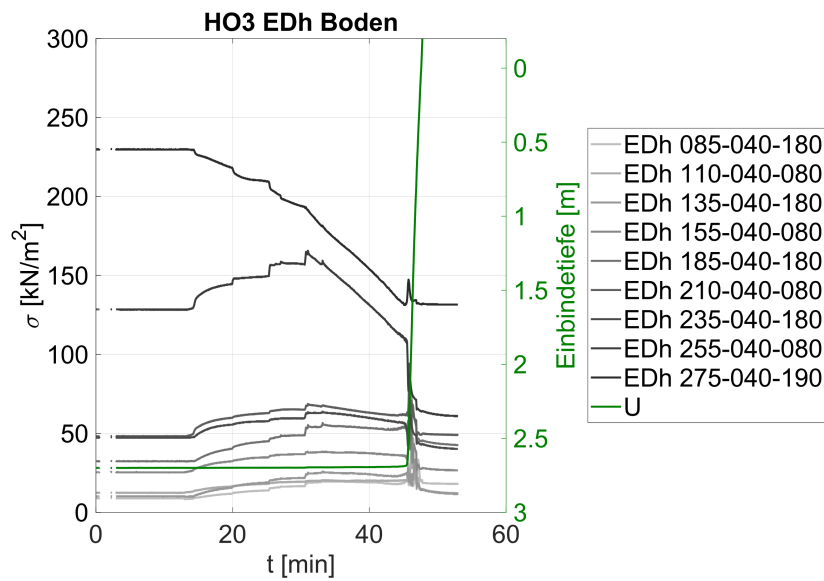


Abbildung D3 - 9: EDh im Boden Abstand 10 cm vom Pfahl HO3

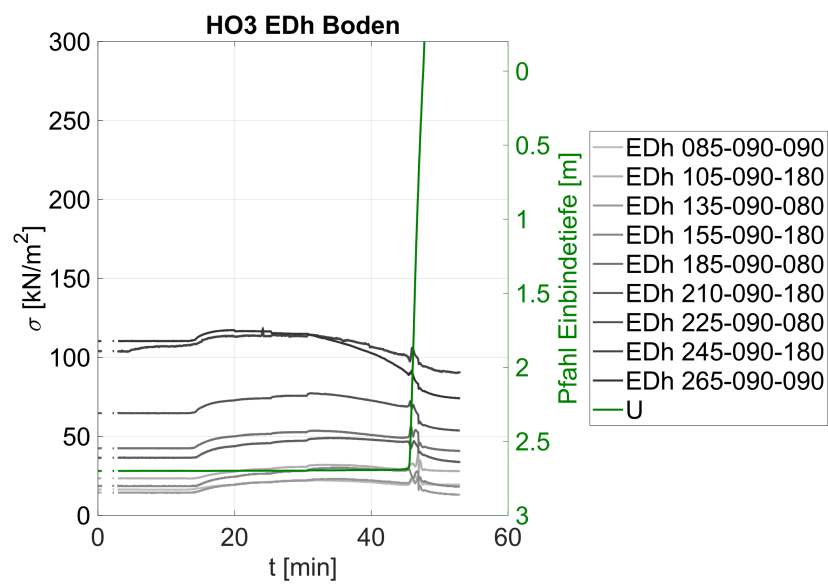


Abbildung D3 - 10: EDh im Boden Abstand 60 cm vom Pfahl HO3

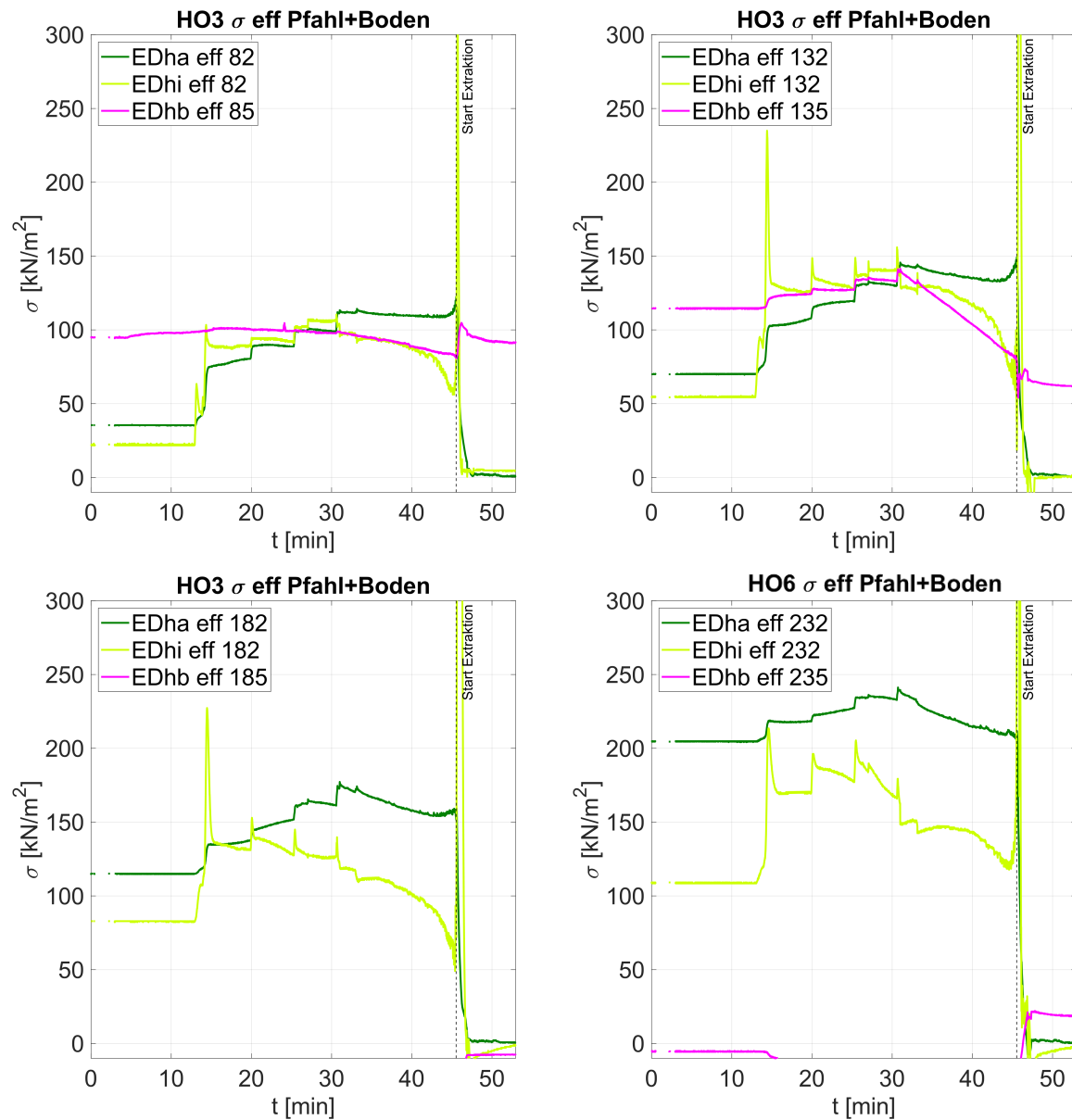


Abbildung D3 - 11: Versuchsparameter  $P$  und  $Q$ , Effektivspannung an der Pfahlaußen- (EDha eff) und Pfahlinnenseite (EDhi eff) sowie im Boden (EDhb eff) 10 cm vom Pfahl beim Versuch HO3

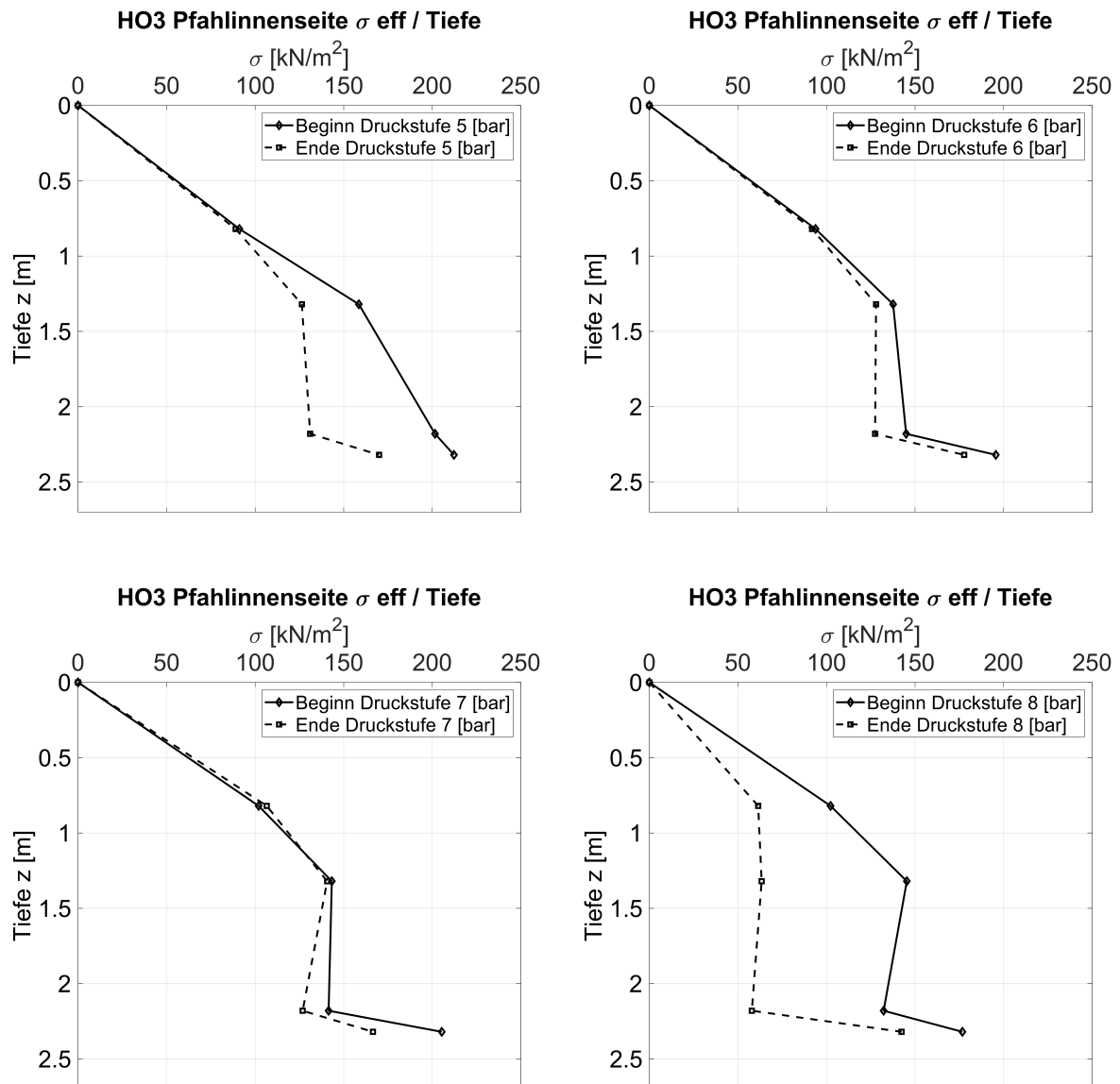


Abbildung D3 - 12 Entwicklung Effektivspannung Pfahlinnenseite über Tiefe z zu Beginn und zum Ende jeder Druckstufe HO3

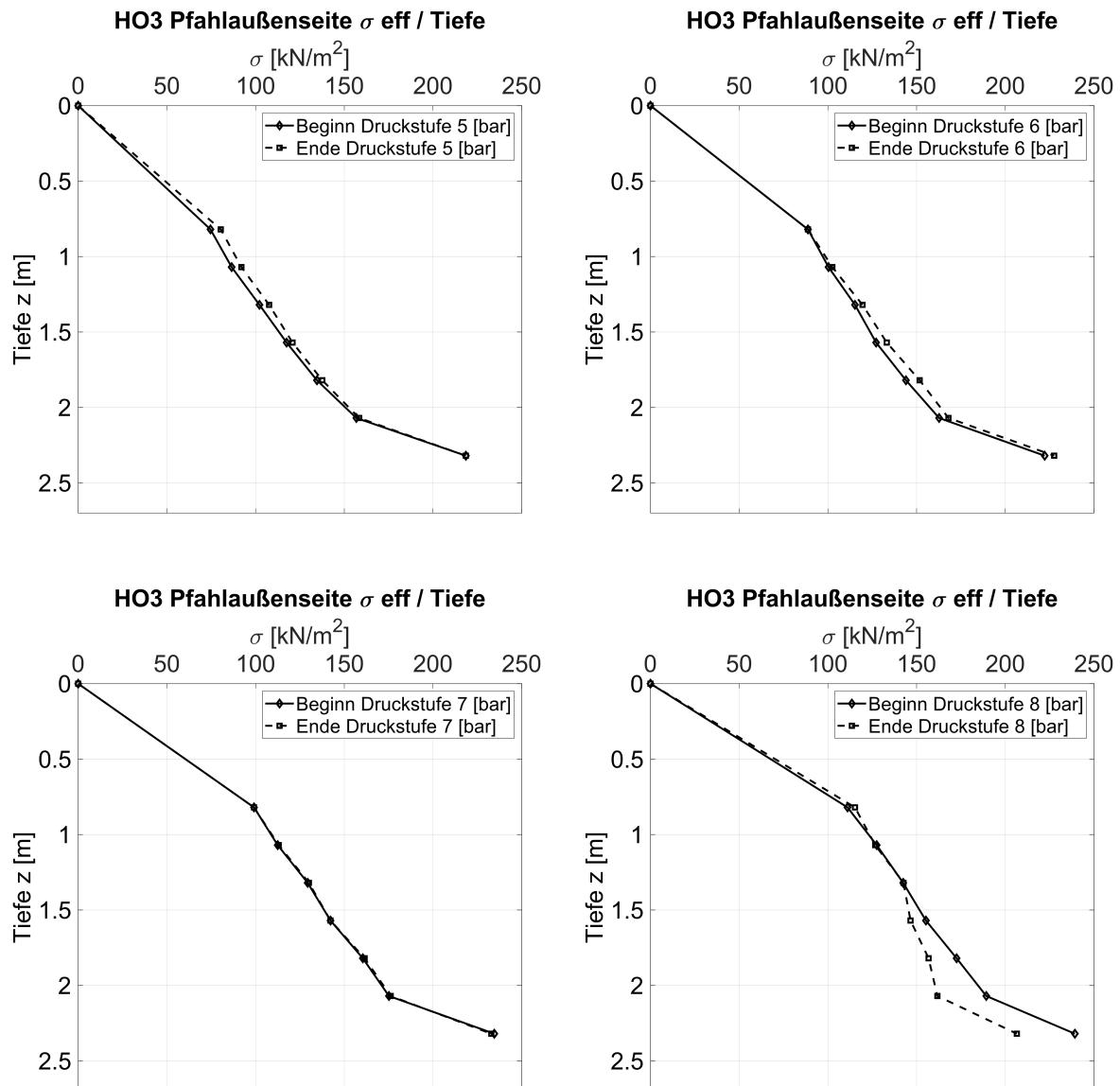


Abbildung D3 - 13: Entwicklung Effektivspannung Pfahlaußenseite über Tiefe z zu Beginn und zum Ende jeder Druckstufe HO3





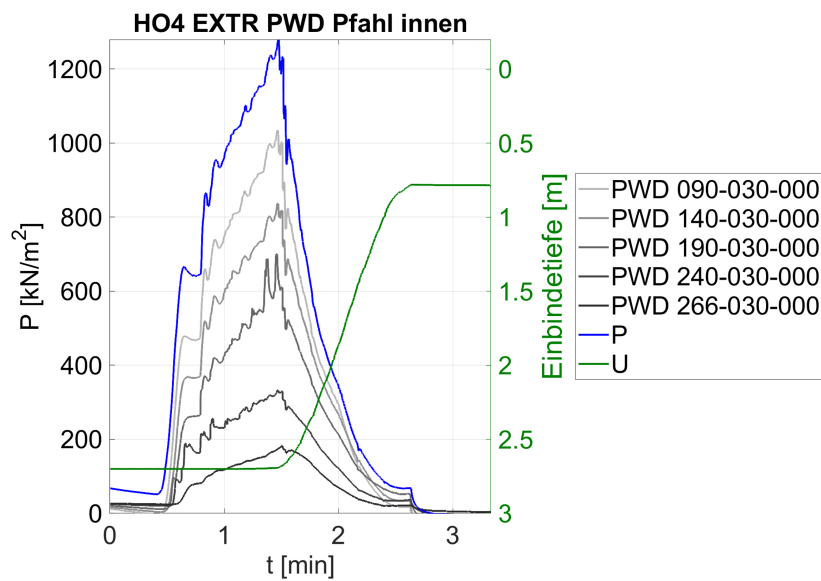


Abbildung D4 - 2: Gemessene PWD an der Pfahlinnenseite HO4

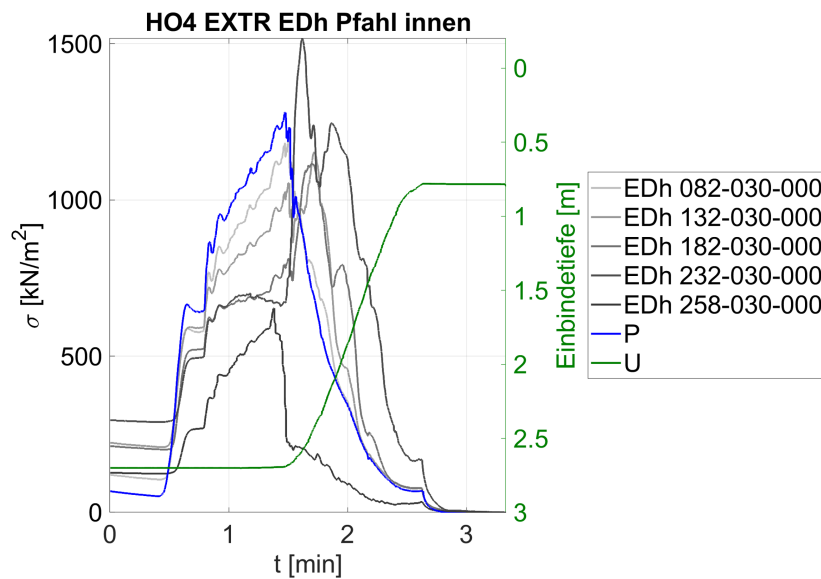


Abbildung D4 - 3: Gemessene EDh an der Pfahlinnenseite HO4

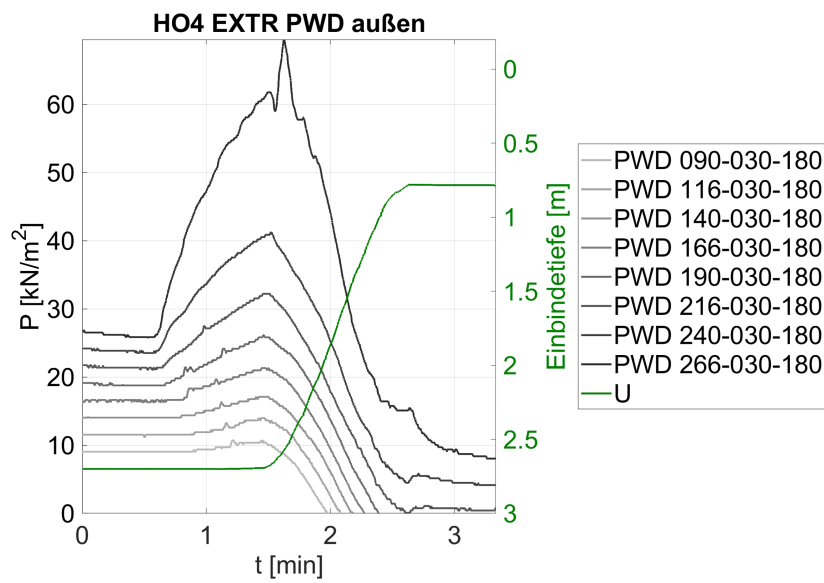


Abbildung D4 - 4: Gemessene PWD an der Pfahlaußenseite HO4

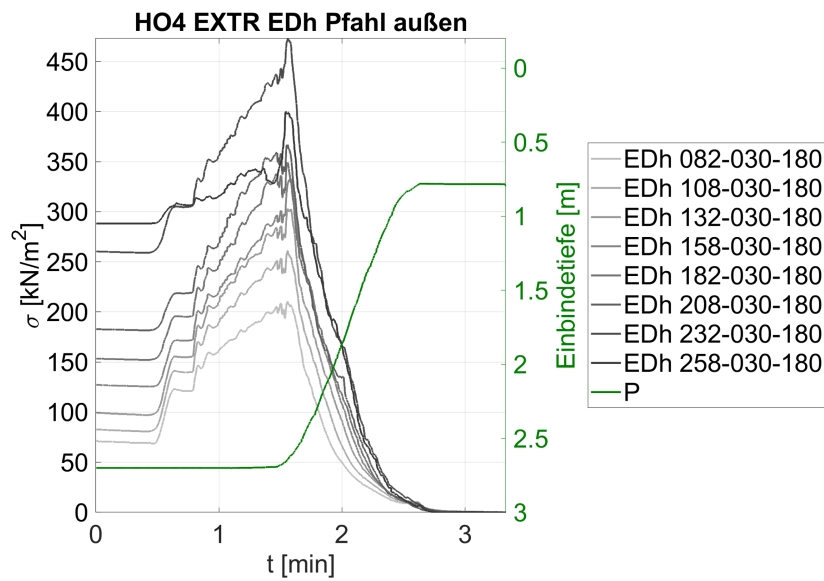


Abbildung D4 - 5: EDh an der Pfahlaußenseite HO4

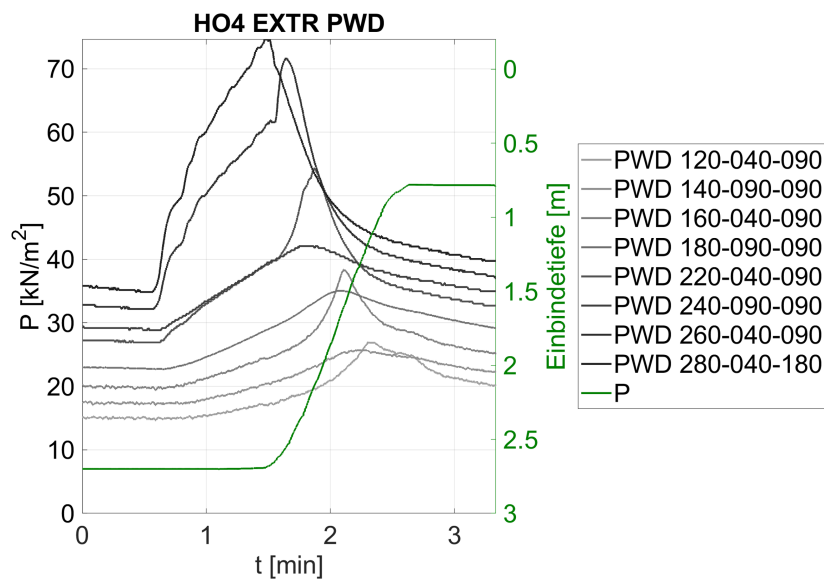


Abbildung D4 - 6: Gemessene PWD im Boden HO4

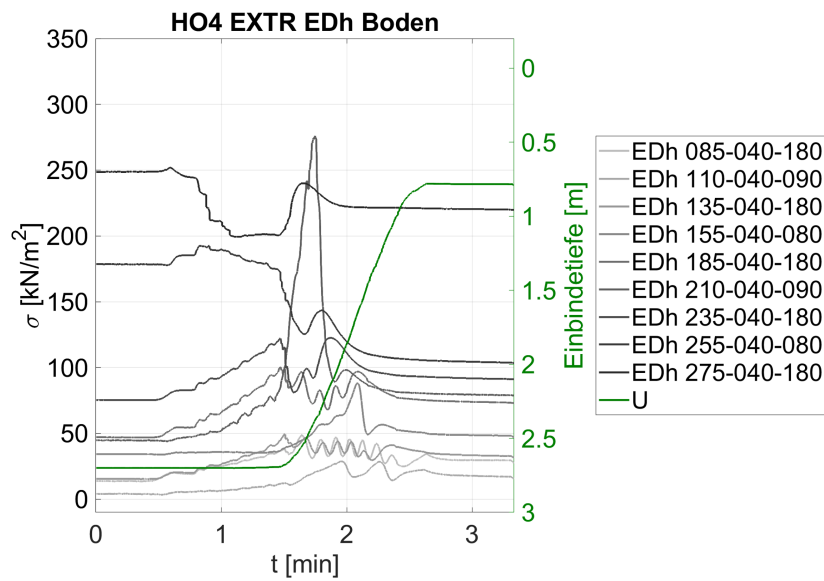


Abbildung D4 - 7: EDh im Boden Abstand 10 cm vom Pfahl HO4

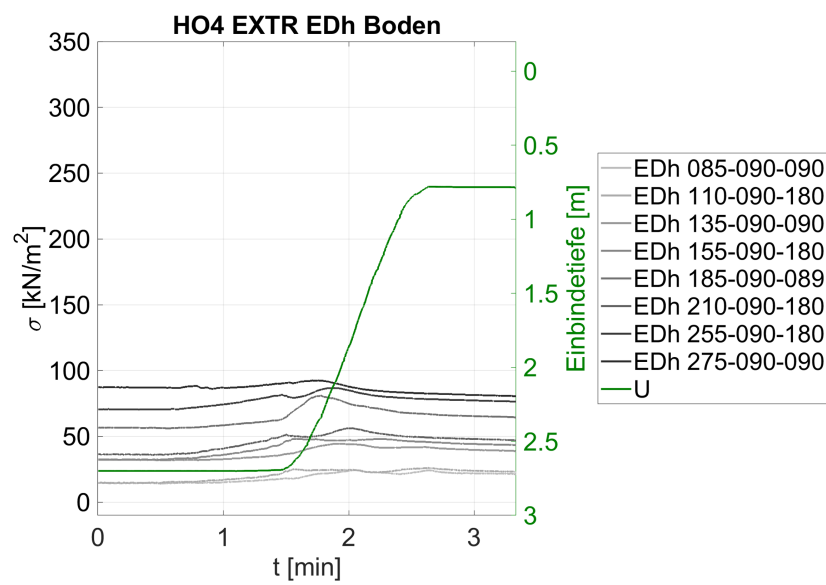


Abbildung D4 - 8: EDh im Boden Abstand 60 cm vom Pfahl HO4

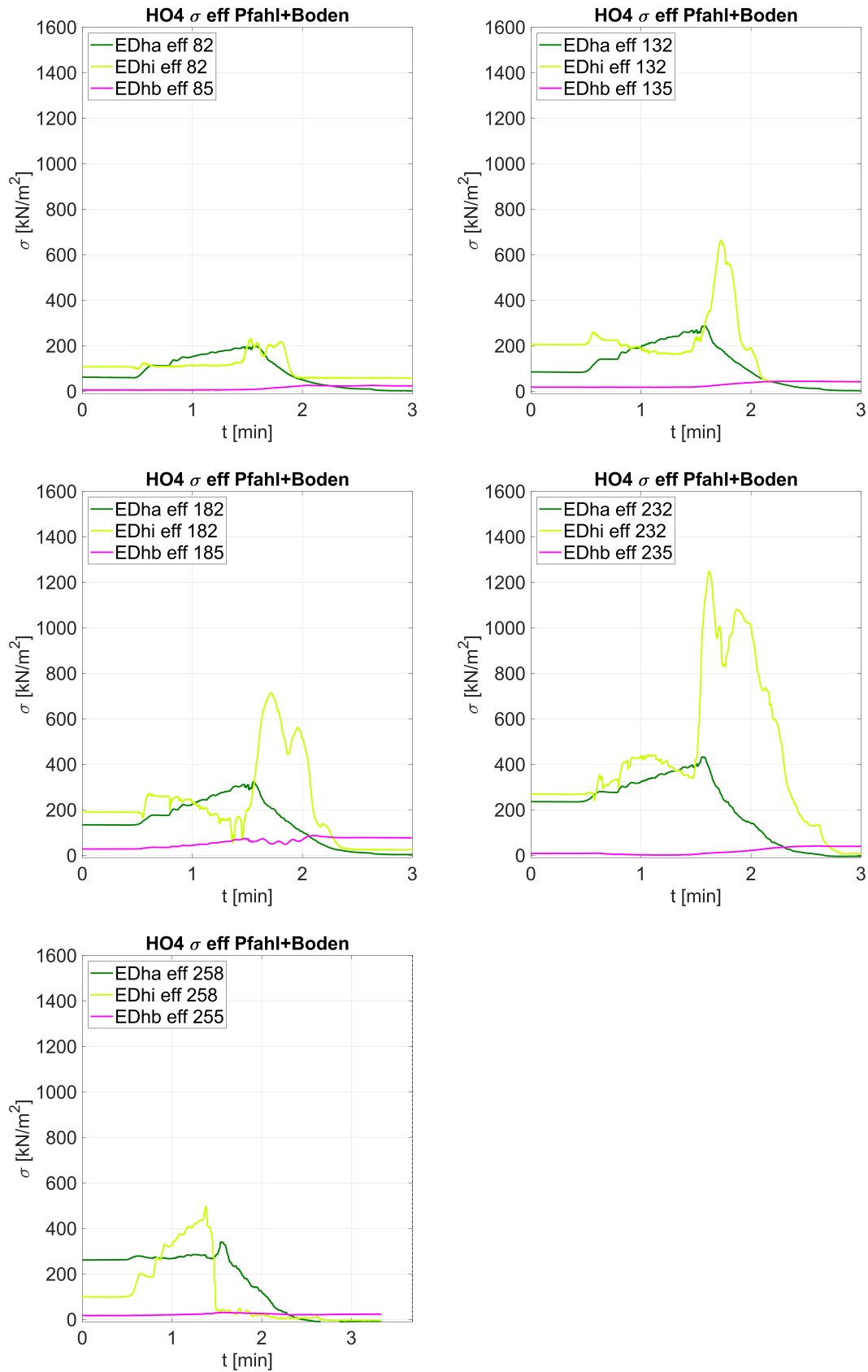


Abbildung D4 - 9: Versuchparameter P und Q, Effektivspannung an der Pfahlaußen- (EDha eff) und Pfahlinnenseite (EDhi eff) sowie im Boden (EDhb eff) 10 cm vom Pfahl beim Versuch HO4



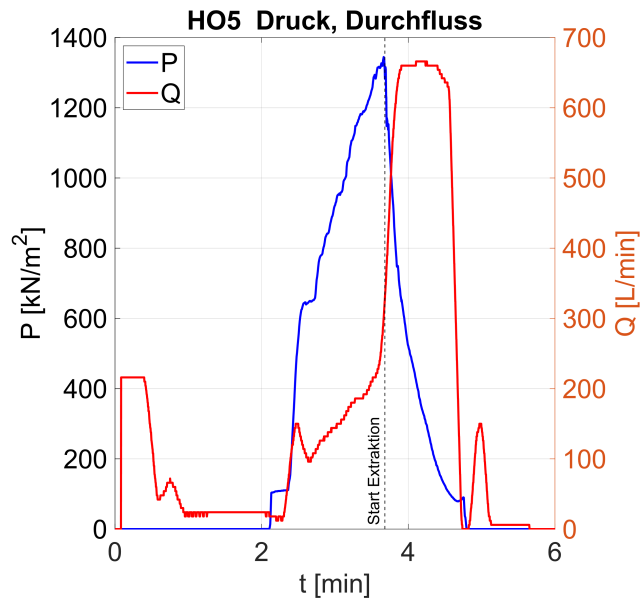


Abbildung D5 - 2: Eingeleiteter Druck  $P$  mit dem Durchfluss  $Q$  – Teilversuch HO5

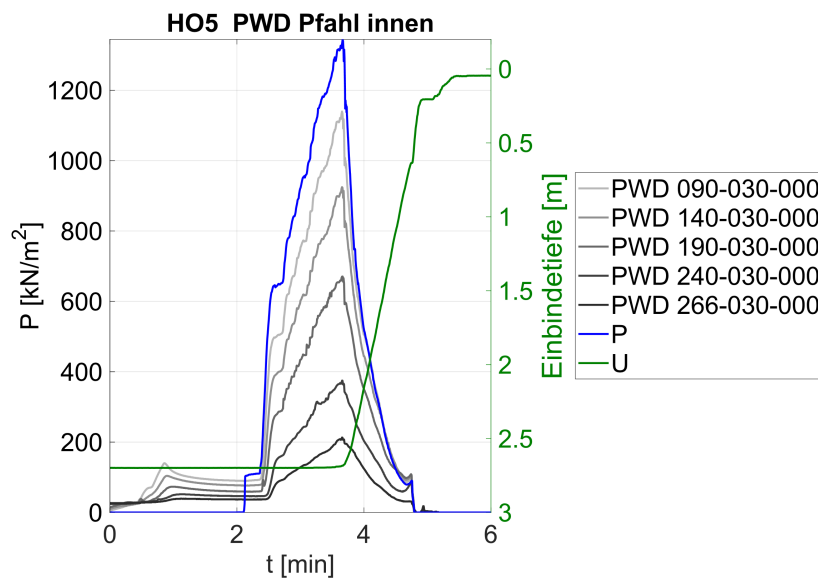


Abbildung D5 - 3: Gemessene PWD an der Pfahlinnenseite HO5

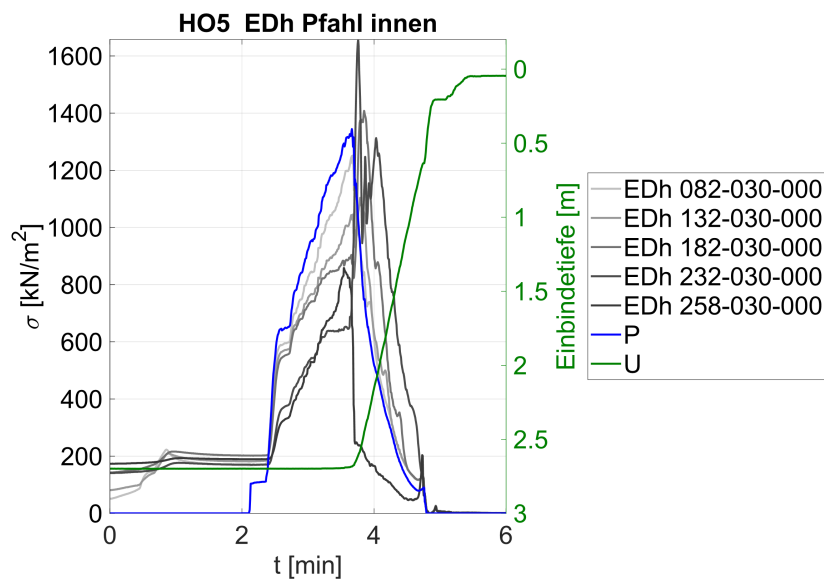


Abbildung D5 - 4: Gemessene EDh an der Pfahlinnenseite HO5

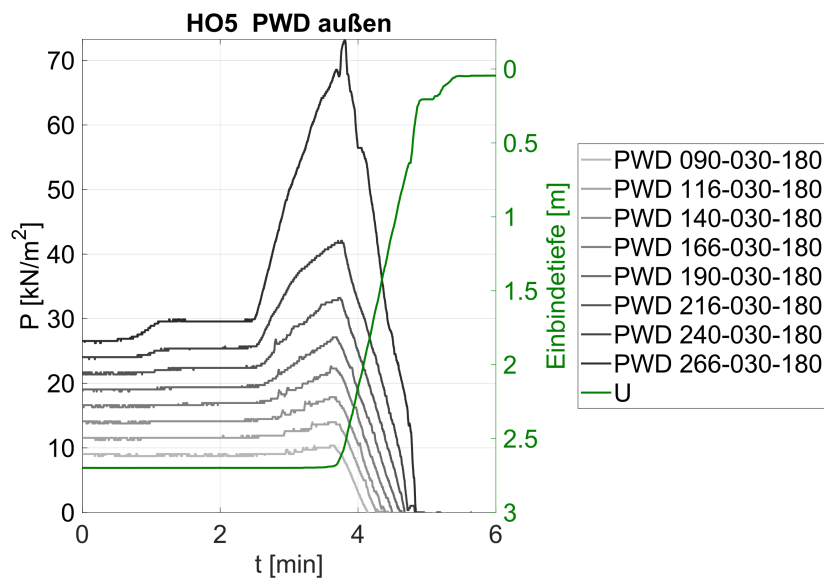


Abbildung D5 - 5: Gemessene PWD an der Pfahlausenseite HO5



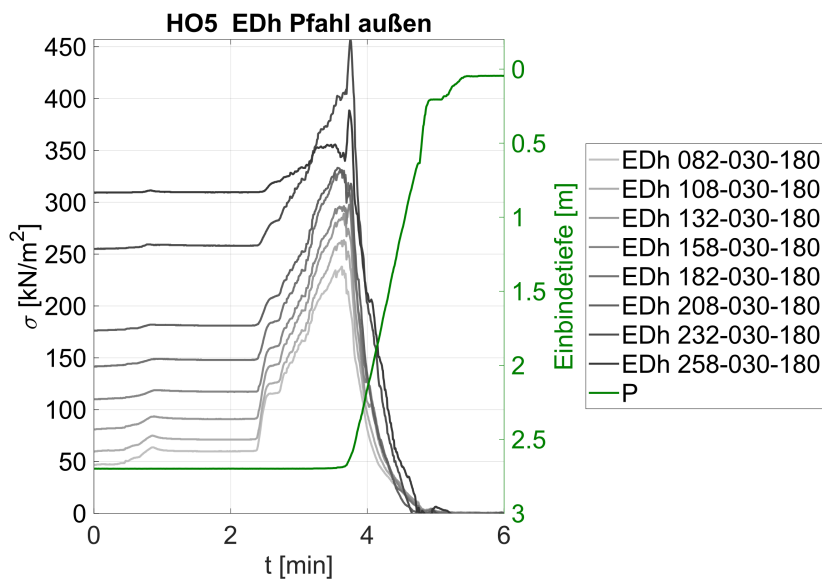


Abbildung D5 - 6: EDh an der Pfahlaußenseite HO5

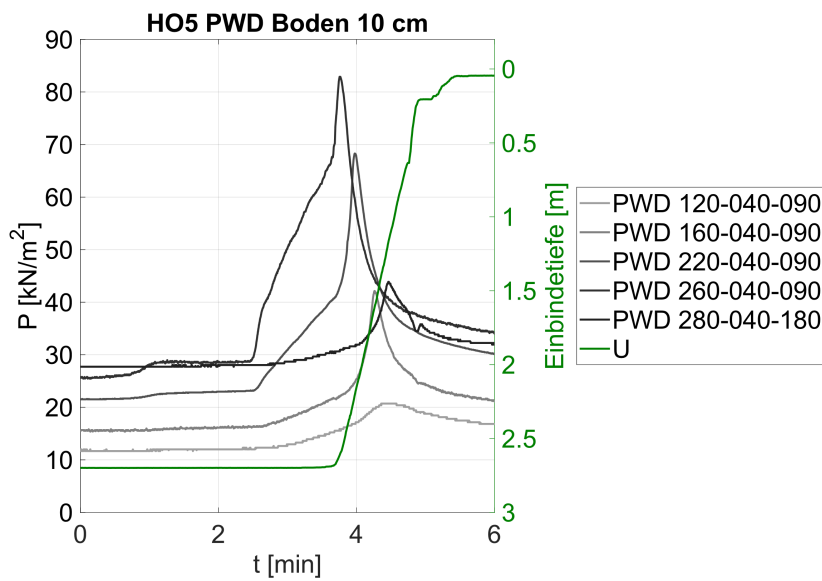


Abbildung D5 - 7: Gemessene PWD im Boden Abstand 10 cm vom Pfahl HO5

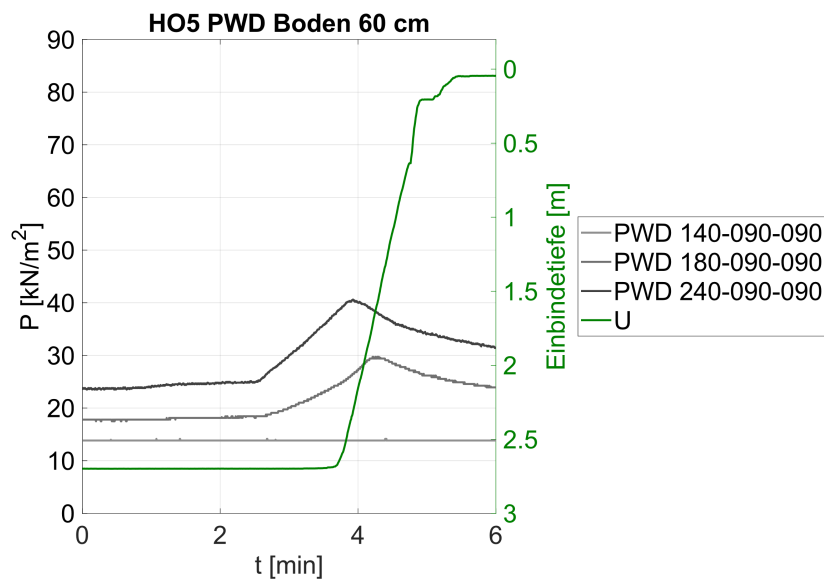


Abbildung D5 - 8: Gemessene PWD im Boden Abstand 60 cm vom Pfahl HO5

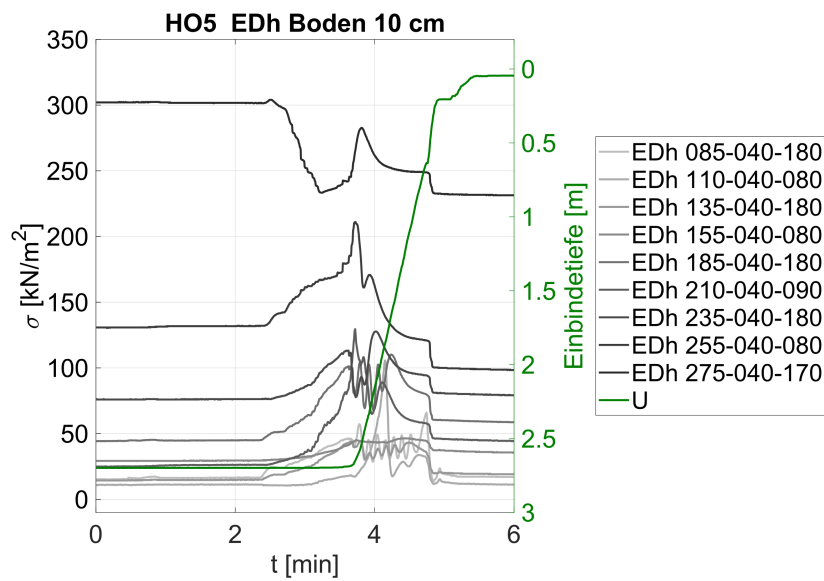


Abbildung D5 - 9: EDh im Boden Abstand 10 cm vom Pfahl HO5

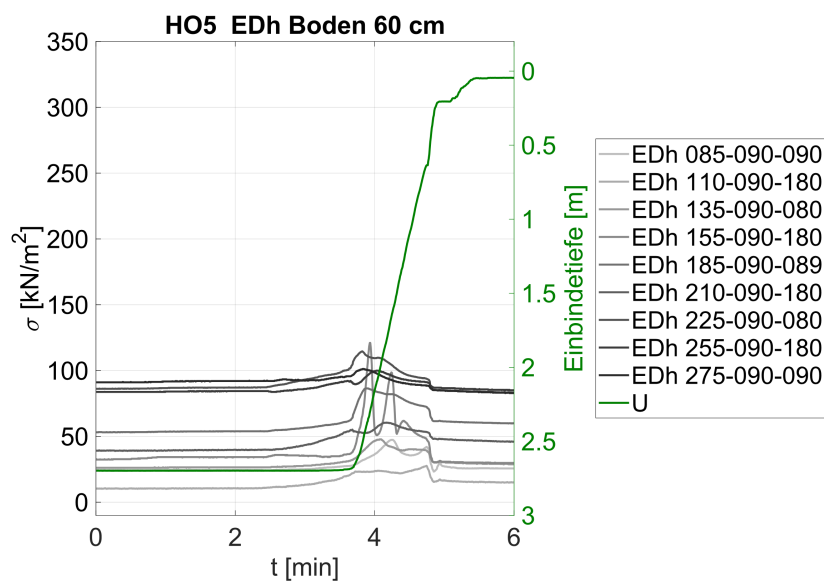


Abbildung D5 - 10: EDh im Boden Abstand 60 cm vom Pfahl HO5

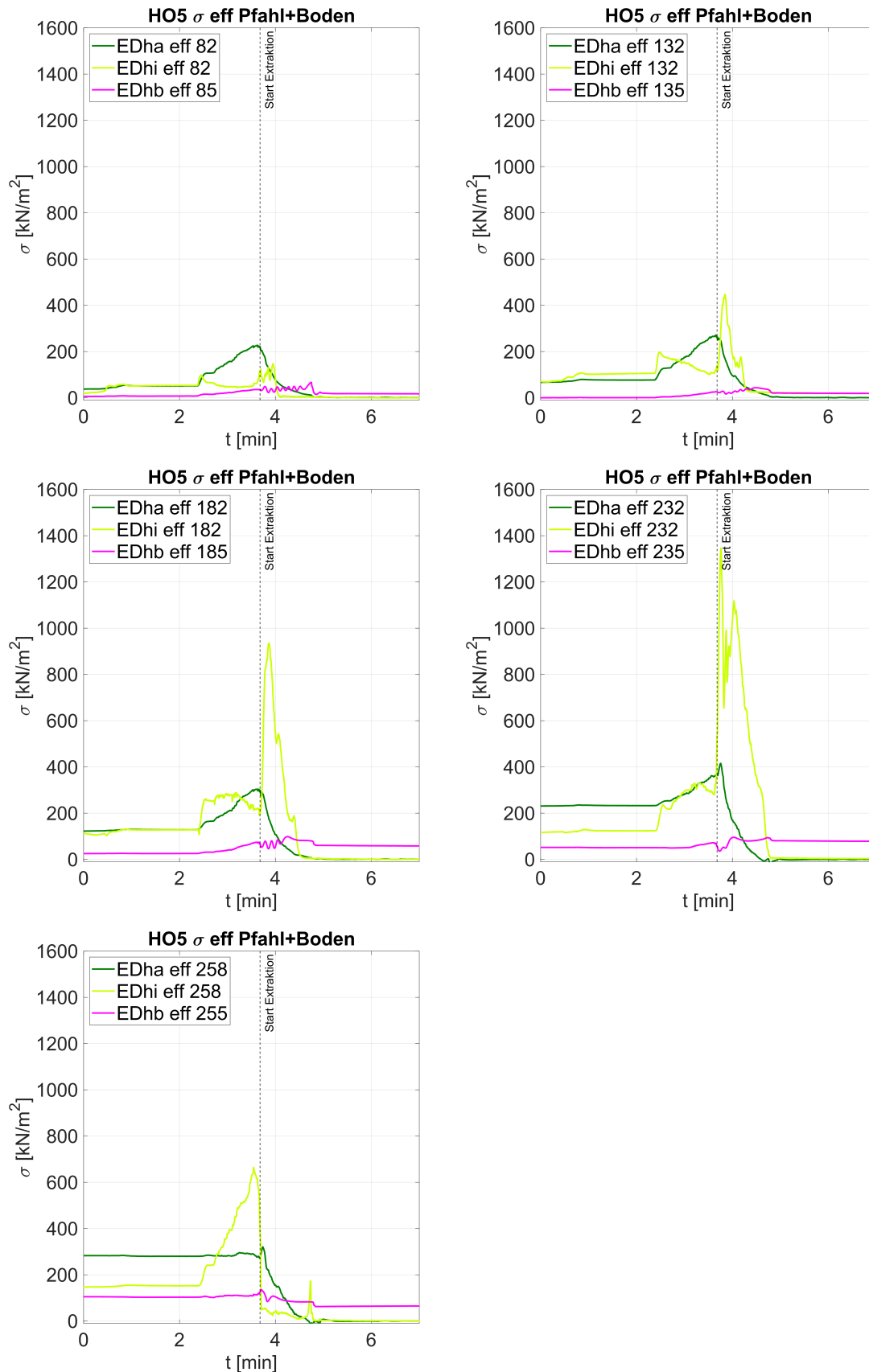


Abbildung D5 - 11: Versuchparameter P und Q, Effektivspannung an der Pfahlaußen- (EDha eff) und Pfahlinnenseite (EDhi eff) sowie im Boden (EDhb eff) 10 cm vom Pfahl beim Versuch HO5

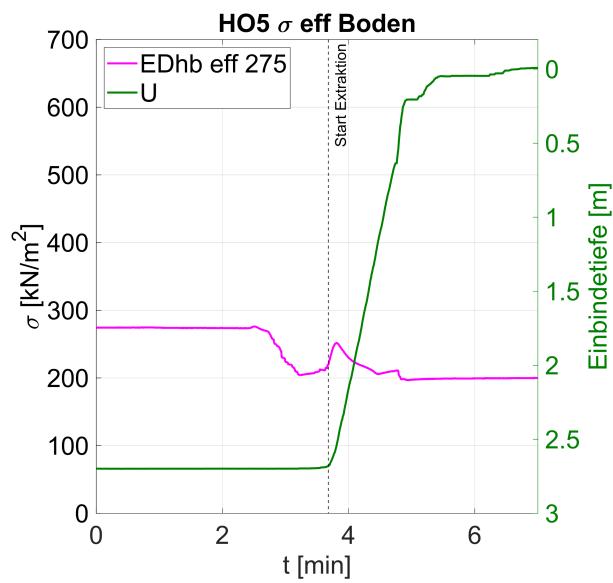


Abbildung D5 - 12: Effektivspannung im Boden (EDhb eff) unter dem Pfahlfuß, mit 10 cm Abstand zum Pfahl HO5

## D6 Versuchsergebnisse HO6

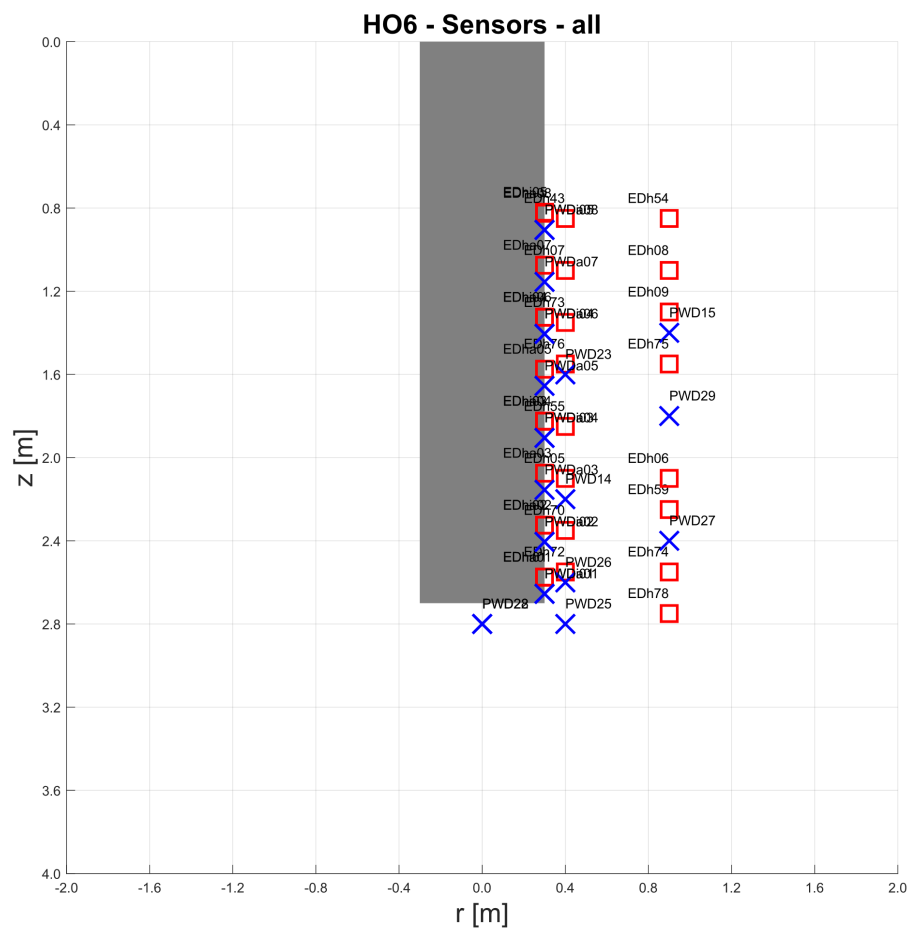


Abbildung D6 - 1: Lage Sensorik Versuch HO6

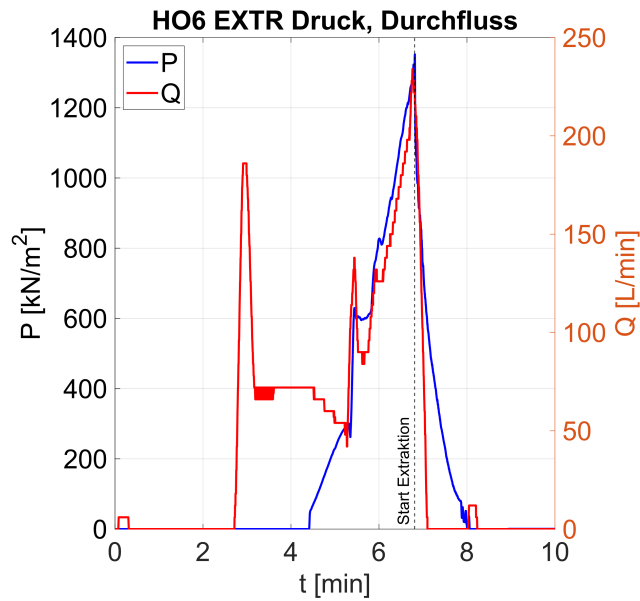


Abbildung D6 - 2: Eingeleiteter Druck  $P$  mit dem Durchfluss  $Q$  – Teilversuch HO6

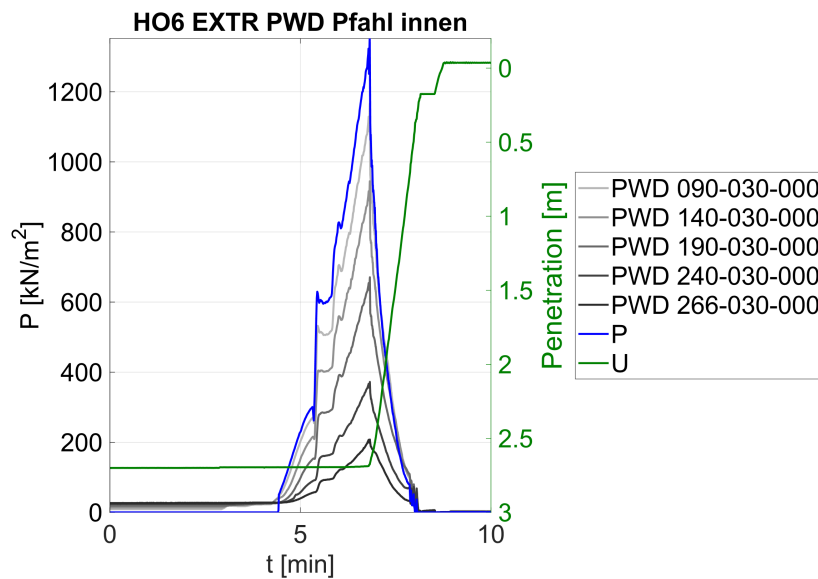


Abbildung D6 - 3: Gemessene PWD an der Pfahlinnenseite HO6

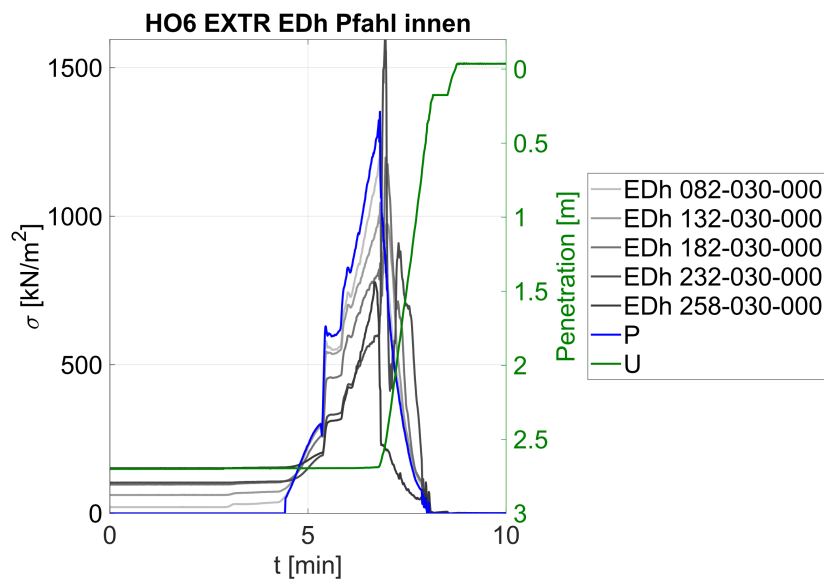


Abbildung D6 - 4: Gemessene EDh an der Pfahlinnenseite HO6

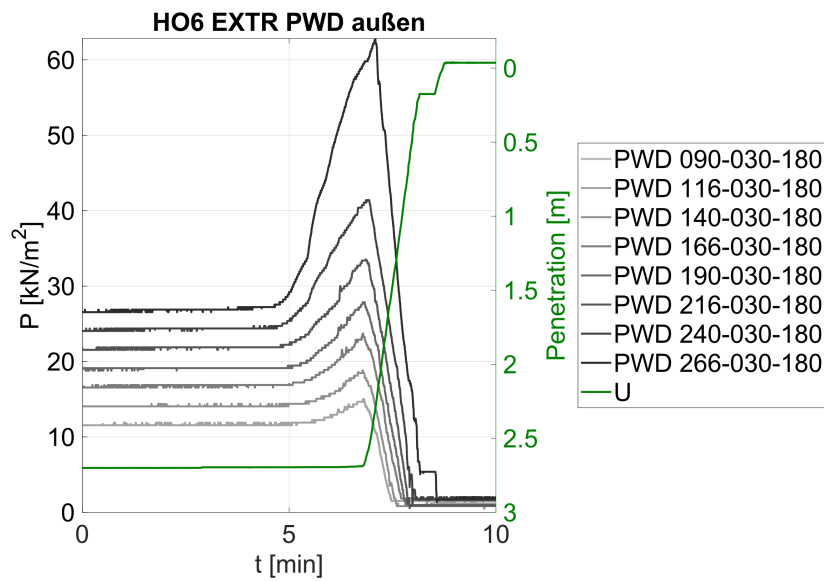


Abbildung D6 - 5: Gemessene PWD an der Pfahlaußenseite HO6



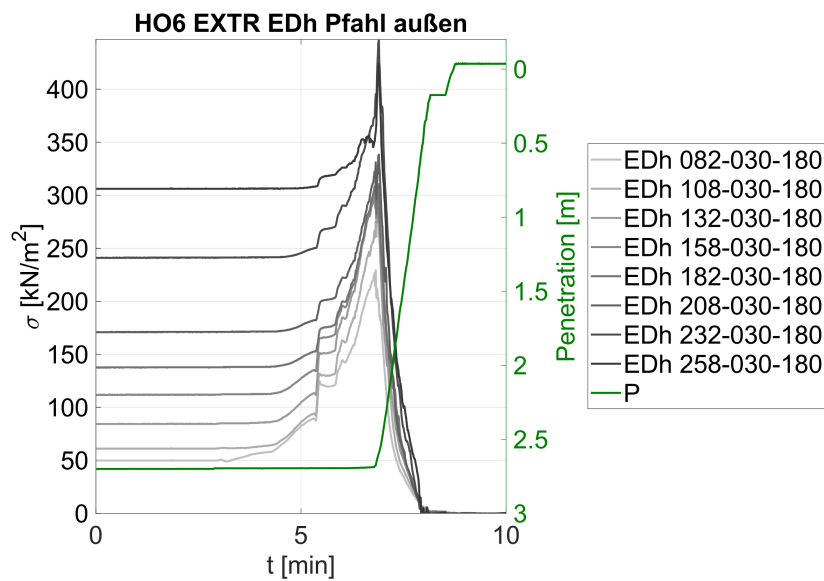


Abbildung D6 - 6: EDh an der Pfahlaußenseite HO6

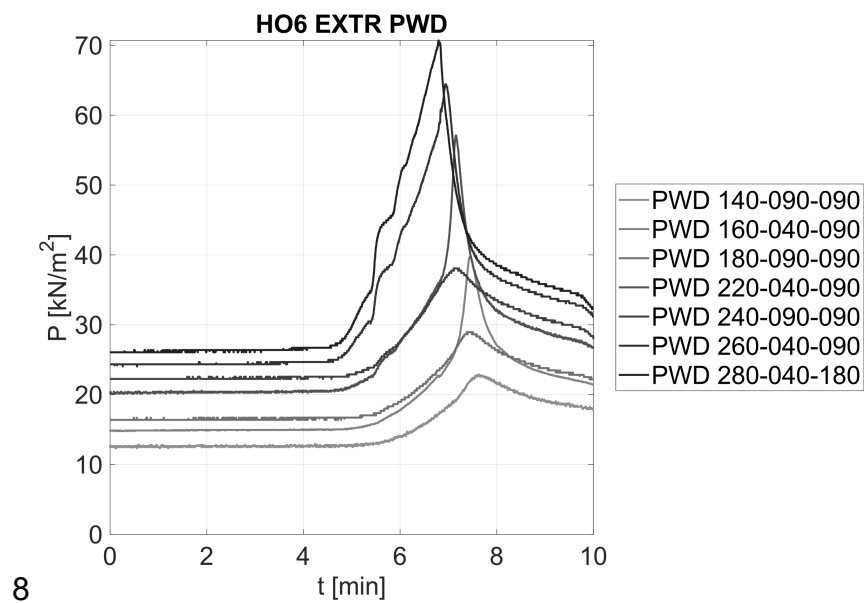


Abbildung D6 - 7: Gemessene PWD im Boden HO6

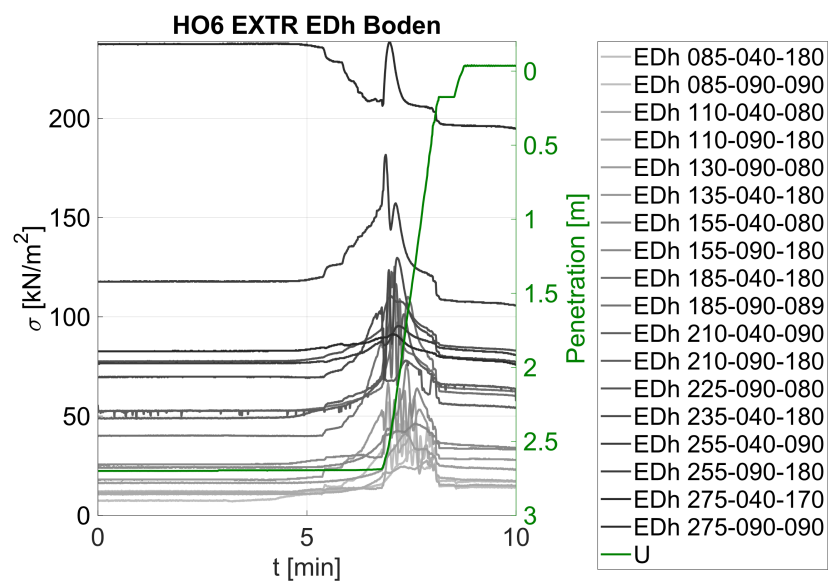


Abbildung D6 - 8: EDh im Boden HO6

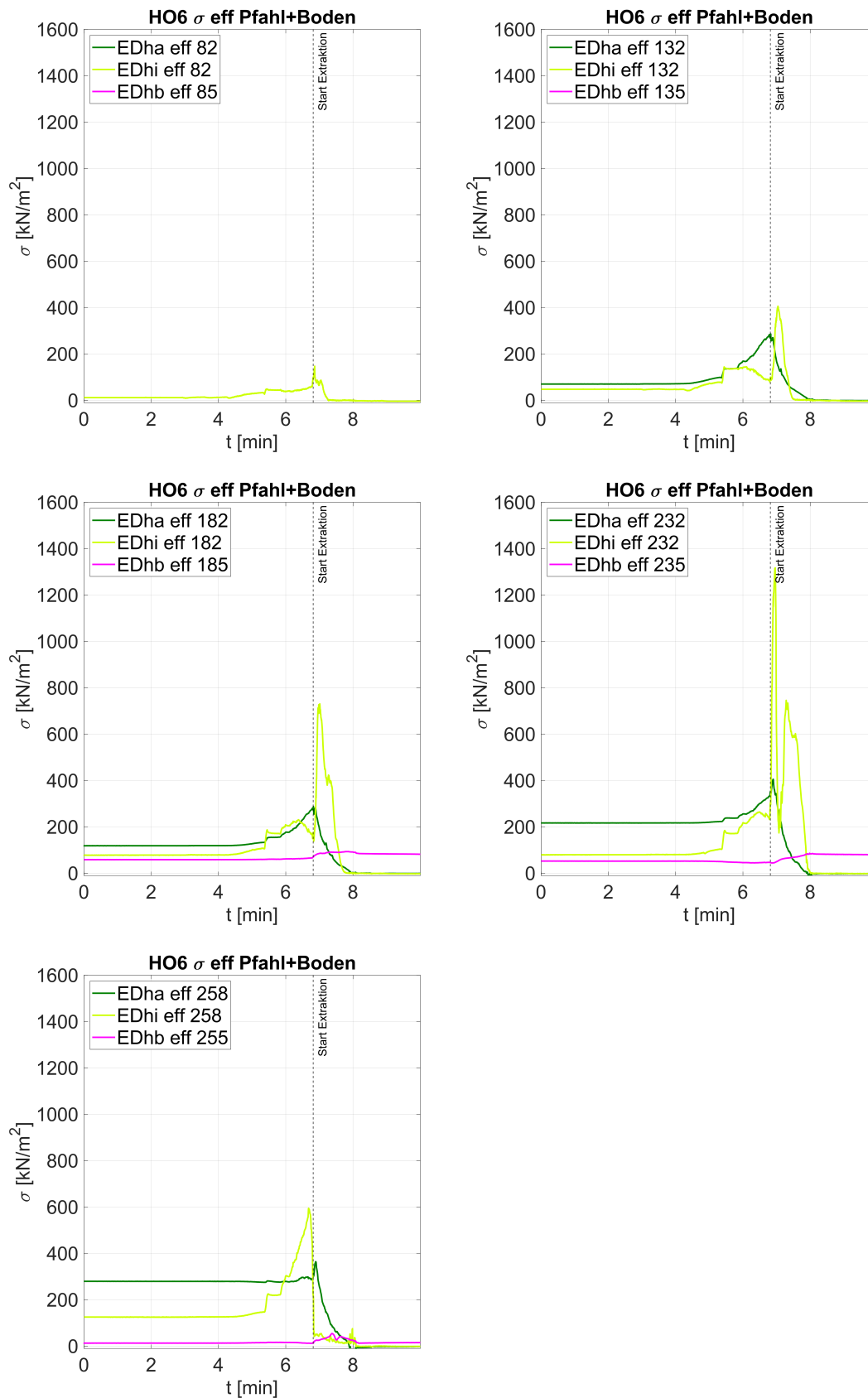


Abbildung D6 - 9: Versuchsp Parameter  $P$  und  $Q$ , Effektivspannung an der Pfahlaußen- (EDha eff) und Pfahlinnenseite (EDhi eff) sowie im Boden (EDhb eff) 10 cm vom Pfahl beim Versuch HO6

## D7 Versuchsergebnisse HO7

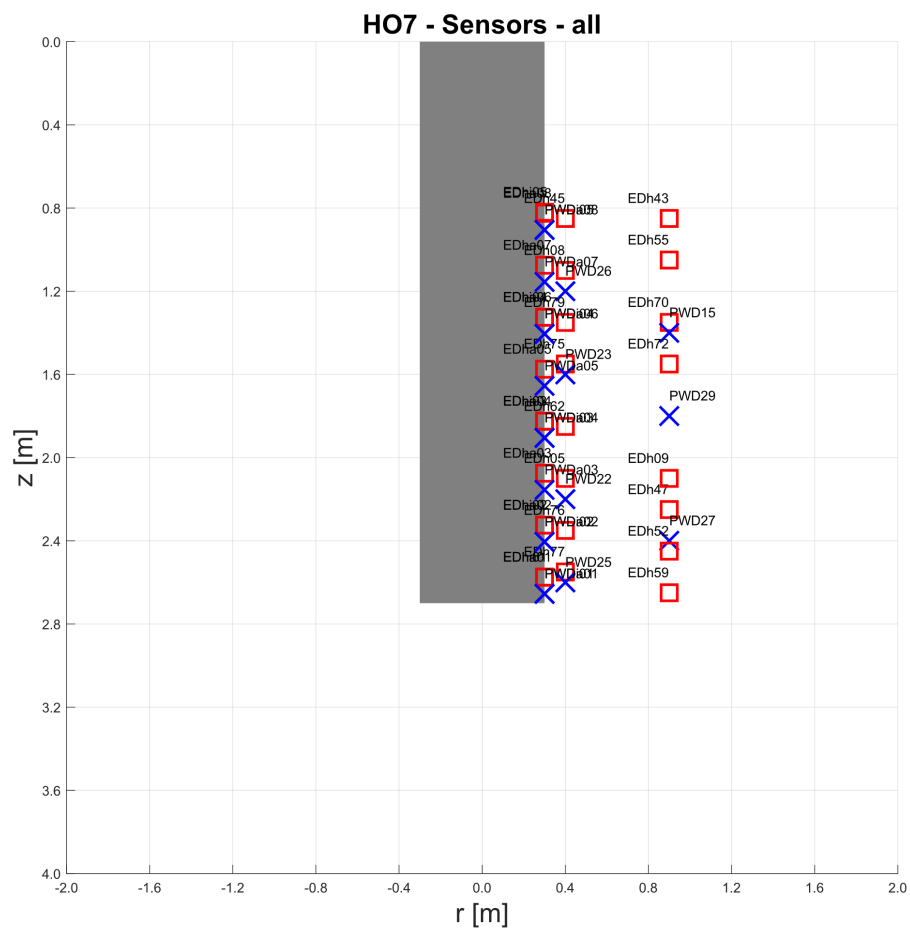


Abbildung D7 - 1: Lage Sensorik Versuch HO7

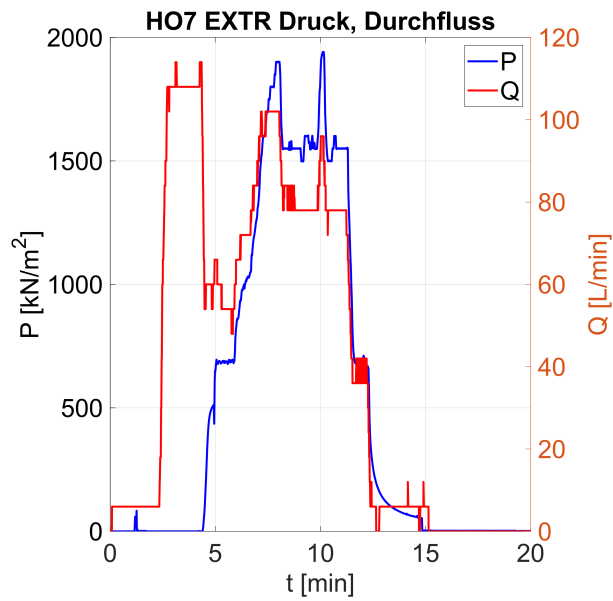


Abbildung D7 - 2: Eingeleiteter Druck  $P$  mit dem Durchfluss  $Q$  – Teilversuch HO7

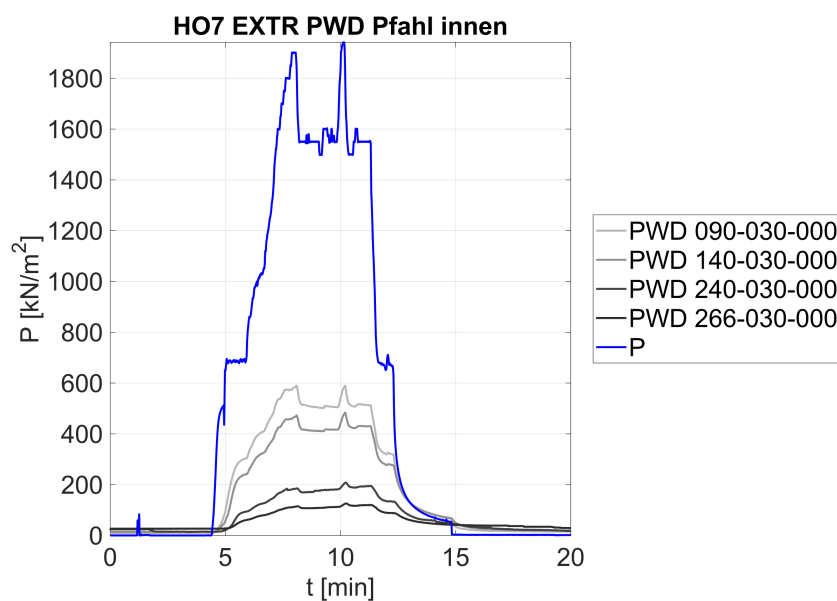


Abbildung D7 - 3: Gemessene PWD an der Pfahlinnenseite HO7

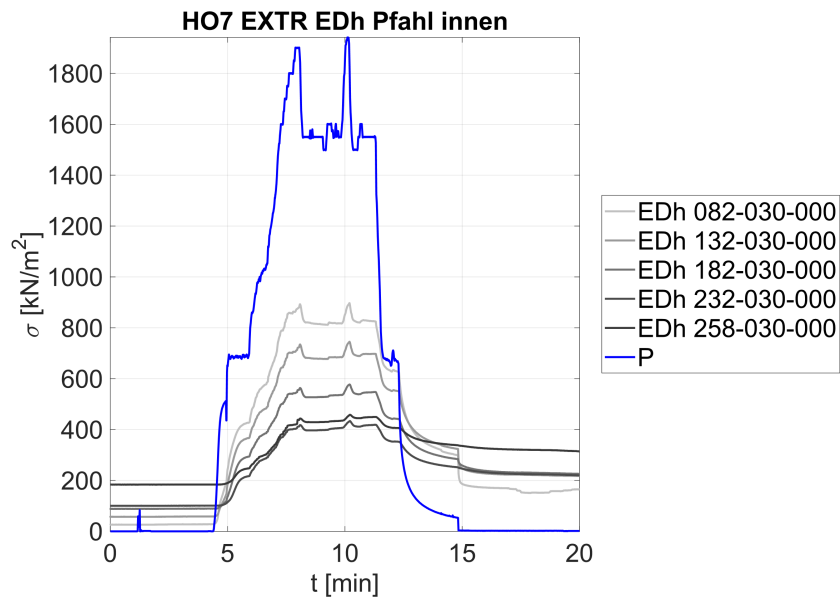


Abbildung D7 - 4: Gemessene EDh an der Pfahlinnenseite HO7

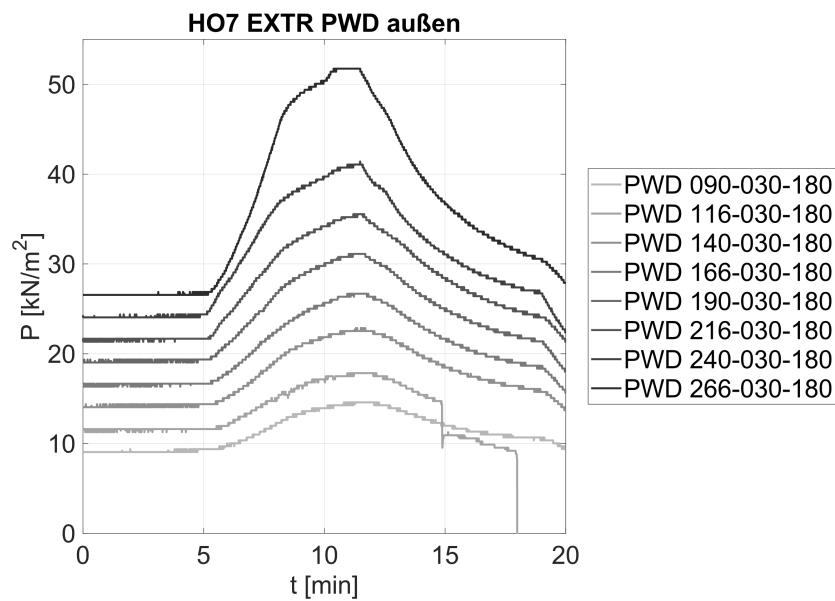


Abbildung D7 - 5: Gemessene PWD an der Pfahlausenseite HO7

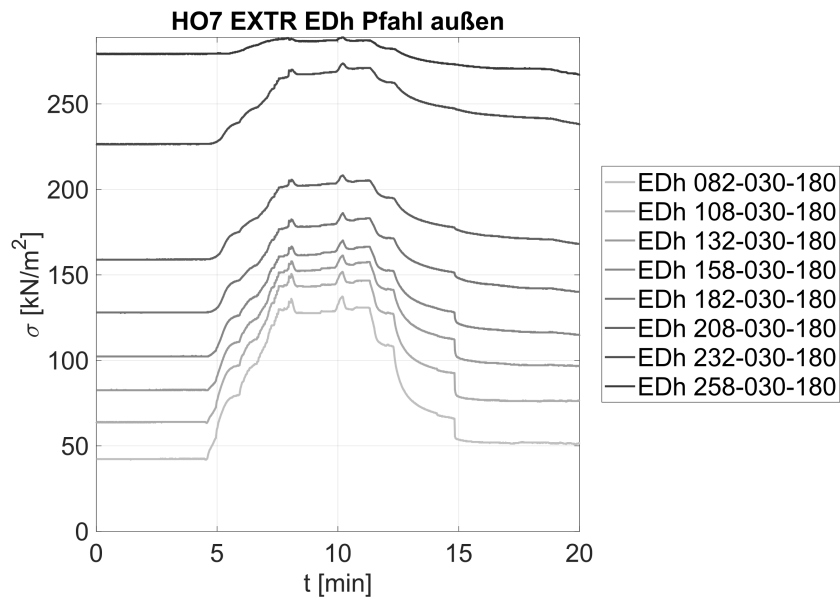


Abbildung D7 - 6: EDh an der Pfahlaußenseite HO7

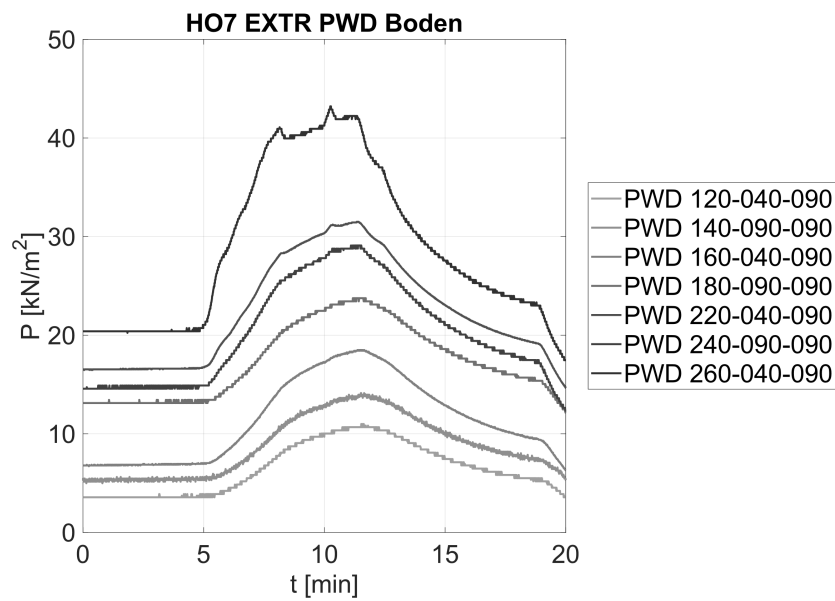


Abbildung D7 - 7: PWD im Boden HO7

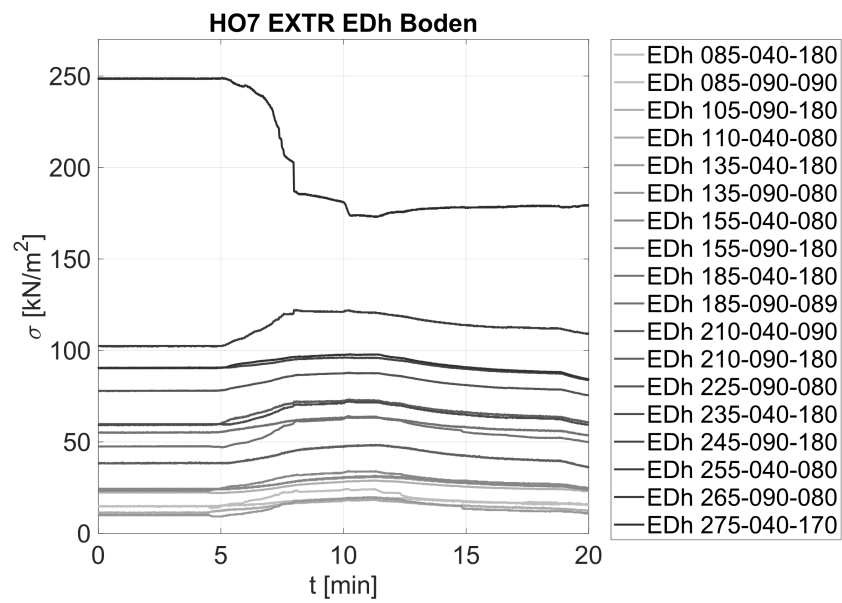


Abbildung D7 - 8: EDh im Boden HO7



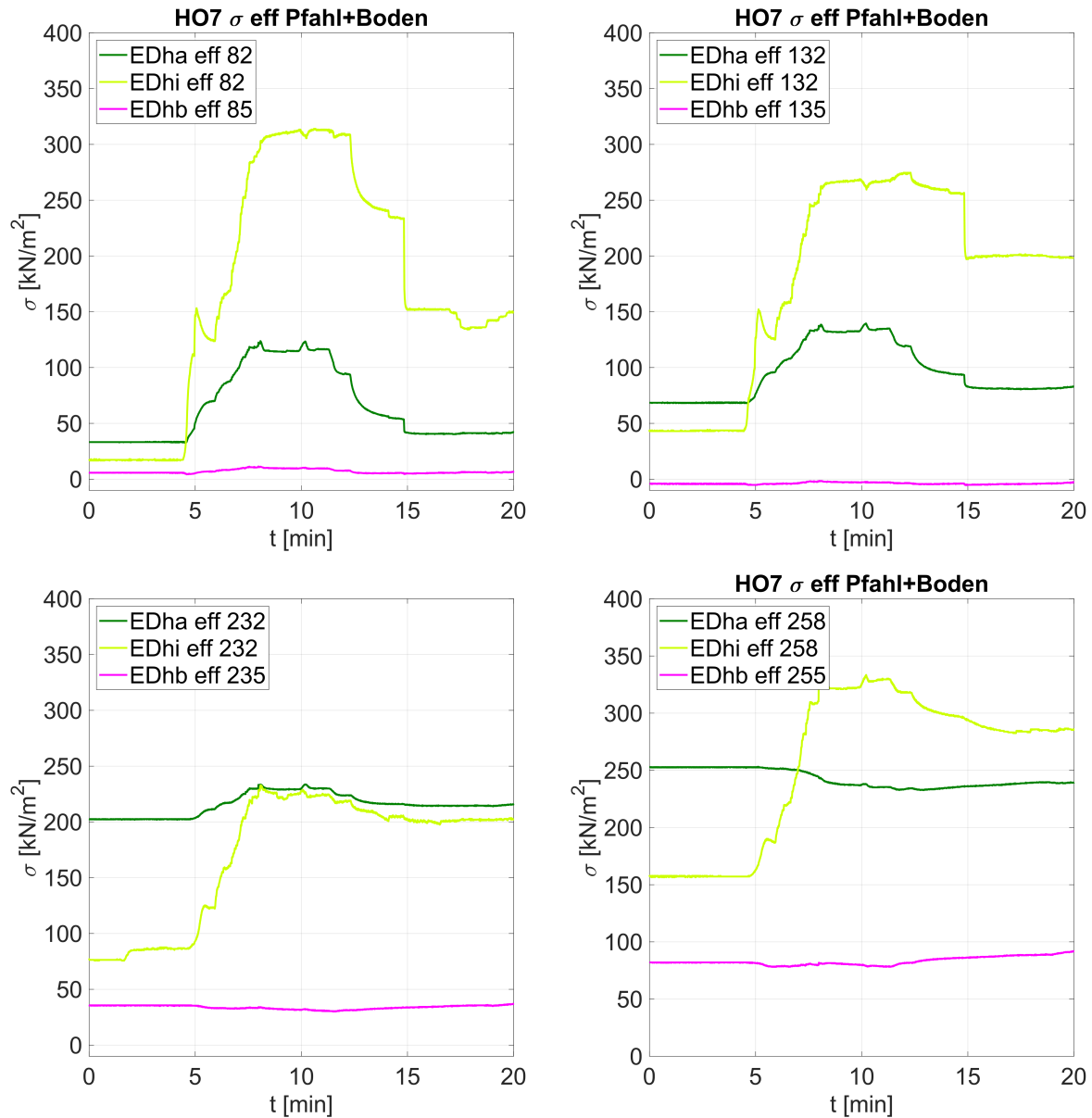


Abbildung D7 - 9: Versuchsparameter  $P$  und  $Q$ , Effektivspannung an der Pfahlaußen- (EDha eff) und Pfahlinnenseite (EDhi eff) sowie im Boden (EDhb eff) 10 cm vom Pfahl beim Versuch HO7

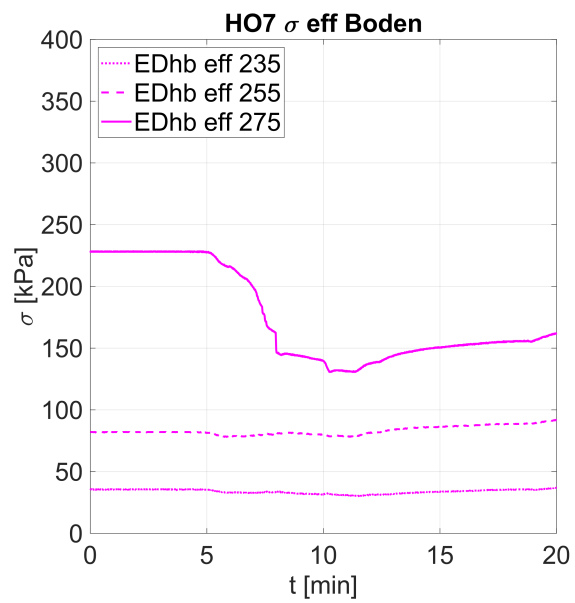


Abbildung D7 - 10: Effektivspannung im Boden (EDhb eff) unter dem Pfahlfuß, mit 10 cm Abstand zum Pfahl HO7



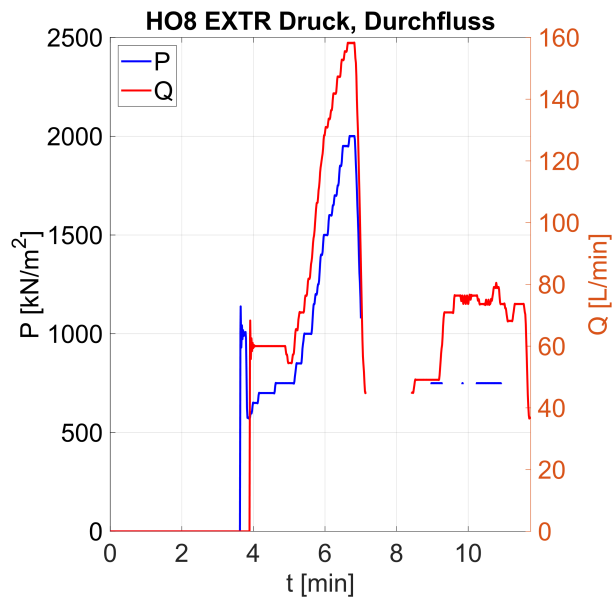


Abbildung D8 - 2: Eingeleiteter Druck  $P$  mit dem Durchfluss  $Q$  – Teilversuch HO8

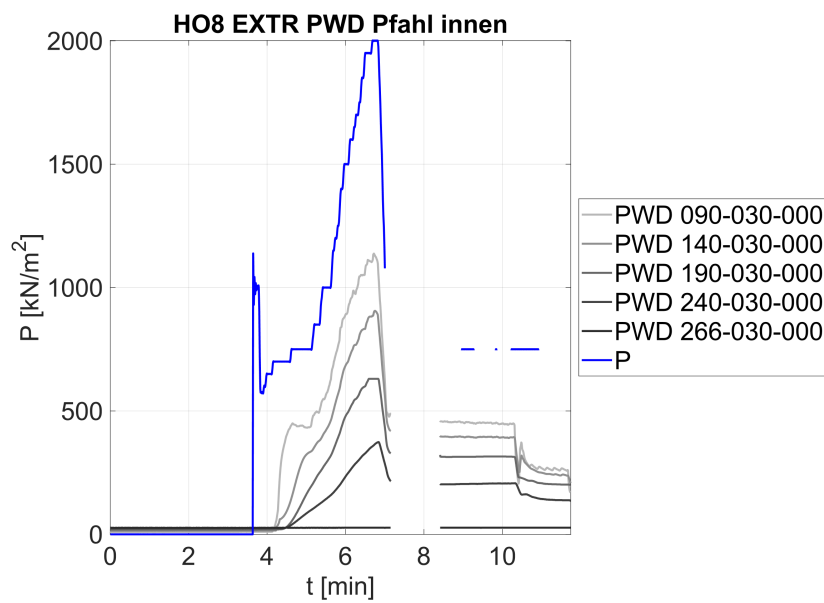


Abbildung D8 - 3: Gemessene PWD an der Pfahlinnenseite HO8

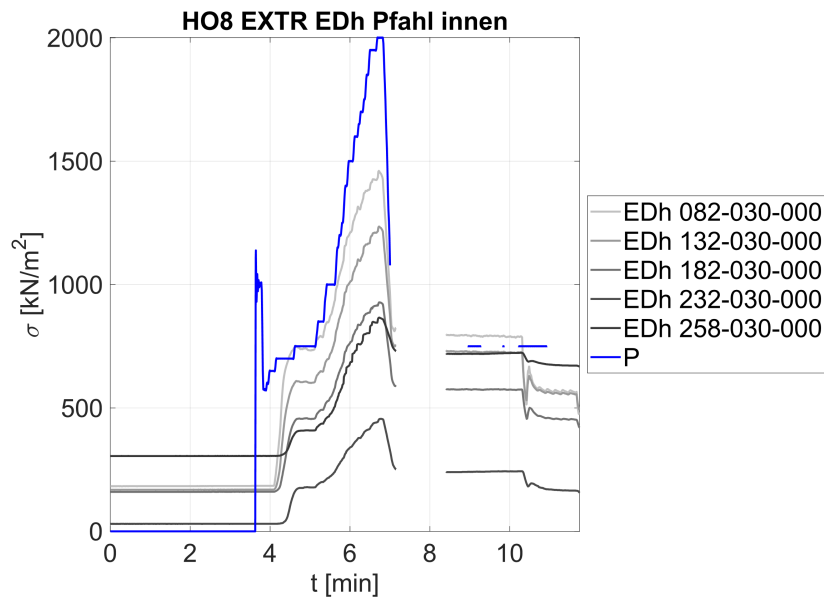


Abbildung D8 - 4: Gemessene EDh an der Pfahlinnenseite HO8

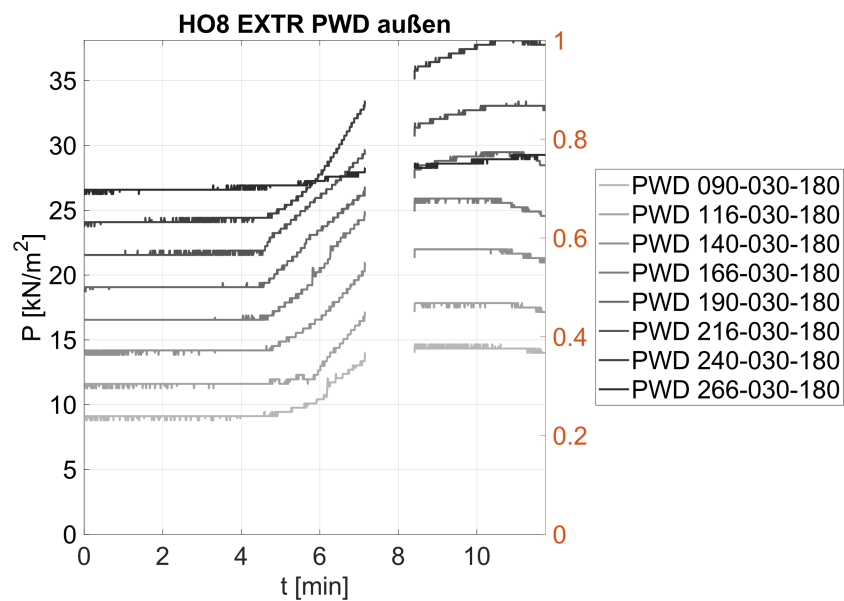


Abbildung D8 - 5: Gemessene PWD an der Pfahlaußenseite HO8

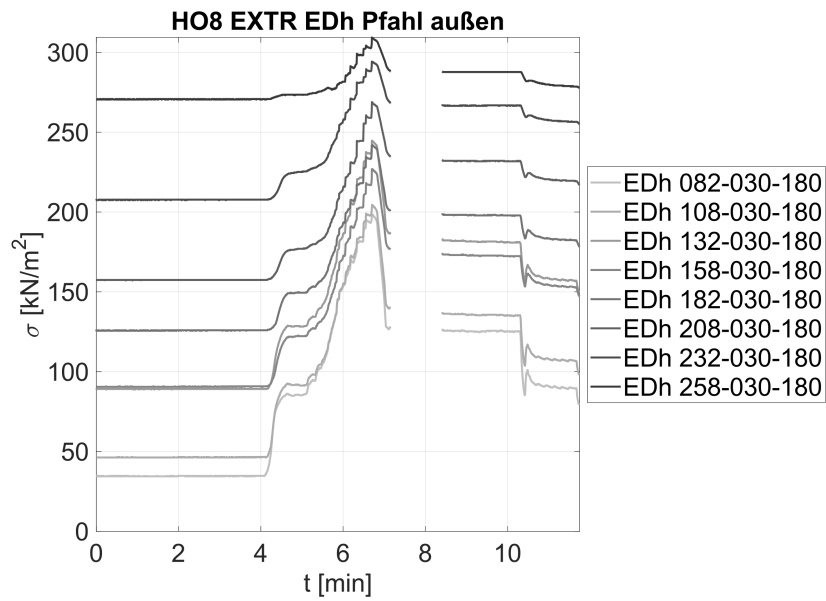


Abbildung D8 - 6: EDh an der Pfahlaußenseite HO8

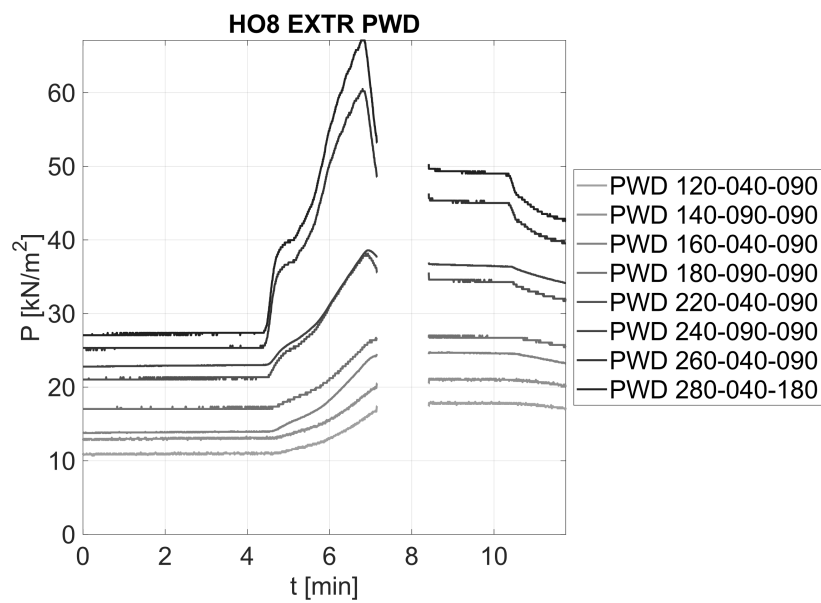


Abbildung D8 - 7: Gemessene PWD im Boden HO8

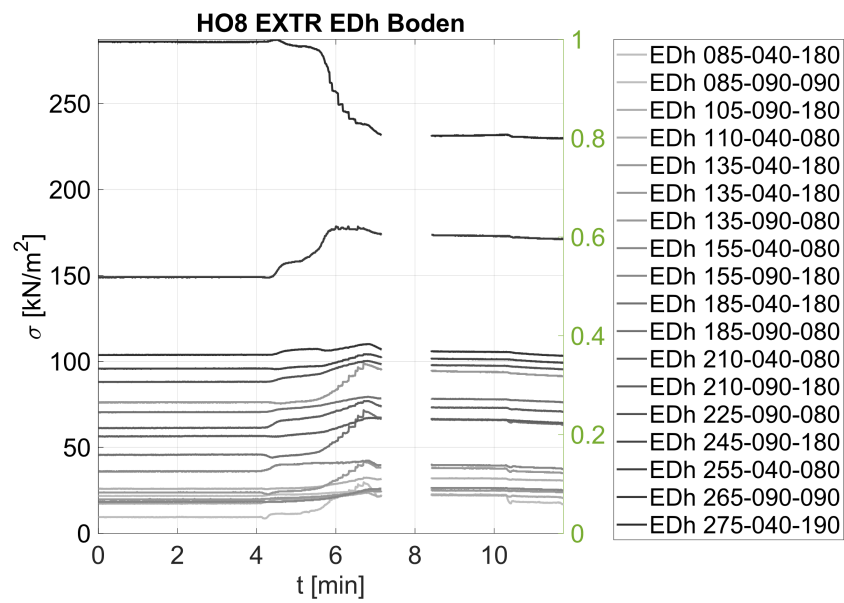


Abbildung D8 - 8: EDh im Boden Pfahl HO8

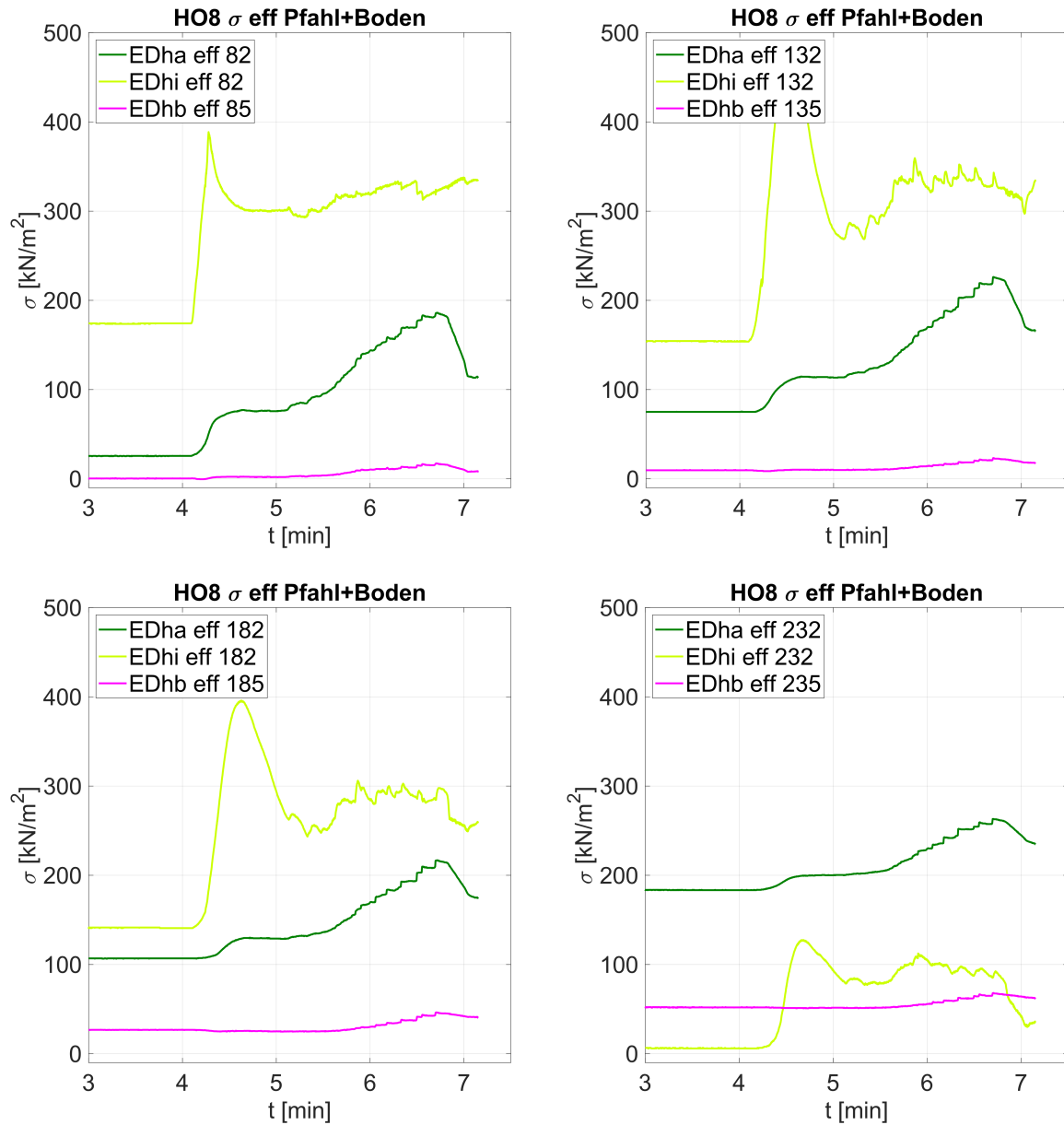
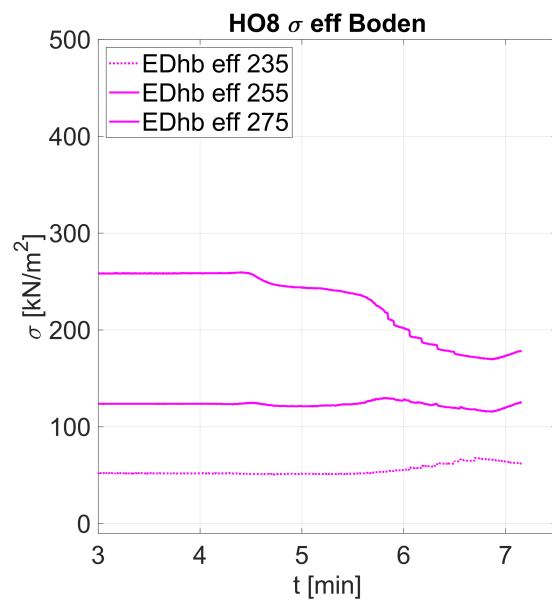


Abbildung D8 - 9: Versuchparameter P und Q, Effektivspannung an der Pfahlaußen- (EDha eff) und Pfahlinnenseite (EDhi eff) sowie im Boden (EDhb eff) 10 cm vom Pfahl beim Versuch HO8





*Abbildung D8 - 10: Effektivspannung im Boden (EDhb eff) unter dem Pfahlfuß, mit 10 cm Abstand zum Pfahl HO8*

**E Versuchsgeräte**Messwerterfassung

| Einheit              |        | Messbereich                                                                      | Messfrequenz | Auflösung | Genauigkeit |
|----------------------|--------|----------------------------------------------------------------------------------|--------------|-----------|-------------|
| Dewesoft             | DWD43a | $\pm 0.01 - 10 \text{ V}$<br>$\pm 10 - 1000 \text{ mV/V}$<br>$4 - 20 \text{ mA}$ | 200 kHz      | 24 bit    | 0.1 %       |
| National Instruments | SCXI   | $\pm 10 \text{ V}$                                                               | 200 kHz      | 16 bit    | 0.1 %       |

Sensorik

| Sensor           | Hersteller  | Typ                      | Messbereich          | Genauigkeit              |
|------------------|-------------|--------------------------|----------------------|--------------------------|
| Seilzugsensor    | Baumer      | GCA5                     | 0 – 4,7 m            | $\leq 2\% \text{ FS}$    |
| Wegaufnehmer     | novotechnik | LS1                      | 0-50 mm<br>0-100 mm  | $\leq 0,15\% \text{ FS}$ |
| Erddruckgeber    | Glötzi      | E10 AU                   | 0-10 bar             | $\leq 0,5\% \text{ FS}$  |
| PWD              | Glötzi      | PP3 RS                   | 0-5 bar              | $\leq 0,5\% \text{ FS}$  |
| Drucksensor      | Keller      | PA – 5L                  | 0-10 bar<br>0-20 bar | $\leq 0,5\% \text{ FS}$  |
| Drucktransmitter | Festo       | SPTW-P16R-<br>G14-VD-M12 | 0-20 bar             | $\leq 1\% \text{ FS}$    |