Hochschule Ruhr West
Institut Bauingenieurwesen
Campus: Mülheim an der Ruhr

Bachelorarbeit

Zu Thema

Ableitung von p-y-Kurven für horizontal gebettete Bohrpfähle anhand von horizontalen Pfahl-Probebelastungen unter Berücksichtigung einer axialen Beanspruchung

Prüfer:

Prof. Dr.-Ing. René Schäfer
Dr.-Ing. Gerd Festag

Verfasser:

Niklas Küster
Matrikelnummer: 10015048

Studiengang: Bauingenieurwesen B.Sc.
Wintersemester 2025

Eingereicht am 13.10.2025

Eidesstattliche Erklärung

„Ich versichere an Eides statt durch meine Unterschrift, dass ich die vorliegende Arbeit selbständig und ohne fremde Hilfe angefertigt und an allen Stellen, die ich wörtlich oder annähernd wörtlich aus Veröffentlichungen entnommen habe, als solche kenntlich gemacht habe, mich auch keiner anderen als der angegebenen Literatur oder sonstiger Hilfsmittel bedient habe.
Des Weiteren hat die Arbeit in dieser oder ähnlicher Form noch keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.“

Neukirchen-Vluyn 13.10.2025

Ort, Datum, eigenhändige Unterschrift

Inhaltsverzeichnis

AUFGABENSTELLUNG ..... **I**

ABBILDUNGSVERZEICHNIS ..... **II**

TABELLENVERZEICHNIS ..... **IV**

ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS ..... **V**

1 EINLEITUNG **1**

1.1 MOTIVATION 1
1.2 ZIELSETZUNG UND GLIEDERUNG DER ARBEIT 1

2 GRUNDLAGEN FASEROPTISCHE MESSTECHNIK **2**

2.1 HINTERGRUND – FASEROPTISCHE SENSOREN 2
2.2 RAYLEIGH-OFDR 4
2.3 RAMAN-OTDR 6
2.4 BRILLOUIN-STREUUNG 8
2.5 BESTIMMUNG DER BIEGELINE AUS FASEROPTISCHEN SENSOREN 9
2.6 VERGLEICH INKLINOMETER/FASER-BRAGG GITTER/DFOS 10

3 BERECHNUNGSVERFAHREN QUER ZUR STABACHSE BELASTETE PFÄHLE **11**

3.1 VERFAHREN NACH BLUM 11
3.2 LINEARES BETTUNGSMODULVERFAHREN 13
3.3 P-Y VERFAHREN 15

4 PFAHLPROBEBELASTUNG A59 AK DUISBURG–AK DUISBURG MARXLOH **23**

4.1 PROJEKTBESCHREIBUNG 23
4.2 GEOTECHNISCH KENNGRÖßEN STANDORT 1 AK DUISBURG 24
4.2.1 Baugrundschichtung 24
4.2.2 Hydrologische Verhältnisse 26
4.2.3 Labor-/Feldversuche 27
4.2.4 Geotechnische Eigenschaften und Bodenkennwerte 28
4.3 GEOTECHNISCH VERHÄLTNISSE STANDORT 2 28
4.3.1 Baugrundschichtung 28
4.3.2 Hydrologische Verhältnisse 32
4.3.3 Labor-/Feldversuche 32
4.3.4 Geotechnische Eigenschaften und Bodenkennwerte 33
4.4 HORIZONTALE PFAHLPROBEBELASTUNG 33
4.4.1 Versuchsaufbau 35
4.4.2 Versuchsdurchführung 35

5 ERGEBNISSE AUS VERFORMUNGSBERECHNUNG **36**

5.1 VERGLEICH LINEARES BETTUNGSMODUL – P-Y VERFAHREN MIT KENNWERTEN AUS GEOTECHNISCHEM BERICHT 36
5.1.1 Zwischenfazit 40
5.2 CURVE-FITTING LINEARES BETTUNGSMODULVERFAHREN 41
5.2.1 Zwischenfazit 44

5.3 Vergleich p-y Verfahren obere und unterer Grenzwert für Bodenparameter mit FOS 45
5.3.1 Zwischenfazit 52
5.4 Vergleich p-y Verfahren (Curve-fitting) mit FOS 53
5.4.1 Zwischenfazit 58
5.5 Analyse der Versuchsergebnisse 58
5.6 Vergleich Verformungen abgeleiteter p-y Kuven mit faseroptischen Messwerten, oberen Grenzwerten und Verformungen aus Curve-fittng 61
5.6.1 Zwischenfazit 68
6 DISKUSSION 69
7 FAZIT 73
LITERATURVERZEICHNIS 75
ANHANG 79

Aufgabenstellung

Die Berechnung horizontal belasteter Bohrpfähle erfolgt i.d.R. nach dem Bettungsmodulverfahren. Die Pfahl-Boden-Interaktion wird hierbei durch den Ansatz eines horizontalen Bettungsmoduls abgebildet, welcher i.d.R. schichtweise als konstante Flächenfeder in Ansatz gebracht wird. Weiterhin wird der Einfluss einer gleichzeitig wirkenden axialen Beanspruchung bei der Berechnung vernachlässigt.

Die Pfahl-Boden-Interaktion folgt jedoch einem nicht-linearen Verhalten. Zur Berücksichtigung dieses Verhaltens kommt das sog. p-y-Verfahren zum Einsatz, bei dem nicht-lineare Bettungsmoduli entlang der Pfahlachse definiert werden. Eine wesentliche Herausforderung bei dieser Vorgehensweise stellt die Festlegung zutreffender p-y-Kurven dar.

Im Zuge des Ausbaus der BAB A59 wurden hierzu horizontale Probebelastungen an Bohrpfählen durchgeführt. Die Aufzeichnung der horizontalen Pfahlverformungen erfolgte dabei mittels Ketteninklinometer und faseroptischen Messungen. Die Probebelastungen wurden dabei an unterschiedlich stark axial vorbelasteten Pfählen durchgeführt.

Folgende Aufgabenpunkte sind im Rahmen der Bachelorarbeit zu bearbeiten:

- Motivation der Arbeit und Erläuterung der Problemstellung;
- Literaturrecherche hinsichtlich faseroptischer Messwerterfassung und -auswertung im Rahmen von Pfahlprobebelastungen. Vorstellung des Messsystems.
- Literaturrecherche, Erläuterung möglicher Bemessungsansätze für die Dimensionierung von horizontal gebetteten Pfählen, Darstellung des Bettungsmodulverfahrens mit linearer und nicht-linearer Pfahl-Boden-Interaktion, Zusammenstellung von Erfahrungs- und Literaturwerten von horizontalen Bettungsmoduli und p-y-Kurven;
- Darstellung und Auswertung der horizontalen Pfahlprobebelastungen an der BAB A59, Erläuterung der geotechnischen Verhältnisse und Zusammenfassung der maßgebenden bodenmechanischen Kennwerte;
- Recherche hinsichtlich geeigneter EDV-Programme zur Berücksichtigung einer nicht-linearen Pfahl-Boden-Interaktion. Rückrechnung und Ableitung von p-y-Kurven anhand der Probebelastungsergebnisse;
- Bewertung des Einflusses einer axialen Pfahlvorbeanspruchung auf die Pfahl-Boden-Interaktion. Ableitung von p-y-Kurven;
- Zusammenfassung der Ergebnisse, Schlussfolgerungen und Ausblick.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 2-1: Aufbau Lichtwellenleiter 3
Abbildung 2-2: Optisches Spektrum Streuungseffekte 4
Abbildung 2-3: Kohärente und inkohärente Strahlung 5
Abbildung 2-4: Messaufbau OFDR 6
Abbildung 2-5: Stokes-, Anti-Stokes-Wellen 7
Abbildung 2-6: Schema OTDR-Versuchsaufbau 8
Abbildung 2-7: Anordnung Instrumentierung – Draufsicht 9
Abbildung 2-8: Dehnungseben 9
Abbildung 3-1: Räumlicher Erdwiderstand und Ersatzkraft C 11
Abbildung 3-1: Räumlicher Erdwiderstand und Ersatzkraft C 12
Abbildung 3-3: Definition ks 14
Abbildung 3-4: Federkennlinie lineares Bettungsmodulverfahren 14
Abbildung 3-5: Nichtlineares Bettungsmodul – Modell 16
Abbildung 3-6: Tiefenabhängige Versagensmodelle 16
Abbildung 3-7: Oberflächennahes Versagensmodell 17
Abbildung 3-8: Horizontales Umfließen des Pfahls 17
Abbildung 3-9: Mohrscher Spannungskreis bindige Böden 18
Abbildung 3-10: Mohrscher Spannungskreis nichtbindige Böden 18
Abbildung 3-11: C1, C2, C3 19
Abbildung 3-12: p-y-Kurve nichtbindiger Boden nach O'Neil 1983 19
Abbildung 3-13: p-y-Kurve bindige Böden cu ≤ 100kN/m² nach Matlock 1970 20
Abbildung 3-14: p-y-Kurve ohne Entfestigung - cu ≥ 100 kN/m² 21
Abbildung 3-15: p-y-Kurven mit Entfestigung - cu ≥ 100 kN/m² 21
Abbildung 3-16: Bestimmung der äquivalenten Tiefe 21
Abbildung 4-1: Übersicht Standorte Pfahlprobebelastung Pfahlprobebelastung 23
Abbildung 4-2: DPT PB-A59-BK1 25
Abbildung 4-3: Schichtverlauf - Standort 1 25
Abbildung 4-4: DPT PB-A59-BK2 30
Abbildung 4-5: Schichtverlauf P3.1 30
Abbildung 4-6: DPT PB-A59-BK3 31
Abbildung 4-7: Schichtverlauf P3.2 31
Abbildung 4-8: Belastungskonstruktion 35
Abbildung 5-1: Vergleich Biegelinie - ks,k (Mittelwerte), ks,k (angepasst) und FOS PPB P1.1 37
Abbildung 5-2: Vergleich Biegelinie - ks,k (Mittelwerte), ks,k (angepasst) und FOS PPB P3.1 39
Abbildung 5-3: Vergleich Biegelinie - ks,k (Mittelwerte), ks,k (angepasst) , FOS P1.1 - Laststufe 7 41
Abbildung 5-4: Vergleich Biegelinie - ks,k (Mittelwerte), ks,k (angepasst), FOS P3.1-LS 7 . 43

Abbildung 5-5: Vergleich - Untere Grenzwerte p-y Verfahren LS 4-7 45
Abbildung 5-6: Vergleich - Untere Grenzwerte p-y Verfahren zu FOS P1.1 - LS 1-3..... 46
Abbildung 5-9: Vergleich - Obere Grenzwerte p-y Verfahren zu FOS P1.1-LS 4-7..... 50
Abbildung 5-10: Vergleich - Obere Grenzwerte p-y Verfahren zu FOS P3.1-LS 5-8..... 51
Abbildung 5-11: Vergleich - p-y-Verfahren (angepasst) zu FOS - P1.1-LS 4-7 54
Abbildung 5-12: Vergleich - p-y-Kurve (angepasst) zu FOS - P1.1-LS 1-3 55
Abbildung 5-13: Vergleich - p-y Kurve (angepasst) zu FOS - P3.1-LS 5-8 56
Abbildung 5-14: Vergleich - p-y Kurve (angepasst) zu FOS - P3.1-LS 1-4 57
Abbildung 5-15: p-y Kurve feinkörnige Auffüllung P1.1-angepasste Bodenparameter..... 60
Abbildung 5-16: : p-y Kurve grobkörnige Auffüllung – P1.1 - angepasste Bodenparameter. 60
Abbildung 5-17: p-y Kurve Auenlehm – P1.1 - angepasste Bodenparameter 60
Abbildung 5-18: p-y Kurve Terrassenkiese – P1.1 - angepasste Bodenparameter 60
Abbildung 5-19: p-y Kurve feinkörnige Auffüllung P3.1 - angepasste Bodenparameter..... 60
Abbildung 5-20: : p-y Kurve grobkörnige Auffüllung – P3.1 - angepasste Bodenparameter.. 60
Abbildung 5-21: Vergleich Verformungen - modifizierte p-y Kurve, FOS, obere , Curve-fitting-LS 5 und 7 63
Abbildung 5-22: Vergleich Verformungen- modifizierte p-y Kurve, FOS, oberer Grenzwerte, Curve-fitting-LS 1 und 3 64
Abbildung 5-23: Vergleich Verformungen - modifizierte p-y Kurve, FOS, obere Grenzwerte, Curve-fitting-LS 6 und 8 66
Abbildung 5-24: Vergleich Verformungen - modifizierte p-y Kurve, FOS. obere Grenzwerte, Curve-fitting-LS 1 und 3 67
Abbildung 6-1: Vergleich p-y Kurve Auenlehm – Standort 1 69
Abbildung 6-2: Vergleich p-y Kurven Terrassenkiese - P1.1 70
Abbildung 6-3: Vergleich p-y Kurven grobkörnige Auffüllung..... 71
Abbildung 6-4: Vergleich p-y Kurven grokörnige Auffüllung P3.1..... 72

Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Vergleich Inklinometer/FBG/FOS 10
Tabelle 3-1: Bettungsmoduli für nichtbindige Böden 15
Tabelle 4-1: Übersicht Bodenschichten – Standort 1 26
Tabelle 4-2: Übersicht Grundwasserstände - Standort 1 26
Tabelle 4-3: Durchlässigkeit und Wassergehalt Bodenschichten - Standort 1 27
Tabelle 4-4: Bodenkennwerte - Standort 1 28
Tabelle 4-5: Übersicht Bodenschichten - Standort 2 29
Tabelle 4-6: Übersicht Grundwasserstände - Standort 2 32
Tabelle 4-7: Durchlässigkeit und Wassergehalt Bodenschichten - Standort 2 32
Tabelle 4-8: Bodenkennwerte - Standort 2 33
Tabelle 4-9: Pfahldaten 34
Tabelle 5-1: Mittelwerte Bodenkennwerte geotechnischer Bericht Standort 1 36
Tabelle 5-2: Mittelwerte Bodenkennwerte geotechnischer Bericht - Standort 2 P3.1 38
Tabelle 5-3: Abweichung angepasste Bettungsmoduli zu Mittelwerten P1.1 42
Tabelle 5-4: Angepasste Bettungsmoduli zu Mittelwerten P3.1 43

Abkürzungsverzeichnis

API ..... *American Petroleum Institute*
DFOS ..... *Distributed Fiber Optic Sensing*, *Distributed Fiber Optic Sensors*
FBG ..... *Faser-Bragg-Gitter*
LWL ..... *Lichtwellenleiter*
MMF ..... *Multimode Glasfaser*
OTDR ..... *Optical Time Domain Reflectometry*
SMF ..... *Singlemode Glasfaser*

1 Einleitung

1.1 Motivation

Pfahlgründungen werden in der Geotechnik eingesetzt, um hohe Lasten in tieferliegende tragfähige Baugrundschichten ableiten zu können. Vor allem im Bereich von Brücken sind Bohrpfähle eine viel eingesetzte Gründungsform. Das axiale Tragverhalten kann bereits gut mit Hilfe der bisher entwickelten Berechnungsmethoden erfasst werden. Das bisher in Deutschland gängige Berechnungsverfahren bildet das laterale Tragverhalten hingegen nur unzureichend ab. Die Beurteilung des seitlichen Tragverhaltens erfolgt international und zur Bemessung von Offshore-Kraftwerken mit Hilfe des p-y Verfahrens. Die p-y Kurven werden verschiebungsabhängig formuliert entgegen den bisherigen zur Bemessung in Deutschland angesetzten Berechnungsverfahren für horizontal belastete Pfähle. Die nichtlinearen Federkennlinien entsprechen dabei dem eigentlichen Tragverhalten des Bodens bei seitlicher Belastung. Dabei sind die p-y Kurven von maßgebenden Bodenkennwerten, der Belastung und der Pfahlgeometrie abhängig. Die international verwendeten Ansätze für p-y Kurven nach Reese, Matlock oder API beruhen auf empirischen Ansätzen, die für spezielle homogene Bodenschichtungen anhand von Versuchsergebnissen abgeleitet wurden.

1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit

.

Im Rahmen dieser Arbeit sollen p-y Kurven für horizontal gebettete Bohrpfähle auf Grundlage von horizontalen Pfahlprobebelastungen im Bereich des Autobahnkreuz A59 abgeleitet und mit den Messwerten verglichen werden. Ziel dabei ist es, dass die entwickelten p-y Kurven sowohl das Tragverhalten bei hohen Beanspruchungen als auch bei niedrigen Beanspruchungen präzise widerspiegeln.

Zunächst werden in Kapitel 2 technische Grundlagen im Bereich der Messtechnik für Dehnungs- und Temperaturmessungen vorgestellt. Anschließend werden in Kapitel 3 in Deutschland und international gängige Berechnungsverfahren zur Ableitung des lateralen Tragverhaltens von Bohrpfählen vorgestellt. Im vierten Kapitel erfolgt ein Vergleich der Berechnungsergebnisse aus den vorgestellten Berechnungsansätzen. Darüber hinaus werden die Verformungsfiguren der Berechnungsansätze über ein Curve-fitting an die Messwerte angenähert und ebenfalls hinsichtlich der notwendigen Anpassungen beurteilt. Abschließend werden auf Grundlage der aus den Berechnungsergbnissen gewonnen Erkenntnisse p-y Kurven abgeleitet.

2 Grundlagen faseroptische Messtechnik

2.1 Hintergrund – Faseroptische Sensoren

Faseroptische Sensoren beruhen auf dem Prinzip der Ausbreitung von Licht. Veränderungen der Gitterstruktur des Glasfaserkabels durch mechanische oder thermische Einflüsse können zu Veränderungen im Lichtsignal führen (vgl. Rayleigh-OFDR und Raman-OTDR). Diese Veränderungen können durch bestimmte Sensoren gemessen werden. Eine Veränderung des Lichtsignals kann sich durch Streuungen, Frequenzverschiebungen oder beispielsweise einer Laufzeitveränderungen widerspiegeln (vgl. Rayleigh-, Raman-, Brillouin-Streuung).

Das erste Glasfaserkabel wurde 1970 entwickelt und galt der Übertragung von Telekommunikationssignalen [1, p. 32 f.]. 1978 konnten bereits erste Faser-Bragg-Gitter (FBG) vorgestellt werden [1, p. 32 f.]. Ende der 1980er-Jahre wurden erste faseroptische Sensoren, die auf dem Prinzip der Raman-Streuung Temperatur entlang der Faser messen konnten, vorgestellt [2, p. 916]. Weiterhin wurde an den Faser-Bragg-Gittern geforscht, so gelang es 1989 Forscher:innen Faser-Bragg-Gitter auf Glasfasern einzuschreiben [2, p. 916]. Der lokal auf die Faser eingeschriebene Filter reagiert auf Dehnungen und Temperaturveränderungen, indem sich der Brechungsindex des Reflexionsgitters verändert [3, p. 45 ff.]. Faseroptische Sensoren auf Basis von Raman- und der Brillouin-Streuung wurden Ende der 1990er-Jahre kommerzialisiert [2, p. 916]. OFDR-Verfahren auf Basis der Rayleigh-Streuung sind seit Ende der 2000er-Jahre mehr und mehr auf den Markt gekommen [1, p. 32 f.].

Aktuell wird in zwei optische Verfahren (Distributed Fiber Optic Sensing (DFOS) und FBG) zur Überwachung von Dehnung und Temperatur in der Geotechnik unterschieden. Beide Verfahren beruhen auf optischen Prinzipien. Das Faser-Bragg-Gitter Verfahren nutzt dabei Rückstreueffekte von vorher auf die Faser aufgeschrieben Reflexionsgittern. [3, p. 45 ff.] Diese werden während des Ziehvorgangs der Glasfaser im sogenannten Ziehturm oder nachträglich über ein einen UV-Laserstrahl auf die Glasfaser aufgebracht. [3, p. 45] Diese Gitterstrukturen sind wenige mm lang und können mit Abständen von wenigen mm bis zu mehreren Kilometern auf die Faser geschrieben werden [4, p. 293]. Jedes Reflexionsgitter reflektiert nur eine bestimmte Wellenlänge des in den Lichtwellenleiter (LWL) eingebundenen Lichtimpulses [1, p. 36 f.]. Dehnung und Temperatur werden punktuell über Veränderung des Brechungsindexes der Reflexionsgitter gemessen [3, p. 47 f.]. Die Ortsauflösung ist abhängig von der Anordnung der Reflexionsgitter und der Länge der gesamten Faser. [4, p. 293]

Im Gegensatz zu FBG, nutzen Distributed Fiber Optic Sensing Rückstreueffekte, die durch bestimmte Arten von Streuungseffekten (Rayleigh-, Raman- und Brillouin-Streuung) erzeugt werden, um über die gesamte Länge des LWL-Dehnungen und Temperatur zu messen [5]. Dehnungen können je nach Rückstreueffekt mit einer Auflösung von ca. 1 mm dargestellt werden [6].

Die bei der für die FBG-Methode, als auch für DFOS benutzten Glasfaserkabel bestehen aus mehreren Schichten. Im Kern bestehen Glasfaserkabel aus der optischen Glasfaser (Core) (vgl. Abb. 1-1). Der Kern der Faser kann aus Singelmode-(SMF) oder Multimodef-Glasfasern (MMF) bestehen (siehe Abb. 1-1) [7]. Singlemode-Fasern (SMF) haben im Vergleich zu Multimode-Fasern (MMF) einen kleineren Kern, die durchschnittlichen Größen für die Kerne betragen ca. 8-9 µm [1, p. 42]. Dieser Kern leitet nur einen einzigen Lichtmode durch die Faser und

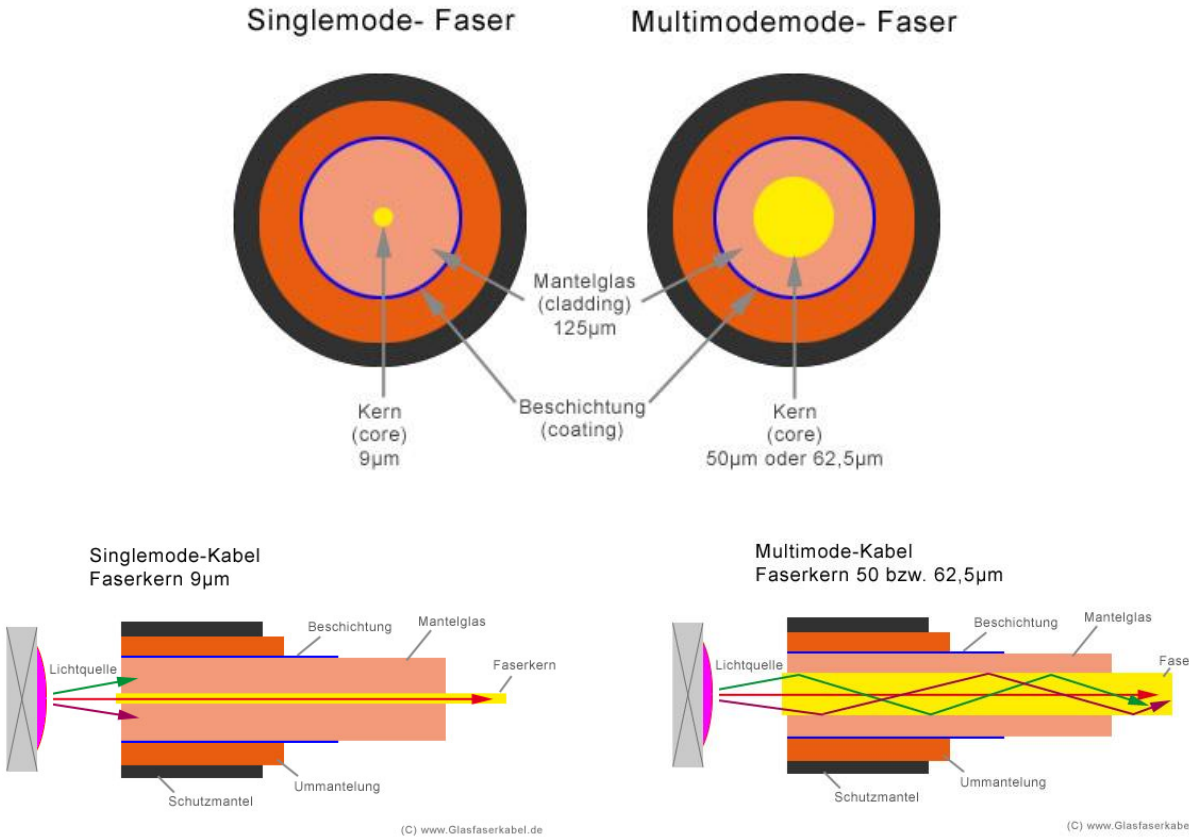


Abbildung 2-1: Aufbau Lichtwellenleiter [7]

minimiert dadurch Signalverluste und Dispersionen. SMF eigenen sich besonderes in der Übertragung von Telekommunikationssignalen über lange Strecken. Die Multimode-Faser kann viele Lichtmode leiten (vgl. Abb. 1-1). Aufgrund der hohen Modendispersion ist die Reichweite und transportierbare Datenmenge im Vergleich zu SMF jedoch geringer [7]. MMF werden in der Praxis für kurze Strecken, wie lokale Netzwerke oder in Rechenzentren genutzt [7]. Bei der Dehnungs- und Temperaturmessung speziell, mittels Rayleigh-Streuung werden ausschließlich SMF benutzt [1, p. 45]. Umhüllt wird der Kern durch das Mantelglas (cladding), welches von einem Stahl- oder Polymer-Röhrchen umschlossen wird (vgl. Abbildung 1-1). Der Durchmesser (bei SMF) beträgt im Durchschnitt 125 µm. [1, p. 45]. Das Mantelglas und der Kern haben einen unterschiedlich hohen Brechungsindex, durch den Unterschied im Brechungsindex kommt es zu einer Reflektion des Lichtes, die für die Übertragung eine

essenzielle Rolle spielt [7]. Als Schutz vor äußeren Einflüssen ist die innere Struktur des Kabels durch eine äußere Kunststoffummantelung (vgl. Abb. 1-1 [7]. Darüber hinaus gibt es eine zusätzliche Hülle (Jacket), die das Kabel zusätzlich schützt [1].

2.2 Rayleigh-OFDR

Die Rayleigh-Streuung ist eine elastische Lichtstreuung, mit der Dehnungen und Stauchungen über die gesamte Pfahllänge punktgenau bestimmt werden können. [8, p. 102 ff.]. Bei einer elastischen Streuung bleiben der Gesamtenergiebetrag und die Wellenlänge, sowie die Frequenz des zurückgestreuten Lichtes gleich dem des einfallenden Lichtes [8, p. 102] (vgl. Abbildung 1-2). Die Photonen werden ausschließlich in eine andere Richtung abgelenkt. [8, p. 102]. Das emittierte Licht wird bei der Rayleigh-Streuung an Inhomogenitäten oder Molekülen, die deutlich kleiner als die Wellenlänge des Lichtes sind gestreut [9, p. 194]. Inhomogenitäten in der Glasfaser können bei der Herstellung durch Verunreinigungen oder durch Differenzen in der Herstelltemperatur entstehen [8, p. 101]. Diese Unregelmäßigkeiten bleiben dauerhaft im Material vorhanden.

Vor dem Einbau wird eine „Nullmessung“, auch optischer Fingerabdruck genannt, durchgeführt, um ein individuelles Rückstreusignal zu erhalten [1, p. 43]. Dieser Fingerabdruck dient als Vergleichswert zum rückgestreuten Licht [1, p. 43]. Treten Dehnungen oder Stauchungen lokal auf, so wird die Intensität des einfallenden Lichtes ab der gedehnten Stelle ebenfalls gedehnt [1, p. 43]. Aus der Differenz zwischen dem rückgestreuten Licht und der Nullmessung kann die Dehnungsänderung über nahezu die gesamte Faser kontinuierlich mit der Optical Frequency Domain Reflcometry (OFDR) Methode dargestellt werden [10, p. 158 ff.]. Glasfaser, die in der Geotechnik eingesetzt werden und mittels OFDR-Methode untersucht werden, sind aktuell auf eine Länge von 70 m beschränkt [10, p. 157]. Die Ortsauflösung ist im Vergleich zu der Brillouin-Streuung deutlich höher und liegt im mm-Bereich [10, p. 157]. Für die Pfahlprobebelastung wurde das Gerät OBR 4600 der Firma Luna Innovations Inc. mit einer Abtastraste von 10 µm auf einer Länge von 30m benutzt [11].

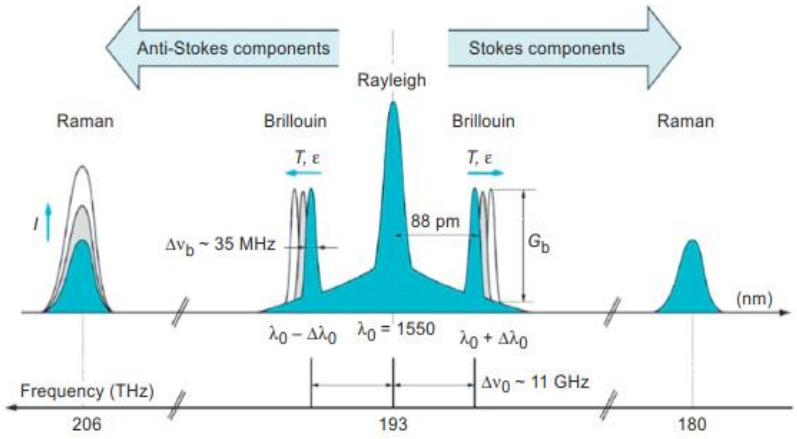


Abbildung 2-2: Optisches Spektrum Streuungseffekte [12, p. 100]

Dehnungsauswertung - Optical Frequency Domain Reflectometer (OFDR)

Mit der OFDR-Methode kann die Rayleigh-Rückstreuung in Singlemode-Fasern gemessen werden. Bei der ODFR handelt es sich um ein Messverfahren, bei dem ein Laser, dessen Frequenz während der Messung kontinuierlich moduliert wird, zum Einsatz kommt [12, pp. 104-105]. Das Messgerät OBR 4600 der Firma Luna Innovations emittiert einen Laser mit einer Wellenlänge von 1525-1610 nm [11]. Das Licht des Lasers ist kohärent [12, pp. 104-105]. Kohärentes Licht beschreibt Licht, welches eine gleichbleibende Frequenz, sowie eine feste Phasenbeziehung zwischen den Wellenzügen und eine langsame Dekohärenz besitzt (siehe Abbildung 1-3).

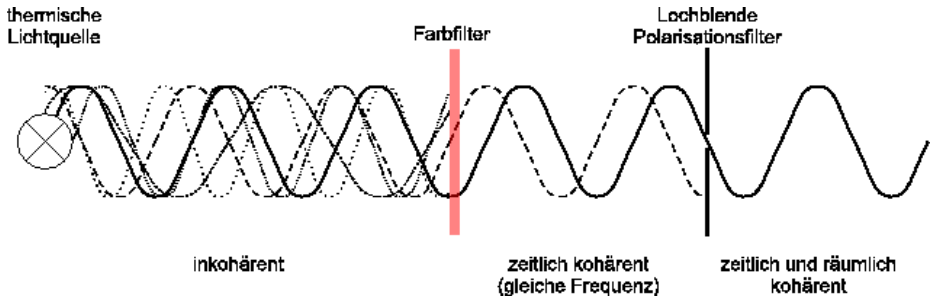


Abbildung 2-3: Kohärente und inkohärente Strahlung [42]

Dieses Licht wird durch ein optisches Interferometer in zwei Strahlgänge aufgeteilt (siehe Abbildung 1-3) [12, pp. 104-105]. Ein Teil des Lichts geht in die Referenzfaser, der andere Teil in die SMF [12, pp. 104-105]. Entlang der Faser kommt es aufgrund von Inhomogenitäten zu Rayleigh-Rückstreuungen. Diese Rückstreuung interferiert am Kuppler mit dem Referenzstrahl (vgl. Abbildung 1-3) und wird am Photonendetektor erfasst. [13, pp. 14-15].

Die Position der Interferenz kann direkt einer bestimmten Schwebungsfrequenz f_b (Beat-Freqeuncy) zugeordnet werden. Dehnungsänderungen können so ortsaufgelöst und mit sehr hoher räumlicher Auflösung entlang der Faser dargestellt werden. Beschrieben wird die Schwebungsfrequenz über [13, pp. 15-16]:

$$f_b = \gamma * \tau = \gamma \frac{2nz}{c} \tag{1}$$

$$f_b = gemessene\ Schwebungsfrequenz\ [Hz]$$
$$\gamma = Frequenz\ des\ Lasers\ [\frac{Hz}{s}]$$
$$\tau = Lichtlaufzeit\ [s]$$
$$n = Brechungsindex\ der\ Faser\ [-]$$
$$z = Position\ entlang\ der\ Faser\ [m]$$
$$c = Lichtgeschwindigkeit\ im\ Vakuum\ [\frac{m}{s}]$$

Durch bereits erwähnte mechanische Einflüsse (Dehnung) entsteht Rayleigh-Streuung, wodurch eine spektrale Verschiebung entsteht [13, pp. 15-16]. Über die Beziehung $\Delta\lambda/\lambda$ lassen sich anschließend Rückschlüsse auf die Dehnung über folgende Formel in der bereits ermittelten Tiefe ziehen [13, pp. 15-16]:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = C_T * \Delta T + C_\varepsilon * \Delta\varepsilon \quad (2)$$

$$\lambda = Wellenlänge\ [nm]$$

$$C_T = Temperaturkoeffizient$$

$$\Delta T = \text{lokaler Änderung der Temperatur}$$

$$C_\varepsilon = Dehnungskoeffzient$$

$$\Delta\varepsilon = lokale\ Änderung\ der\ Temperatur$$

Das OFDR-Verfahren zeichnet sich gegenüber anderen optischen Messverfahren wie dem Optical Time Domain Reflecory (OTDR, siehe RAMAN-Streuung) durch seine hohe Ortsauflösung, hohe Sensitivität und die schnelle Datenerfassung aus [12, p. 104]. Über viele virtuelle Messpunkte entlang der Faser können Schäden schnell erfasst und quasi-kontinuierlich dargestellt werden [1, p. 35].

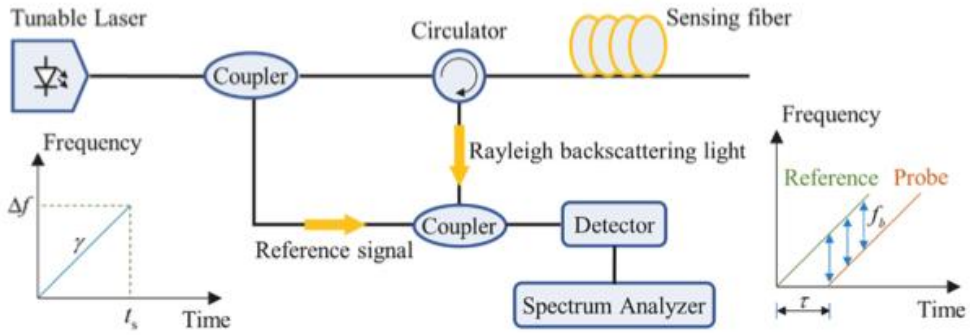


Abbildung 2-4: Messaufbau OFDR [13]

2.3 Raman-OTDR

Die Raman-Streuung ist ein inelastischer Streuungsprozess, mit dem die Temperatur über die komplette Faserlänge bestimmt werden kann [12, p. 100]. Im Gegensatz zur Rayleigh-Streuung, bei der kein Energieaustausch stattfindet, kommt es bei der Wechselwirkung zwischen Photonen und Molekülen bei der Raman-Streuung in der Glasfaser zum Energieaustausch [12, p. 100].

Trifft ein Photon auf ein Molekül innerhalb der Glasfaser, so kann es mit den durch Temperatur angeregten vibrierenden Gitterstrukturen wechselwirken [14, p. 206]. Die Wechselwirkung führt zu Frequenzverschiebungen des zurückgestreuten Lichtes (siehe Abbildung 1-5). Diese Frequenzverschiebungen werden über zwei charakteristische Streulichtanteile, die Stokes- und die Anti-Stokes-Streuung dargestellt [14, p. 206].

Bei der Stokes-Streuung überträgt das Photon einen Teil seiner Energie auf das Molekül der Glasfaser und fällt dadurch auf ein niedrigeres Energieniveau (siehe Abbildung 1-5) [14, p. 211]. Durch die Verringerung der Energie verringert sich auch die gestreute Frequenz im Vergleich zur Eingangsfrequenz (siehe Abbildung 1-2) [14, p. 206]. Die Stokes-Streuung tritt häufiger auf, da sich mehr Moleküle im Grundzustand befinden (siehe Abbildung 1-5) [14, p. 214].

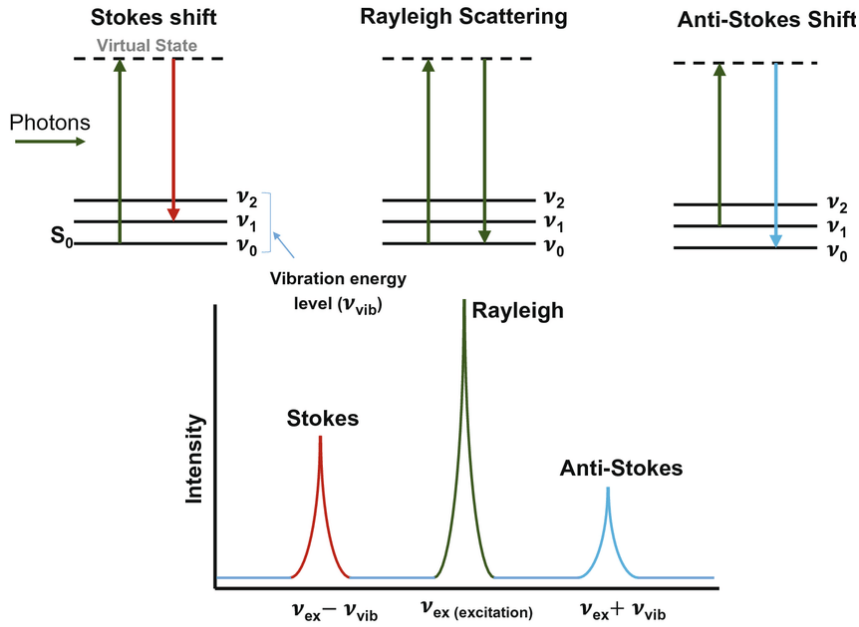


Abbildung 2-5: Stokes-, Anti-Stokes-Wellen [43]

Bei der Anti-Stokes-Streuung wechselwirkt das Photon mit den durch Temperatureinwirkung angeregten Molekülen der Glasfaser und nimmt dabei Energie auf [14, p. 211]. Durch diesen Energieaustausch wird das Photon mit einer höheren Frequenz als der Eingangsfrequenz zurück zum Empfänger gestreut [14, p. 206]. Die Anti-Stokes-Streuung tritt mit steigender Temperatur häufiger in der Glasfaser auf, da sich mehr Moleküle im angeregten Zustand befinden [14, p. 214]. Die Intensität der Anti-Stokes-Streuung ist demnach stark temperaturabhängig.

Temperaturbestimmung - Optical Time Domain Refclectometer

Um die Temperatur entlang der Glasfaser zu messen, wurde während der Pfahlprobebelastung das Gerät N45 der Firma APSensing verwendet. Das Messsystem beruht auf dem Prinzip OTDR [5]. Das Messgerät kann Messungen in unter 1 Sekunde durchführen und hat eine räumliche Auflösung von 0,5 m [15].

Ein wesentlicher Vorteil von Raman-basierten OTDR-Messsystemen gegenüber Rayleigh-basierten OTDR-Messsystemen ist, dass die Rama-Streuung ausschließlich von der Temperatur abhängig ist [16, p. 41]. Die Rayleigh-Streuung ist darüber hinaus zusätzlich von der Dehnung der Glasfaser abhängig [16, p. 41].

Bei dem OTDR-Verfahren werden im Gegensatz zum OFDR kurze optische Pulse in die Glasfaser eingekoppelt [16, pp. 42-43]. Ein Teil des emittierten Lichtes wechselwirkt mit den Molekülen der Glasfaser und die Raman-Streuung wird in Form der bereits beschriebenen Stokes- und Anti Stokes- Anteile zurückgestreut [16, pp. 42-43]. Die zurückgestreuten Anteile werden am Faseranfang über einen Kuppler vom eingekoppelten Licht getrennt (siehe Abbildung 1-6) [17, p. 129]. Anschließend werden die Anteile digitalisiert, sodass Phasen und Amplituden durch den Signalprozessor berechnet und ausgewertet werden können (siehe Abbildung 1-6) [16, pp. 42-43].
Aus der Laufzeit des rückgestreuten Lichtsignals lässt sich die Position der Streuung dadurch, dass die Ausbreitungsgeschwindigkeit des Liches in der Glasfaser bekannt ist, über die Faserlänge kontinuierlich bestimmen [5]. Das zeitaufgelöste Signal wird so in ein ortsaufgelöstes Signal umgewandelt.
Zur Bestimmung der Temperatur wird das Verhältnis aus Anti-Stokes- und Stokes-Intensität gebildet:

$$R(T) = \frac{I_{AS}(T)}{I_S(T)} \tag{3}$$

$$I_{AS}(T) = Intensität\ Anti - Stokes - Streuung$$

$$I_S(T) = Intensität\ Stokes\ Streuung$$

Das Verhältnis ist stark temperaturabhängig und kann mit Hilfe der Laufzeit Aufschlüsse auf Temperaturveränderungen über die Länge z der Glasfaser geben [16, pp. 42-43].

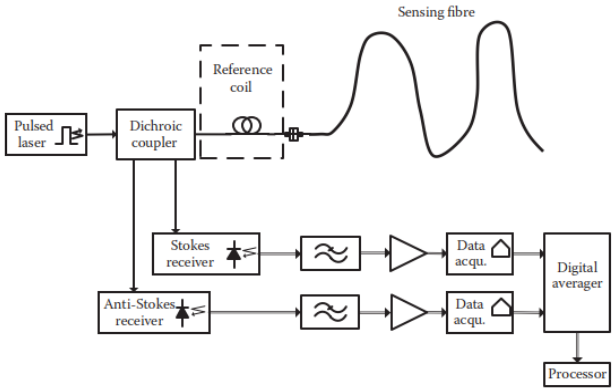


Abbildung 2-6: Schema OTDR-Versuchsaufbau [16]

2.4 Brillouin-Streuung

Die Brillouin-Streuung zählt wie die Raman-Streuung zu den inelastischen Streuungsprozessen [8, p. 283]. Mit der Brillouin-Streuung können sowohl Temperatur, als auch Dehnungen entlang des Lichtwellenleiters gemessen werden [8, p. 285]
Das Prinzip der Brillouin-Streuung basiert auf der Wechselwirkung von Photonen mit akustischen Phononen [1, p. 40]. „Akustische Phononen beschreiben die Quasiteilchen der quantisierten Gitterschwingungen“ [8, p. 311]. Die Verschiebung der Frequenz durch Gitterschwingungen können durch thermische, mechanische Einwirkung oder

Dichteschwankungen angeregt werden [8, p. 285]. Dabei breiten sich diese mit Schallgeschwindigkeit v_a in der Glasfaser aus und modulieren den Brechungsindex periodisch [8, p. 295].

Trifft ein Photon auf ein Phonon, das sich entgegen der Ausbreitungsrichtung des Photons bewegt, so wird es zurückgestreut und gibt dabei Energie ab [8, p. 284]. Die Frequenzabnahme wird gleich zu der Raman-Streuung als Stokes-Anteil beschrieben (siehe Abbildung 1-2). Bewegt sich Photon in dieselbe Richtung wie das Phonon, so nimmt es Energie auf [8, p. 284]. Diese Verschiebung der Frequenz wird mit dem Anti-Stokes-Anteil dargestellt (siehe Abbildung 1-2).

Für OTDR, die auf der Brillouin-Streuung basieren, kann ein Ortsauflösung von 1 m über eine Länge von bis zu 50 km angegeben werden [1, p. 40].

Die Brillouin-Streuung kann mit verschiedenen Analyse-Verfahren gemessen und ausgewertet werden, auf die an dieser Stelle jedoch nicht weiter eingegangen wird [10, pp. 156-157].

2.5 Bestimmung der Biegeline aus faseroptischen Sensoren

Zur Bestimmung der Biegelinie werden die Neigungen der einzelnen Dehnungsebenen in der untersuchten Höhe ermittelt [18, p. 194]. Die Dehnungsebene ist dabei die durch die vier um 90° versetzen faseroptischen Sensoren abgesteckte Ebene im Bohrpfahl (siehe Abbildung 1-7 und 1-8) [18, p. 194]. Die Krümmung $k(x)$ lässt sich über die Neigung der Dehnungsebene gegenüber der Pfahlachse bestimmen [18, p. 194]. Die Biegeline lässt sich über zweifache Integration der Krümmungsfunktion ermitteln. Allgemein gilt:

$$w'' = k(x) \tag{4}$$

$$w(x) = \iint_{z_0}^{z_i} k(x)dz^2 + C1 * x + C2 \tag{5}$$

beschrieben wird, lässt sich durch Integration des Krümmungsverlaufs die Biegelinie ermitteln. Mit Hilfe der Annahmen, dass die Verdrehung φ und die Verformung w gleich 0, sind lassen sich folgende Randbedingungen zum Lösen der Differentialgleichung aufstellen [19]:

$$C_1 = \varphi\left(z_{Pfahlfuß}\right) = 0$$

$$C_2 = w\left(z_{Pfahlfuß}\right) = 0.$$

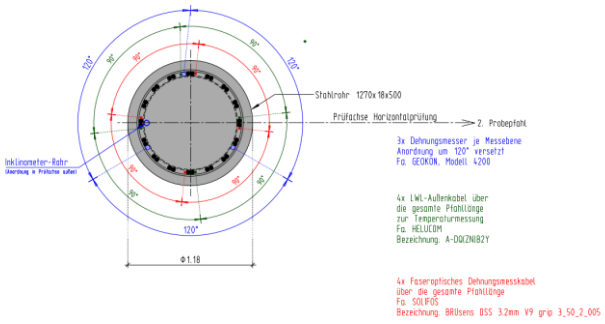


Abbildung 2-7: Anordnung Instrumentierung – Draufsicht

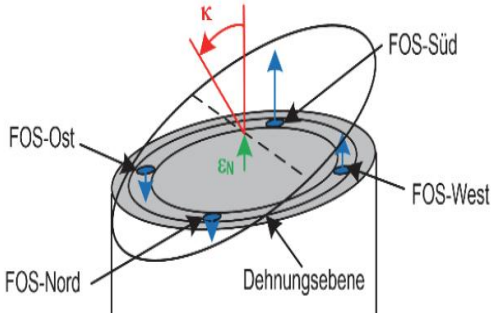


Abbildung 2-8: Dehnungseben [18, p. 194]

2.6 Vergleich Inklinometer/Faser-Bragg Gitter/DFOS

Während der Pfahlprobebelastung wurden neben den Dehnungsmessungen mittels faseroptischer Sensoren auch Dehnungsmessungen mit Ketteninklinometer der Firma Measurand erfasst, um weiteren Vergleichswerte zu erhalten. Das Ketteninklinomter SAAV der Firma Measurand hat einen Messbereich von ± 60° und erreicht eine Messgenauigkeit von 0,00067° (0,012mm/m) [20]. Verbaut wurden die Inklinometer in den Pfählen P1.2 und P3.1. Nachfolgend wird ein Vergleich zwischen Dehnungsmessung mit Ketteninklinometer, FBG und während der Pfahlprobebelastung angewandten faseroptischen Sensoren (hier Rayleigh-OFDR und Raman-OTDR) dargestellt.

Tabelle 2-1: Vergleich Inklinometer/FBG/FOS

Kriterium	Inklinometer	Faser-Bragg-Gitter	DFOS (Distributed Fiber Optic Sensors)
Messprinzip	Micro-Electro-Mechanical System [20]	Reflexion bestimmter Wellenlängen durch Faser-Bragg-Gitter	Streuungseffekte (Rayleigh-, Raman-Streuung)
Messintervalle	0,25-0,5 m [20]	Punktuell an Faser-Bragg-Gitter (abhängig von Abstand der Bragg-Gitter untereinander 5-6 mm [3, p. 45])	0,01 mm (Rayleigh) 0,5 m (Raman)
Anwendung	Neigungsmessung und Temperaturmessung [21]	Dehnungs-und Temperaturmessung	*Rayleigh-OFDR* zur Messung von Dehnungen *Raman-OTDR* zur Messung von Temperatur
Einschränkungen	Geringe Langzeitstabilität Hohe Temperaturempfindlichkeit [22]	Trennung zwischen Dehnungs- und Temperatursignalen schwer [3, p. 53])	*Rayleigh:* - Faserlänge auf 70 m begrenzt [11] *Raman:* - Anfällig für Schwankungen in den optischen Eigenschaften [10]
Messdauer	Messungen in Echtzeit [21]	Abhängig vom Messsystem und der Entfernung [23]	Luna OBR 4600 (Rayleigh): wenige Sekunden DTS N45 APENSING (Raman): wenige Sekunden
Auswertverfahren	Messung der Neigung relativ zur Schwerkraft entlang der X-,Y und Z-Achse. [21]	Optischer Interrogator [24]	OFDR (vgl. Rayleigh-OFDR) OTDR (vgl. Raman-OTDR)

Anwendungsbereich	Überwachung von Dämmen, Tunnel, Wänden und Gebäuden. [21]	Monitoring von Brücken und Pfahlprobebelastungen [25, p. 146]	Monitoring von Hangsicherung, Pfahlprobebelastungen, Brücken [26, p. 369] [27, p. 46] [25, p. 130]

3 Berechnungsverfahren quer zur Stabachse belastete Pfähle

Neben axialen Belastungen können auf Bohrpfähle auch horizontale Belastungen einwirken. In der Praxis gibt es verschiedene Ansätze, die Bodenwiderstände der horizontal belasteten Pfähle nachzuweisen. In der Praxis kann der Nachweis von aktiv belasteten Pfählen mit der Dalbentheorie oder der Finiten-Element Methode nachgewiesen werden. Ein weiterer Ansatz zur Berechnung der Beanspruchung der Pfähle ist das Bettungsmodulverfahren. Das Bettungsmodulverfahren kann, je nachdem, welcher Nachweis gefordert ist, als lineares oder nicht-lineares Modell angewandt werden.

3.1 Verfahren nach Blum

Das Verfahren nach Blum wird überwiegend bei kurzen starren Pfählen eingesetzt [28, p. 170]. Konkret wird bei dem Verfahren eine Einbindetiefe t zur Aufnahme der äußeren Einwirkungen ermittelt [29].

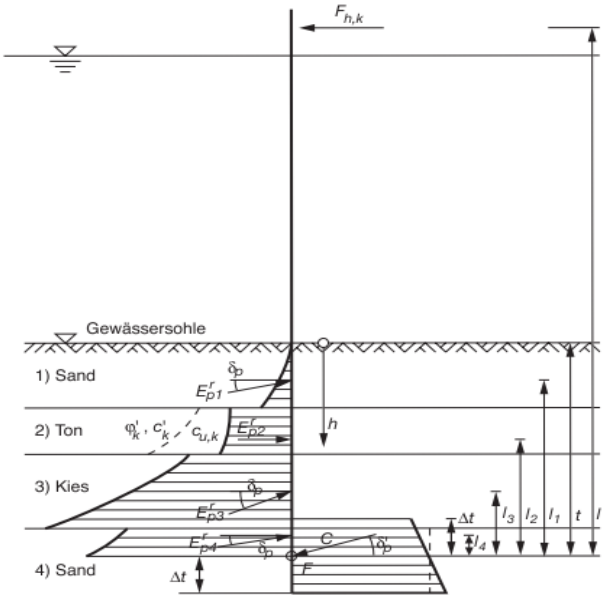


Abbildung 3-1: Räumlicher Erdwiderstand und Ersatzkraft C [31]

Der Pfahl wird dabei als unverschiebliche Einspannung, die durch einen parabelförmig modellierten Erdwiderstand und einer theoretischen Ersatzkraft C am Drehpunkt F belastet ist, abgebildet (siehe Abbildung 3-1) [30, p. 534]. Der räumliche passive Erdwiderstand wird zur Ermittlung der Einbindetiefe vollständig angesetzt (siehe Abbildung 3-2) [29]. Dadurch kommt

es zu einer Unterschätzung der tatsächlichen Verformungen, aufgrund dessen das Verfahren eher für den Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit herangezogen wird [29]. Der räumliche passive Erddruck kann nach [30, p. 534] gemäß DIN 4085 aus:

$$E_{ph,k}^{r} = E_{pgh,k}^{r} + E_{pch,k}^{r} + E_{pph,k}^{r} \tag{6}$$

$$E_{ph,k}^{r} = Charakteristischer\ räumlicher\ Erdwiderstand\ in\ Höhe\ der\ Ersatzkraft$$
$$E_{pgh,k}^{r} = Charakteristischer\ Anteil\ aus\ Bodeneigengewicht$$
$$E_{pch,k}^{r} = Charakteristischer\ Anteil\ aus\ großflächigen\ Gleichlasten$$
$$E_{pph,k}^{r} = Charakteristischer\ Anteil\ aus\ Kohäsion$$

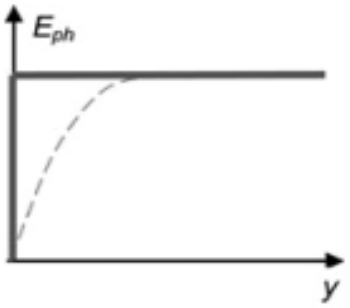


Abbildung 3-2: Erddruckansatz nach Blum [30]

bestimmt werden. Die einzelnen Anteile des räumlich passiven Erddrucks können nach Gln. (3)-(6) aus [31] berechnet werden. Die dort aufgeführten Formbeiwerten D^{er} dienen dazu, das räumliche Spannungsverhalten des Bodens in einen zweidimensionalen Spannungszustand zu überführen [30, pp. 534-535]. Die Formbeiwerte D^{er} sind abhängig von dem Verhältnis der Lage t des theoretischen Fußpunktes zum Durchmesser D und dem Reibungswinkel φ und können ebenfalls [31] entnommen werden. Für bindige Böden muss der Erdwiderstand mit Hilfe der undrainierten Scherparameter c_u und φ_u berechnet werden [31]. Für geschichtete nicht bindige Böden gilt näherungsweise [31]:

$$e_{pgh,k}^{r} = \Sigma(\gamma_i * h_i) * k_{pgh} * D_{pg}^{er} \tag{7}$$

Die erforderliche Einbindetiefe t wird im ersten Berechnungsschritt über das Momentengleichgewicht um den theoretischen Fußpunkt F bestimmt (Gl. (8)) [31].

$$\Sigma M_F = 0 = F_{h,d} * 1 - \Sigma E_{ph,i}^{r} / \gamma_{Ep} * li) \tag{8}$$

$$F_{h,d} = Horizontale\ Einwirkung\ (desgin)$$
$$E_{ph,i}^{r} = Erddruckresultierende$$

$$\gamma_{Ep} = Teilsicherheitsbeiwert\ Erdwiderstand$$

$$l_i = Hebelarm\ Erddrukresultierende\ (siehe\ Abbildung\ 2-1)$$

Die Ersatzkraft C wird eingeführt, um das horizontale Gleichgewicht zu wahren und greift am theoretischen Fußpunkt F an [31]. Aus der Differenz zwischen den angreifenden Kräften unter Vernachlässigung des aktiven Erddrucks und dem mobilisierten räumlichen Erdwiderstand kann die Ersatzkraft C berechnet werden (Gl. (9)) [31].

$$C_{h,k} = E^r_{ph,mob,d} - \Sigma F_{h,k,i} \tag{9}$$

$$F_{h,k,i} = Charakteristische\ Horizontale\ Einwirkung$$

$$E^r_{ph,mob,d} = {E^r_{ph,k}}\Big/{(\gamma_Q * \gamma_{Ep})}$$

$$\gamma_Q = Teilsicherheitsbeiwert\ Einwirkung$$

Die Ersatzkraft C sollte nach [31] nicht über $\delta_p, = +1/3\varphi$ angesetzt werden, damit das Gleichgewicht der Vertikalkräfte erhalten bleibt. Sollte der Nachweis der Vertikalkräfte nicht eingehalten werden, so ist δ_p, entsprechend anzupassen [31].

Die Ersatzkraft C wirkt im Bereich des theoretischen Fußpunktes über Δt (siehe Abbildung 2-1) [31]. Die aus dem Bereich Δt resultierenden Spannungen aus der Ersatzkraft C dürfen dabei nicht größer als der passive Erdwiderstand werden [31].

$$\Delta t = \frac{1}{2} * C_{h,k,Blum} * y_Q * \frac{\gamma_{R,e}}{e^r_{ph,k}} \tag{10}$$

$$e^r_{ph,k} = Ordinate\ des\ charakteristischen\ räumlichen\ Erddrucks\ in\ Höhe\ von\ C$$

Die erforderliche Einbindetiefe ergibt sich dann aus (Gl. (11)).

$$t_{erf} = t + \Delta t \tag{11}$$

3.2 Lineares Bettungsmodulverfahren

Das lineare Bettungsmodulverfahren wird im Gegensatz zum Verfahren nach Blum bei langen biegeweichen Pfählen eingesetzt [32, p. 124]. Die Bodenwiderstände werden dabei als Federn simuliert und über Bettungsmodule angegeben [33, p. 196]. Der Pfahl wird dabei über die nachfolgende Gleichung als federgebetteter Balken beschrieben [28, p. 166].

$$EI * \frac{d^4 * y(z)}{d * z^2} + \sigma_h(z) * D_s = 0 \tag{12}$$

Über σ_h wird die seitliche Bodenreaktion, die beim linearen Bettungsmodulverfahren proportional zur Pfahlverschiebung angenommen wird, beschrieben [28, p. 167].

$$\sigma_h = k_s * y \tag{13}$$

Das Bettungsmodul k_s beschreibt dabei das Verhältnis der Bodenreaktion gegenüber der horizontalen Verschiebung des Pfahls. Im Last-Verformungsdiagramm beschreibt es die Steigung der Geraden zwischen Anfangsspannungszustand und mobilisiertem Erdwiderstand (siehe Abbildung 2-3). Der Bettungsmodul lässt sich vereinfacht über Gl. 14 bestimmen [28, p. 167].

$$k_s = \frac{E_s}{D_s} \tag{14}$$

Das lineare Bettungsmodulverfahren ist vor allem für die Nachweise im Grenzzustand der Tragfähigkeit anzuwenden [32, p. 131]. Für die Nachweise STR und GEO im Grenzzustand der Tragfähigkeit gilt, diese müssen nicht geführt werden, wenn die waagerechte charakteristische Beanspruchung aus dem BS-P höchstens 3% oder im BS-T maximal 5% der vertikalen Belastung betragen [32, p. 131]. Das Bettungsmodul k_s darf auf der vereinfachten

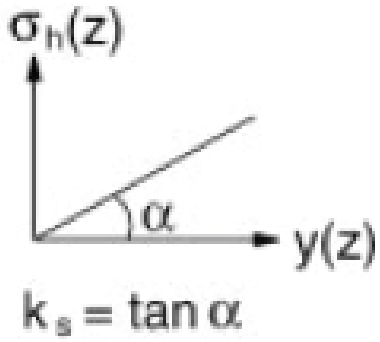


Abbildung 3-3: Definition ks [28]

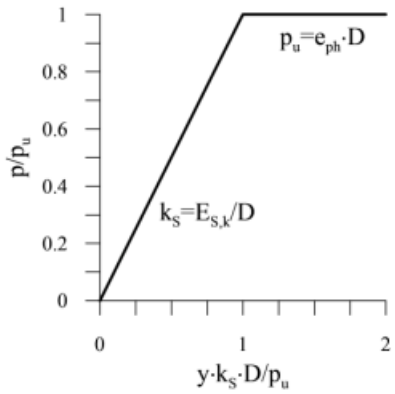


Abbildung 3-4: Federkennlinie lineares Bettungsmodulverfahren [29]

Grundlage nach Gl. (14) nur für die Ermittlung von Schnittgrößen herangezogen werden [32, p. 132]. Für den Verformungsnachweis ist die Anwendung der Gl. (12)-(14) auf 2,0 cm oder 0,03 * $D_s$begrenzt, dabei ist der kleinere Wert maßgebend [34, p. 75]. Sollten Verformungen für die Bemessung des Bauwerks von Bedeutung sein, so sind die Werte für k_s aus horizontalen Pfahlprobebelastungen oder aus Erfahrungswerten abzuleiten [34, p. 75]. Die eigentliche Steifigkeit des Bodens entspricht entgegen dem linearen Bettungsmodulverfahren eigentlich einem nichtlinearen Verlauf (siehe p-y Verfahren) [28, p. 168].
Im Rahmen des Bettungsmodulverfahrens sind zwei maßgebliche Nachweise in Bezug auf die Pfahl-Boden-Interaktion zu führen [32, p. 132]. Die charakteristischen Normalspannungen $\sigma_{h,k}$, die zwischen dem Pfahl und dem Boden auftreten müssen nahe der Geländeoberfläche kleiner als der sich aus dem ebenen passiven Erddruck $e_{ph,k}$ ergebenen Bodenreaktion sein [32, p. 132].

$$\sigma_{h,k} \leq e_{ph,k} \tag{15}$$

Darüber hinaus darf der seitliche Bodenwiderstand $B_{h,d}$nicht größer als der bis zum Drehpunkt angesetzte räumliche passive Erdwiderstand $E_{ph,d}^{r}$ werden [32, p. 132].

$$B_{h,d} \leq E_{ph,d}^{r} \tag{16}$$

Erfahrungswerte für Bettungsmodule für nichtbindige Böden können der nachfolgenden Tabelle entnommen werden.

Tabelle 3-1: Bettungsmoduli für nichtbindige Böden

Nichtbindige Böden mit Lagerungsdichte:			
Locker	Mitteldicht	Dicht	Sehr dicht
1-4 MN/m²	3-10 MN/m²	8-15 MN/m²	12-20 MN/m²

3.3 p-y Verfahren

Das p-y Verfahren ist ein Bettungsmodulverfahren, bei dem die Bodenreaktion durch nichtlineare Federkennlinien (p-y-Kurven) in Abhängigkeit der Pfahlverformung dargestellt wird (siehe Abbildung 3-5) [30, p. 536]. Anhand der Winkler-Feder-Theorie werden diese analysiert [35]. Die einzelnen Schichten werden als voneinander unabhängige Federn modelliert, wodurch die Übertragung von Schubspannungen der Schichten untereinander vernachlässigt wird (siehe Abbildung 3-5) [35, p. 166].

Entwickelt wurde das p-y-Verfahren zwischen 1970 und 1980 in den USA auf Grundlage horizontaler Pfahlprobebelastungen, die an Stahlrohrprofilen durchgeführt wurden [30]. Die Probebelastungen wurden an Pfählen in homogenen Böden mit einem Durchmesser von 0,3-0,64 m durchgeführt [35]. Einschätzungen im Jahresbericht 2020 der EAP gehen davon aus, dass das p-y Verfahren für Pfähle bis zu einem Durchmesser von 2,00 m anwendbar ist [35]. International ist das p-y Verfahren üblich zur Bemessung von Pfahlgründungen für Offshore-Windkraftanlagen und wird nach dem Jahresbericht 2020 der EAP in der nachfolgenden Auflage der EAP für horizontal belastete Pfähle als Bemessungsansatz mit aufgenommen [35]. Im Unterschied zum aktuell in den EA-Pfählen empfohlenen linearen Bettungsmodulverfahren beruht das p-y-Verfahren auf einem nichtlinearen Spannungs-Verschiebungs Ansatz [35] (siehe Abbildung 3-5). Soll die horizontale Verformung ohne Pfahlprobebelastungen über die durch die DIN 1054 vorgegebenen Grenzen für das lineare Bettungsmodulverfahren ermittelt werden, so können p-y-Kurven herangezogen werden [29, p. 197]. Die horizontale Tragfähigkeit als auch die Verformungen von Pfählen lassen sich durch das p-y-Verfahren realistischer abschätzen [29, p. 197]. Die für das Bettungsmodul verlangten Nachweise (siehe Gl. (15) und Gl. (16)) nach Eurocode 7-1 sind ebenfalls für das p-y-Verfahren nachzuweisen [29, p. 199]. Der vereinfachte Nachweis darf nach [35] entfallen, da durch p-y-Kurven die maximal mobilisierbaren Bettungsspannungen durch den Erdwiderstand begrenzt werden [29, p. 199].

Im Gegensatz zum Verfahren nach Blum wird bei dem p-y-Verfahren keine konkrete Einbindetiefe des Bohrpfahls berechnet und der Erdwiderstand wird nicht verschiebungsunabhängig und vollständig angesetzt [35].
Der Jahresbericht 2020der EA-Pfähle empfiehlt die Berechnungen der p-y-Kurven nach dem Berechnungsmodell des American Petroleum Institute (API), dieses hat charakteristische p-y Kurven für nichtbindige und bindige Böden vorformuliert (siehe Abbildung 3-12, Abbildung 3-13, Abbildung 3-14, Abbildung 3-15).

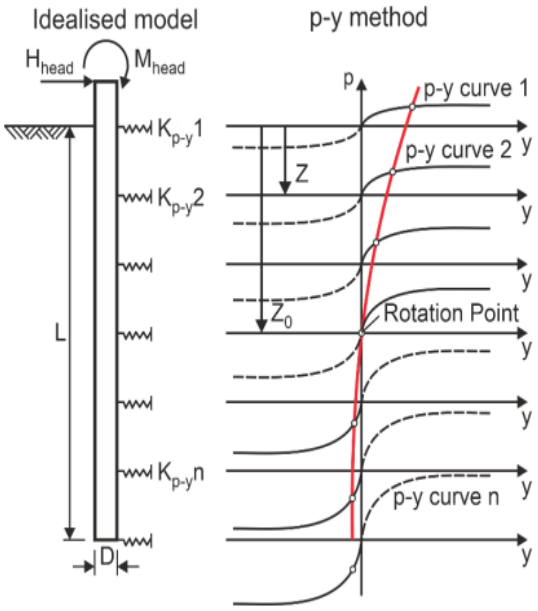


Abbildung 3-5: Nichtlineares Bettungsmodul – Modell [41]

Die maximale Bettungsspannung wird tiefenabhängig über zwei Versagensmechanismen berechnet (siehe Abbildung 3-6) [29, p. 199]. Oberflächennah wird die Bettungsspannung über

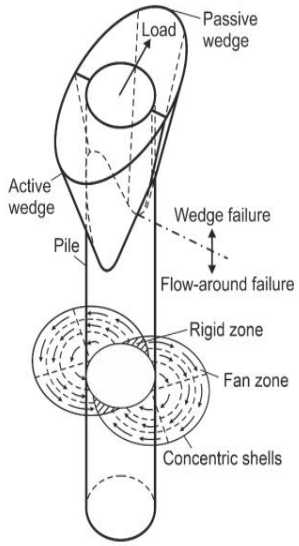


Abbildung 3-6: Tiefenabhängige Versagensmodelle [41]

ein Bruchmodell mit einem vom Reibungswinkel φ abhängigen Gleitkeil berechnet (siehe Abbildung 3-7) [29, p. 199]. Mit zunehmendem Reibungswinkel φ vergrößert sich auch der Aufweitungswinkel α des Gleitkeils (siehe Abbildung 3-7) [29]. Für bindige Böden mit $\varphi_u = 0°$, die sich im undrainierten Zustand befinden wird der Aufweitungswinkel des Gleitkeils zu $\alpha = 0°$ angesetzt [29, p. 199]. Der räumliche Erdwiderstand p_u wird aus der Widerstandskraft des Gleitkeils als Kraft pro m Pfahllänge abgeleitet [29, p. 199]. Multipliziert man die aufnehmbare Bettungsspannung mit dem Pfahldurchmesser D, so ergibt sich der Erdwiderstand [29, p. 199].

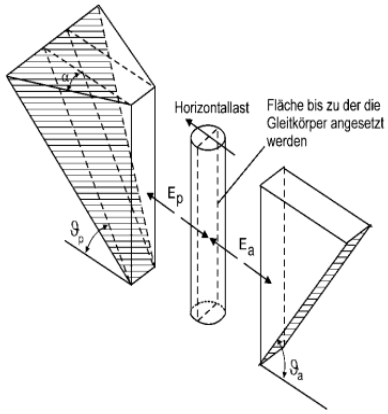


Abbildung 3-7: Oberflächennahes Versagensmodell [40]

In tieferen Schichten führen hohe Vertikalspannungen dazu, dass es vor dem Ausbilden eines Gleitkeils zum Versagen durch ein Umfließen des Bodens um den Pfahl kommt (siehe Abbildung 3-6) [29, p. 200]. Der Pfahl wird dabei auf der Vorderseite der Bewegungsrichtung durch den passiven Erddruck und von der Hinterseite durch den aktiven Erddruck beeinflusst (siehe Abbildung 3-8) [29, p. 200]. Dabei ergibt sich der räumliche Erdwiderstand $p_u$aus der Differenz der passiven Erddruckkomponente zu der aktiven Erddruckkomponente [29, p. 200]. Für bindige Böden lässt sich der Zusammenhang zwischen aktiver und passiver Komponente über das in Abbildung 3-9 dargestellte Versagenskriterium nach Moh-Coulomb beschreiben,

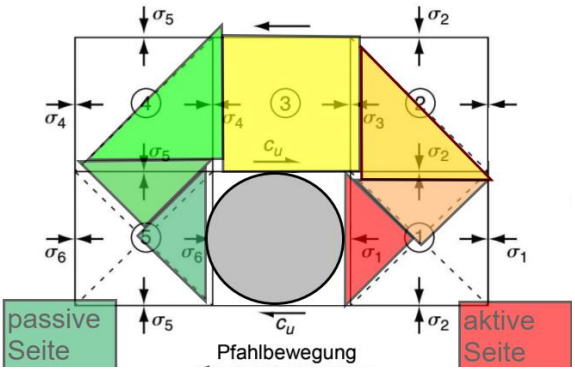


Abbildung 3-8: Horizontales Umfließen des Pfahls [29]

für nichtbindige Böden über das Versagenskriterium nach Moh-Coulomb in Abbildung 3-10 [29].

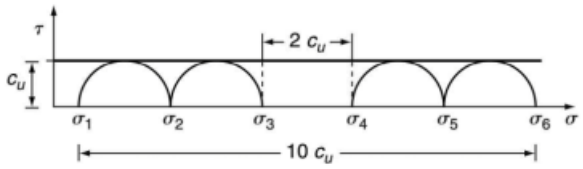


Abbildung 3-9: Mohrscher Spannungskreis bindige Böden [29]

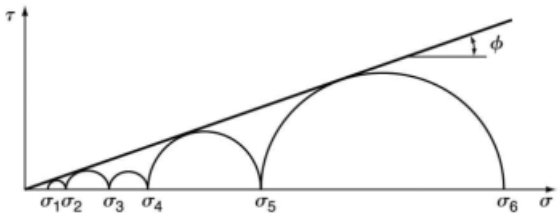


Abbildung 3-10: Mohrscher Spannungskreis nichtbindige Böden [29]

Die Berechnung der P-Y Kurven nach dem Ansatz des API wird nachfolgend vorgestellt. Es werden drei Bodenkategorien, die je unterschiedliche Berechnungsansätze zur Ermittlung der P-Y Kurven haben, vorgestellt.

Nichtbindige Böden

P-Y Kurven der nichtbindigen Böden werden mittels $tanh$-Funktion dargestellt, die für statische und zyklische Belastungen (N≤100 Lastzyklen) Anwendung findet [35, p. 166]. Eine exemplarische p-y-Kurve für nichtbindige Böden und der zugehörigen Funktion ist in Abbildung 3-12 dargestellt.

$$p = A * p_u * \tanh\left(\frac{k * z}{A * p_u} * y\right) \tag{17}$$

$$p_u = maximal\ mobilisierbare\ Bodenreaktionskraft\ [kN/m]$$
$$A = empirischer\ Anpassungsfaktor\ [-]$$
$$y = horizontale\ Verschiebung\ [m]$$
$$z = Tiefe\ [m]$$
$$k = Anfangssteifigkeit\ [kN/m^3]$$

Die Anfangssteigung und die Bettungsspannung sind dabei abhängig von:

- Tiefe [m]
- Wichte (ϒ, ϒ')
- Reibungswinkel φ
- dem Pfahldurchmesser D [m].

Über die Faktoren C_1, C_2 und C_3 wird der Einfluss des Reibungswinkels berücksichtigt (siehe Abbildung 3-11) [35, p. 167]. Für die maximal mobilisierbare Bodenreaktionskraft wird in oberflächennah (p_{u1}) und nach größeren Tiefen (p_{u2}) unterschieden [35, p. 167].

$$p_{u1} = (C_1 * z + C_2 * D) * \gamma' * z \tag{18}$$

$$p_{u2} = C_3 * D * \gamma' * z \tag{19}$$

Maßgebend für die Gleichung (20) ist der kleinere Wert. Für eine Berechnung der Einzelwerte wird auf [35] verwiesen.

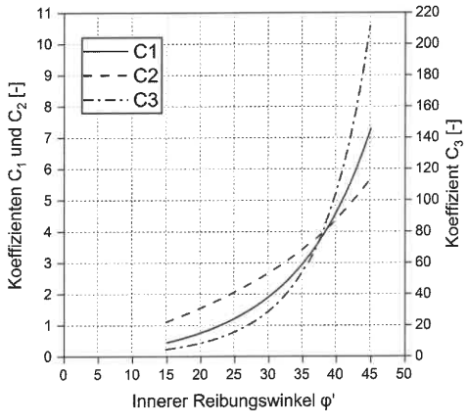


Abbildung 3-11:C1, C2, C3 [35]

Durch den empirischen Anpassungsfaktor A aus Gl. (17) können die Unterschiede zu den in den Feldversuchen gemessenen und aus dem Modell abgeleiteten Werten der maximal mobilisierbaren Bodenreaktionskraft ausgeglichen werden [35, p. 167]. Berücksichtigt wird der Anpassungsfaktor für die Ermittlung des maximalen Erdwiderstands [35, p. 167]. Für statische Belastungen gilt Gl. (21). Anpassungen für zyklische Lasten enthält [35].

$$A = (3 - 80 * \frac{z}{D}) \geq 0{,}90 \tag{21}$$

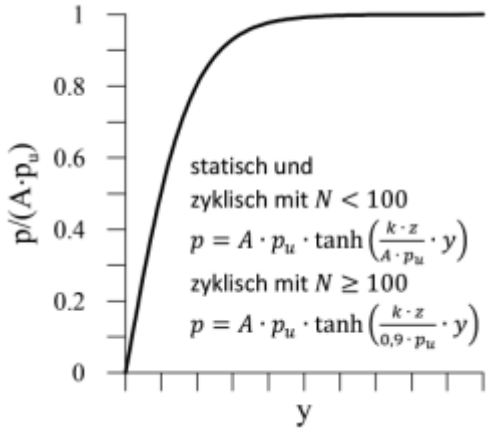


Abbildung 3-12: p-y-Kurve nichtbindiger Boden nach O'Neil 1983 [29]

Weiche bindige Böden

Für weiche bindige Böden mit einer Scherfestigkeit c_u<100 kN/m² werden die p-y-Kurven durch folgende parabolische Funktion beschrieben [35, p. 167]:

$$p = \frac{1}{2} p_u (\frac{y}{y_{50}})^{\frac{1}{3}} \leq p_u \tag{22}$$

$$y_{50} = Verschiebung\ bei\ 50\%\ der\ maximal\ mobilisierbaren\ Bodenrealttion\ [m]$$

Eine exemplarisch p-y-Kurve und die dazugehörige Funktion zur Beschreibung der Kurve in Abbildung 3-13 dargestellt.
Ebenfalls wie für nichtbindige Böden, wird auch bei den weichen bindigen Böden der kleinere Wert aus der Berechnung der räumlichen Erdrücke aus den Gl. (23) und (24) maßgebend [35, p. 168].

$$p_{u1} = 3 * c_u * D + \gamma' * z * D + J * z * c_u \tag{23}$$

$$p_{u2} = 9 * c_u * D \tag{24}$$

$$\gamma' = \text{über die } Tiefe\ gemittelte\ Bodenwichte\ [kN/m^3]$$
$$z = Tiefe\ [m]$$
$$c_u = undränierte\ Kohäsion\ in\ der\ Tiefe\ z\ [kN/m^2]$$
$$D = Pfahlaußendurchmesser [m]$$
$$J = \ dimensionsloser\ Beiwert\ [-]\ (für\ weiche\ bindige Böden\ ist\ / = 0{,}25 - 0{,}5)$$

Der kleiner Wert ist maßgebend. Die Berechnung der Einzelwerte geht aus [35] hervor.

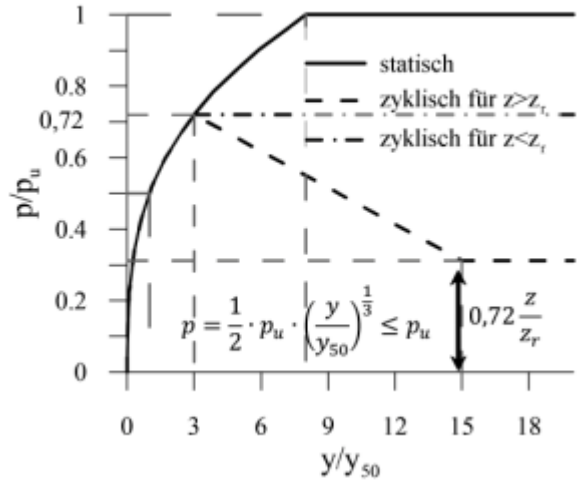


Abbildung 3-13: p-y-Kurve bindige Böden cu ≤ 100kN/m² nach Matlock 1970 [29]

Steife bindige Böden

Böden mit $c_u > 100\,\mathrm{kN/m^2}$ werden nach dem p-y-Verfahren als steife bindige Böden kategorisiert [35, p. 168]. Diese werden zusätzlich in Böden mit Entfestigungseffekten und ohne Entfestigungseffekten unterschieden.

Ohne Entfestigungseffekte:

$$p = \frac{1}{2} p_u \left(\frac{y}{y_{50}}\right)^{\frac{1}{4}} \leq p_u \tag{25}$$

Für Böden mit Entfestigungseffekten siehe [35].
Über Gl. (23) und Gl. (24) kann die maximal mobilisierbare Bodenreaktion berechnet werden, für y_{50} siehe [35]. Abbildung 3-14 und Abbildung 3-15 zeigen exemplarische Verläufe für p-y-Kurven ohne Entfestigungseffekt und mit Entfestigungseffekt.

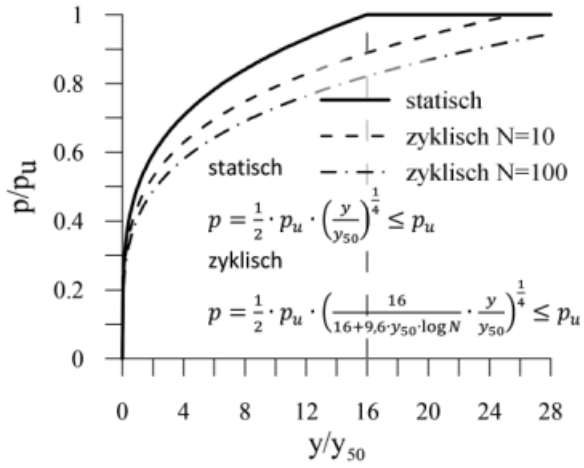


Abbildung 3-14:p-y-Kurve ohne Entfestigung - cu ≥ 100 kN/m² [29]

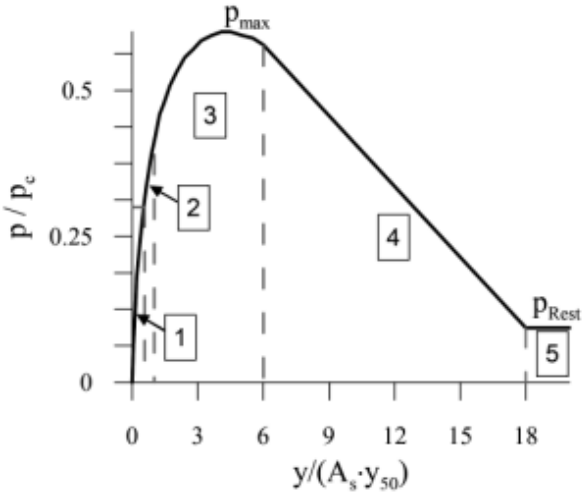


Abbildung 3-15: p-y-Kurven mit Entfestigung - cu ≥ 100 kN/m² [29]

Die von dem API abgeleiteten Berechnungsansätze wurden ausschließlich für einen homogenen Baugrund abgeleitet [35, p. 169]. Die Berechnungsansätze berücksichtigen somit über die gesamte Tiefe die gleiche Steifigkeit bzw. undrainierte Scherfestigkeit [35, p. 169]. Durch die Abbildung des Bodens durch voneinander unabhängiges Federn, wird die Antwort des Bodens auf die Einwirkung als zu hoch eingeschätzt [35, p. 169] [29, p. 202]. Abhängig von der

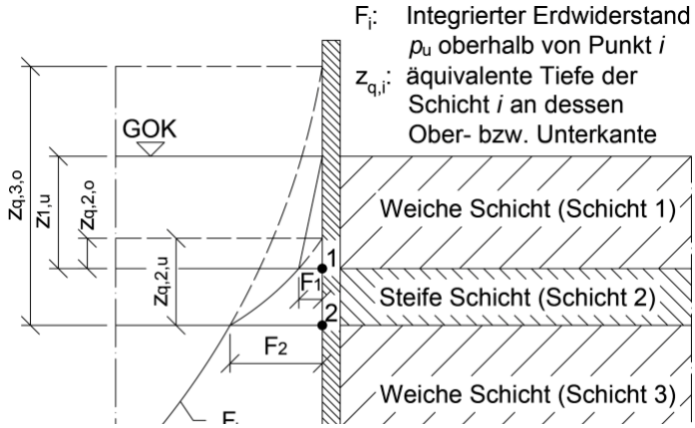


Abbildung 3-16: Ansatz nach [36] – Bestimmung der äquivalenten Tiefe [29]

Steifigkeit der überlagernden Schicht kann die Steifigkeit der betrachteten Schicht beeinflusst werden [29]. Eine höhere Steifigkeit einer darüberliegenden Schicht kann zu einer höheren Tragfähigkeit der untersuchten Schicht führen [29, p. 202].
Ein möglicher Ansatz zur Berücksichtigung von Wechsellagerung stellt [36] dar. Dabei wird für jede Bodenschicht eine äquivalente Tiefe bestimmt, mit der der Grenzwert der Bodenbettung an der oberen Schichtgrenze berechnet wird [29, p. 202]. Die äquivalente Tiefe hängt dabei von der aktuellen Tiefe, dem Überlagerungsdruck und von der Steifigkeit der darüberliegenden Schicht ab [35]. Um die äquivalente Tiefe zu bestimmen, muss die Bruchkraft, F_1 die aufgewendet werden muss, um die darunterliegende Schicht zu durchbrechen (siehe Abbildung 3-16) bestimmt werden. Über das Integral des maximalen Erdwiderstands $p_{u,1}$ in den Grenzen von GOK bis zur Schichtgrenze lässt sich F_1 bestimmen (siehe Gl. (26)) [29, p. 202].

$$F_1 = \int_0^{z_{1,u}} p_{u,1}\, dz \tag{26}$$

Um nun die äquivalente Tiefe zu bestimmen, wird die Erddruckkraft F_2, aus der Integration des Erdwiderstands $p_{u,2}$ gebildet [29, p. 202]. Aus dem Gleichgewichtszustand

$$F_2 = \int_0^{z_{q,2,o}} p_{u,1}\, dz = F_1 \tag{27}$$

ergibt sich die die äquivalente Tiefe $z_{q,2,o}$, also die Tiefe der Oberkante der zweiten Schicht, ausgehend von der GOK [29, p. 202]. Die Unterkante der Schicht wird nach dem Ansatz von [36] durch die Addition der tatsächliche Schichtdicke zu $z_{q,2,o}$, bestimmt.
Die Berechnung der p-y-Kurven erfolgt dann nach den bereits vorgestellten Ansätzen.

4 Pfahlprobebelastung A59 AK Duisburg–AK Duisburg Marxloh

4.1 Projektbeschreibung

Die Autobahn GmbH plant einen 6-streifigen Ausbau der Bundesautobahn A 59. Der Bauabschnitt erstreckt sich vom Autobahnkreuz Duisburg bis zur Anschlussstelle Duisburg-Marxloh (siehe Abbildung 4-1**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Zusätzlich werden Anpassungen an den Bauwerken, Autobahnkreuzen und jeglichen Anschlussstellen durchgeführt. Für die Gründung der neuen Brücke werden Bohrpfähle als Gründungsvariante ausgeführt. Als Vorabmaßnahme sind dazu Pfahlprobebelastungen an zwei Standorten (nordöstliches Ohr im AK Duisburg (Standort1) und östlich AK Duisburg-Nord (Standort2) – vgl. Abbildung) vorgesehen. Insgesamt wurden sechs Probepfähle hergestellt, an jedem Standort sind jeweils zwei Probepfähle gegeneinander lateral, über Hydraulikpressen belastet worden. Jeder Probepfahl wurde darüber hinaus vorher vertikal belastet. Die Pfahlprobebelastung dient dazu, die Machbarkeit und Optimierung der Bohrpfahlgründungen innerhalb der Hauptbaumaßnahme zu prüfen und Bemessungskennwerte für Mantelreibung, Spitzendruck sowie dem horizontalen Lastabtragverhalten für die relevanten Baugrundschichten zu ermitteln. Die Pfahlprobebelastungen wurden über einen Zeitraum von

Abbildung 4-1: Übersicht Standorte Pfahlprobebelastung Pfahlprobebelastung [44]

ca. zwei Monaten an den jeweiligen Standorten ausgeführt.

Anhand der durch die Kernbohrung gewonnenen Kerne, kann ein Schichtverlauf des Bodens an der abgeteuften Stelle ermittelt werden kann. Die indirekten Aufschlussbohrungen liefern

Kenngrößen für den Spitzenwiderstand q_s und für die Mantelreibung f_s. Bei der Auswertung der Bohrungen ist darauf zu achten, diese in Zusammenhang zu bringen, um geotechnische Bodenkenngrößen verlässlich ableiten zu können. Darüber hinaus wurden Laboruntersuchungen durchgeführt, um die Ergebnisse der Aufschlussbohrungen zu ergänzen. Nachfolgend werden die Auswertungen aus den Feld- und Laborversuchen vorgestellt.

4.2 Geotechnisch Kenngrößen Standort 1 AK Duisburg

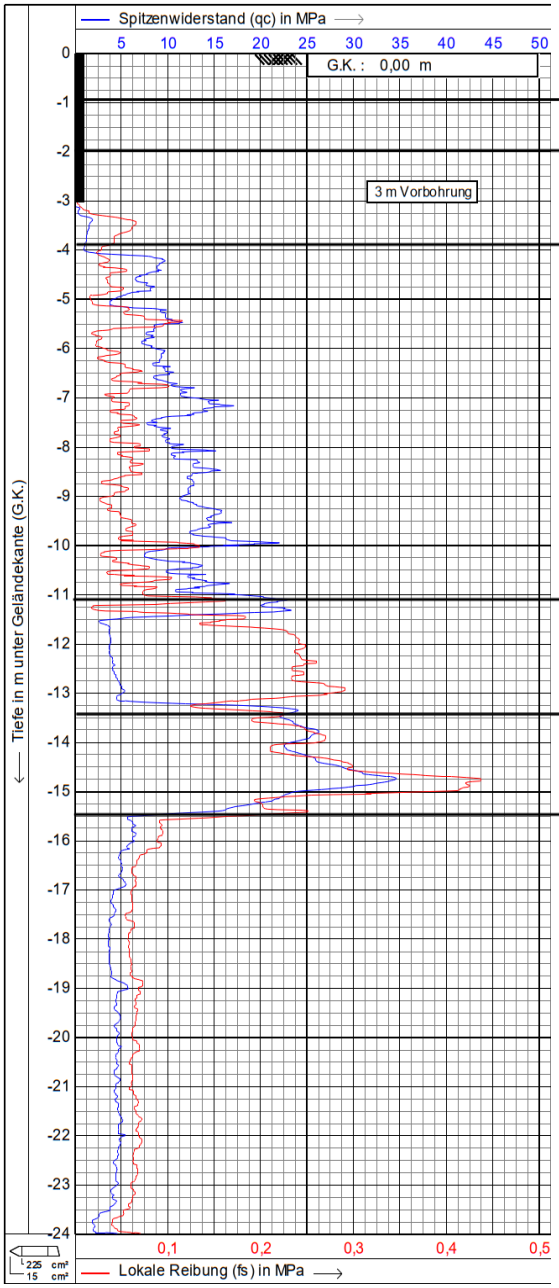
4.2.1 Baugrundschichtung

Gemäß den Untersuchungen ist der für die Probepfähle anstehende Boden in die vier nachfolgenden übergeordneten Baugrundsichten zu unterteilen:

1. Auffüllung
2. Quartäre Böden
3. Tertiäre Böden
4. Oberkreide

Die vier übergeordneten Bodenschichten gliedern sich wiederum in 6 Schichten (siehe Abbildung 4-3), die jeweils geringfüge Unterschiede in den Verläufen der Einzelschichten aufweisen. Übergeordnet können die Einzelschichten jedoch einer der sechs Schichten zugeordnet werden. Die Schichtgrenzen können als nahezu horizontal gelagert angesehen werden [37].

Für die Pfahlprobebelastung wurde eine etwa 1,0 m dicke Auffüllung als Arbeitsebene auf das Baufeld aufgeschüttet [37]. Auf die Auffüllung folgt die Schicht 1.2, die sich in tonige, schluffige und sandige Kiese bzw. tonige schluffige und kiesige Sande gliedert (siehe Abbildung 4-3) [37]. Die Sande weisen eine lockere bis mitteldichte Lagerung und eine Schichtdicke von 1,0 m auf [37]. Unterlagert werden die Sande durch die Schicht 2.2, den Auenlehmen [37]. Die Auenlehme bestehen teilweise aus sandigen Tonen, mit vereinzelnd geringen Kiesanteilen. Darüber hinaus können diese Anteile von organischen Beimengungen aufweisen [37] (siehe Abbildung 4-3). Innerhalb der Schicht wechseln sich die sandigen Tone mit kiesigen Schluffen ab. Die durch die indirekten Aufschlüsse gemessene Lagerungsdichte erstreckt sich von weicher bis halbfester Konsistenz [37]. Am Standort 1 wurde die Schicht 2.2 in einer Mächtigkeit von 1,9 m angetroffen [37]. Die gemessene Lagerungsdichte ist als weich bis steif angegeben (siehe Abbildung 4-3) [37]. An die vorangegangenen Auenlehme schließen sich die Terrassensande Schicht 2.3 an [37]. Die Terrassensande weisen einen geringen bindigen Anteil auf und bestehen hauptsächlich aus kiesigen Sanden [37]. Unterlagert wird die Schicht 2.3 von den Terrassenkiesen (Schicht 2.4), die aus sandigen Kiesen mit Beimengungen aus



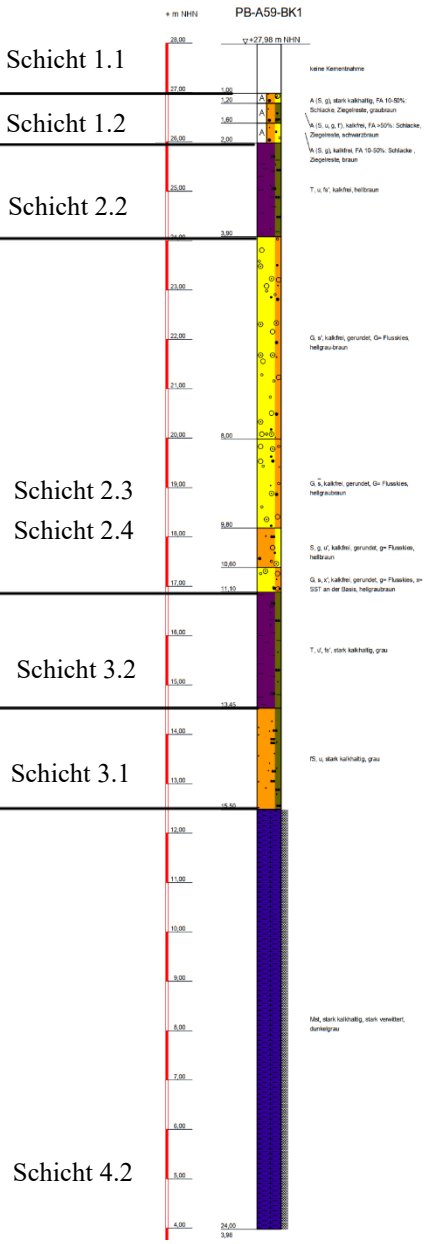


Abbildung 4-2: DPT PB-A59-BK1

Abbildung 4-3: Schichtverlauf - Standort 1

Schluff, Ton und Steinanteilen bestehen [37]. Schicht 2.3 und Schicht 2.4 sind den quartären rolligen Böden zuzuordnen und besitzen eine mitteldichte bis dicht gelagerte Lagerungsdichte (siehe Abbildung 4-2 [37]. Die angetroffene Schichtdicke der Schichten 2.3 und 2.4 insgesamt liegen bei 7,2 m (siehe Abbildung 4-3). Unterhalb der Terrassenkiese folgen die tertiären Schichten, bestehend aus den tertiären Feinsanden (Schicht 3.1) und den tertiären Tonen (Schicht 3.2) [37]. Die tertiären Feinsande bestehen aus schwach mittelsandigen bis mittelsandigen tonigen Feinsanden, mit einer Mächtigkeit von 2,05 m und einer Lagerungsdichte von dicht bis sehr dicht. Schicht 3.2 besteht aus sandigen Tonen, die eine steife Konsistenz aufweisen (siehe Abbildung 4-2) [37]. Die Schichtdicke beträgt 2,35 m [37]. Nachfolgend schließt sich die Schicht der Emscher Kreide-Mergel (Schicht 4.2) an [37]. Diese

Schicht besteht aus Sandmergel, welcher eine dichte Lagerung aufweist [37].
Die angetroffene Schichtdicke der Schichten 2.3 und 2.4 insgesamt liegen bei 7,2 m (siehe Abbildung 4-3). Unterhalb der Terrassenkiese folgen die tertiären Schichten, bestehend aus den tertiären Feinsanden (Schicht 3.1) und den tertiären Tonen (Schicht 3.2) [37]. Die tertiären Feinsande bestehen aus schwach mittelsandigen bis

Tabelle 4-1: Übersicht Bodenschichten – Standort 1

	Schicht Nr.	Schichtbezeichnung	Klassifizierung nach DIN 18196	Schichtdicke [m]	Konsistenz/Lagerungsdichte
Auffüllung	-	Auffüllung		1,0	-
	1.2	Grobkörnige Auffüllung	A[S, g, u, t']	1,0	locker bis mitteldicht
Quartäre Böden	2.2	Auenlehm	T, u, fs'	1,9	weich bis steif
	2.3	Terrassensande	S, g, u'	7,2	mitteldicht bis dicht
	2.4	Terrassenkiese	G. s'		mitteldicht bis dicht
Tertiäre Böden	3.1	Tertiärer Feinsand	fS, u	2,05	dicht bis sehr dicht
	3.2	Tertiärer Ton	T, u', fs	2,35	Überwiegend steif
Oberkreide	4.2	Kreide-Mergel	Mst, stark kalkhaltig	Keine Angaben	dicht

4.2.2 Hydrologische Verhältnisse

Die Grundwasserpegel auf dem Projekt variiert in Abhängigkeit der angrenzenden Ruhr. Im Baufeld befindet sich ein stark durchlässiger Porengrundwasserleiter aus quartären Terrassenkiesen [37]. Die über den quartären Terrassenkiesen gelagerten Auenlehme weisen dagegen eine geringe Durchlässigkeit auf (vgl.
Tabelle 4-3) [37].

Tabelle 4-2: Übersicht Grundwasserstände - Standort 1

Standort	Bauwasserstand [mNHN]	Bemessungsgrundwasserstand [mNHN]
Standort 1	+20,80	+21,50

.

Tabelle 4-3: Durchlässigkeit und Wassergehalt Bodenschichten - Standort 1

	Schicht Nr.	Schichtbezeichnung	Durchlässigkeitsbeiwert K_f {m/s]	Durchlässigkeitsbereich	Wassergehalt
Auffüllung	1.2	Grobkörnige Auffüllung	$1*10^{-2}$ bis $1*10^{-6}$	sehr stark durchlässig bis durchlässig	23,4% im Mittel
Quartäre Böden	2.2	Auenlehm	$1*10^{-6}$ bis $1*10^{-11}$	durchlässig bis sehr schwach durchlässig	26,9% im Mittel
	2.3	Terrassensande	$1*10^{-2}$ bis $1*10^{-6}$	sehr stark durchlässig bis durchlässig	12,4% im Mittel
	2.4	Terrassenkiese	$1*10^{-2}$ bis $1*10^{-6}$	sehr stark durchlässig bis durchlässig	2,8% -17,8%
Tertiäre Böden	3.1	Tertiärer Feinsand	$5*10^{-4}$ bis $1*10^{-9}$	durchlässig bis sehr schwach durchlässig	13,1% - 28,7%
	3.2	Tertiärer Ton	$1*10^{-7}$ bis $1*10^{-11}$	schwach durchlässig bis sehr schwach durchlässig	13,9% - 30,6%
Oberkreide	4.2	Kreide-Mergel	$5*10^{-5}$ bis $1*10^{-9}$	durchlässig bis sehr schwach durchlässig	19,3 % -26,9 %

4.2.3 Labor-/Feldversuche

Zur Berechnung des Verformungsverhaltens und zur Ableitung des Steifmoduls des Bodens wurden Bohrlochaufweitungsversuche durchgeführt [37].

Die Fließ- und Ausrollgrenze wurde gemäß DIN 17892-12 nach Atterberg ausgeführt. Die Fließgrenze beschreibt dabei den Wassergehalt, ab welchem der untersuchte Boden vom flüssigen in den plastischen Zustand übergeht. Mit der Ausrollgrenze kann der Wassergehalt, bei dem der Boden keine plastische Verformung mehr aufweist, beschrieben werden. Die Untersuchung ergaben folgende Ergebnisse [37].

- Schicht 1 (Auffüllung): breiig bis halbfest
- Schicht 2 (Quartäre Böden): breiig bis halbfest
- Schicht 3 (Tertiäre Böden): flüssig bis steif
- Schicht 4 (Oberkreide): weich bis steif

Für die Klassifizierung des Bodens gemäß DIN 18 196 siehe Abbildung 4-3 und Tabelle 4-1.

Der Anteil organischen Beimengungen wurde über den Glühverlust bestimmt. Im Mittel lag der Wert bei < 6 Gew.-%. Es wurden Proben aus den Schichten 1.1, 2,2 und 3.2 entnommen [37].

Schicht 2.2 weist vereinzelt einen Glühverlust von 13,9 Gew.-% auf. Organische Böden weisen meist eine sehr geringe Dichte und einen hohen Wassergehalt auf. Hohe Glühverluste sprechen für hohe organische Beimengungen, welche negative Einflüsse auf bautechnische Eigenschaften haben können.

4.2.4 Geotechnische Eigenschaften und Bodenkennwerte

Die charakteristischen Bodenkennwerte sind in der nachfolgenden Tabelle dargestellt.

Tabelle 4-4: Bodenkennwerte - Standort 1

Schicht Nr.	Schichtbezeichnung	Wichte feuchter Boden γ_k [kN/m³]	Wichte unter Auftrieb γ_k' [kN/m³]	Reibungswinkel φ_k' [°]	Kohäsion c_k' [kN/m²]	Undrainierte Kohäsion $c_{u,k}'$ [kN/m²]	Steifemodul $E_{s,k}$ [kN/m³]
1.2	Grobkörnige Auffüllung	18	11	30	-	-	20-50
2.2	Auenlehm	19,5	9,5	25	10	20-150	5-20
2.3	Terrassensande	19	10	32,5	-	-	40-80
2.4	Terrassenkiese	19,5	10,5	35	-	-	60-150
3.1	Tertiärer Feinsand	18	10,5	32,5	5	20-100	30-100
3.2	Tertiärer Ton	19,5	10	20	25	80-250	20-80
4.2	Kreide-Mergel	20	10,5	25	40	80-500	60-250

4.3 Geotechnisch Verhältnisse Standort 2

4.3.1 Baugrundschichtung

Gemäß den Untersuchungen ist der für die Probepfähle anstehende Boden in die drei nachfolgenden übergeordneten Bodenschichten zu unterteilen:

1. Auffüllung
2. Quartäre Böden
3. Tertiäre Böden

Die drei übergeordneten Bodenschichten gliedern sich gleich zum Standort 1 in 6 Schichten (siehe Abbildung 4-5 und Abbildung 4-7), die jeweils geringfüge Unterschiede in den Verläufen der Einzelschichten aufweisen. Übergeordnet können die Einzelschichten jedoch einer der sechs Schichten zugeordnet werden. Die Schichtgrenzen können als nahezu horizontal gelagert angesehen werden [38].

Unter der vor Baubeginn künstlich aufgeschütteten Auffüllung (D = 1,0 m) steht die Schicht 1.2 an (siehe Abbildung 4-5 und Abbildung 4-7). Schicht 1.2 besteht aus sandigen, schluffigen und steinigen Kiesen, vereinzelnd finden sich Rückstände von Beton und Asphalt wieder [38].

Die Schicht 1.2 weist eine Mächtigkeit von 6,70- 7,80 auf (siehe Abbildung 4-5 und Abbildung 4-7). Die Lagerung ist als locker bis mitteldicht angegeben (siehe Abbildung 4-4, Abbildung 4-6) [38]. Nach der Schicht 1.2 folgen die Auenlehme (Schicht 2.2). Die Auenlehme bestehen teilweise aus sandigen Tonen, mit vereinzelnd geringen Kiesanteilen [38]. Darüber hinaus können diese Anteile von organischen Beimengungen aufweisen [38]. Innerhalb der Schicht wechseln sich die sandigen Tone mit kiesigen Schluffen ab [38]. Die durch die indirekten Aufschlüsse gemessene Lagerungsdichte erstreckt sich von weicher bis halbfester Konsistenz [38]. Am Standort 2 wurde die Sicht 2.2 in einer Mächtigkeit von 0,2-0,3 m angetroffen [38]. Unter die Schicht 2.2 lagern sich quartärer rolliger Böden bestehen aus Terrassensande (Schicht 2.3) an (siehe Abbildung 4-5 und Abbildung 4-7). Diese setzen sich aus kiesigen Sanden mit einem geringen Anteil an bindigen Böden zusammen [38]. An Schicht 2.3 schließen sich bei den Aufschlüssen im Bereich P3.1 Terrassenkiese (Schicht 2.4) bestehend aus sandigen Kiesen mit untergeordneten geringen Schluff-, Ton, und Steinanteilen an [38]. Im Bereich Nord wurden diese Schichten teilweise in Wechsellagerung angetroffen [38]. Die Lagerungsdichte: reicht von dicht bis mitteldicht (siehe Abbildung 4-4 und Abbildung 4-6) [38]. Im Anschluss an Schicht 2.3 folgen im Bereich BP3.2 rollige tertiären Feinsande (Schicht 3.1) und bindige tertiäre Tone (Schicht 3.2) [38]. Die Feinsande bestehen größtenteils aus schwach bis mittelsandigen, teils tonigen Feinsanden [38]. Die Lagerungsdichte wird als dicht bis sehr dicht eingestuft [38]. In der Schicht 3.2, welche im Bereich P3.1 Schicht 2.4 direkt unterlagert treten überwiegend sandige Tone auf, deren Konsistenz als steif zu klassifizieren ist [38] .

Tabelle 4-5: Übersicht Bodenschichten - Standort 2

	Schicht Nr.	Schichtbezeichnung	Klassifizierung nach DIN 18196	Schichtdicke [m]	Konsistenz/Lagerungsdichte
Auffüllung	-	Auffüllung		1,0	-
	1.2	Grobkörnige Auffüllung	A[S, g, u, t', o]	P3.1: 6,70 P3.2: 7,80	locker bis mitteldicht
Quartäre Böden	2.2	Auenlehm	T, u, s‘	P3.1: 0,3 P3.2: 0,2	weich bis steif
	2.3	Terrassensande	S, g, u‘	P3.1: 6,6 P3.2: 7,5	mitteldicht bis dicht
	2.4	Terrassenkiese	G,. s‘	P3.1: 2,25 P3.2: -	mitteldicht bis dicht
Tertiäre Böden	3.1	Tertiärer Feinsand	fS, u‘, t‘	P3.1: - P3.2: 0,35	dicht bis sehr dicht
	3.2	Tertiärer Ton	T, u‘, fs‘	P3.1: 8,75 P3.2: 9,55	Überwiegend steif

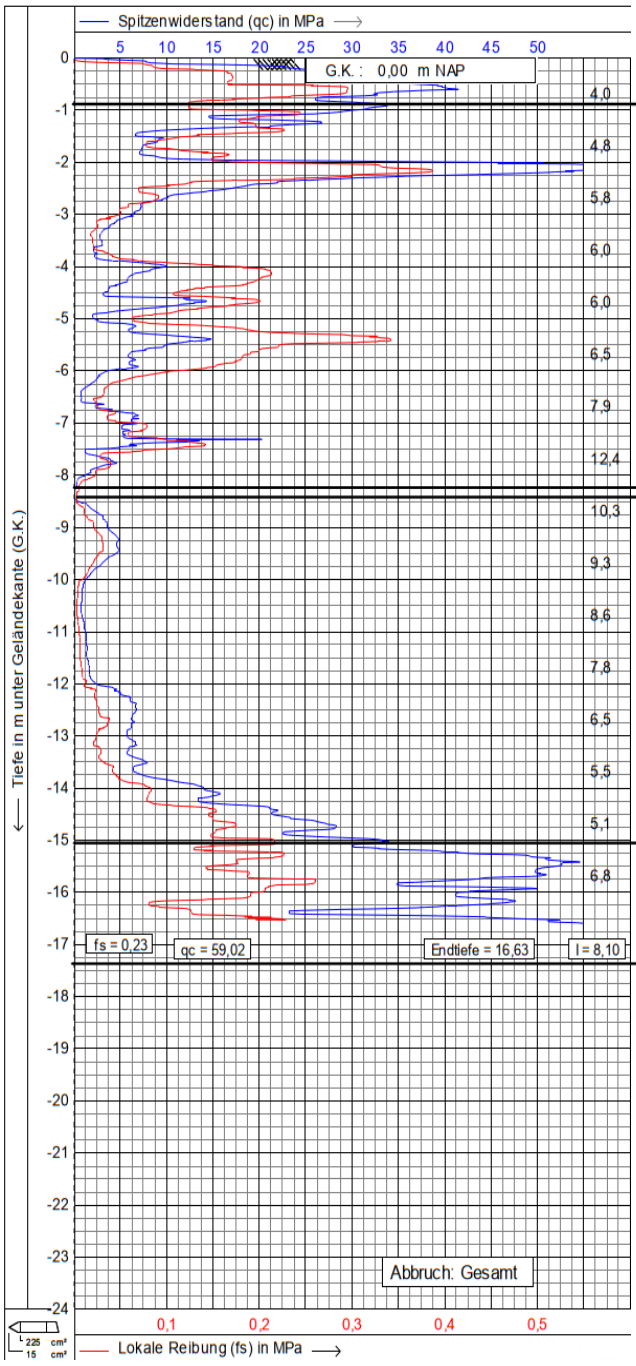


Abbildung 4-4: DPT PB-A59-BK2

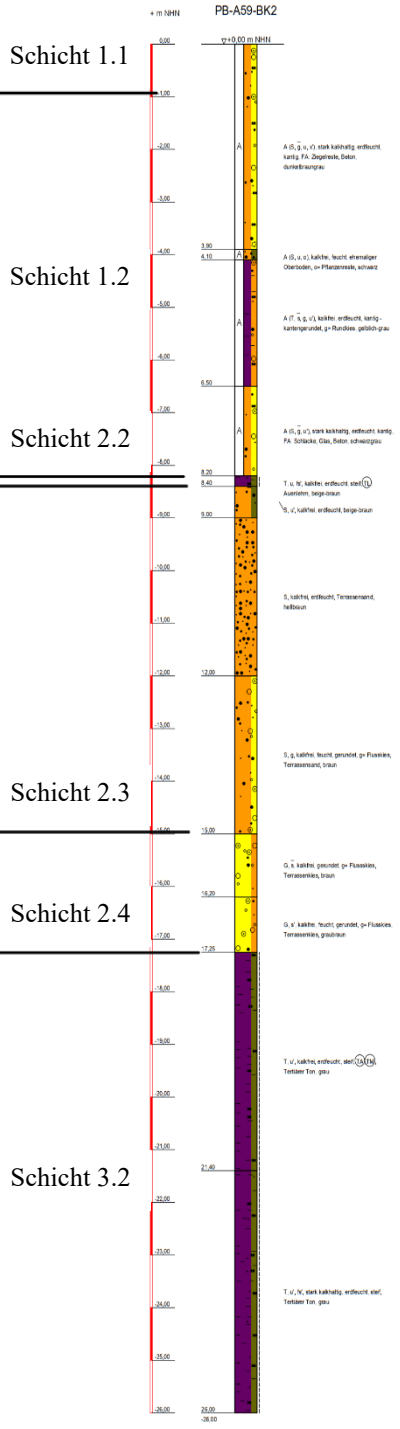


Abbildung 4-5: Schichtverlauf P3.1

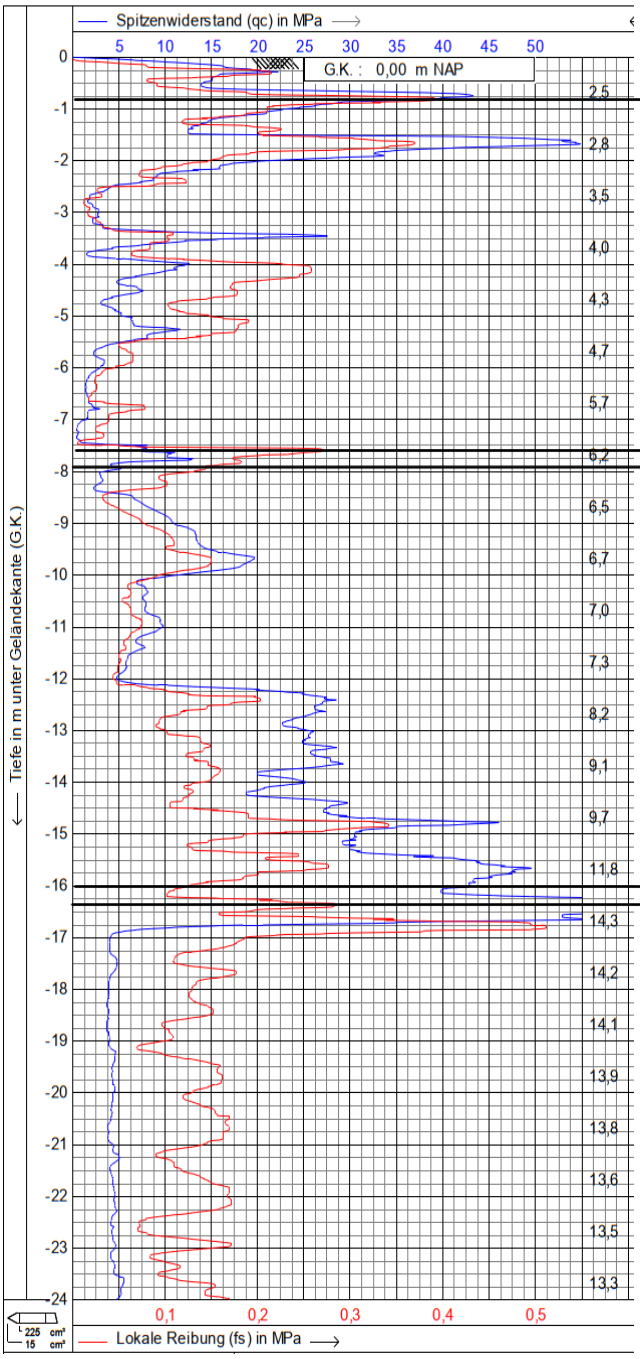


Abbildung 4-6: DPT PB-A59-BK3

Abbildung 4-7: Schichtverlauf P3.2

4.3.2 Hydrologische Verhältnisse

Die Grundwasserpegel auf dem Projekt variieren in Abhängigkeit der umliegenden Flüsse Ruhr und alter Emscher-Kanal [38]. Im Baufeld befindet sich ein stark durchlässiger Porengrundwasserleiter aus quartären Terrassenkiesen [38]. Die über den quartären Terrassenkiesen anstehenden bindigen Schichten weisen dagegen eine geringe Durchlässigkeit auf (siehe Tabelle 4-7).

Tabelle 4-6: Übersicht Grundwasserstände - Standort 2

Standort	Bauwasserstand [mNHN]	Bemessungsgrund-wasserstand [mNHN]
Standort 2	+20,55	+26,50

Tabelle 4-7: Durchlässigkeit und Wassergehalt Bodenschichten - Standort 2

	Schicht Nr.	Schichtbezeichnung	Durchlässigkeitsbeiwert K_f {m/s]	Durchlässigkeitsbereich	Wassergehalt
Auffüllung	1.2	Grobkörnige Auffüllung	$1*10^{-2}$ bis $1*10^{-6}$	sehr stark durchlässig bis durch-lässig	23,4% im Mittel
Quartäre Böden	2.2	Auenlehm	$1*10^{-6}$ bis $1*10^{-11}$	durchlässig bis sehr schwach durchlässig	26,9% im Mittelwert
	2.3	Terrassensande	$1*10^{-2}$ bis $1*10^{-6}$	sehr stark durchlässig bis durch-lässig	12,4% im Mittelwert
	2.4	Terrassenkiese	$1*10^{-2}$ bis $1*10^{-6}$	sehr stark durchlässig bis durch-lässig	2,8% -17,8%
Tertiäre Böden	3.1	Tertiärer Feinsand	$5*10^{-4}$ bis $1*10^{-9}$	durchlässig bis sehr schwach durchlässig	13,1% - 287%
	3.2	Tertiärer Ton	$1*10^{-7}$ bis $1*10^{-11}$	schwach durchlässig bis sehr schwach durchlässig	13,9% - 30,6%

4.3.3 Labor-/Feldversuche

Zur Berechnung des Verformungsverhaltens und zur Ableitung des Steifmoduls des Bodens wurden Bohrlochaufweitungsversuche durchgeführt [38].

Die Fließ- und Ausrollgrenze wurde gemäß DIN 17892-12 nach Atterberg ausgeführt. Die Untersuchung ergaben folgende Ergebnisse [38]:

- Schicht 1 (Auffüllung): weiche bis halbfest
- Schicht 2 (Quartäre Böden): breiig bis halbfest
- Schicht 3 (Tertiäre Böden): breiig bis halbfest

für die Klassifizierung des Bodens gemäß DIN 18 196

Mittels des Glühverlustversuch wurde der Anteil organischer Bestandteile an 55 Proben untersucht. 58 % der Proben weisen einen organischen Anteil von ≤ 6 Gew.- % auf. 36 %der Proben weisen einen organischen Anteil von 6 Gew.- % - 20 Gew.- % auf. Die restlichen 7 % weisen einen organischen Anteil von größer als 20 Gew.- % auf [38].
Schicht 2.1 weist keine Kalkanteile auf. Schicht 2.2 weist leichte Kalkanteile auf [38]. Die Terrassensande weisen keine bis leichte Kalkrückstände auf [38]. Schicht 3.2 ist als leicht kalkhaltig bis kalkhaltig einzustufen [38]. Vereinzelnd weisen Proben dieser Schicht Kalkgehalte zwischen 41,9 % bis 54,6% auf [38].

4.3.4 Geotechnische Eigenschaften und Bodenkennwerte

Nachfolgend werden die aus den Versuchen vor Ort sowie aus den Laborversuchen gewonnenen Erkenntnissen der geschätzten charakteristischen Bodenkennwerte dargestellt.

Tabelle 4-8: Bodenkennwerte - Standort 2

Schicht Nr.	Schicht-bezeichnung	Wichte feuchter Boden γ_k [kN/m³]	Wichte unter Auftrieb γ_k‘ [kN/m³]	Rei-bungs-winkel φ_k' [°]	Kohäsion c_k' [kN/m²]	Undrainierte Kohäsion $c_{u,k}'$ [kN/m²]	Steifemodul $E_{s,k}$ [kN/m³]	Frostempfindlichkeit
1.2	Grobkörnige Auffüllung	18	11	30	-	-	20-50	F1-F2
2.2	Auenlehm	19,5	9,5	25	10	20-150	5-20	F2-F3
2.3	Terrassensande	19	10	32,5	-	-	40-80	F1-F2
2.4	Terrassenkiese	19,5	10,5	35	-	-	60-150	F1-F3
3.1	Tertiärer Feinsand	18	10,5	32,5	5	20-100	30-100	F1-F3
3.2	Tertiärer Ton	19,5	10	20	25	80-250	20-80	F2-F3

4.4 Horizontale Pfahlprobebelastung

Vor der horizontalen Belastung der Pfähle wurde eine vertikale Pfahlprobebelastung an den Probepfählen durchgeführt. Die Krafteinleitung erfolgte dabei über Druckpressen. Die horizontale Pfahlprobebeanspruchung erfolgte mit zwei gegeneinander verspannten Pfählen über Druckpressen.

Die Standorte, an denen die Pfahlprobebelastungen durchgeführt wurden, wurden nach bestimmten Oberkriterien ausgewählt. Zum einen sollen standortbezogene Pfahlmantelwiderstände und Pfahlfußwiderstände für die Schichten 2.3/2.4, 3.1, 3.2 und 4.2 sowie Pfahlwiderstandswerte für die Bemessung der Bohrpfähle untersucht werden [39]. Außerdem hat Zugänglichkeit unter Berücksichtigung späterer Baumaßnahmen des Hauptprojektes ebenfalls Einfluss bei der Auswahl der Standorte [39].
Standort 1 bot sich aufgrund des anstehenden Schichtverlaufes an, auch wenn dieser keinen ausreichend großen Pfahlwiderstand realisieren kann [39]. Der Bohrpfahl wurde daher bis in den Kreide-Mergel abgeteuft [39].
Standort 2 kam aufgrund seiner ausreichend großen Mächtigkeit der Schichten 2.3, 2.4 und 3.2 infrage, um diese ausreichend zu untersuchen [39].
Die Ergebnisse der statischen Pfahlprobebelastungen können gemäß EA-Pfähle auf den doppelten Pfahldurchmesser übertragen werden. Für das spätere Bauwerk sind Pfähle mit Durchmessern von 1,5 m – 1,8 m geplant. Die Probepfähle haben einen Durchmesser von 1,2 m [39]. Eine Übertragung ist demnach möglich (Bauwerkspfähle < D = 2,4 m) [39]. Für die Pfahllänge wird als Mindesteinbindetiefe in die tragfähige Schicht eine Pfahleinbindung von mindestens 2,5 m oder dem 3-fachen Pfahlfußabstand berücksichtigt [39].
Folgende Parameter nach DIN EN 1536 und EN 206 wurden für die Probe- und Reaktionspfähle im Vorhinein festgelegt:
Bewehrung: Individuell je nach Pfahlgröße (Typ R1, Typ R2, Typ P1, Typ P2, Typ P3)
Druckfestigkeitsklasse:

Reaktionspfähle: C30/37

Probepfähle: C50/60 - Stahlbeton

Tabelle 4-9: Pfahldaten

Pfahlnummer	Betonage	Alter [Tage]	Alter [Tage]
P1.1 (Standort1)	26.-27.02.25	41	41
P1.2 (Standort1)	05.03.2025	41	41
P2.1 (Standort2)	18.-19.03.25	70	70
P2.2 (Standort2)	20.03.2025	75	75
P3.1 (Standort2)	18.03.2025	57	57
P3.2 (Standort2)	19.-20.03.25	60	60

Die horizontale Pfahlprobebelastung am Standort 1 wurde 21 Tage nach Beginn der vertikalen Pfahlprobebelastung von Pfahl 1.2 ausgeführt. Am Standort 2 wurde die horizontale Pfahlprobebelastung 25 Tage nach der vertikalen Pfahlprobebelastung von Pfahl 3.1 durchgeführt.

4.4.1 Versuchsaufbau

Nach der EA-Pfähle kann eine statische Pfahlprobebelastung quer zur Pfahlachse sowohl als Zug- als auch als Druckbelastung ausgeführt werden. Die Pfahlprobebelastungen beider Standorte wurden als Druckbelastung ausgeführt [39]. Der Mindestabstand von 6*D = 6*1,20 = 7,2 m wurde mit 11,88 m für den Standort 1 und 2 eingehalten. Ein exemplarischer Versuchsaufbau ist in der nachfolgenden Abbildung dargestellt.

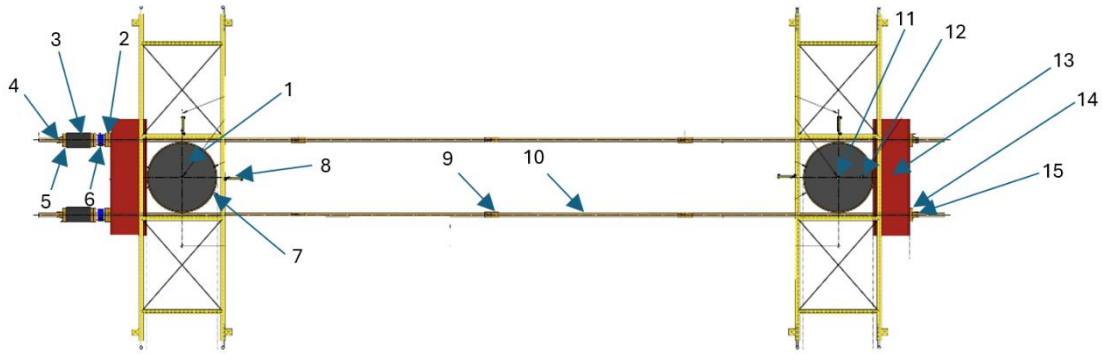


Abbildung 4-8: Belastungskonstruktion

Belastungskonstruktion; 1=Probepfahl, 2=Ankerplatte, 3=Sonderkraftaufnehmer, 4=Ankermutter, 5=Ankerplatte, 6=HBK-Sonderkraftaufnehmer, 7=Stahlhüllrohr, 8=Induktiver Wegaufnehmer, 9=GEWI-Muffe, 10=GEWI, 11=Neigungssensor, 12=Inklinometer-Rohr, 13=Kastenträger, 14=Ankermutter, 15=Ankerplatte

4.4.2 Versuchsdurchführung

Die Belastung wird durch zwei Laststufen auf den Pfahl aufgebracht.

1. Belastungszyklus. Die Last wird bis zum Niveau der charakteristischen Einwirkung von 2800 kN gesteigert [39].
2. Belastungszyklus. Die Last wird bis auf ein Belastungsniveau von 3500 kN gesteigert [39].

Eine ausführliche Darstellung der Belastungzyklen ist in [39] dargestellt.

5 Ergebnisse aus Verformungsberechnung

Für das Projekt wurden mittels faseroptischen Sensoren Verformungen abgeleitet und ausgewertet. Nachfolgend werden die Verformungen der einzelnen Pfähle mit dem bisher in Deutschland verbreiteten linearen Bettungsmodulverfahren sowie dem international und für Offshore-Anlangen gebräuchlichen p-y Verfahren verglichen. Es sollen die Unterschiede der Rechenverfahren dargestellt werden und eine Beurteilung hinsichtlich zukünftiger Berechnungen aus dem Vergleich gezogen werden. Darüber hinaus wird analysiert, wie stark obere und untere Grenzwerte für Bodenparameter die mit dem p-y Verfahren berechneten Verformungen beeinflusst. Weiter wird versucht, die Verformungen, die durch das lineare Bettungsmodul-Verfahren und das p-y-Verfahren entwickelt wird durch ein Curve-fitting an die Verformungen der faseroptischen Sensoren eines jeden Pfahls anzunähern und diese dann hinsichtlich der Genauigkeit zu bewerten. Abschließend werden Verformungen mit abgeleiteten p-y Kurven an die Messwerte angenähert.

Alle für P3.2 berechneten Verformungen können dem Anhang entnommen werden.

5.1 Vergleich lineares Bettungsmodul – p-y Verfahren mit Kennwerten aus geotechnischem Bericht

Im ersten Schritt soll das lineare Bettungsmodulverfahren mit den Berechnungsergebnissen des p-y Verfahrens verglichen werden. Beide Verformungen werden in Bezug auf die Messergebnisse der faseroptischen Sensoren verglichen und beurteilt. Die Berechnungen im ersten Schritt sind mit Mittelwerten der Bodenkennwerte aus den geotechnischen Berichten [37] [38] durchgeführt worden. Die Grenzwerte der Reibungswinkel sind der EAU und der DIN 1055-2 entnommen worden. Eine beispielhafte Darstellung der Mittelwerte für den Standort 1 ist in Tabelle 5-1 dargestellt. Die Darstellung der Mittelwerte für den Standort 2 P3.1 ist in Tabelle 5-2 dargestellt. Die Bettungsmoduli wurden mit der Formel (14) berechnet, der Durchmesser wurde mit 1 m angesetzt.

Tabelle 5-1: Mittelwerte Bodenkennwerte geotechnischer Bericht Standort 1

P1.1/1.2	Reibungswinkel unterer Grenzwert φ_k	Reibungswinkel oberer Grenzwert φ_k	Undrainierte Kohäsion geotechnischer Bericht $c_{u,k}$ [kN/m²]	Undrainierte Kohäsion geotechnischer Bericht - Mittelwert $c_{u,k}$ [kN/m²]	Bettungsmodul geotechnischer Bericht $k_{s,k}$ [kN/m²]	Bettungsmodul geotechnischer Bericht - Mittelwert $k_{s,k}$ [kN/m²]
Schicht 1.1	25		15-60	37,5	5-10	7,5
Schicht 1.2	27,5	32,5	-	-	20-50	35
Schicht 2.2	25		20-150	85	5-20	12,5

P1.1/1.2	Reibungswinkel unterer Grenzwert φ_k	Reibungswinkel oberer Grenzwert φ_k	Undrainierte Kohäsion geotechnischer Bericht $c_{u,k}$ [kN/m²]	Undrainierte Kohäsion geotechnischer Bericht - Mittelwert $c_{u,k}$ [kN/m²]	Bettungsmodul geotechnischer Bericht $k_{s,k}$ [kN/m²]	Bettungsmodul geotechnischer Bericht - Mittelwert $k_{s,k}$ [kN/m²]
Schicht 2.3	32,5	37,5	-	-	40-80	60
Schicht 2.4	32,5/35	37,50/40	-	-	60-150	155
Schicht 3.1	35	40	20-100	60	30-100	65
Schicht 3.2	22,5		80-250	165	20-80	50
Schicht 4.2	25		80-500	290	40-100	70

In Abbildung 5-1**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** sind die Ergebnisse der Berechnung für Verformungen aus dem linearen Bettungsmodulverfahren, dem p-y Verfahren und der FOS für P1.1 dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Verformungen mit dem

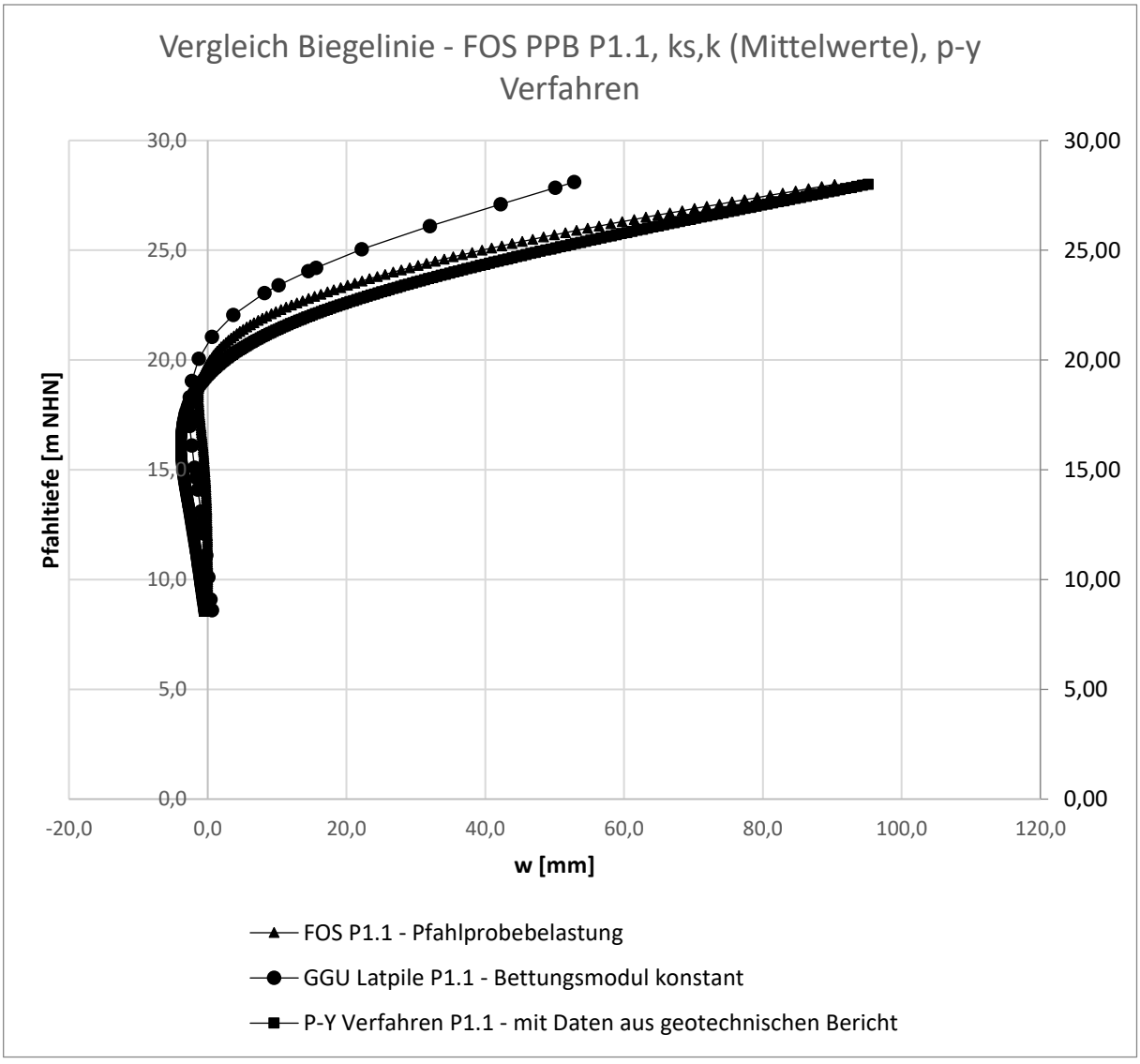


Abbildung 5-1: Vergleich Verformungen - ks,k (Mittelwerte), ks,k (angepasst) und FOS PPB P1.1 – Eigene Darstellung

linearen Bettungsmodulverfahren für den Standort 1 die gemessenen Verformungen des P1.1 deutlich unterschätzen (siehe Abbildung 5-1). Im Pfahlkopfbereich weichen die Verformungen deutlich zu den gemessenen Verformungen des P1.1 ab. Die Abweichung der nach dem linearen Bettungsmodul berechneten Verformungen zu den gemessenen Verformungen betragen auf dem ersten Meter ca. 28 %. Bis 24 m NHN beträgt die Differenz der mittleren Verformung ab dem ersten Meter ca. 36 % und nimmt leicht zu. Im Bereich von 24 m NHN bis zu 20 m NHN beträgt die Differenz der Verformung im Mittel 42,4 %.

Die Berechnungsergebnisse aus dem p-y Verfahren mit den Mittelwerten des geotechnischen Berichtes liegen sehr nah an den gemessenen Ergebnissen im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen des linearen Bettungsmodulverfahrens. Im Pfahlkopfbereich überschätzen die nach dem p-y-Verfahren berechneten Verformungen die tatsächlichen um ca. 7,53% und sind damit 20 % geringer als die Abweichung des linearen Bettungsmodulverfahrens. Ab dem ersten Meter nimmt die Abweichung der Verformungsergebnisse stetig zu, die mittlere Abweichung bis 24 m NHN beträgt ca. 16,2 % und ist auf diesem Abschnitt ca. 12 % geringer als die des linearen Bettungsmodulverfahrens. Bis auf 20 m NHN steigt die Differenz der Verformung weiter an und beträgt im mittleren Durchschnitt auf diesem Bereich ca. 85 %. Über die Pfahltiefe nimmt die Differenz der Verformungen zu den faseroptischen Sensoren deutlich zu und übersteigt diese.

Am Standort 2 verhält sich der Boden der Pfähle P3.1/3.2 gemäß dem linearen Bettungsmodulverfahren deutlich weicher und überschätzt die Verformungen im Gegensatz zu den gemessenen Verformungen (siehe Abbildung 5-2). Wie auch bei dem linearen

Tabelle 5-2: Mittelwerte Bodenkennwerte geotechnischer Bericht - Standort 2 P3.1

P3.1	Reibungswinkel unterer Grenzwert φ_k	Reibungswinkel oberer Grenzwert φ_k	Undrainierte Kohäsion geotechnischer Bericht $c_{u,k}$ [kN/m²]	Undrainierte Kohäsion geotechnischer Bericht - Mittelwert $c_{u,k}$ [kN/m²]	Bettungsmodul geotechnischer Bericht $k_{s,k}$ [kN/m²]	Bettungsmodul geotechnischer Bericht - Mittelwert $k_{s,k}$ [kN/m²]
Schicht 1.1	25		15-60	37,5	5-10	7,5
Schicht 1.2	30	35	-	-	20-50	35
Schicht 2.2	25		20-150	85	5-20	12,5
Schicht 2.3	32,5	37,5	-	-	40-80	60
Schicht 2.4	35	40	-	-	60-150	155
Schicht 3.2	25	30	80-250	165	20-80	50

Bettungsmodulverfahren für den P1.1 weichen für P3.1 die Pfahlkopfverschiebungen deutlich von den gemessenen Verformungen ab. Im Kopfbereich weicht das Ergebnis des linearen Bettungsmodulverfahrens um ca. 84,5 % von den gemessen Werten ab. Auf dem ersten Meter weichen die Rechenergebnisse im Mittel ca. 94 % von den gemessenen Ergebnissen ab (siehe Abbildung 5-2**Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Von 30,20 m NHN bis auf 27,2 m NHN weichen die berechneten zu den gemessenen Punkten um ca. 196 % ab. Die Differenz der Verformungen von 27,2 m NHN bis zu 23 m NHN beträgt im Mittel ca. 600

%. Die Differenz der Verformungen nimmt wie am Standort 1 über die Tiefe zu. Darüber hinaus weist die Kurve im Vergleich zu der gemessenen Kurve im Bereich zwischen 22,15 m NHN und 15,0 m NHN eine deutlich stärkere Auslenkung auf.

Der Verformungen, die mittels p-y Verfahren berechnet wurden weichen im Pfahlkopfbereich um 168% ab von den gemessenen Werten der faseroptischen Sensoren und überschätzen die Verformung deutlich. Nach dem ersten Meter steigt die Differenz der Verformung kontinuierlich an, über den Bereich bis 27,2 m NHN beträgt die mittlere Abweichung knapp 291 %. Die prozentuale Abweichung der Verformung zu den insitu gemessenen Werten steigt

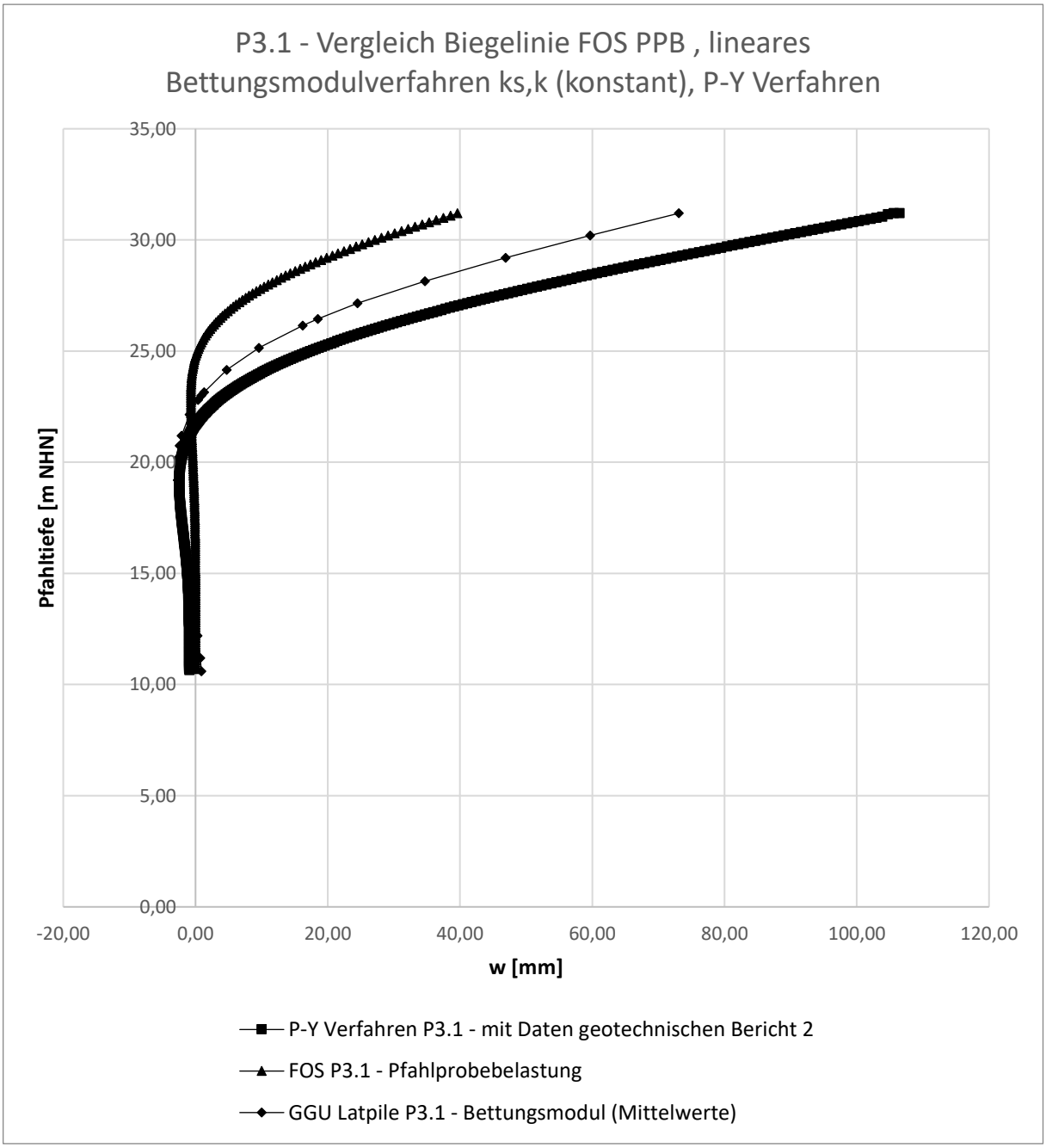


Abbildung 5-2: Vergleich Verformungen - ks,k (Mittelwerte), ks,k (angepasst) und FOS PPB P3.1 – Eigene Darstellung

über die die Tiefe im Bereich von 27,2 m NHN bis 23 m NHN an und weicht im Mittel knapp 960 % von den gemessenen Verformungen ab. Die prozentuale Abweichung weicht am

Standort 2 deutlich stärker von den gemessenen Werten ab. Im Vergleich zum Standort 1 weichen die Verformungen am Kopf um 160 % und über die Pfahltiefe um ca. 900 % stärker von den gemessenen Werten der Pfahlprobebelastung ab.

5.1.1 Zwischenfazit

Es sei erwähnt, dass prozentuale Abweichungen nicht überbewertet werden sollten, sofern die zulässigen Verformungen in der Praxis die tatsächlichen Messwertdifferenzen deutlich übersteigen. Dennoch sind die Erkenntnisse für die Beurteilung des linearen sowie des p-y Verfahrens von Bedeutung. Die absoluten Abweichungen werden über die Pfahltiefe kleiner, auch wenn die prozentualen Abweichungen ansteigen.

Die Ergebnisse des linearen Bettungsmodulverfahrens auf Grundlage der Mittelwerte aus den geotechnischen Berichten weichen stark von den gemessenen Verformungen ab. Dabei kommt es je nach Standort zur Über- oder Unterschätzen der Verformungen. Die prozentualen Abweichungen zu den gemessenen Verformungen nehmen über die Pfahltiefe immer stärker zu. Am Standort 2 weichen die zu den berechneten Verformungen am Standort 1 deutlich stärker von den gemessenen Werten ab.

In Realität verhält sich der Boden nichtlinear, wodurch die Verformung nur unzureichend genau mit dem linearen Bettungsmodulverfahren abgebildet werden kann. Eine lineare Zunahme des Bettungsmodul mit der Verformung ist nicht realistisch, wodurch es zu größeren Differenzen in den Berechnungsergebnissen kommt. Beim linearen Bettungsmodulansatz wird ein proportionaler Zusammenhang zwischen der Bettungsreaktion und den Verformungen angenommen. Dadurch kann die tatsächliche Bodenreaktion nicht realitätsnah abgebildet werden. Darüber hinaus sollte das Verfahren gemäß 3.2 mit der vereinfachten Formel (14) nur für die Ermittlung von Schnittgrößen angewandt werden, für Verformungsberechnungen ist es auf 2,0 bzw. $0{,}03 * D_s$ beschränkt. Im Bereich kleinerer Verformungen kann das lineare Bettungsmodul die gemessenen Verformungen jedoch besser abbilden als das p-y Verfahren.

Das p-y Verfahren ohne Anpassungen der Bodenkennwerte kann die Verformungen für den Standort 1 genauer abbilden als am Standort 2. Am Standort 2 weichen die berechneten Verformungen stark von den gemessenen ab. Im Vergleich zum linearen Bettungsmodulverfahren werden die Verformungen an beiden Standorten überschätzt. Am Standort 2 wird die Verformung deutlich überschätzt im Vergleich zum linearen Bettungsmodulverfahren. Eine mögliche Ursache dafür kann die unzureichende Untersuchung und Einschätzung der grobkörnigen Auffüllung sein, die in dem für die Verformung maßgebenden Bereich ansteht. Die Bodenkennwerte der grobkörnigen Auffüllung können aufgrund der starken Inhomogenität des Materials von den gemessenen Ergebnissen abweichen.

.

5.2 Curve-fitting lineares Bettungsmodulverfahren

Im zweiten Schritt wird ein Curve-fitting auf die jeweils höchste Laststufe eines Standortes durchgeführt. Dabei wird verglichen, wie stark die Bettungsmoduli angepasst werden müssen, um eine annähernde Übereinstimmung mit den Messwerten zu erzielen. Die Schichten wurden dabei in 1 Meter dicke Schichten unterteilt, Schichten deren originale Schichtdicke ≤ 1 Meter waren, wurden mit der originalen Schichtdicke angesetzt.

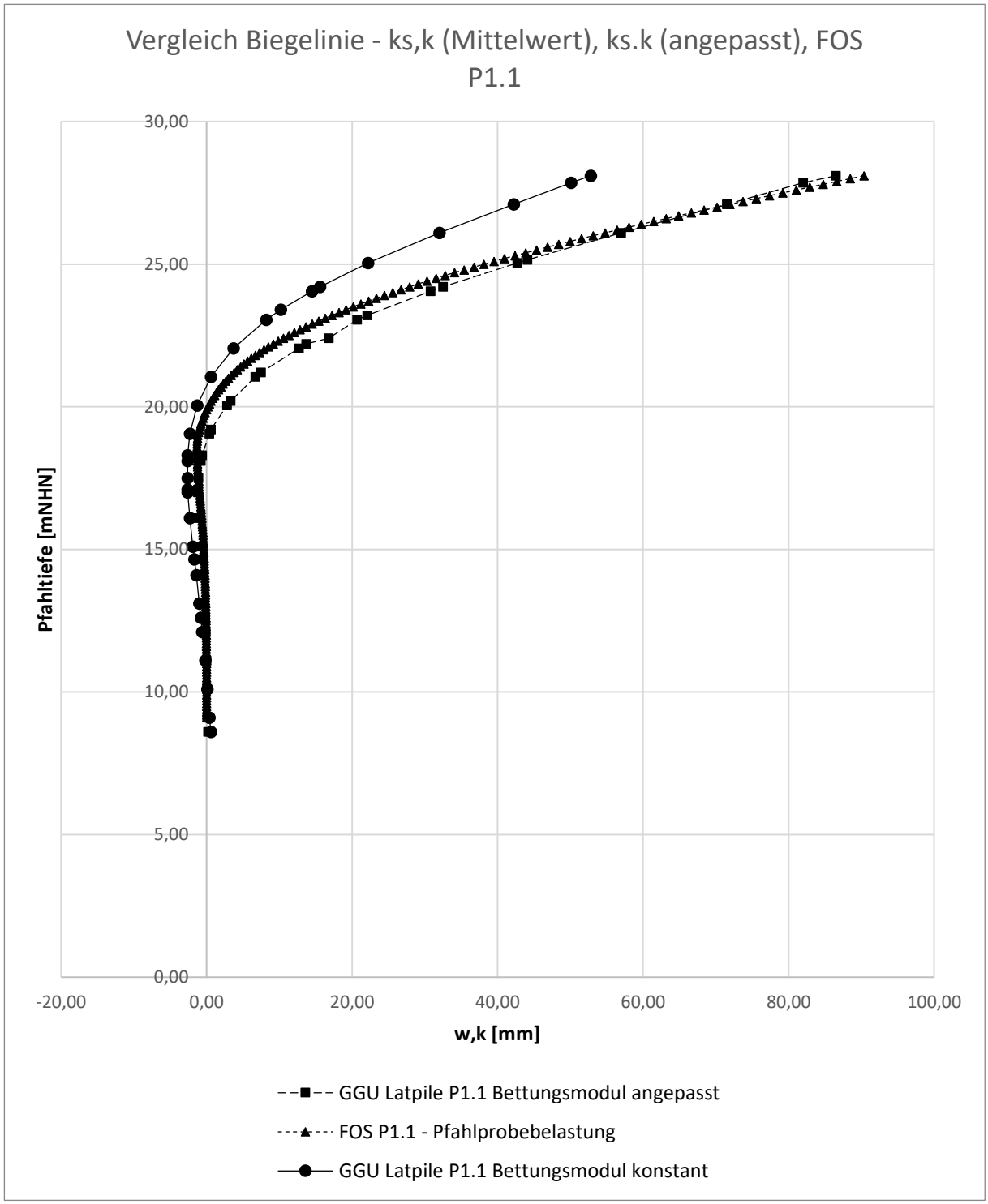


Abbildung 5-3: Vergleich Verformungen - ks,k (Mittelwerte), ks,k (angepasst) , FOS P1.1 - Laststufe 7 – Eigene Darstellung

Abbildung 5-3 zeigt deutlich, dass eine gute Abbildung der Verformung auf den ersten fünf Metern möglich ist. Zu Beginn werden die Verformungen um ca. 4 % gegenüber den

Tabelle 5-3: Abweichung angepasste Bettungsmoduli zu Mittelwerten P1.1

Schichtnummer	Schichtbezeichnung	Schichtgrenzen	LBV - ks,k (Mittelwert aus geotechnischem Bericht)	ks,k (Sichtgrenze oben)	ks,k (Schichtgrenze unten)	Mittelwert - ks,k (angepasst)	Abweichung (Mittelwertgt. Bericht/angepasster Bettungsmodul)
1	Feinkörnige Auffüllung	1	**7,5**	0,5	1	**0,75**	90,00%
2	Grobkörnige Auffüllung	2	**35**	1	1,5	**1,25**	96,43%
3	Auenlehm	2,95	**12,5**	1	1,5	**1,25**	90,00%
4	Auenlehm	3,9	**12,5**	1,5	3	**2,25**	82,00%
5	Terrassenkiese	4,9	**105**	25	50	**37,50**	64,29%
6	Terrassenkiese	5,9	**105**	50	60	**55,00**	47,62%
7	Terrassenkiese	6,9	**105**	60	60	**60,00**	42,86%
8	Terrassenkiese	7,9	**105**	60	60	**60,00**	42,86%
9	Terrassenkiese	8,9	**105**	105	105	**105,00**	0,00%
10	Terrassenkiese	9,8	**105**	105	105	**105,00**	0,00%
11	Terrassensande	10,6	**60**	200	200	**200,00**	-233,33%
12	Terrassenkiese	11,1	**105**	200	200	**200,00**	-90,48%
13	Tertiäre Tone	13,45	**50**	400	400	**400,00**	-700,00%
14	Tertiärere Feinsand	15,5	**65**	400	400	**400,00**	-515,38%
15	Kreide-Mergel	19,5	**155**	400	400	**400,00**	-158,06%

Messwerten unterschätzt. Ab 26,1 m NHN werden die Verformungen überschätzt und weichen bis 21,1 m NHN um ca. 40 % von den Messwerten ab. Um eine feste Einspannung zu realisieren, wurden die Bettungsmoduli ab 10,6 m NHN deutlich vergrößert.

Es ist zu erkennen, dass die Bettungsmoduli der einzelnen Schichten unterschiedlich stark angepasst wurden, um die Verformungen an die Messwerte anzunähern. Die Bettungsmoduli der ersten vier Schichten befinden sich außerhalb der durch den geotechnischen Bericht vorgegebene Bandbreite. Die Bettungsmoduli der Schichten 6-10 befinden sich innerhalb der durch den geotechnischen Bericht vorgegebenen Bandbreit des Bettungsmoduls.

Am Standort 2 können die Verformungen mit den angepassten Bettungsmoduli ebenfalls gut abgebildet werden. Im Pfahlkopfbereich werden die Verformungen um ca. 5,22 % gegenüber den Messwerten überschätzt. Bis auf 21,1 m NHN weichen die Verformungen im Mittel um 28,96 % von den Messwerten ab (siehe Abbildung 5-4).

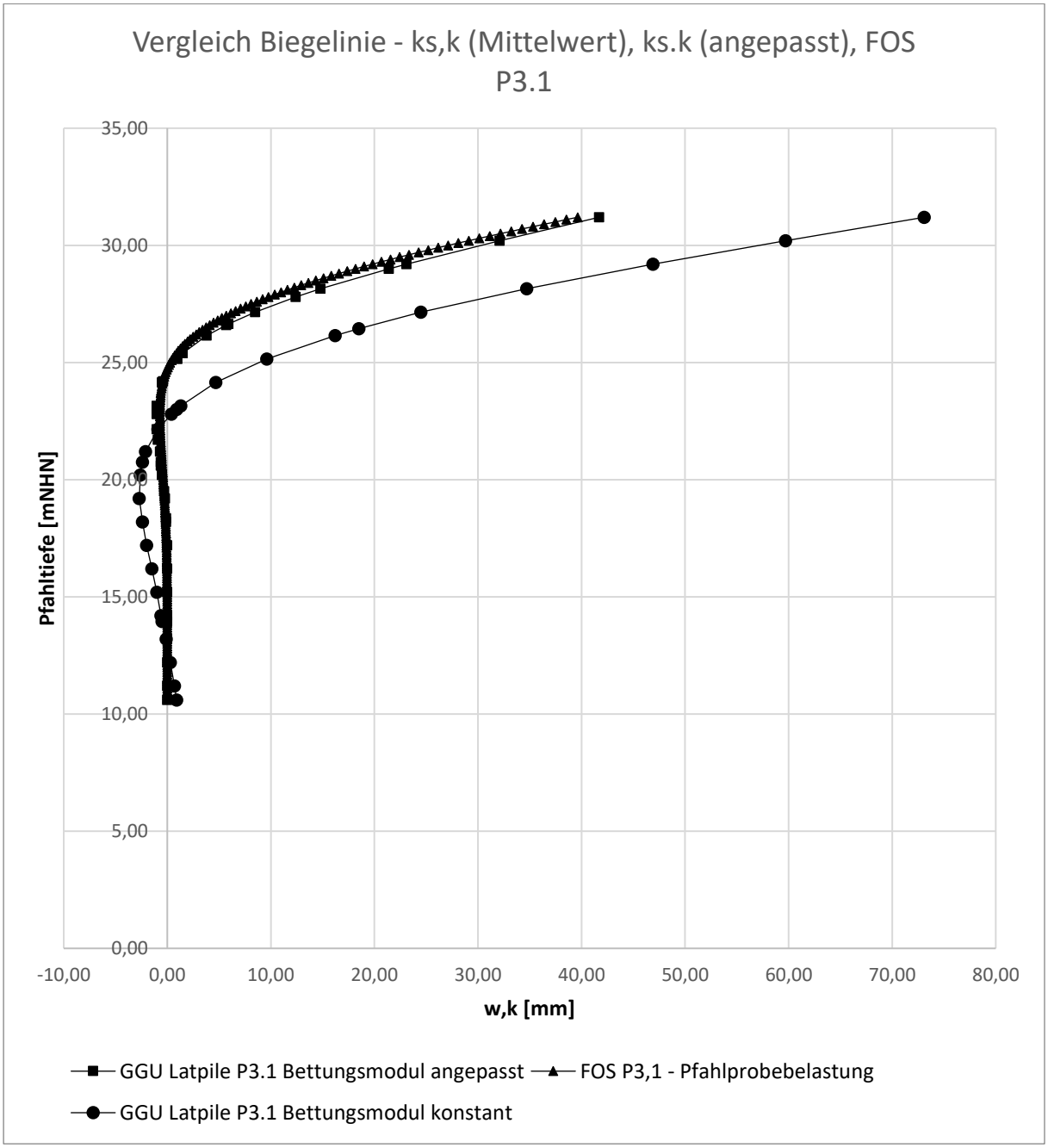


Abbildung 5-4: Vergleich Verformungen - ks,k (Mittelwerte), ks,k (angepasst), FOS P3.1-LS 7 – Eigene Darstellung

Im Vergleich zu den Beettungsmoduli am Standort 1, müssen die Bettungsmoduli am Standort 2 deutlich verändert werden, um die gemessene Verformung abbilden zu können. Die angepassten Bettungsmoduli weichen teilweise 1328 % von den aus den Mittelwerten berechneten BEttungmoduli ab.

Tabelle 5-4: Angepasste Bettungsmoduli zu Mittelwerten P3.1

Schichtnummer	Schichtbezeichnung	Schichtgrenzen	LBV - ks,k (Mittelwert aus geotechnischem Bericht)	ks,k (Sichtgrenze oben)	ks,k (Schichtgrenze unten)	Mittelwert - ks,k (angepasst)	Abweichung (Mittelwertgt. Bericht/angepasster Bettungsmodul)
1	Feinkörnige Auffüllung	1	**7,5**	5,0	5,0	**5**	**33,33%**
2	Grobkörnige Auffüllung	2,2	**35**	25,0	60,0	**42,5**	**-21,43%**
3	Grobkörnige Auffüllung	3,4	**35**	60,0	60,0	**60**	**-71,43%**
4	Grobkörnige Auffüllung	4,6	**35**	400,0	400,0	**400**	**-1042,86%**
5	Grobkörnige Auffüllung	5,8	**35**	500,0	500,0	**500**	**-1328,57%**
6	Grobkörnige Auffüllung	7	**35**	500,0	500,0	**500**	**-1328,57%**
7	Grobkörnige Auffüllung	8,2	**35**	500,0	500,0	**500**	**-1328,57%**
8	Auenlehm	8,4	**12,5**	500,0	500,0	**500**	**-3900,00%**
9	Terrassensande	9,5	**60**	500,0	500,0	**500**	**-733,33%**
10	Terrassensande	10,6	**60**	500,0	500,0	**500**	**-733,33%**
11	Terrassensande	11,7	**60**	500,0	500,0	**500**	**-733,33%**
12	Terrassensande	15	**60**	500,0	500,0	**500**	**-733,33%**
13	Terrassenkiese	17,5	**105**	500,0	500,0	**500**	**-376,19%**
14	Tertiäre Tone	20,6	**50**	500,0	500,0	**500**	**-900,00%**

5.2.1 Zwischenfazit

Mit den Verformungen aus dem Curve-fitting können an beiden Standorten die jeweiligen gemessenen Verformungen gut abgebildet werden. Allerdings weichen die veränderten Bettungsmoduli von den aus geotechnischen Bericht entnommenen Mittelwerten ab. Am Standort 1 liegen die Bettungsmoduli nur teilweise in der durch den geotechnischen Bericht vorgegeben Bandbreite und teilweise unter den unteren Grenzwerten. Am Standort 2 liegen die oberen Schichten in der angegebenen Bandbreite, die unteren Schichten übersteigen die oberen Grenzwerte der Bandbreite stark.

5.3 Vergleich p-y Verfahren obere und unterer Grenzwert für Bodenparameter mit FOS

Im dritten Schritt erfolgt eine Bewertung der mit dem p-y Verfahren berechneten Verformung aus den oberen und unteren Grenzwerten der Bodenparameter im Vergleich zu den gemessenen Verformungen. Bei nichtbindige Böden lässt sich die Verformung des p-y Verfahrens maßgeblich über den Reibungswinkel beeinflussen. Über die undrainierte Kohäsion $c_{u,k}$ sowie die ε_{50}-Werte kann der Einfluss der bindigen Böden auf die Verformung (weich als auch steif) beeinflusst werden. Je nach Berechnung wurden die unteren oder oberen Grenzen der im geotechnischen Bericht aufgehführten Bodenkennwerte für $c_{u,k}$ (siehe Tabelle 5-1 und Tabelle 5-2) eingesetzt. Die Genauigkeit der Ergebnisse aus den Grenzwerten wird über alle Laststufen mit den gemessenen Ergebnissen verglichen.

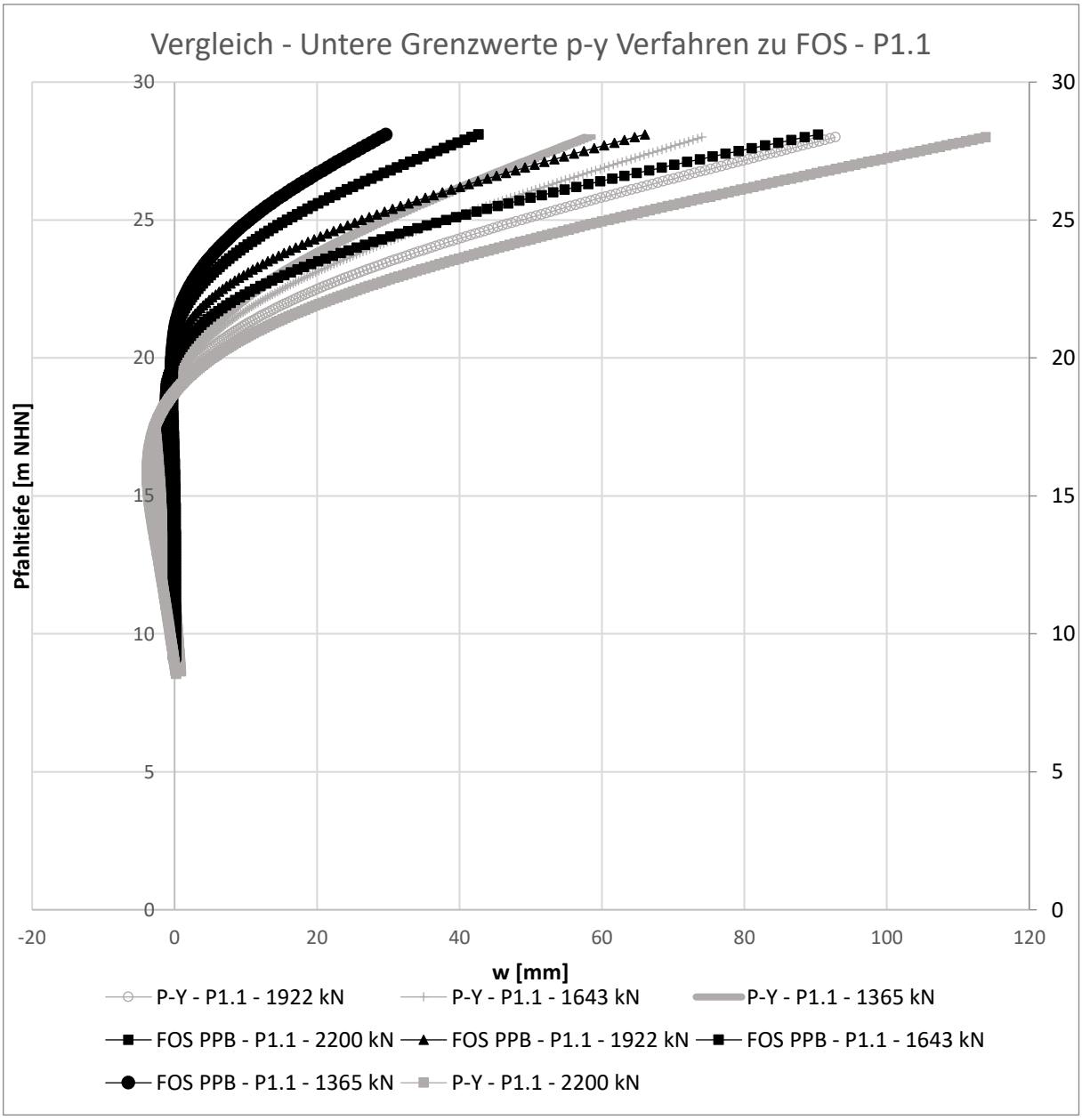


Abbildung 5-5: Vergleich - Untere Grenzwerte p-y Verfahren Laststufen 4-7 – Eigene Darstellung

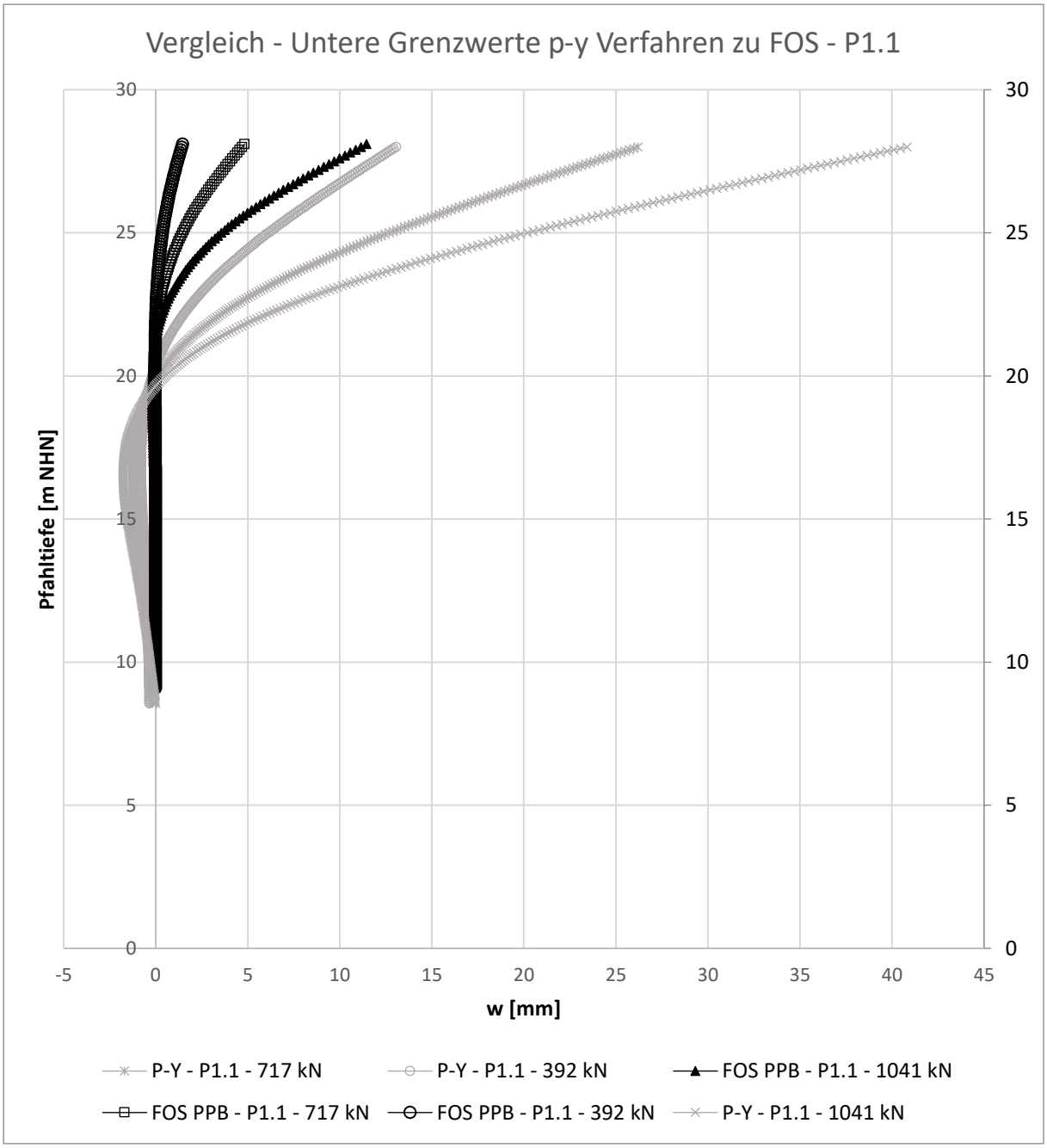


Abbildung 5-6: Vergleich - Untere Grenzwerte p-y Verfahren zu FOS P1.1 - LS 1-3 – Eigene Darstellung

Die Pfähle an Standort 1 wurden über 7 Laststufen belastet. Die daraus berechnete Biegeline wird nachfolgend mit den Berechnungsergebnissen der unteren Grenzwerte der Bodenkennwerte verglichen.

Am Standort 1 ist für den Pfahl P1.1 deutlich zu erkennen, dass die Verformungen über die Tiefe stärker zunehmen und die gemessenen Verformungen deutlich überschätzen (siehe Abbildung 5-5). Im Pfahlkopfbereich werden die Verformungen um ca. 28,69 % gegenüber den gemessenen Verformungen überschätzt. Auf den ersten vier Meter beträgt die Differenz der Verformung für die Laststufe 7 (2200 kN) ca. 48,74 %. Über die Tiefe bis auf
20,00 m NHN weicht die Biegeline im Mittel ca. 189 % von der gemessenen Biegeline ab. Für die Laststufe 5 (1643 kN) werden die Verformungen im Pfahlkopfbereich um 77% überschätzt.

Auf den ersten vier Metern nimmt die prozentuale Abweichung der Verformung stetig zu, beträgt im Mittel ca. 118 % und weicht 70 % stärker als für Laststufe 7 ab. Bis auf 20 m NHN wächst die mittlere Abweichung der Differenz auf ca. 750 % an und beträgt 560 % mehr im Vergleich zu Laststufe 7. Für die Laststufe 3 (1041 kN) weichen die Verformungen auf den ersten vier Metern im Mittel um ca. 390 % von den gemessenen Werten ab (siehe Abbildung 5-6). Im Pfahlkopfbereich beträgt die Überschätzung 266 %. Die prozentuale Differenz der Verformungen weicht im Vergleich zur Laststufe 7 um 342 % stärker auf den ersten vier Metern, in Bezug auf die gemessenen Verformungswerten ab. Bis auf 20 m NHN weichen die

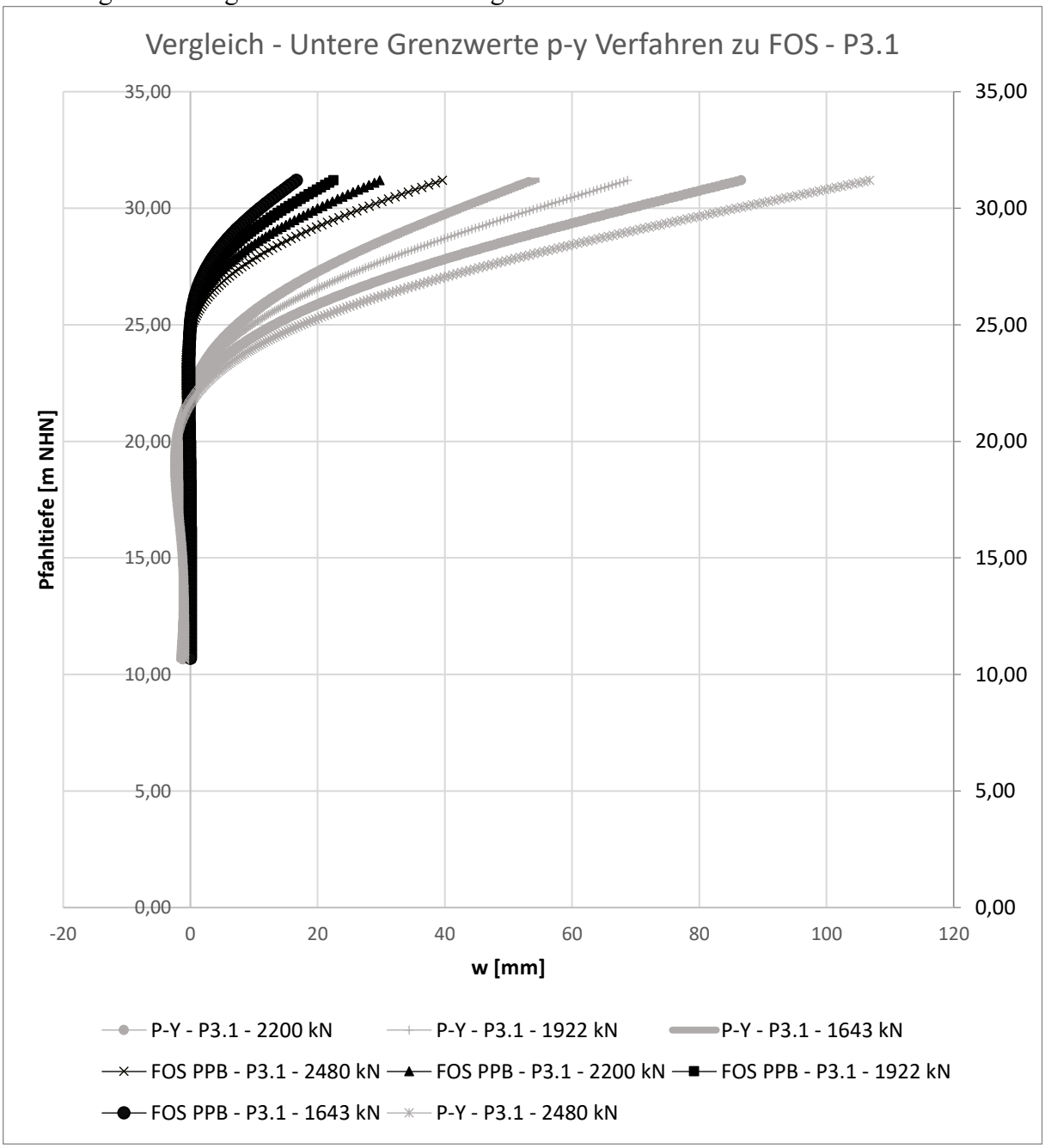


Abbildung 5-7: Vergleich - Untere Grenzwerte p-y Verfahren zu FOS P3.1-LS 5-8 – Eigene Darstellung

Verformungen im Mittel um 1800 % von den gemessenen Werten ab. Die prozentuale Abweichung der Verformungen für die Laststufe 1 (392 kN) zu den gemessenen Verformungen

beträgt auf den ersten vier Metern im Mittel ca. 1306 % und ist im Vergleich zur Laststufe 7 (2200 kN) um ca. 1260 % höher. Im Pfahlkopfbereich werden die Verformungen um 824,54 % überschätzt. Auf den ersten acht Metern beträgt die mittlere Abweichung ca. 4780,9 %.

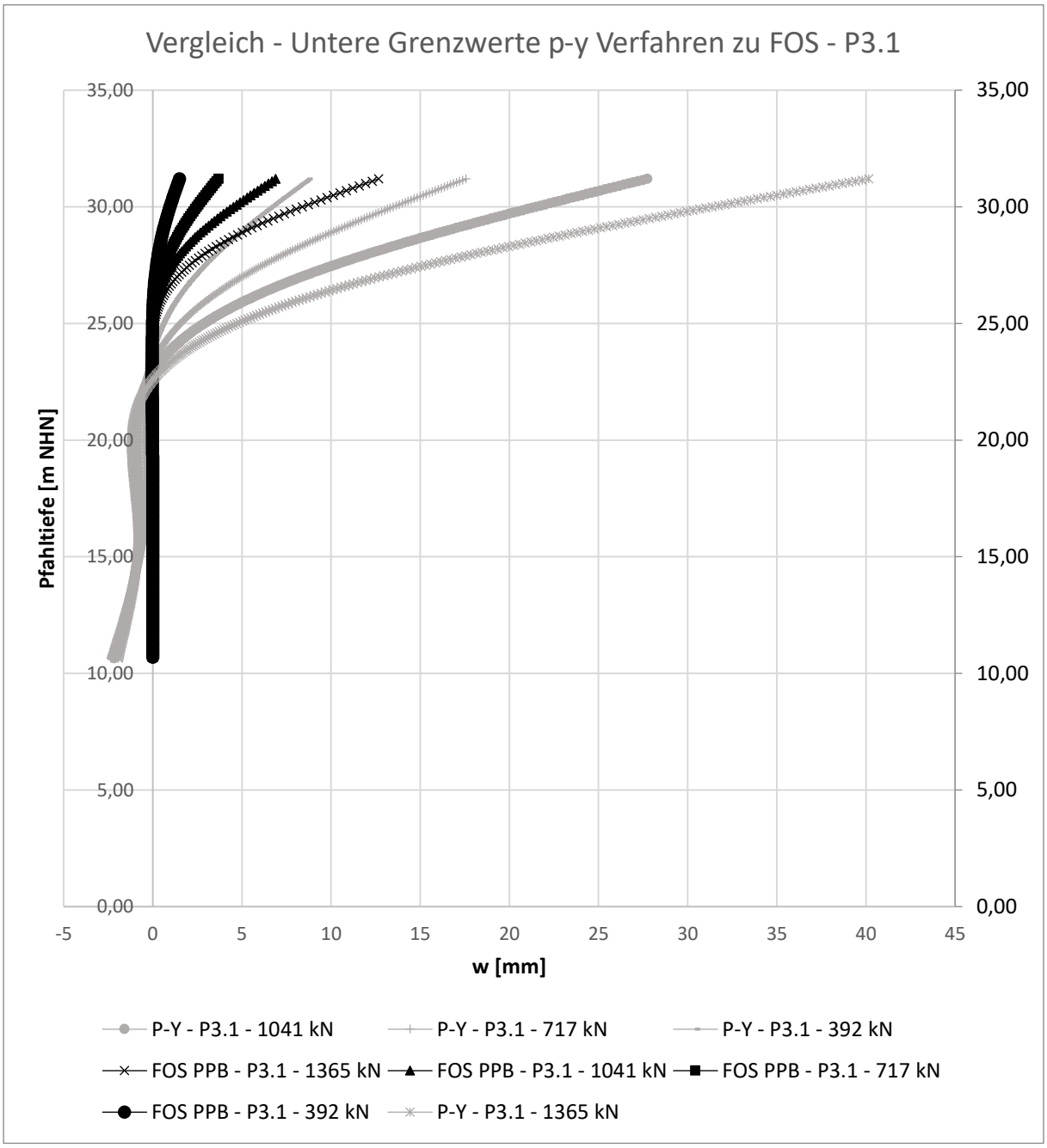


Abbildung 5-8: Vergleich - Untere Grenzwerte p-y Verfahren zu FOS P3.1-LS 1-4 – Eigene Darstellung

Die Bohrpfähle am Standort 2 wurden über 8 Laststufen hinweg belastet. Am Standort 2 weichen die nach dem p-y Verfahren berechneten Ergebnisse deutlich stärker von den Messwerten ab als am Standort 1. Die prozentuale Abweichung am Pfahlkopfbereich für die Laststufe 8 beträgt 170 %. Bis auf 27 m NHN nimmt die Abweichung zu und beträgt im Mittel 305 %. Die Abweichung steigen prozentual weiter an und betragen bei 23 m NHN im Mittel ca. 1945 %. Am Pfahlkopf weichen die Verformungen der Laststufe 5 um 219 % von den gemessenen Werten ab, verglichen mit Laststufe 8 entspricht das einer Zunahme von 50 %. Auf

den ersten vier Metern weicht die berechnete Verformung für die Laststufe 5 (1643) im Mittel um 428 % von den gemessenen Werten ab (siehe Abbildung 5-7). Die Differenz im Vergleich zur Laststufe 8 steigt im Vergleich um 125 %. Bis auf eine Tiefe von 23,00 m NHN steigt die Differenz der Verformung auf ca. im Mittel 4468 % an (siehe Abbildung 5-7). Die Differenzen der berechneten Verformung zu den gemessenen Verformungen für die Laststufe 3 (1041 kN) betragen im Pfahlkopfbereich 303 %, auf den ersten vier Metern im Mittel ca. 544 % und sind ca. 116 % höher im Vergleich zu den Differenzen der Laststufe 5. Über die Tiefe bis auf 23 m NHN nehmen die Differenzen für die Laststufe 4 bis auf ca. 2465 % im Mittel zu. Die prozentuale Abweichung der Verformungen der Laststufe 1 (392 kN) beträgt am Pfahlkopf 480 % und auf den ersten vier Metern im Mittel ca. 800 % und liegt deutlich höher als die prozentuale Abweichung der Laststufe 3 zu den gemessenen Verformungen (siehe Abbildung 5-8). Bis auf 23 m NHN steigt die prozentuale Abweichung auf ca. 2123 % im Mittel an.
Auch am Standort 2 ist zu erkennen, dass die Verformungen nach dem p-y Verfahren für kleinere Laststufen stärker von den gemessenen Verformungen als bei hohen Laststufen abweichen.
Die berechneten Verformungen für die oberen Grenzwerte des Bohrpfahls P1.1, bilden die gemessenen Verformungen für die Laststufe 7 gut ab (siehe Abbildung 5-9). Am Pfahlkopf werden die Verformung der oberen Grenzwerte um 7 % gegenüber der gemessenen Verformung unterschätzt. Die gemessene Verformung weicht bis auf eine Tiefe von 24 m NHN um Mittel um ca. 4,71 % von der gemessenen Verformung ab. Die Abweichungen sind damit im Vergleich zu den Ergebnissen der unteren Grenzwerte auf den ersten vier Metern 44 % % niedriger. Dabei werden die Verformungen bis ca. 26 m NHN unterschätzt und ab 26 m NHN überschätzt. Bis auf die auf 20 m NHN steigt die prozentuale Abweichung im Mittel auf 16,31 %. Die Berechnungsergebnisse der unteren Grenzen weichen bis 24 m NHN 32 % stärker ab. Die Verformungen der Laststufe 6 können ebenfalls am Pfahlkopf gut über das p-y Verfahren abgebildet werden (siehe Abbildung 5-8). Im Pfahlkopfbereich werden die Verformungen um 2,94 % gegenüber den Messwerten. Bis auf 24 m NHN nehmen die Abweichungen auf 14,54 % im Mittel zu. Die oberen Grenzwerte der Bodenkennwerte liegen im Vergleich zu den niedrigeren Grenzwerten deutlich näher an den gemessenen Verformungen des Pfahls für die Laststufen 6.-7. Die Abweichung der Verformung für Laststufe 5 entspricht im Pfahlkopfbereich ca 25 % und weicht 52 % weniger ab als die Verformung der unteren Grenzwerte. Bis auf 24 m NHN nimmt diese Abweichung weiter zu, im Mittel beträgt die Abweichung 45 % (70 % geringer als bei den unteren die Grenzwerten). Bis auf 20 m NHN nimmt die prozentuale Abweichung weiter zu, im Mittel beträgt diese 240 %. Die Differenz zu den Berechnungsergebnissen der unteren Grenzwerte beträgt ca. 510 %. Bei den niedrigeren Laststufen weichen die prozentualen Verformungen stärker von den gemessen Verformungen ab. Im Kopfbereich des Pfahls weichen die Verformungen der Laststufe 3 145 % von den gemessenen Werten ab. Die Abweichungen der Laststufe 3 (1041 kN) betragen im Mittel ca. 740 % (370 % niedriger als bei den unteren Grenzwerten) bis auf eine Tiefe von 20 m NHN

(siehe Anhang 4) Im Pfahlkopfbereich weichen die Verformungen der Laststufe 1 (392 kN) 439 % von den gemessenen Werten ab. Gegenüber den unteren Grenzwerten weichen die Berechnungsergebnisse 385 % weniger von den gemessenen ab. Bis auf 24 m NHN weichen die Verformungen um ca. 640 % gegenüber den gemessenen Werten ab und 595 % stärker als die berechneten Verformungen der Laststufe 5. Bis auf 20 m NHN weichen die Verformungen um ca. 522 % von den gemessenen Werten ab. Die prozentualen Abweichungen am Standort 1 werden, wie bei den unteren Grenzwerten größer je niedriger die Laststufen werden. Bei hohen Lasten kann die Verformung im Gegensatz zu den unteren Grenzwerten mit einer deutlich

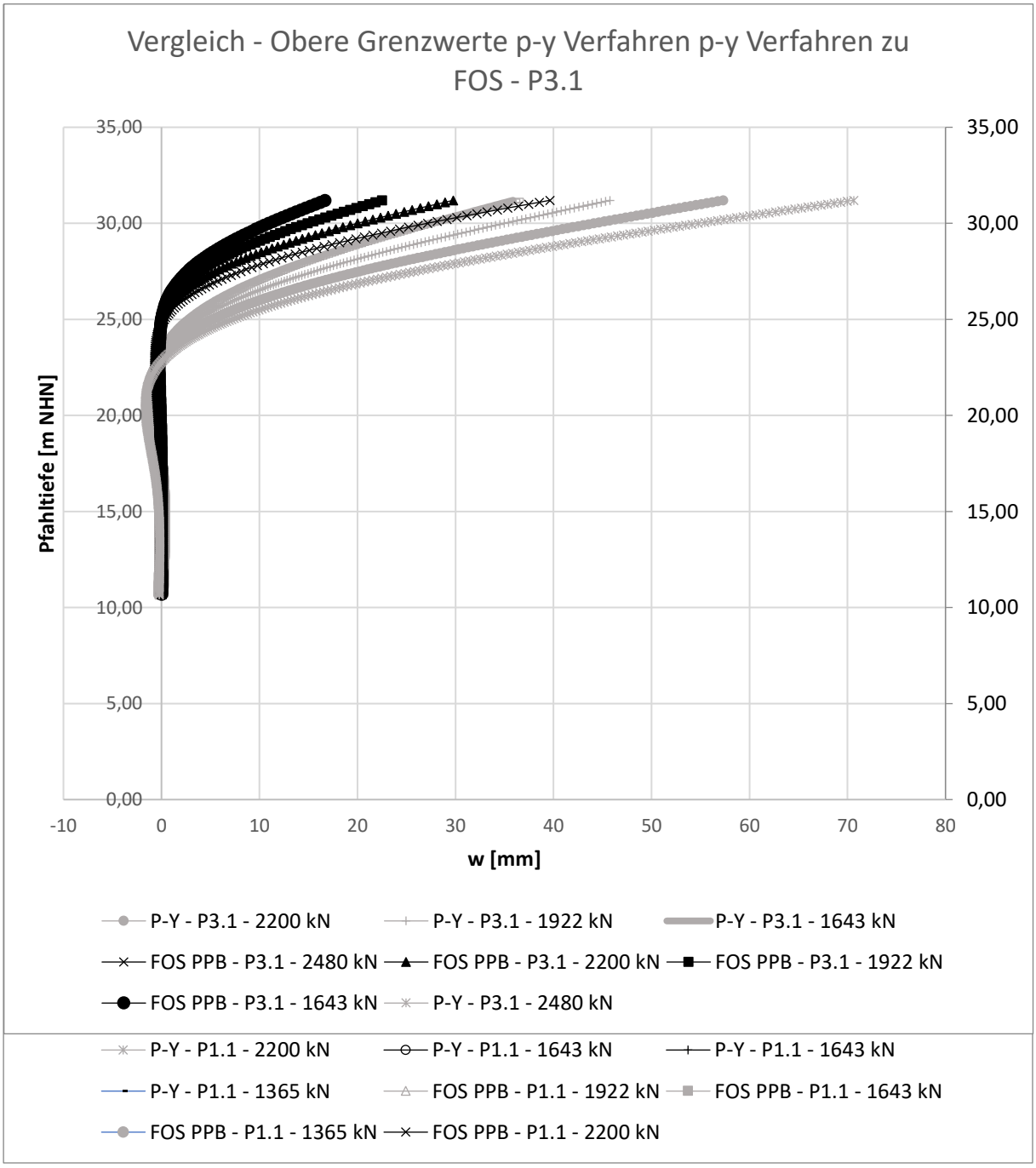


Abbildung 5-9: Vergleich - Obere Grenzwerte p-y Verfahren zu FOS P1.1-LS 4-7 – Eigene Darstellung

geringeren prozentualen Abweichung abgebildet werden.

Am Standort 2 werden die Verformungen für P3.1 für die hohen Laststufen im Gegenteil zu den Berechnungsergebnissen am Standort 1 deutlich überschätzt (siehe Abbildung 5-10). Am Pfahlkopf wird die Verformung der Laststufe 8 um 78 % überschätzt. Im Vergleich zu den unteren Grenzwerten weichen die Verformungen 90 % weniger stark von den Messwerten ab. Bis auf 27 m NHN betragen die prozentualen Abweichungen der Laststufe 8 (2480 kN) ca. 145%, bis auf 23 m NHN steigt die mittlere prozentuale Abweichung auf 769 % an. Über die Tiefe steigen die Differenzen zu den unteren Grenzwerten an. Bis auf 27 m NHN sind die Verformungen um 145 % und bis auf 23 m NHN um 1200 % niedriger als die der unteren Grenzwerte. Im Pfahlkopfbereich weichen die Berechnungsergebnisse der Laststufe 5 um 115 % von den gemessenen Werten ab (100 % niedrigere Abweichung als für die unteren Grenzwerte). Auf den ersten vier Metern bis 27 m NHN beträgt die Differenz ca. 217 % und die prozentualen Differenzen bis 23 m NHN 1676,65 % im mittleren Durchschnitt. Die ersten

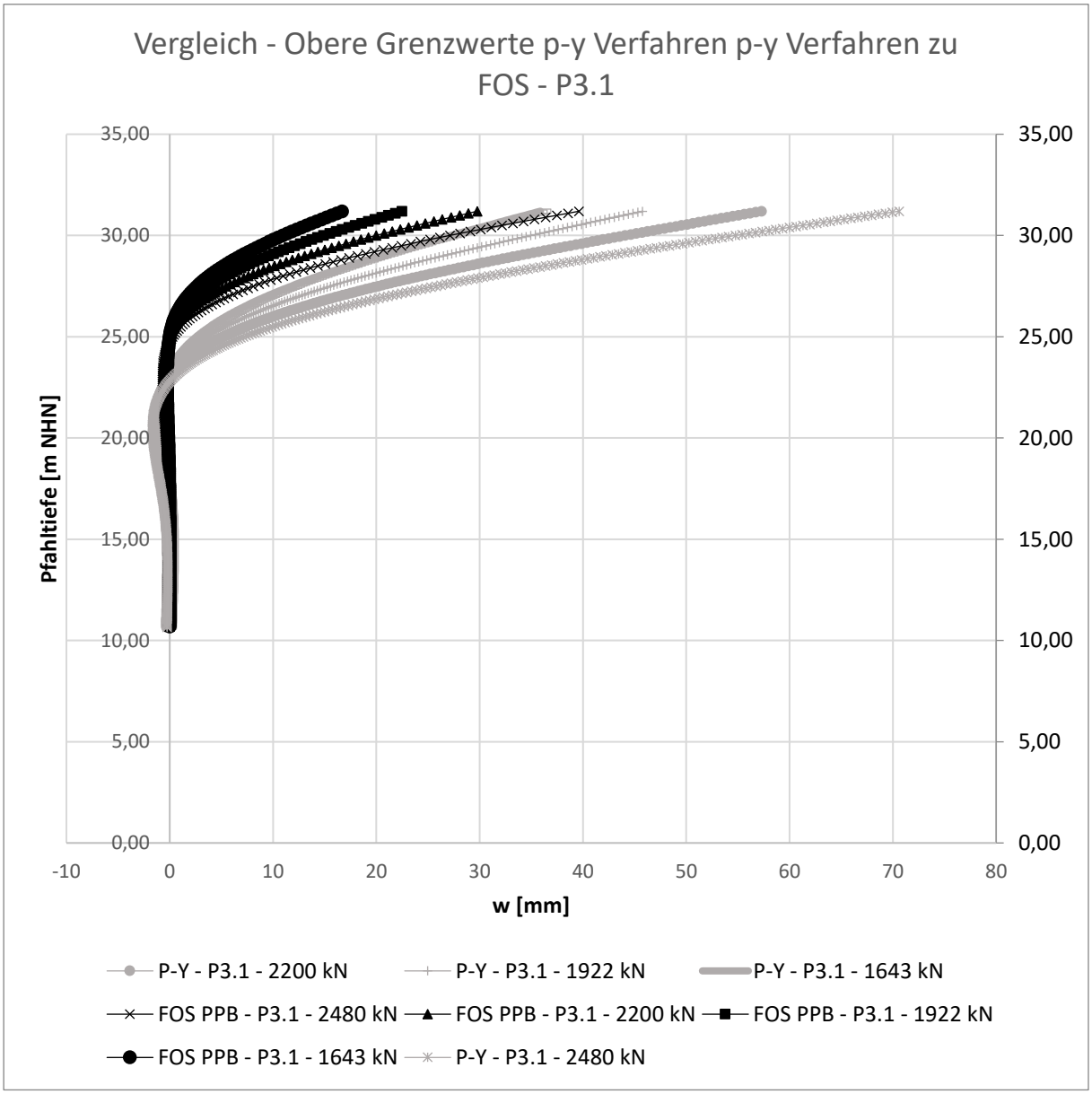


Abbildung 5-10: Vergleich - Obere Grenzwerte p-y Verfahren zu FOS P3.1-LS 5-8 – Eigene Darstellung

vier Meter weichen 210 % weniger stark von den Messwerten als die Verformungen der unteren Grenzwerte ab. Die mittlere prozentuale Abweichung der Verformung für die Laststufe 3 beträgt bis auf 27 m NHN ca. 303 %. Bis auf die Tiefe von 23 m NHN nimmt die mittlere prozentuale Abweichung bis auf 940 % zu. Im Pfahlkopfbereich beträgt die prozentuale Abweichung 181,84 %. Auch die Laststufe 1 (392 kN) weicht stark von den gemessenen Werten ab. Im Pfahlkopfbereich werden die Verformungen um 326 % gegenüber den gemessenen Werten überschätzt. Im Pfahlkopfbereich überschätzen die unteren Grenzwerte der Verformungen um 150 % stärker als die Verformungen der oberen Grenzwerte. Auf den ersten vier Metern beträgt die mittlere prozentuale Abweichung 495 %. Die Differenz nimmt bis auf eine Tiefe von 23 m NHN auf 1477 % zu.
Die mittlere prozentuale Abweichung nimmt wie am Standort 1 auch bei niedrigeren Laststufen im Pfahlkopfbereich zu. Darüber hinaus weichen die Verformungen der in den einzelnen Laststufen zunehmend über die Tiefe ab.

5.3.1 Zwischenfazit

Es sei erwähnt, dass prozentuale Abweichungen nicht überbewertet werden sollten, sofern die zulässigen Verformungen in der Praxis die tatsächlichen Messwertdifferenzen deutlich übersteigen. Die unterschiedlichen Verschiebungsnullpunkte in den Verformungen resultieren in großen prozentualen Abweichungen. Die absoluten Abweichungen werden über die Pfahltiefe kleiner, auch wenn die prozentualen Abweichungen ansteigen.
Die Auswertung der Messergebnisse an beiden Standorten zeigt, dass die Differenzen der Verformungen zu den Messergebnissen an beiden Standorten sowohl über die Tiefe des Bohrpfahls als auch mit kleiner werdenden Laststufen zunehmen. Die berechneten Verformungen der oberen Grenzwerte bilden die gemessenen Verformungen besser als die Verformungen der unteren Grenzwerte ab. Die beiden Standorte unterscheiden sich dabei jedoch in der Genauigkeit in Bezug auf die gemessenen Werte für die Verformung.
Am Standort 1 können die Pfahlkopfverschiebungen und die Verschiebung auf den ersten vier Metern bei hohen Laststufen annähernd genau erfasst werden. Mit abnehmender Last wird die Übereinstimmung zunehmend ungenauer und die nach dem p-y Verfahren berechneten Verformungen weichen immer stärker von den gemessenen Werten ab.
Am Standort 2 können die Pfahlkopfverschiebungen auch bei höheren Laststufen nur unzureichend genau mit den oberen Grenzwerten abgebildet werden. Die Verformungen werden über die Tiefe in einer Laststufe, als auch bei kleineren Lasten zunehmend ungenauer und weichen selbst bei den oberen Grenzwerten immer noch stark von den gemessenen Werten ab.
Die unteren Grenzwerte beider Standorte erweisen sich als ungeeignet und weichen in der Verformung bei den hohen Laststufen deutlich stärker von den gemessenen Ergebnissen als die die Verformungen der oberen Grenzwerte ab. Auch bei den unteren Grenzwerten weichen die

berechneten Verformungen über die Tiefe und bei kleineren Laststufen immer stärker von den gemessenen Werten ab.

5.4 Vergleich p-y Verfahren (Curve-fitting) mit FOS

Im vierten Schritt wurde ein Curve-fitting für die Verformungsfigur bei der jeweils höchsten Laststufe durchgeführt. Anschließend wird die Last an die niedrigeren Laststufen angepasst, die Bodenparameter, die zum Curve-fitting verwendet wurden, bleiben unverändert. Es wird überprüft, inwieweit sich die Verformung niedriger Laststufen mit den auf die höchste Laststufe angepassten Bodenparametern abbilden lassen.

Am Standort 1 konnten die Verformungen im Kopfbereich bei hoher Belastung gut abgebildet werden (siehe Abbildung 5-15). Die Verformungen am Pfahlkopf bei der Laststufe 7 (2200 kN) werden um ca. 1,20% gegenüber den gemessenen Verformungen überschätzt. Im Vergleich zu den Berechnungen der Verformungen nach den oberen Grenzwerten kann die Verformung im Pfahlkopfbereich um 8 % genauer abgebildet werden. Bis auf eine Tiefe von 23,00 m NHN nehmen die Verformungen zu und unterschätzen die gemessenen Verformungen im Mittel um ca. 12,41%. Damit liegen die berechneten Verformungen mit den angepassten Bodenparametern leicht über der prozentualen Abweichung der oberen Grenzwerte (ca. 7 %). Die Verformungen der Laststufe 5 (1643 kN) überschätzen die Verformungen bereits im Pfahlkopfbereich. Die prozentuale Abweichung beträgt im Pfahlkopfbereich ca. 35% und nimmt bis auf eine Tiefe von 23 m NHN auf ca. 69% zu. Die Verformungen für die oberen Grenzwerte stellen die Verformungen auf diesem Abschnitt genauer dar und weichen im Mittel 24 % geringer ab. Auch beim Curve-fitting auf die höchste Laststufe weichen die Berechnungsergebnisse am Standort 1 für die Verformungen bei kleineren Laststufen zunehmend stärker ab (siehe Abbildung 5-12). Die Laststufe 3 weicht bereits im Pfahlkopfbereich um ca. 175 % von der gemessenen Verformung ab. Damit weicht die Verformung im Pfahlkopfbereich 35 % stärker von den Messergebnissen als die Ergebnisse der oberen Grenzwerte ab. Auf den ersten vier Metern nimmt die prozentuale Abweichung kontinuierlich zu und beträgt im Mittel 250 %. Auf den ersten vier Metern ist die Abweichung gegenüber den oberen Grenzwerten um 50 % höher. Bis zu einer Tiefe von 20 m NHN steigt

die Abweichung weiter, die mittlere Abweichung beträgt ca. 1010 %. Auch in diesem Bereich liegen die prozentualen Abweichungen der oberen Grenzwerte näher an den gemessenen Ergebnissen. Insgesamt werden die Verformungen dennoch überschätzt. Auf den ersten vier Metern beträgt die Überschätzung der Verformung ca. 880 %. Die prozentuale Abweichung der

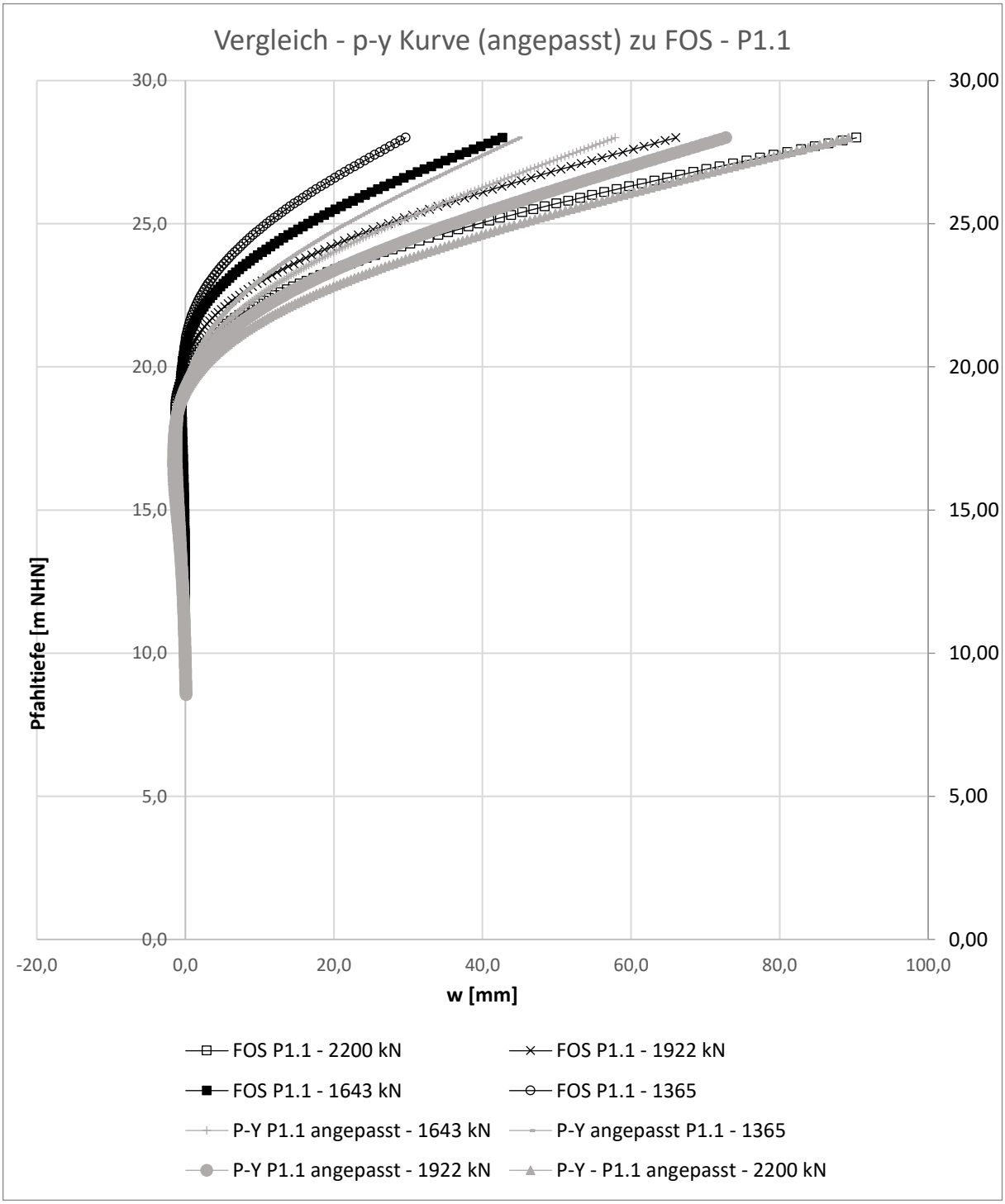


Abbildung 5-11: Vergleich - p-y-Verfahren (angepasst) zu FOS - P1.1-LS 4-7 – Eigene Darstellung

Laststufe 1 (392 kN) zu den gemessenen Werten beträgt im Pfahlkopfbereich 580% und nimmt bis auf eine Tiefe von 23 m NHN auf 2935 % im Mittel zu. Gegenüber den Berechnungsergebnissen der oberen Grenzwerte weichen die Berechnungsergebnisse stärker

von den gemessenen Verformungen ab. Am Pfahlkopf überschätzen die Ergebnisse der oberen Grenzen die Verformung um 100 %. Bis auf 24 m NHN sind die prozentualen Abweichungen der oberen Grenzwerte um 240 % geringer als der angepassten Werten.

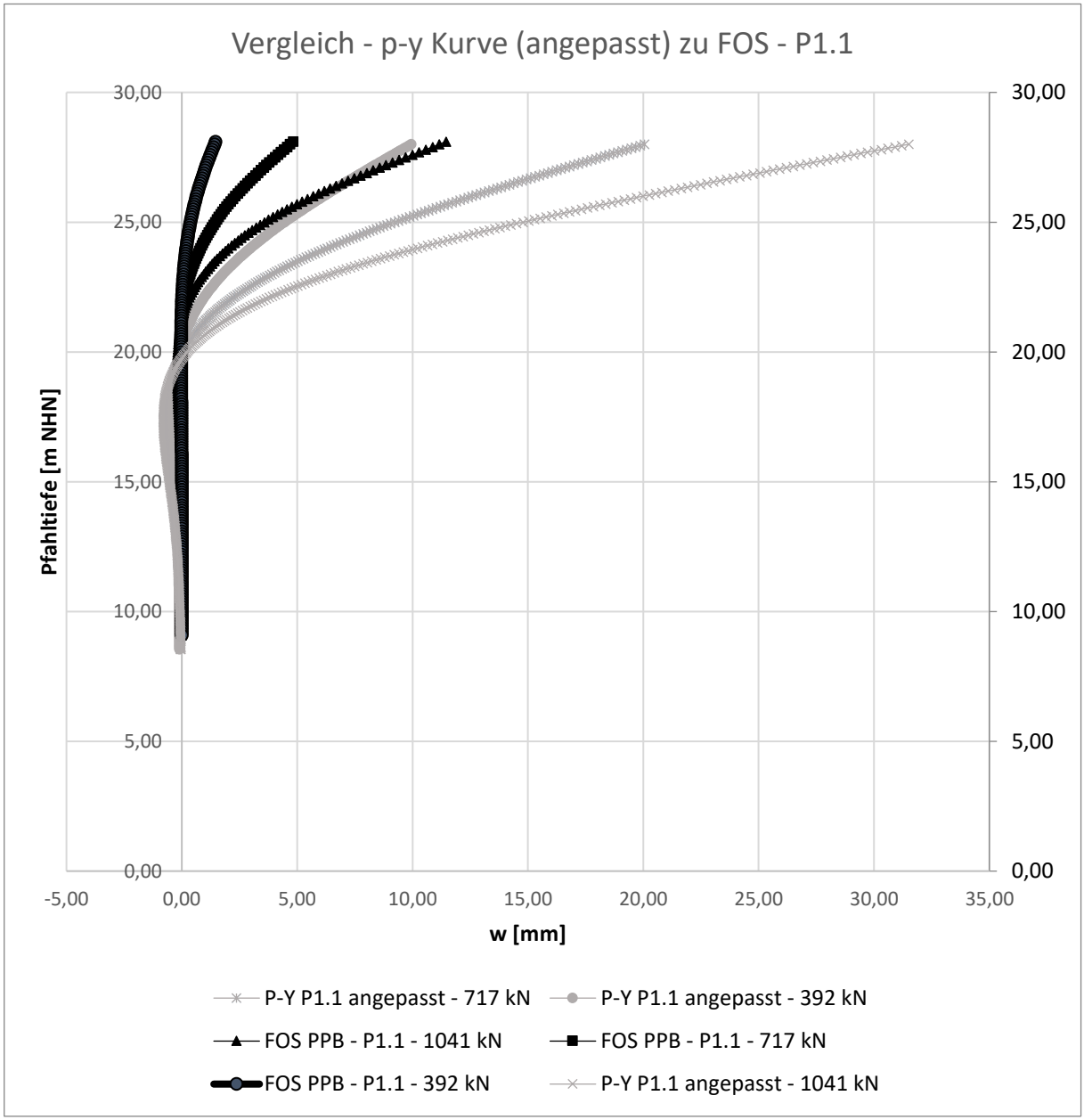


Abbildung 5-12: Vergleich - p-y-Kurve (angepasst) zu FOS - P1.1-LS 1-3 – Eigene Darstellung

Am Standort 2 werden die Verformung am Pfahlkopf der Laststufe 8 (2480 kN) um ca. 6,9 % überschätzt. Bis auf eine Tiefe von 27 m NHN wächst die prozentuale Differenz weiter an und die Abweichung nach oben beträgt im Mittel ca. 50,3 %. Die die prozentuale Differenz ist größer als am Standort 1 und nimmt bis auf eine Tiefe von 24 m NHN auf ca. 60% zu. Vergleicht man die angepassten Berechnungsergebnisse mit den für die oberen Grenzwerte, ist zu erkennen, dass die oberen Berechnungsergebnisse der oberen Grenzwerte deutlich von den unteren abweichen. Die Verformung im Pfahlkopfbereich weicht ca. 72 % stärker von den gemessenen Werten ab als die der angepassten Berechnung. Von 31,20 m NHN bis auf 27 m

NHN überschätzen die Berechnungsergebnisse der oberen Grenzwerte um 105 % stärker als die der Berechnungsergebnisse für die angepassten Berechnungsergebnisse. Für die Laststufe 5 (1643 kN) beträgt die prozentuale Abweichung von der gemessenen Verformung am Pfahlkopf 20,41% und liegt damit 5 % unter der am Standort 1. Bis auf eine Tiefe von 27 m NHN nimmt die Abweichung der Verformung weiter zu, die prozentuale Überschätzung beträgt im Mittel ca. 42,30 %. Damit liegt die Abweichung der Verformung 3 % niedriger als am Standort 1 auf den ersten vier Metern. Die Verformungen der Berechnungswerte aus den oberen

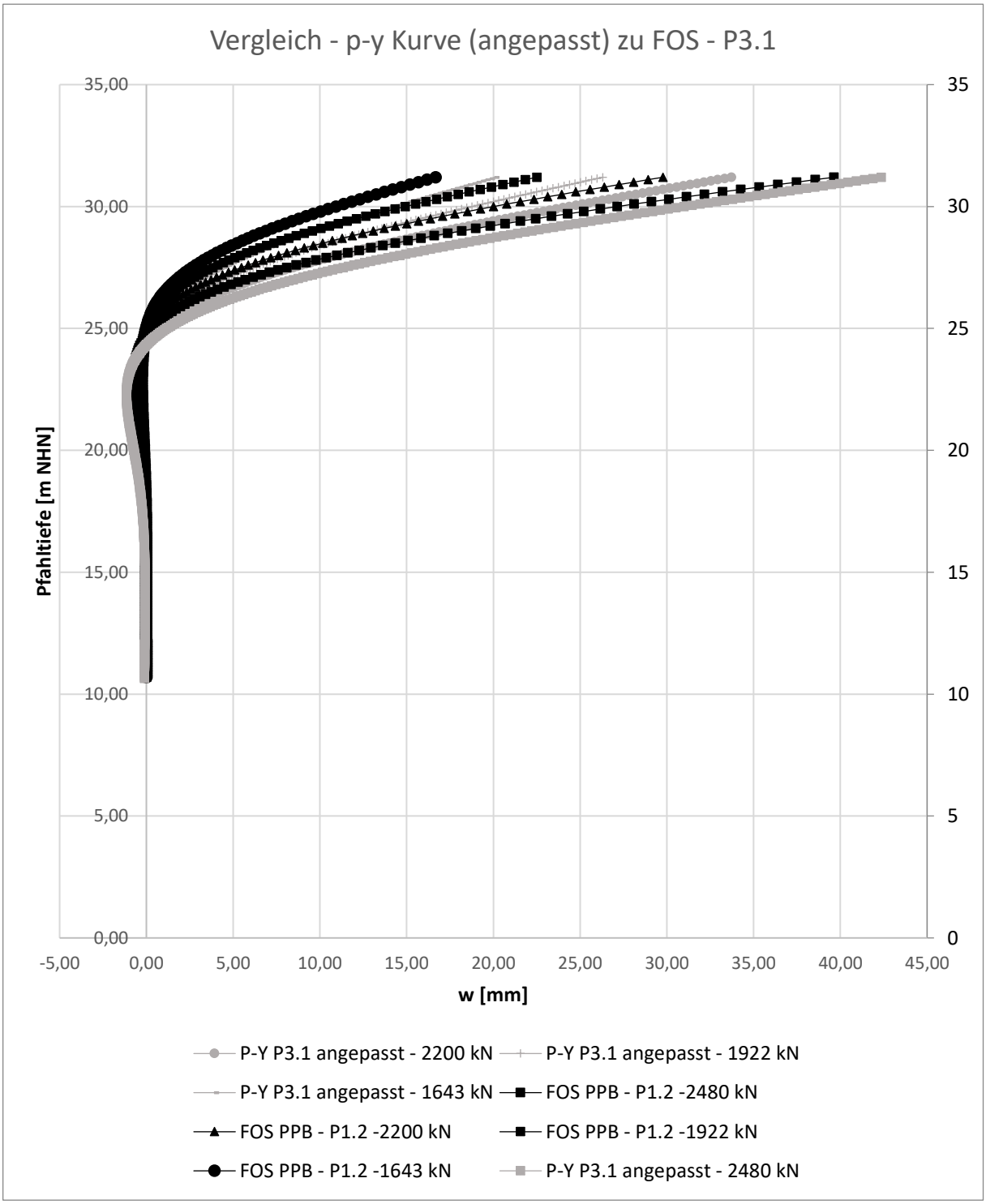


Abbildung 5-13: Vergleich - p-y Kurve (angepasst) zu FOS - P3.1-LS 5-8 – Eigene Darstellung

Bodenparametern beträgt ca. 95 % weniger im Pfahlkopfbereich. Bis auf eine Tiefe von 23 m NHN weichen die Berechnungsergebnisse der oberen Bodenparameter im Mittel ca. 86,46 % ab und weichen damit 1590 % weniger stark von den Ergebnissen der oberen Grenzwerte ab. Die Verformungen der Laststufe 3 (717 kN) weichen im Pfahlkopfbereich um ca. 51 % von der gemessenen Verformung ab. Verglichen mit den Ergebnissen aus den Berechnungen der oberen Grenzwerte weicht die Verformung um 130 % weniger stark von den gemessenen Ergebnissen ab. Bis auf 27 m NHN bleibt die Abweichung der Verformung gleich und beträgt im Mittel ca. 67,8 % und weicht 145 % geringer von den gemessenen Werten ab. Für die Laststufe 3 können im Vergleich zu den Berechnungsergebnissen am Standort 1 die Verformungen der Messergebnisse daher besser abgebildet werden (siehe Abbildung 5-12). Bis auf 23 m NHN

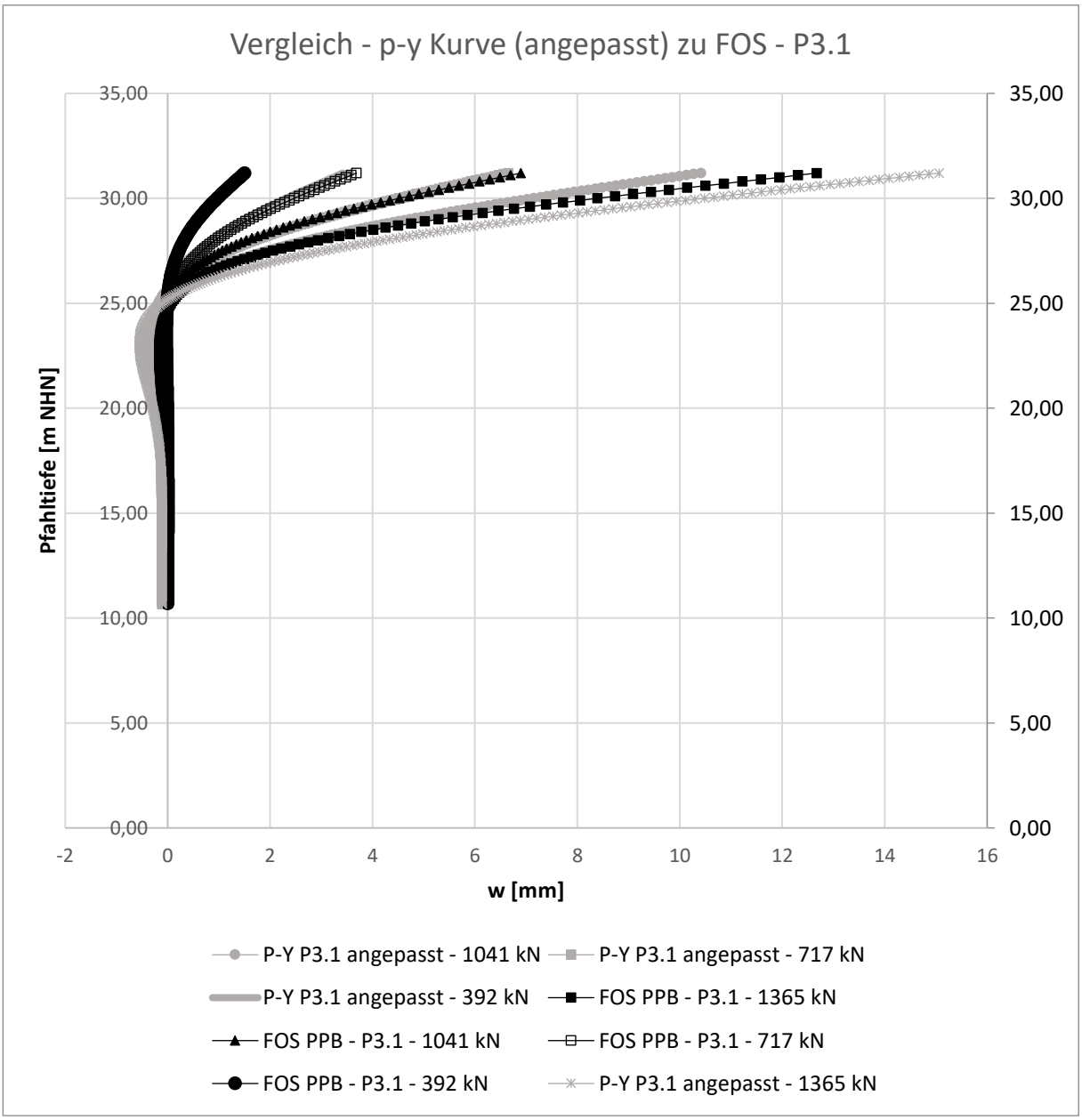


Abbildung 5-14: Vergleich - p-y Kurve (angepasst) zu FOS - P3.1-LS 1-4 – Eigene Darstellung

nehmen die Verformungen im Mittel auf 168 % zu. Für die Laststufe 1 (392 kN) liegt die prozentuale Abweichung im Pfahlkopfbereich bei 127 % und ist damit ca. 200 % geringer als die berechneten Verformungen mit den oberen Grenzwerten. Bis auf eine Tiefe von 27 m NHN nimmt die Abweichung auf ca. 145 % im Mittel zu. Die berechneten Verformungen aus den oberen Bodenparametern weichen um 350 % stärker von 31,20 m NHN bis 27 m NHN im Mittel ab. Auch Laststufe 1 kann im Vergleich zum Standort 1 die gemessenen Verformungen genauer abbilden.

5.4.1 Zwischenfazit

Vergleicht man die Messergebnisse aus dem Curve-fitting mit den Berechnungsergebnissen auf Grundlage der oberen und unteren Grenzwerte der Bodenkennwerte, so zeigt sich, dass die berechneten Verformungen die gemessene Kurve bei hohen Laststufen deutlich besser annähern kann. Bei niedrigen Laststufen kann die Verformung für den Standort 1 nicht mehr sehr genau abgebildet werden und weicht zunehmend stärker von den gemessenen Ergebnissen ab. Abschnittsweise kann die Verformung am Standort 1 jedoch gerade bei hohen Laststufen besser abgebildet werden.

Am Standort 2 hingegen kann die Verformung durch die Verformungsfiguren der angepassten Bodenparameter auch bei kleinen Laststufen deutlich besser als bei den oberen Grenzwerten an die Messwerte angenähert werden. Generell werden die Verformungen am Standort 2 überschätzt und weichen trotz der an die höchste Laststufe angepassten Bodenparameter bei niedrigen Laststufen von den Messwerten ab.

Darüber hinaus lässt sich erkennen, dass mit zunehmender Tiefe die Differenz zwischen der berechneten und der gemessenen Verformung zunimmt, dies gilt sowohl für die Berechnungen mit den oberen und unter Grenzwerten als auch für die Berechnung der Verformungen nach den angepassten Bodenparametern. Aufgrund der unterschiedlich tiefliegenden Verschiebungsnullpunkte, sowohl am Standort 1 als am Standort 2 im Vergleich zu den Messwerten, sind die prozentualen Abweichungen in dem Bereich groß. Die absoluten Verformungen werden sowohl am Standort 1 als auch am Standort 2 über sie Tiefe geringer.

Die Verformungsfigur kann somit nicht eindeutig zu 100% über alle Laststufen und über die Tiefe hinweg durch das p-y Verfahren mit dem Programm GGU-Latpile 9 nach dem Jahresbericht EA-Pfähle 2020 abgebildet werden.

5.5 Analyse der Versuchsergebnisse

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die mit dem Programm GGU-Latpile erzeugten, p-y Kurven das Spannungs-Verschiebungsverhältnis nur unzureichend abgebildet werden kann. Insbesondere bei kleinen Verformungen können sowohl die Verformungen mit den oberen und unteren Grenzwerten als auch mit den angepassten Bodenparametern nur unzureichend genau abgebildet werden. Aus den Vergleichen aus den vorherigen Kapiteln kann man ableiten, dass

insbesondere im Bereich kleinerer Verformungen zu niedrige Anfangssteifigkeiten für die p-y Kurven angesetzt werden.
Dies zeigt sich besonders im Pfahlkopfbereich und auf den ersten vier Metern für den Standort 1. In Abbildung 5-15 und Abbildung 5-17 ist zu erkennen, dass die obenliegenden Schichten größtenteils zu geringe Anfangssteifigkeiten aufweisen. Aus zu geringen Anfangssteifigkeiten resultieren zu große Verformungen bei niedrigen Laststufen. Dieses Verhalten spiegelt sich in den nach dem Programm berechneten p-y Kurven wider. Vergleicht man die bindigen Schichten im oberen Bereich mit den nichtbindigen Schichten, so ist zu erkennen, dass die nichtbindigen Schichten bereits hohe Anfangssteifigkeiten aufweisen. Bei niedrigen Laststufen werden vor allem die oberen Schichten des Bodens beansprucht, während die Bodenschichten ab 24 m NHN für die Verformungsfigur eine untergeordnete Rolle spielen. Die bindigen Schichten haben demnach bei niedrigen Laststufen einen maßgeblichen Einfluss auf die Verformungsfigur.
Vergleicht man die Genauigkeit der Verformungslinien kleinerer Laststufen beider Standorte mit den gemessenen Ergebnissen, so wird klar, dass die Abweichungen am Standort 1 deutlich höher als die Abweichungen am Standort 2 sind. Am Standort 2 steht auf den ersten vier Metern eine bindige Schicht mit einer Schichtdicke von 1,0 m an (siehe Tabelle 4-1). Die unterlagernden Schichten sind nichtbindig und weisen eine deutlich höhere Anfangssteifigkeit auf (siehe Abbildung 5-20). Auch die bindige Schicht weist eine geringe Anfangssteifigkeit auf (siehe Abbildung 5-19). Es kann davon ausgegangen werden, dass die Verformungen durch die am Pfahlkopf anstehenden bindigen Schichten maßgeblich beeinflusst werden.
Die Bedeutung der obersten vier Meter für den Lastabtrag bei niedrigen Laststufen werden zusätzlich von den faseroptischen Messungen gestützt. Für niedrige Laststufen treten auf den ersten vier Metern die größten absoluten Änderungen der Verformung auf. Der Einfluss der Bodenschichten auf den ersten vier Metern auf die Verformungsfigur ist dadurch überproportional im Vergleich zu tieferliegenden Schichten. Daraus ergibt sich, dass die angesetzten p-y Kurven, um die Verformungen insitu abbilden zu können, angepasst werden müssten. Die Anfangssteifigkeit vor allem für die bindigen Schichten muss erhöht werden. Darüber hinaus muss der Übergangsbereich zwischen der Anfangssteifigkeit und p_u angepasst werden, um für niedrige Laststufen eine Verformungsfigur, die nah an den Messwerten liegt, zu generieren. Dadurch würde das Verformungsverhalten realitätsbezogener abgebildet werden können.

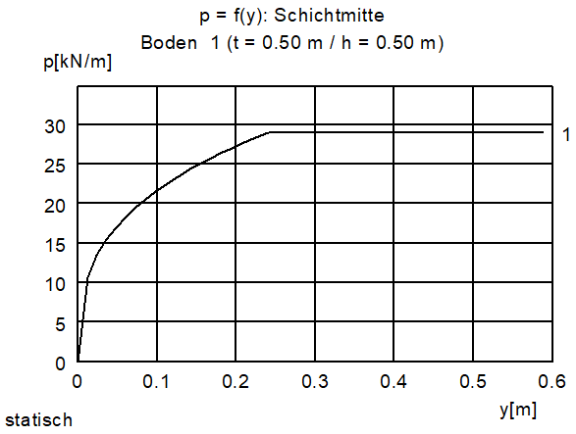


Abbildung 5-15: p-y Kurve feinkörnige Auffüllung P1.1- angepasste Bodenparameter GGU-Latpile

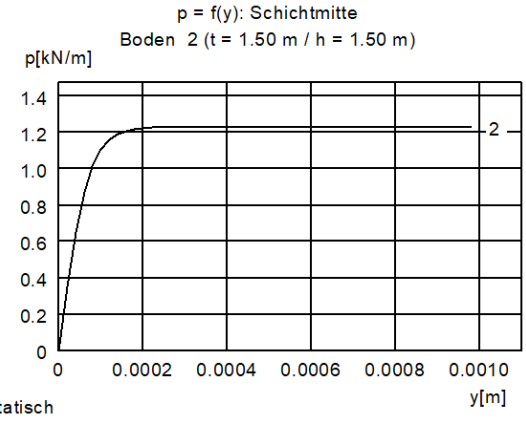


Abbildung 5-16: p-y Kurve grobkörnige Auffüllung – P1.1 - angepasste Bodenparameter GGU-Latpile

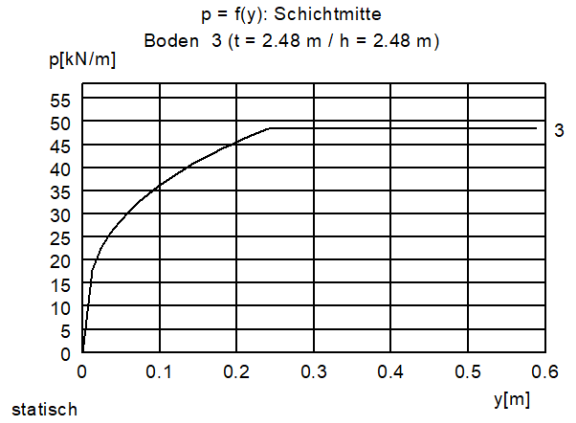


Abbildung 5-17: p-y Kurve Auenlehm – P1.1 - angepasste Bodenparameter GGU-Latpile

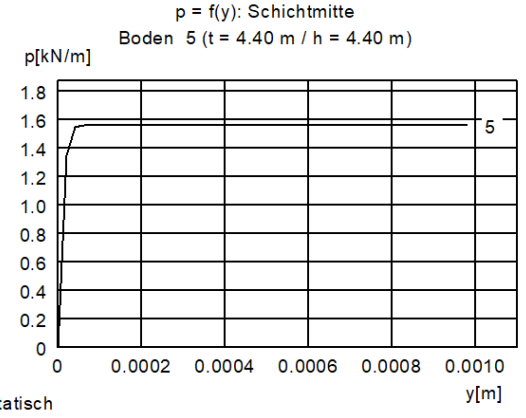


Abbildung 5-18: p-y Kurve Terrassenkiese – P1.1 - angepasste Bodenparameter GGU-Latpile

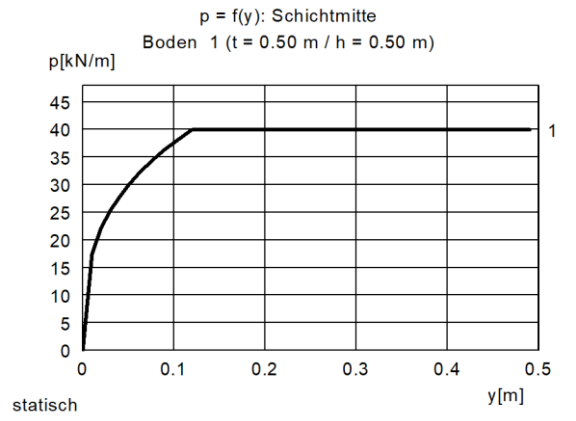


Abbildung 5-19: p-y Kurve feinkörnige Auffüllung P3.1 - angepasste Bodenparameter GGU-Latpile

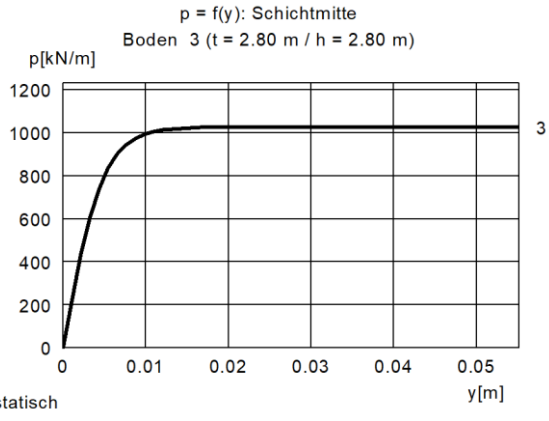


Abbildung 5-20: p-y Kurve grobkörnige Auffüllung – P3.1 - angepasste Bodenparameter GGU-Latpile

5.6 Vergleich Verformungen abgeleiteter p-y Kuven mit faseroptischen Messwerten, oberen Grenzwerten und Verformungen aus Curve-fittng

Im letzten Schritt sollen mit den Erkenntnissen aus dem vorangegangenen Kapitel p-y Kurven abgeleitet werden. Die Kurven sollen entgegen der bei dem Curve-fitting angewandten Schichteinteilung nun für die Originalschichtmächtigkeit abgeleitet werden, um das Ergebnis in die Praxis übertragen zu können. Die Schichteinteilung ist Tabelle 4-1 und Tabelle 4-5 zu entnehmen. Die p-y Kurven wurden mit dem Programm PileLAt 2.6 abgeleitet. Der Verformungsverlauf ist den nachfolgenden Abbildungen zu entnehmen.
Im ersten Schritt wurden die berechneten p-y Kurvenverläufe aus GGU-Latpile für jede Bodenschicht extrahiert. Diese sind nach den bereits gewonnenen Erkenntnissen modifiziert worden, um die Verformungen einer jeden Laststufe am jeweiligen Standort abzudecken. Um eine benutzerdefinierte p-y Kurve in PileLAT zu generieren, wurden nachfolgenden Parameter benötigt.

- Ultimate Lateral Resistance at the layer top, Pu-top
- Change Rate of Ultimate Lateral Resistance along the depth
- Wichte

Die genannten Parameter können aus GGU-Latpile entnommen werden. Für den ersten Wert wurde der Widerstand nach der p-y Kurve an der Schichtoberkante als Richtwert verwendet. Die change rate of ultimate Lateral Resistance along the depth beschreibt die Zunahme von pu ab der Schichtoberkante der betrachteten Schicht bis zur Unterkante. Beide Werte wurden aus p-y Kurven der angepassten Mittelwerte entnommen, da diese von Beginn an die größte Übereinstimmung mit den Messwerten hatten.
Nachfolgend werden die berechneten Verformungen mit den gemessenen als auch den Verformungen aus der Anpassung der Mittelwerte sowie den Verformungen aus den oberen Grenzwerten verglichen. Darüber hinaus werden die modifizierten p-y Kurven mit den aus dem Programm GGU Latpile abgeleiteten p-y Kurven verglichen und analysiert. Die maßgebenden p-y Kurven werden im Kapitel Diskussion vorgestellt.

Die Verformungen der Laststufe 7 (2200 kN) werden durch alle in Abbildung 5-21 genannten Rechenverfahren gut dargestellt. Die Verformung der modifizierten p-y Kurven ist am Pfahlkopf um 5,25 % kleiner als die gemessenen Werten und ebenfalls kleiner als die der oberen Grenzwerte. Im Vergleich zu den Verformungen aus dem Curve-fitting weichen die Verformungen aus der modifizierten p-y Kurve um knapp 4 % stärker nach unten ab. Auf den ersten vier Metern weichen die Verformungen der modifizierten p-y Kurve im Mittel ca. 11 % von den gemessenen Werten ab und überschätzen die Verformungen ab 26,5 m NHN. Die Verformungen aus dem Curve-fitting weichen bis ca. 1,5% weniger von den gemessenen Verformungen als die der modifizierten p-y Kurve ab. Bis auf 20 m NHN betragen die prozentualen Abweichungen der aus den modifizierten p-y Kurven ermittelten Verformungen im Mittel ca. 81 %. Somit liegen die Abweichungen im Mittel ca. 50 % höher als die aus den

oberen Grenzwerten ermittelten Verformung. Im Vergleich zu den anhand des Curve-fitting berechneten Verformungen liegen die prozentualen Abweichungen ca. 30 % höher.
Die prozentualen Verformungen der nach den modifizierten p-y Kurven für die Laststufe 5 (1643 kN) berechneten Verformungen weichen am Pfahlkopf 11 % von den gemessenen Werten ab. Damit liegen die Verformungen ca. 14-24% genauer an Messwerten im Vergleich zu den mit den oberen Grenzwerten und den aus dem Curve-fitting berechneten Verformungen. Bis auf 24 m NHN weichen die Verformungen um ca. 35 % im Mittel ab und bilden die Verformungen im Mittel 15% genauer als die mit dem Curve-fitting berechneten Verformungen ab. Die berechneten Verformungen nach den oberen Grenzwerten weichen in der Differenz 8 % zu den mit den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen bis auf 24 m NHN ab. Bis auf 20 m NHN beträgt die prozentuale Abweichung der mit den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen 230 % gegenüber den Messwerten. Die Differenz der oberen Grenzwerte zu den Messwerten weicht 252 % bis auf 20 m NHN und damit 30 % stärker als die Verformungen, die mit den modifizierten p-y Kurven berechnet wurden von den Messwerten ab. Die mit dem Curve-fitting berechneten Verformungen weichen bis auf 20 m NHN im Mittel ca. 150 % stärker als die mit den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen von den Messwerten ab.
Im Kopfbereich weichen die Verformungen der mit den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen 23 % ab und sind 120-150 % genauer als die Kopfverformungen aus den Berechnungen der oberen Grenzwerte und dem Curve-fitting. Auf den ersten vier Metern weichen die Verformungen im Mittel ca. 48 % von den Messwerten ab. Im Vergleich zu den Verformungen aus den oberen Grenzwerten und dem Curve-fitting sind diese 150-200 % genauer. Bis auf 20 m NHN beträgt die mittlere Abweichung ca. 175 %. Die Verformungen bilden die Messwerte im Vergleich zu den Verformungen aus den Berechnungen der oberen Grenzwerte und dem Curve-fitting um 600-800 % genauer ab.
Die Laststufe 1 (392 kN) kann sehr gut im Vergleich zu den Verformungen aus den Berechnungen mit den oberen Grenzwerten und dem Curve-fitting abgebildet werden. Die Pfahlkopfverformungen weichen 30 % von den Messwerten ab und sind gegenüber den Verformungen aus den oberen Grenzwerten und dem aus dem Curve-fitting um 380-550% genauer. Auf den ersten vier Metern weichen die Verformungen aus der modifizierten p-y Kurve um ca. 30 % von den Messwerten im Mittel ab und sind 570-840 % genauer als die Verformungen nach den oberen Grenzwerten und dem Curve-fitting. Bis auf eine Tiefe von 20 m NHN weichen die Verformungen nach den modifizierten p-y Kurven im Mittel um 50 % von den Messwerten ab. Die Verformungen nach den oberen Grenzwerten weichen 1530% stärker im Mittel bis auf eine Tiefe von 20 m NHN als die der mit dem modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen gegenüber den Messwerten ab. Die nach dem Curve-fitting berechneten Verformungen weichen 2890 % stärker im Mittel bis auf 20 m NHN ab, als die nach den modifizierten p-y Kurven ermittelten Verformungen.

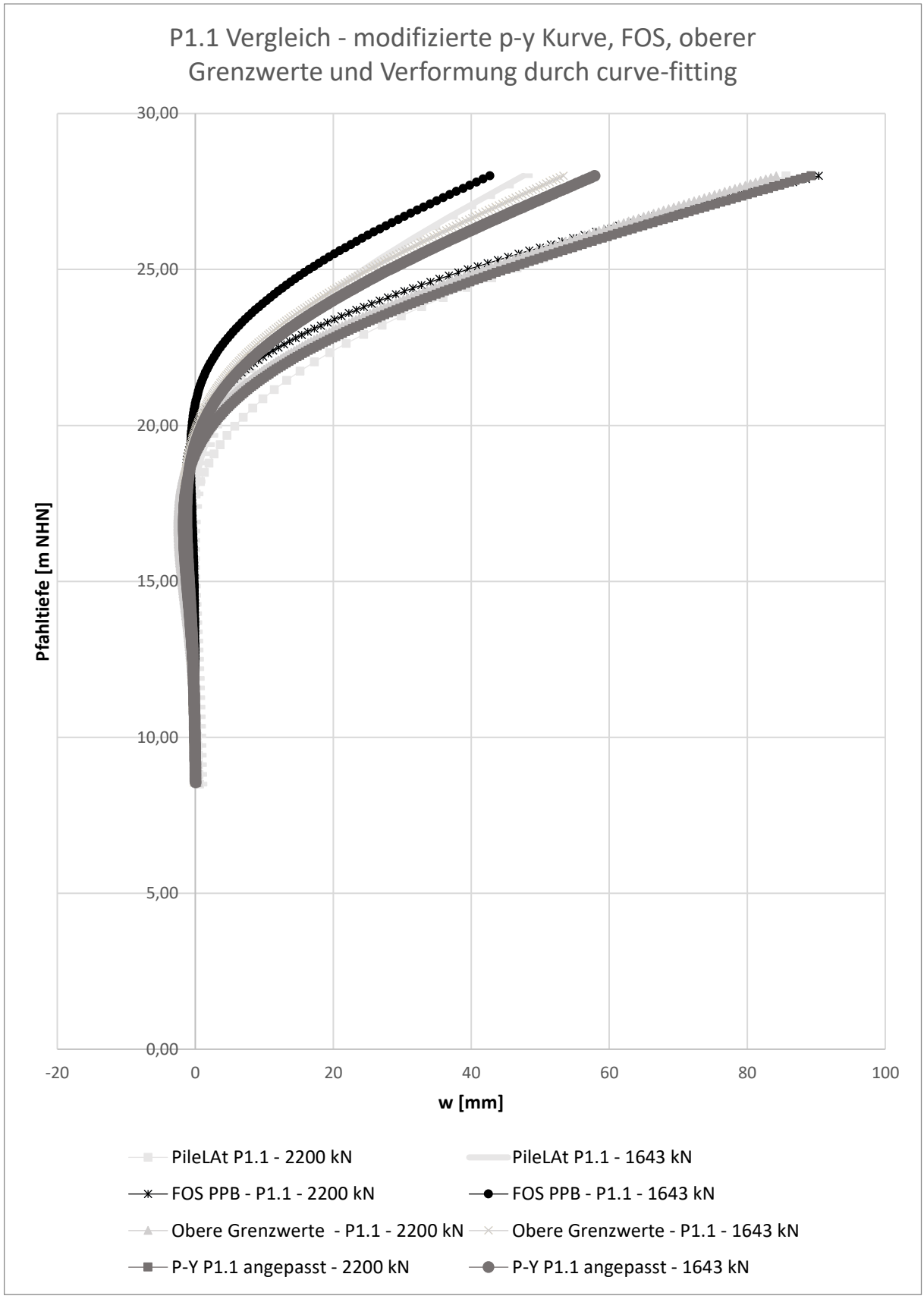


Abbildung 5-21: P1.1 Vergleich Verformungen - modifizierte p-y Kurve, FOS, obere , Curve-fitting-LS 5 und 7- Eigene Darstellung

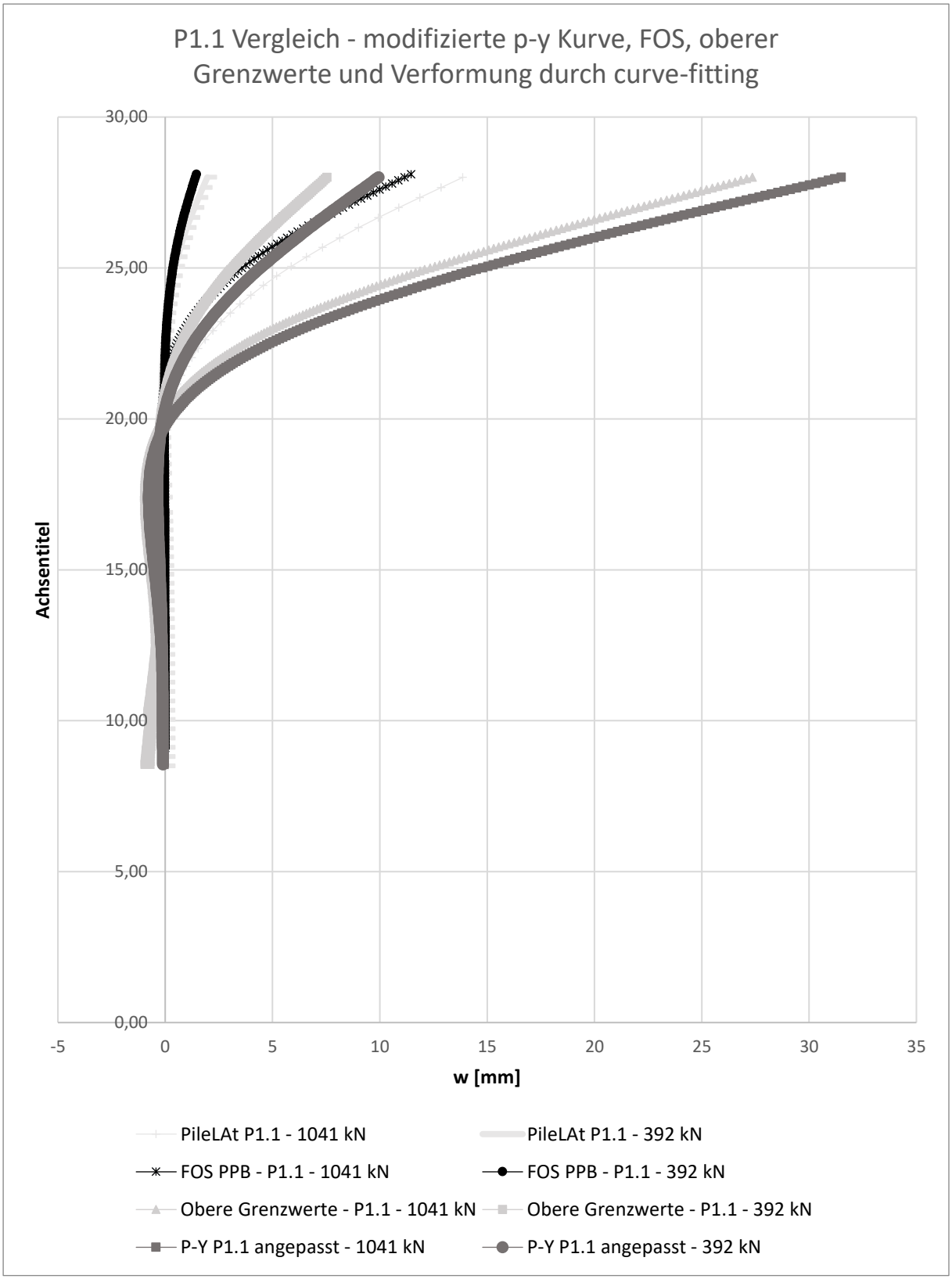


Abbildung 5-22: P1.1 Vergleich Verformungen- modifizierte p-y Kurve, FOS, oberer Grenzwerte, Curve-fitting-LS 1 und 3 – Eigene Darstellung

Am Standort 2 werden die Verformungen durch das Curve-fitting gut an die Messwerte angenähert. Die Verformungen, die mit den modifizierten p-y Kurven berechnet wurden, können die Verformungen am Pfahlkopf für die Laststufe 8 (2480 kN) ebenfalls gut abbilden. Die Verformungen nach den modifizierten p-y Kurven sind dabei 2 % genauer, unterschätzen die Messwerte im Gegensatz zu den mit dem Curve-fitting berechneten Verformungen allerdings. Ab 30,5 m NHN werden die Verformungen nach den modifizierten p-y Kurven überschätzt. Die mittlere Abweichung bis auf 27 m NHN beträgt 8,06 %. Die mit dem Curve-fitting berechneten Verformungen weichen bis 27 m NHN im Mittel ca. 14 % stärker ab. Die oberen Grenzwerte weichen ca. 130 % stärker im Vergleich zu den Verformungen der modifizierten p-y Kurven von den Messwerten ab. Bis auf 23 m NHN weichen die Verformungen aus den modifizierten p-y Kurven ca. 28 % von den Messwerten ab. Die Verformungen aus dem Curve-fitting weichen im Mittel 40 % stärker als die nach den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen bis auf 23 m NHN ab. Bis auf 23 m NHN weichen die Verformungen, der oberen Grenzwerte 700 % stärker von den Messwerten als die Verformungen der modifizierten p-y Kurven ab. Die Verformungen nach modifizierten p-y Kurven für die Laststufe 6 (1922 kN) beträgt am Pfahlkopf 9 %. Die prozentuale Abweichung der Verformungen die mit dem Curve-fitting für den Pfahlkopf berechnet wurden, betragen 16 % und weichen 7 % stärker von den Messwerten ab als die Verformungen die mit dem modifizierten p-y Kurven berechnet wurden. Bis auf 27 m NHN weichen die Verformungen die mit dem modifizierten p-y Kurven berechnet wurden ca. 24 % im Mittel von den Messwerten ab. Die Verformungen aus dem Curve-fitting weichen 13 % stärker gegenüber den Messwerten ab. Bis auf 23 m NHN weichen die Verformungen nach dem Curve-fitting 130 % stärker als die Verformungen nach den modifizierten p-y Kurven von den Messwerten ab. Für die Laststufe 3 (1041 kN) weichen die nach den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen am Pfahlkopf 23 % von den Messwerten ab und können die Verformungen 26 % genauer als die nach dem Curve-fitting berechneten Verformungen abbilden. Die prozentuale Abweichung der oberen Grenzwerte weicht 160 % stärker von den Messwerten ab als die mit den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen. Auf den ersten vier Metern weicht die prozentuale Verformung der mit den angepassten p-y Kurven berechneten Verformungen im Mittel um ca. 20 % von den Messwerten ab. Die Verformungen aus dem Curve-fitting weichen 47 % stärker als die nach den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen von den Messwerten ab. Bis zu einer Tiefe von 23 m NHN weichen die mit den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen 50 % weniger stark von den Messwerten ab als die Verformungen nach dem Curve-fitting. Die Verformungen nach den oberen Grenzwerten weichen 920 % im Mittel stärker als die nach den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen von den Messwerten ab. Die Laststufe 1 am Standort 2 kann mit den nach den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen mit einer Genauigkeit von 37 % abgebildet werden. Die Pfahlkopfverformungen nach dem mit dem Curve-fitting berechneten Verformungen weichen 90 % stärker als die nach den angepassten p-y Kurven berechneten Verformungen von den

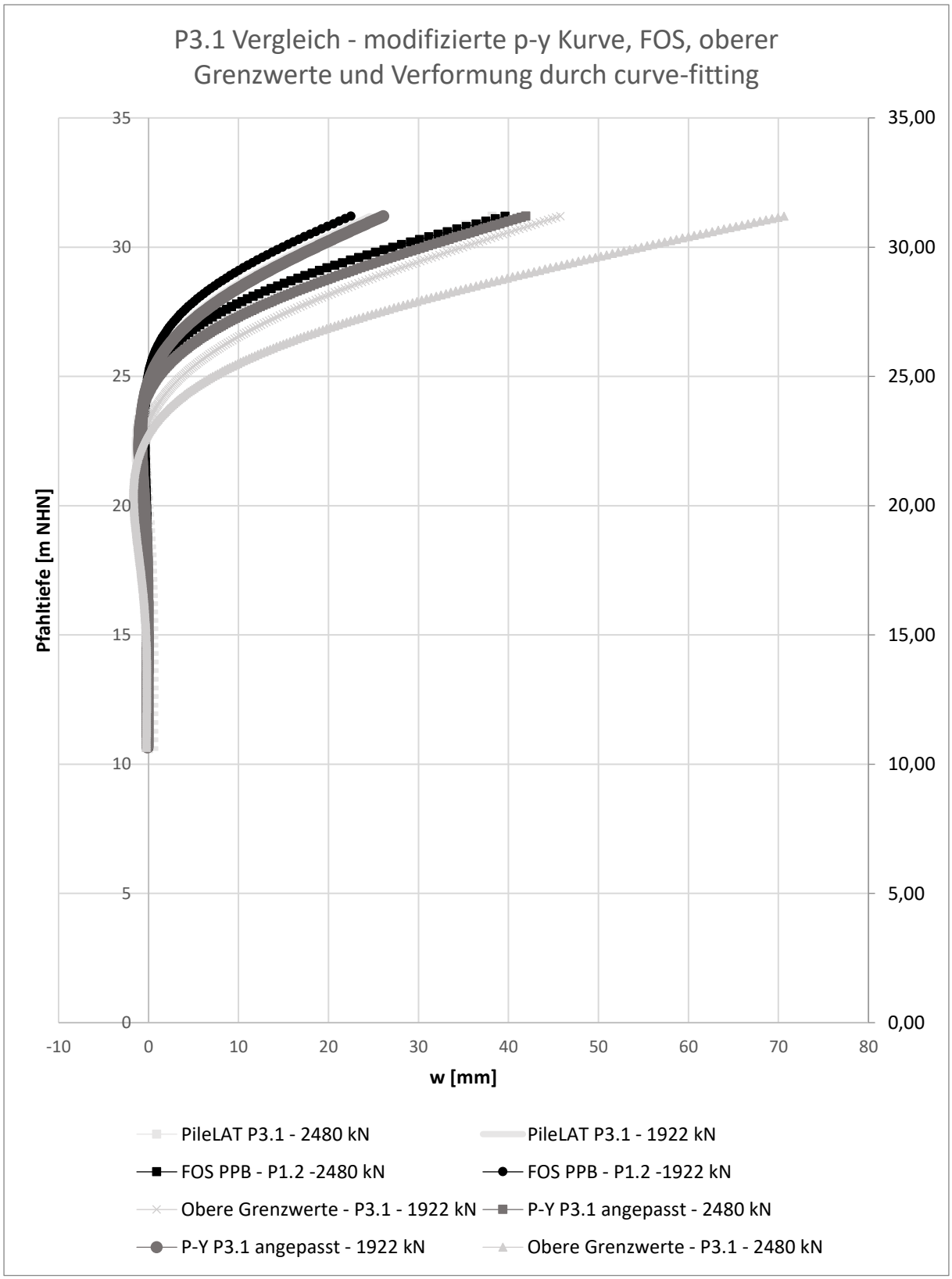


Abbildung 5-23: P3.1 Vergleich Verformungen - modifizierte p-y Kurve, FOS, obere Grenzwerte, Curve-fitting-LS 6 und 8 – Eigene Darstellung

Messwerten ab. Die oberen Grenzwerte weichen 300 % stärker gegenüber den nach den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen von den Messwerten ab. Im Mittel weichen die mit den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen auf den ersten vier

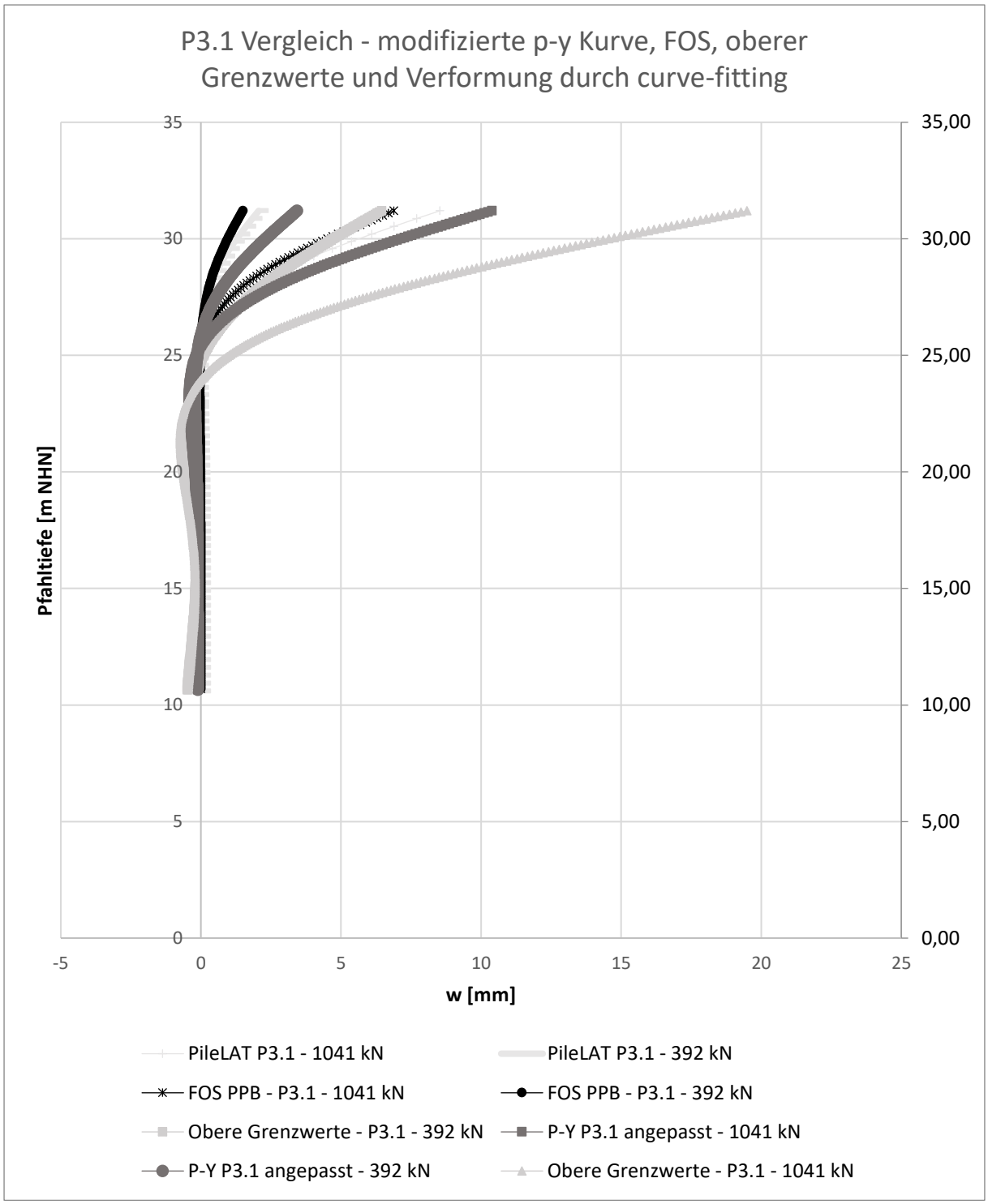


Abbildung 5-24: P3.1 Vergleich Verformungen - modifizierte p-y Kurve, FOS. obere Grenzwerte, Curve-fitting-LS 1 und 3 – Eigene Darstellung

Metern 24 % von den Messwerten ab. Die mit dem Curve-fitting berechneten Verformungen weichen 120 % stärker als die nach den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen von den Messwerten ab. Bis auf 23 m NHN weichen die mit den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen 475 % weniger stark von den Messwerten ab als die mit dem Curve-fitting berechneten Verformungen. Die oberen Grenzwerte weichen bis zu einer Tiefe von 23

m NHN um 1365 % geringer im Mittel als die mit den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen von den Messwerten ab.

5.6.1 Zwischenfazit

Die Berechnungen zeigen, dass die Verformungen mit den modifizierten p-y Kurven im Vergleich zu den Verformungen aus den oberen Grenzwerten und dem Curve-fitting deutlich besser abgebildet werden können. Insbesondere die Verformungen der niedrigen Laststufen können besser im Vergleich zu den oberen Grenzwerten und dem Curve-fitting abgebildet werden.

Am Standort 1 können die Verformungen mit den modifizierten p-y Kurven besonders für die unteren Laststufen besser an die Messwerte angenähert werden. Bei der höchsten Laststufe werden die Verformungen leicht unterschätzt, während die Verformungen ab Laststufe 6 leicht überschätzt werden. Es fällt auf, dass, obwohl die Pfahlkopfverformungen im Vergleich zu den oberen Grenzwerten und dem Curve-fitting besser abgebildet werden können, die prozentuale Abweichung über die Pfahltiefe ebenfalls zunimmt. Weiter zeigt sich, dass die Ermittlung des Verschiebungsnullpunktes nicht exakt abgebildet werden kann, wodurch es zu erheblichen prozentualen Abweichungen in der Verformung in diesem Bereich kommt. Darüber hinaus werden die Verformungen der mittleren Laststufen im Vergleich zu den niedrigen und den hohen Laststufen am ungenauesten abgebildet.

Auch am Standort 2 werden die Pfahlkopfverformungen durch die modifizierten p-y Kurven bei der höchsten Laststufe unterschätzt, die nachfolgenden Laststufen unterschätzen die Verformungen am Pfahlkopf. Dennoch können sowohl die Messwerte der niedrigen als auch der mittleren und der hohen Laststufen gut über die modifizierten p-y Kurven abgebildet werden und weisen eine höhere Genauigkeit als die mit dem Curve-fitting berechneten Verformungen auf. Die mit den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen bilden die Messwerte deutlich genauer bei niedrigen Laststufen als die Verformungen der oberen Grenzwerte ab. Auch bei mittleren Belastungsstufen können die Verformungen am besten mit den nach den modifizierten p-y Kurven berechneten Verformungen im Vergleich zu den Verformungen aus den oberen Grenzwerten und dem Curve-fitting abgebildet werden. Insgesamt nehmen die prozentualen Abweichungen am Standort 2 mit zunehmender Tiefe des Bohrpfahls zu, bilden die Verformungen über die Tiefe jedoch genauer als die oberen Grenzwerte und das Curve-fitting ab.

6 Diskussion

Nachfolgend werden die während der Modifizierung gewonnenen Ergebnisse mit der bisherigen Vermutung, dass die p-y Kurven der bindigen Schichten im Pfahlkopfbereich eine höhere Anfangssteifung aufweisen müssten, um mehr Spannung bei kleineren Verformungen realisieren zu können, verglichen. Die Modifizierung der p-y Kurven erfolgt dabei nach den charakteristischen p-y Kurvenverläufen aus dem Programm GGU-LatPile 9 für die oberen Grenzwerte der Bodenparameter. Die Grenzwerte für pu wurden aus den für das Curve-fitting berechneten maximal mobilisierbaren Bettungsspannungen abgeleitet.

Durch den in dem Kapitel 2.3 p-y Verfahren dargestellten Ansatz zur Erddruckberechnung wird klar, dass den bindigen Schichten weniger Last zugewiesen wird, woraus ein geringerer Einfluss auf die Verformung im Vergleich zu den nichtbindigen Schichten entsteht. Die Anpassung der p-y Kurven für bindige Böden hat daher nur einen kleinen Einfluss auf die Verformung sowohl bei hohen als auch bei niedrigen Laststufen. Verändert man die p-y Kurven Verläufe der nichtbindigen Schichten im maßgebenden Einflussbereich (ca. die ersten 10 m), haben diese Veränderungen einen deutlich größeren Einfluss auf die Verformung, insbesondere bei hohen Laststufen. Dies liegt daran, dass sie im Rahmen des p-y Verfahrens bei nichtbindigen Böden höhere Bettungsspannung mobilisiert werden, wodurch ein erhöhtes Tragverhalten gegenüber den nichtbindigen Schichten auftritt.

Nach dem Jahresbericht der EA-Pfähle werden p-y Kurven für bindige Böden mit einer undrainierten Scherfestigkeit von ≥ 100 kN/m² mit der in Abbildung 6-1 dargestellten Kurve (Kurve 1) beschrieben.

Eine Einzelbewertung der Kurven am Standort 1 ist nicht möglich, da eine Wechselwirkung der Kurven im Gesamten betrachtet werden muss.

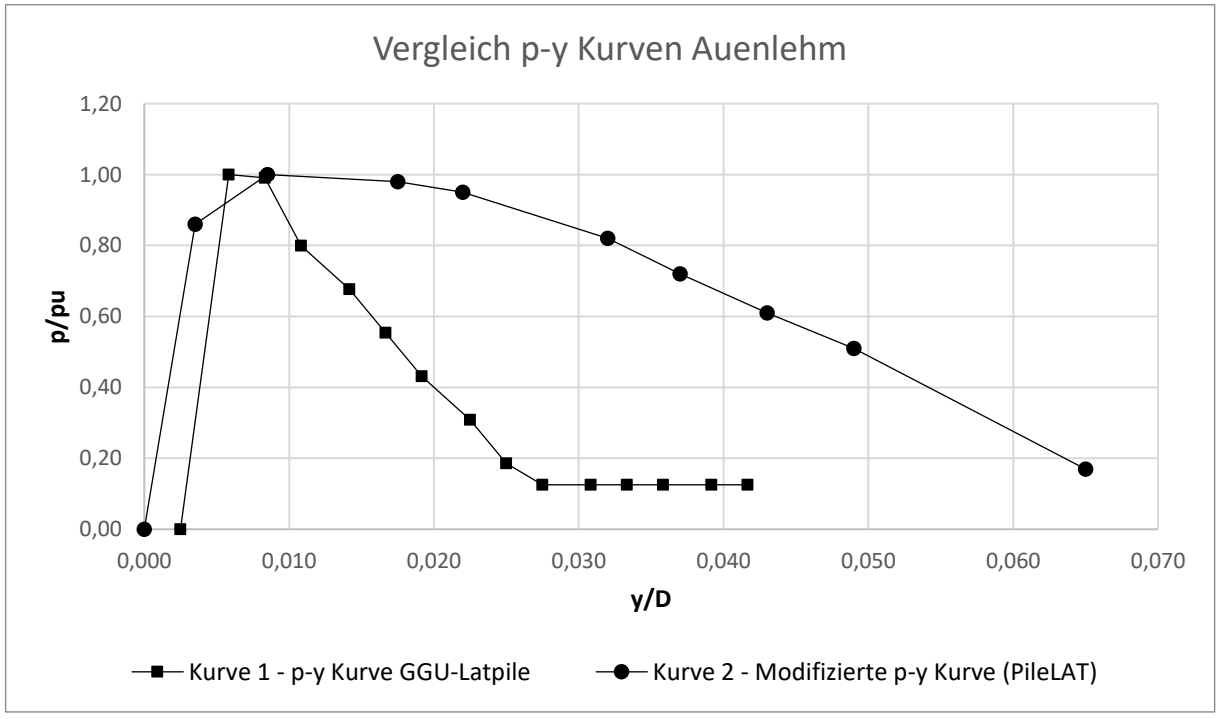


Abbildung 6-1: Vergleich p-y Kurve Auenlehm – Standort 1 – Eigene Darstellung

Die in Abbildung 6-1 modifizierte Kurve verläuft entsprechend dem aus GGU-Latpile abgeleiteten Kurve nach dem Erreichen der maximalen Bodenreaktionsraft p_u etwas steiler, um die Verformung bei hohen Laststufen zu verringern. Eine Versteifung des hinteren Bereiches y/D = 0,02-0,07 führt zu einer geringeren Verformung. Eine Verschiebung der Kurve 2 in Richtung Kurve 1 führt zu einer höheren Verformung, die ebenfalls eine Verschiebung des Nullpunktes in Richtung GOK zur Folge hat. Die kleinen Laststufen würden weitgehend unbeeinflusst bleiben, da diese Bodenwiderstände im Bereich zwischen y/D = 0-0,01 mobilisieren. Zusätzlich zu dem charakteristischen Verlauf der p-y Kurve wurde die maximalen Bodenreaktionsraft p_u im Rahmen der durch das Curve-fiting angegebenen Bandbreite variiert. Durch eine Erhöhung des p_u-Wertes wird die Tragfähigkeit der Schicht erhöht, ohne dass die p-y Kurve verändert wird. Darüber hinaus wurde die „Change Rate of Ultimate Lateral Resistance along the depth“ erhöht, um über die Schichtdicke höhere Spannungen realisieren zu können. Die Anpassung der „Change Rate of Ultimate Lateral Resistance along the depth“ wurde im Rahmen der durch das Curve-fitting vorgegeben Bandbreite angepasst. Die maximal mobilisierbare Bettungsspannung für den Auenlehm wurde um 40 % gegenüber den in der in dem Curve-fitting angegebenen Bettungsspannung erhöht, sodass die Schicht mehr Einfluss auf die Verformung hat. Die Change-rate wurde ebenfalls erhöht, um den Einfluss der Schicht auf die Verformung zu steigern, da es nicht sinnvoll ist, dass die Verformungen ausschließlich über die grobkörnige Auffüllung gesteuert wird.

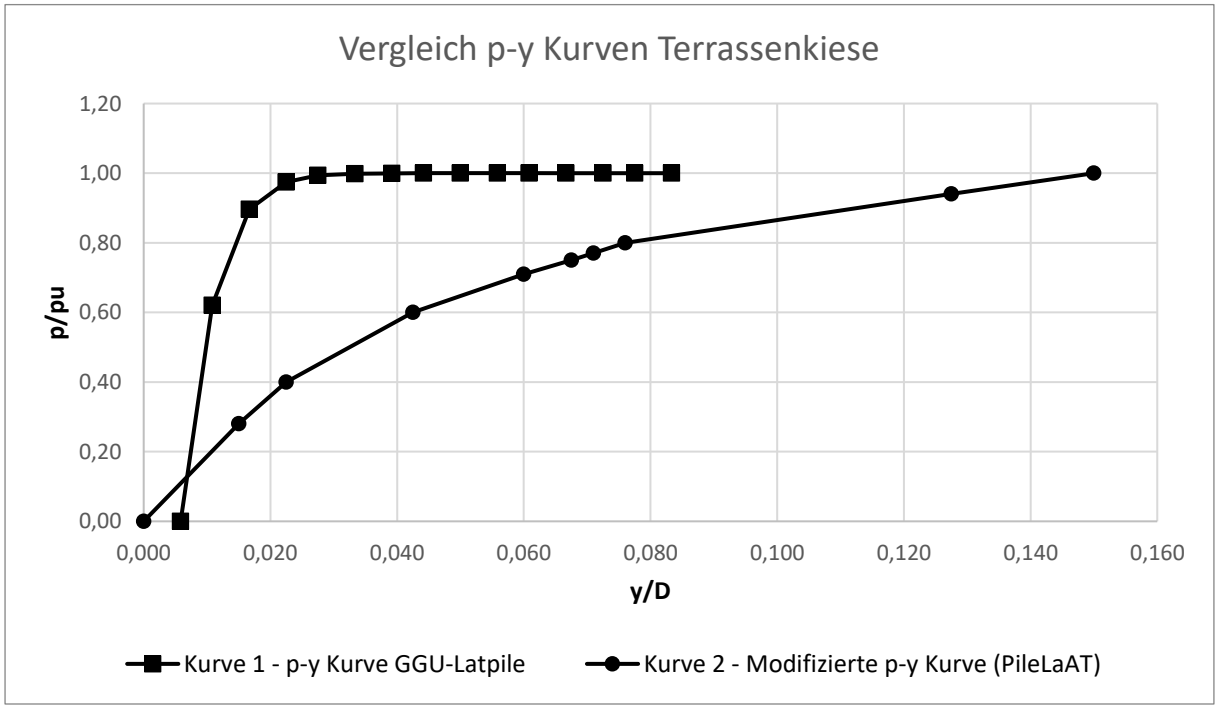


Abbildung 6-2: Vergleich p-y Kurven Terrassenkiese - P1.1 – Eigene Darstellung

Die Terrassenkiese haben mit der grobkörnigen Auffüllung jedoch den größten Einfluss auf die Verformung. Die Kurve 1 ist zu Beginn sehr steil und hat eine hohe Anfangssteigung und erreicht bei einem sehr geringen y/D bereits p_u. Die Kurve 2 verläuft anfangs flacher, wodurch gerade bei hohen Laststufen eine größere Verformung möglich ist, und erreicht den p_u-Wert bei

einem größeren y/D Verhältnis als Kurve 1. Um die Verformungen der oberen Laststufe besser an die Messwerte anzunähern, war es notwendig, die p-y Kurve in dem bei hohen Laststufen maßgeblichen Bereich weicher zu machen. Würde die Kurve 2 allerdings zu flach werden, würden die Verformungen der unteren Laststufen sich ebenfalls vergrößern und stärker von den Messwerten abweichen.

Durch die hohe Anfangssteigung der p-y Kurve für grobkörnige Auffüllung werden bei kleinen Verformungen bereits hohe Widerstände mobilisiert, die die Kopfverformungen maßgeblich beeinflussen. Um im Bereich kleinerer Verformungen die Messwerte genauer abbilden zu können, musste die charakteristische p-y Kurve für die grobkörnige Auffüllung anfangs deutlich steiler verlaufen.

Da vor allem bei kleinen Laststufen die Verformungen der oberen Grenzwerte deutlich durch den Anfangsbereich von y/D = 0-0,15 beeinflusst werden. Die angepasste Kurve 2 mobilisiert deutlich früher höhere Erdwiderstände, wodurch die Verformungen für kleine Laststufen verringert wird, die Verformung für hohe Laststufen aber weitgehend unbeeinflusst bleibt.

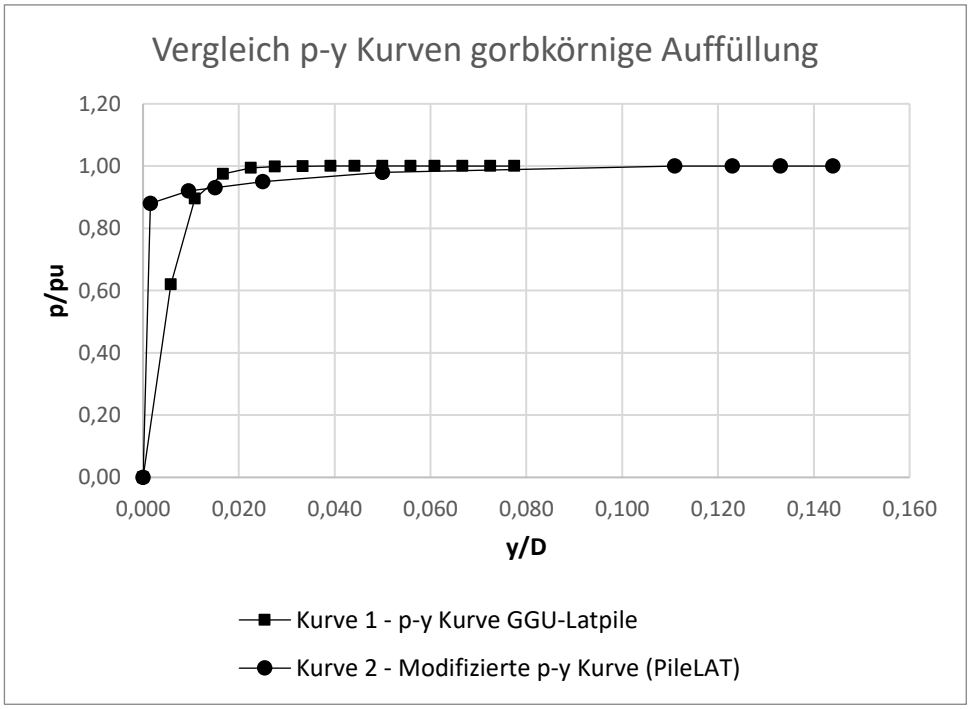


Abbildung 6-3: Vergleich p-y Kurven grobkörnige Auffüllung – Eigene Darstellung

Die Pfähle am Standort 2 binden auf den ersten 8 Metern über 7,20 m in eine grobkörnige Auffüllung ein. Diese ist aufgrund ihrer Mächtigkeit und ihrer Lage im Schichtverlauf des Bodens maßgeblich für die Verformung am Standort 2 (P3.1).

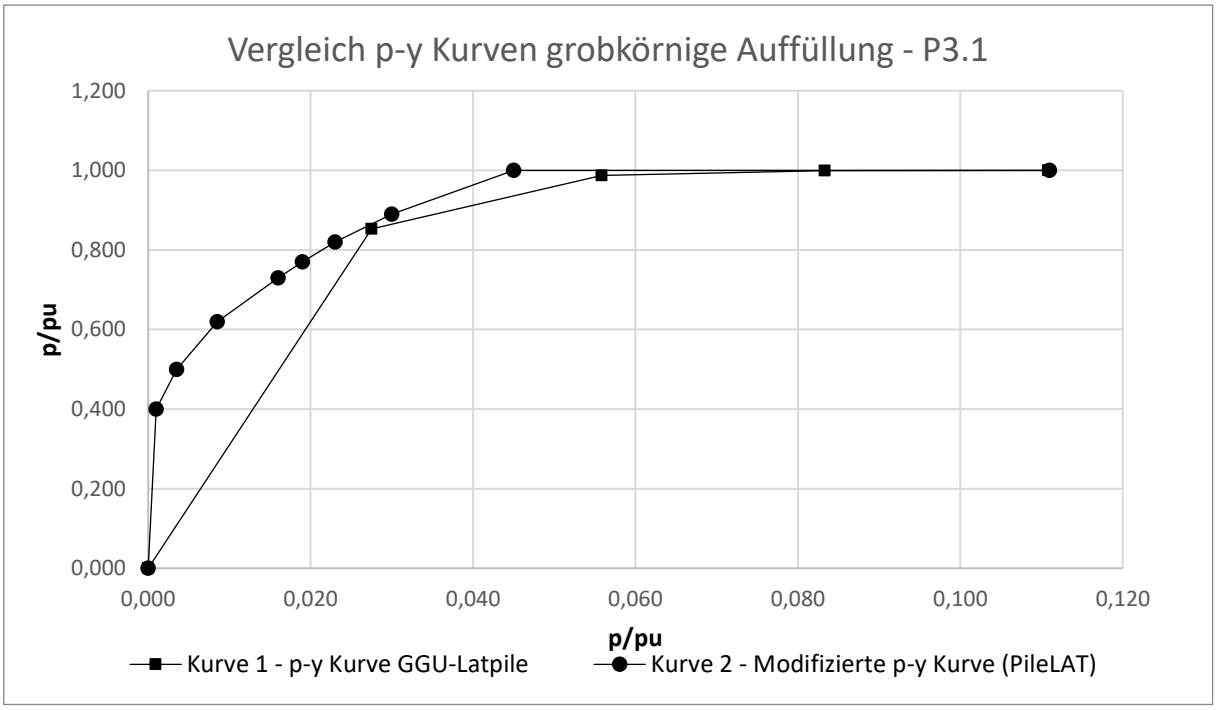


Abbildung 6-4: Vergleich p-y Kurven grokörnige Auffüllung P3.1 - Eigene Darstellung

Die aus GGU-Latpile abgeleiteten p-y Kurven verlaufen anfangs zu flach, um genug Widerstand mobilisieren zu können, der eine geringe Verformungen zur Folge hat. Um die Verformungen den Messwerten anzupassen und somit eine höhere Genauigkeit zu erreichen, musste die p-y Kurve der grobkörnigen Auffüllung im für niedrige und hohe Laststufen maßgebenden Bereich angepasst werden. Der maßgebende Bereich für Verformungen liegt zwischen y/D = 0-0,06. Darüber hinaus wurden pu sowie die Change-rate etwas niedriger gewählt, um die anfänglich hohe Steifigkeit zu reduzieren, um die Verformungen im Pfahlkopfbereich an die Messwerte zusätzlich anzunähern.

Die anfänglich getroffene Aussage kann also nur teilweise bestätigt werden. Es sind nicht ausschließlich die p-y Kurven der bindigen Schichten in ihrer Anfangssteigung zu weich. Am Standort 1 beeinflussen mehrere Schichten den Verlauf der Verformung bei niedrigeren Laststufen maßgeblich. Es müssen daher immer alle Schichten im Gesamten betrachtet werden. Am Standort 2 trifft die Aussagen insofern zu, als dass die grobkörnige Auffüllung im maßgebenden Bereich für die Verformungen aller Laststufen liegt und größtenteils allein die Verformung beeinflusst. Sie muss das steife Verhalten bei niedrigen Laststufen und das weiche Verhalten bei hohen Laststufen abbilden können.

Die mit dem Programm GGU-LatPile abgeleiteten p-y Kurven bilden die tatsächlich auftretende Spannungs-Verschiebungsreaktion im Boden nur eingeschränkt ab. Zudem stehen in dem Programm lediglich vorformulierte p-y Kurven für nichtbindige, bindig weiche und bindig steife Böden zur Verfügung. Da das reale Bodenverhalten jedoch häufig von den vorgefertigten Kurven abweicht, können die berechneten Ergebnisse die Messwerte nur unzureichend abdecken.

7 Fazit

Ziel dieser Arbeit war es, p-y Kurven für horizontal gebettete Bohrpfähle auf Grundlage von horizontalen Pfahlprobebelastungen abzuleiten. Dabei sollten herkömmliche Berechnungsverfahren mit den p-y Verfahren verglichen werden. Mithilfe der Programme GGU-LatPile 9 und PileLAT 2.6 wurde das Verformungsverhalten der Bohrpfähle nach herkömmlichen Berechnungsansätzen und dem p-y Verfahren umfangreich untersucht.
Die Ergebnisse des linearen Bettungsmodulverfahrens weisen an beiden Standorten deutliche Abweichungen von den Messwerten auf. Am Standort 1 können die Verformungen an die Messwerte ausschließlich über den oberen Grenzwerten der Bodenparameter an die Messwerte angenähert werden. Am Standort 2 müssen die Bodenparameter deutlich über die oberen Grenzwerte hinaus angepasst werden, um die Messwerte gut abzubilden. Eine Verformungsberechnung nach dem linearen Bettungsmodulansatz erweist sich als nicht zielführend und sollte sich stets innerhalb der in der EA-Pfähle vorgegebenen Grenze bewegen.
Auch bei dem p-y Verfahren können die Verformungen mit den unteren Grenzwerten nur unzureichend genau an beiden Standorten abgebildet werden und überschätzen die Verformung stark. Die oberen Grenzwerte bilden die Messwerte teilweise gut ab, wobei die Verformungen am Standort 1 besser als am Standort 2 abgebildet werden. Über die Pfahltiefe und bei niedrigeren Laststufen nehmen die prozentualen Differenzen jedoch deutlich im Vergleich zu den Messwerten zu.
Die Untersuchungen des p-y Verfahrens zeigen, dass die p-y Kurven, die nach dem Jahresbericht der EA-Pfähle im Programm GGU-Latpile 9 vorformuliert sind, die tatsächlichen Verformungen nur unzureichend genau abbilden können. Insbesondere im Bereich kleiner Laststufen weisen diese starke Abweichungen zu den Messergebnissen auf. Hohe Laststufen können ausschließlich am Standort 1 gut abgebildet werden. Am Standort 2 können ebenfalls die hohen Laststufen nur sehr ungenau abgebildet werden. Eine Ursache dafür sind die zu flach verlaufenden Anfangssteigungen der p-y Kurven. Dadurch wird bei kleinen Laststufen zu wenig Bettungsspannung mobilisiert, um die Verformungen realitätsnah abbilden zu können.
Am Standort 1 sind vor allem die p-y Kurven der Schichten im für die Verformung maßgebenden Bereich zu flach. Da am Standort 2 auf den ersten acht Metern hauptsächlich eine Schicht ansteht, muss diese den steifen Verlauf bei niedrigen als auch den weichen Verlauf bei hohen Laststufen widerspiegeln. Mit den p-y Kurven nach GGU-LatPile kann diese Beziehung nur unzureichend genau in einer p-y Kurve dargestellt werden.
Durch eine Modifikation der p-y Kurven konnten p-y Kurven entwickelt werden, die sowohl die Verformungen bei hohen als auch bei niedrigen Laststufen gut abbilden. Die berechneten Verformungen liegen deutlich näher an den Messwerten an beiden Standorten als die Verformungen der oberen Grenzwerte der Bodenparametern und dem Curve-fitting. Besonders im Bereich niedriger Laststufen konnten die Abweichungen zu den Messwerten stark reduziert werden und die Verformungen so realitätsnäher abgebildet werden. Dies wurde durch eine

ganzheitliche Anpassung der in dem für die Verformung maßgebenden Bereich anstehenden Schichten erreicht. Die angepassten p-y Kurven verlaufen anfänglich steiler im Vergleich zu den nach GGU-Latpile berechneten p-y Kurven, um bei niedrigen Laststufen und kleinen Verformungen größere Spannungen mobilisieren zu können. Die prozentualen Abweichungen der modifizierten p-y Kurven gegenüber den Messwerten nehmen dennoch über die Pfahltiefe zu.

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die p-y Kurve das reale Verformungsverhalten des Bodens vereinzelnd deutlich präziser abbilden können. Allerdings können die p-y Kurven bei bestimmten Schichten die Verformungen nur unzureichend genau mit den gegebenen Bodenparametern abdecken.

Um eine noch genauere Übereinstimmung mit den Messwerten zu erhalten, könnten die Schichten kleinteiliger unterteilt werden. So kann die Spannungs-Verschiebungs-Interaktion einer Teilschicht realitätsbezogener dargestellt werden.

Für zukünftige Untersuchungen wird empfohlen, sofern möglich, die Analyse des horizontale Tragverhalten und der Verformung von Böden in Kombination mit Pfahlprobebelastungen durchzuführen, um eine sichere Einschätzung der Baugrundverhältnisse zu erhalten. Denn selbst unter Verwendung der oberen Grenzwerte aus Normen und Empfehlungen lassen sich teilweise nur unzureichend genaue Ergebnisse berechnen. Weiter sollte das Programm GGU-LatPile um p-y Kurven, die auf international anerkannten Normen basieren erweitert werden. Dies würde eine genauere Klassifizierung der anstehenden Böden und eine bessere Verformungsprognose bewirken. Die Nutzung weniger vorformulierter p-y Kurven reicht für die Abbildung des individuellen Tragverhalten des Bodens nicht aus, um die realen Verformungen abbilden zu können. Im Gegensatz zu GGU-LAtPile bietet PileLAT mehr Auswahlmöglichkeiten von p-y Kurven für die jeweiligen Bodenarten,und ermöglicht so eine genauere Verformungsprognose.

Literaturverzeichnis

[1] D.-I. A. Künzel, „Parameteridentifikation auf Basis faseroptisch gemessener quasi kontinuierlicher Dehnungssignal," Dissertation, Berlin, 2016.

[2] P. Ferdinand, „THE EVOLUTION OF OPTICAL FIBER SENSORS TECHNOLOGIES DURING THE 35 LAST YEARS AND THEIR APPLICATIONS IN STRUCTURAL HEALTH MONITORING," 7th European Workshop on Structural Health Monitoring, La Cite, 2014.

[3] M. Gabler, „Funktionsintegrierte Faserverbundstoffe - ein Beitrag zu strukturintegrierter Sensorik," Fakultät Architektur und Stadtplanung der Universität Stuttgart, Stuttgart, 2012.

[4] O. S. e. al., Lichtwellenleiter-Übertragungs- und Sensortechnik, Berlin: VDE , 2014.

[5] APSENSING, „https://www.apsensing.com," APSENSING, Ohne Datum Ohne Datum Ohne Datum. [Online]. Available: https://www.apsensing.com/de/technologie-und-produkte/verteilte-temperaturmessung. [Zugriff am 15 08 2025].

[6] Polytec Magazin, „magazine.polytec.com," Polytec Magazin, Keine Angaben Keine Angaben Keine Angaben. [Online]. Available: https://magazine.polytec.com/de/kontinuierliche-faseroptische-dehnungsmessung. [Zugriff am 20 07 2025].

[7] ServiceNet, „www.glasfaserkabel.de," Keine Angaben Keine Angaben Keine Angaben. [Online]. Available: https://www.glasfaserkabel.de/Der-Unterschied-zwischen-Singlemode-und-Multimode-LWL-Kabeln:_:13.html. [Zugriff am 03 07 2025].

[8] R. Engelbrecht, Nichtlineare Faseroptik Grundlagen und Anwendungsbeispiele, Erlangen: Springer Vieweg, 2014.

[9] M. .. M. A. Coopermann, „Load monitoring for active control of wind turbines," in *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Delft, Elvesier, 2014.

[10] Nils Nöther, Massimo Facchini, „Verteilte faseroptische Temperatur- und Dehnungs-messungen: Möglichkeiten, Herausforderungen und Erfahrungen aus 10 Jahren Feldeinsatz," in *Messen in der Geotechnik 2024 - Heft Nr. 116*, Braunschweig, Institut für Geomechanik und Geotechnik - Technische Universität Braunschweig ISBN: 978-3-948141-08-0, 2024, pp. 153-171.

[11] Luna Innovations, „lunainc.com," Luna Innovations, Keine Angabe Keine Angaben Keine Angaben . [Online]. Available: https://lunainc.com/product/obr-4600. [Zugriff am 22 07 2025].

[12] J. W. Aghiad Khadour, „Monitoring of concrete structures with optical fiber sensors,“ in *Eco-efficient Repair and Rehabilitation of Concrete Infrastructures*, Paris, Elsevier Ltd, 2018.

[13] Fujian Tang et al., „A review on fiber optic sensors for rebar corrosion monitoring in RC structures,“ Elsevier Ltd., Dialan, 2021.

[14] R. Engelbrecht, Nichtlineare Faseroptik, Erlangen: Springer Vierweg, 2014.

[15] APSENSING, „https://www.apsensing.com,“ APSENSING, Ohne Datum Ohne Datum Ohne Datum. [Online]. Available: https://www.apsensing.com/de/produkte/dts-n45-serie. [Zugriff am 15 08 2025].

[16] Iyad S. M. Shatarah, Robert Olbrycht, „Distributed temperature sensing in optical fibers based on Raman scattering: theory and applications,“ in *Measurement Automation Monitoring*, Wólczańska, Lodz UNIVERSITY OF TECHNOLOGY, INSTITUTE OF ELECTRONICS, POLAND, 2017, pp. 41-44.

[17] A. H. Hartog, AN Introduction to Distributes Optical Fibre Sensors, Boca Raton: CRC Press, 2017.

[18] Andreas Künzel et al., „Robuste faseroptische Dehnungs- und Temperaturmessung,“ in *Messen in der Geotechnik 2024 - Heft Nr. 116*, Braunschweig, Institut für Geomechanik und Geotechnik Technische Universität Braunschweig, 2024, pp. 172-205.

[19] Technikmathe.de, „https://technikermathe.de,“ Technikmathe, Ohne Datum Ohne Datum Ohne Datum . [Online]. Available: https://technikermathe.de/tm2-biegelinie-querkraftbiegung. [Zugriff am 01 09 2025].

[20] Measurand, „https://measurand.com,“ Ohne Datum Ohne Datum Ohne Datum. [Online]. Available: https://indd.adobe.com/view/84dce203-6496-41a7-ad8f-31b003dae47c. [Zugriff am 18 08 2025].

[21] Measurand, „https://support.measurand.com,“ 24 06 2025. [Online]. Available: https://support.measurand.com/support/solutions/articles/19000160019-saav-manual. [Zugriff am 16 08 2025].

[22] Althensensors, „www.althensensors.com,“ Althensensors, Ohne Datum Ohne Datum Ohne Datum. [Online]. Available: https://www.althensensors.com/de/blog/geotechnische-inklinometer. [Zugriff am 12 08 2025].

[23] HBK - Hottinger Brüel & KJÆR, „www.hbm.com,“ HBK - Hottinger Brüel & KJÆR, Keine Angaben Keine Angaben Keine Angaben. [Online]. Available: https://www.hbm.com/de/4596/was-ist-ein-faser-bragg-gitter/. [Zugriff am 23 07 2025].

[24] HBK - Hottinger Brüel & KJAER, „https://www.hbm.com,“ HBK - Hottinger Brüel & KJAER, Ohne Datum Ohne Datum Ohne Datum. [Online]. Available:

https://www.hbm.com/de/6827/artikel-wie-funktionieren-optische-dehnungsmessstreifen/?product_type_no=Artikel:%20Wie%20funktionieren%20optische%20Dehnungsmessstreifen?. [Zugriff am 16 08 2025].

[25] „30 Jahre Glasfasermessungen in der Geotechnik," Bd. Heft Nr. 116, 2024.

[26] Stefan Franz, Andreas Künzel, Benedikt Bruns, „Innovative Messtechnik bei der Hangsicherung Heuberg (A 44)," Bde. %1 von %2Pfahl - Symposium 2023 Band 2, Nr. Heft Nr. 113, 2023.

[27] J. B. S. G. Mike Lieske, „Geotechnische Überwachung der Auffahrung des Einlagerungsfüllorts Schacht Konrad 2," Bd. 116, 2024.

[28] H.-G. Kempfert, „Pfahlgründungen," in *Grundbau-Taschenbuch, Teil 3: Gr ndungen und geotechnische Bauwerke*, Berlin, Ernst & Sohn, 2009, pp. 74-244.

[29] Jan Lüking, Philipp Wiesenthal, Fabian Kirsch, „Zur Anwendung der Erdwiderstandsmodelle von p-y-Kurven und nach DIN 4085 zur lateralen Pfahlbemessung in geschichteten Böden," in *Geotechnik 45 - Heft 3*, Berlin, Ersnt & Sohn, 2022, pp. 197-210.

[30] Arbeitsausschuss "Ufereinfassun" der HTG und der DGGT, EMpfehlung des Arbeitsausschusses "Ufereinfassung", Berlin: Ernst & Sohn, 2020.

[31] Christina Rudolph et al., „Vergleichsberechnung zur Dalbenbemessung nach Blum und mit der p-y-Methode," in *geotechnik 34, Heft 4* , Berlin, Ernst & Sohn, 2011, pp. 237-251.

[32] Deutsche Gesellschaft für Geotechnik, Empfehlung des Arbeitskreises "Pfähle", Berlin: Ernst & Sohn, 2012.

[33] Hans-Jürgen Lang et al., Bodenmechanik und Grundbau 8. Auflage, Berlin/Heidelberg: Springer, 2007.

[34] DIN-Normenausschuss Bauwesen (NABau), „DIN 1054 - Baugrund - Sicherheitsnachweise im Erd- und Grundbau - Ergänzende Regelungen zu DIN EN 1997-1," Beuth Verlag GmbH, Berlin, 2021.

[35] C. Moormann, „Jahresbericht 2020 des Arbeitskreises "Pfähle" der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT)," in *Bautechnik 98 (20211, Heft 2*, Berlin, Ernst & Sohn, 2021, pp. 163-185.

[36] Georgiardis K., „Development of p-y curves for layered soils," in *Proceedings Geotechnical Practtice in Offshore Engineering, American Society of Civil Engineers* , Texas, The Society, 1983, pp. 536-545.

[37] Dr. Spang Ingenieurgesellschaft für Bauwesen, Geologie und Umwelttechnik mbH, „6-streifiger Ausbau der BAB A 59, Streckengutachten AK Duisburg – AS Duisburg-

Marxloh - Geotechnisches Streckengutachten - Abschnitt Süd," Dr. Spang Ingenieurgesellschaft für Bauwesen, Geologie und Umwelttechnik mbH, Witten, 2020.

[38] Dr. Spang Ingenieurgesellschaft für Bauwesen, Geologie und Umwelttechnik mbH, „6-streifiger Ausbau der BAB A 59, Streckengutachten AK Duisburg – AS Duisburg-Marxloh - Geotechnisches Streckengutachten - Abschnitt Nord," Dr. Spang Ingenieurgesellschaft für Bauwesen, Geologie und Umwelttechnik mbH, Witten, 2020.

[39] Dr. Spang Ingenieuergesellschaft für Bauwesen, Geologie und Umwelttechnik mbH, „6-streifiger Ausbau der A 59 von südlich AK Duisburg bis AS Duisburg-Marxloh," Dr. Spang Ingenieuergesellschaft für Bauwesen, Geologie und Umwelttechnik mbH, Witten, 2024.

[40] K. L. W. R. Jens Wiemann, „ANwendbarkeit von Standardverfahren zur Bemessung von Pfahlgründungen für Offshore-WEA," in *3. Symposium Offshore-Windenergie, Bau- und umwelttechnische Aspekte* , Hannover, Institut für Grundbau und Bodenmechanik, Universität Duisburg-Essen , 2004, pp. 1-12.

[41] M. M. T. Almanza, „A new p-y Approach to Pile Foundations with Arbitrary Dimensions under Monotonic Load in Cohesive Soils," Fakultät für Bauingenieurwesen und Geodäsie der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover , Hannover, 2021.

[42] E. Schubert, „https://www.vitavonni.de," -, Keine Angaben Keine Angaben Keine Angaben. [Online]. Available: https://www.vitavonni.de/facharbeit/Modellvorstellung_Licht.html. [Zugriff am 13 08 2025].

[43] Y. C. Cho, „https://www.researchgate.net/," ResearchGate, Keine Angaben 07 2020. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/figure/Rayleigh-scattering-versus-Stokes-Raman-and-anti-Stokes-Raman-scattering_fig4_342986781. [Zugriff am 14 08 2025].

[44] https://www.google.com/maps, „https://www.google.com/maps," Google, Keine Angaben Keine Angaben Keine Angaben. [Online]. Available: https://www.google.com/maps. [Zugriff am 25 08 2025].

Anhang

Anhang_1_Lineares Bettungsmodulverfahren (Mittelwerte)
Anhang_2_Lineares Bettungsmodulverfahren Curve-fitting
Anhang_3_p-y Verfahren (angepasste Parameter)
Anhang_4_p-y Verfahren (obere Grenzwerte)
Anhang_5_p-y-Verfahren (Ableitung p-y Kurven mit PileLAT)
Anhang_6_p-y-Verfahren (Mittelwerte)
Anhang_7_p-y-Verfahren (untere Grenzwerte)