

Diploma Thesis

Load-deformation behavior of energy piles in typical Viennese ground

submitted in satisfaction of the requirements for the degree of

Diplom-Ingenieur

of the TU Wien, Faculty of Civil Engineering

Diplomarbeit

Last-Verformungsverhalten von Energiepfählen im typischen Wiener Baugrund

ausgeführt zum Zwecke der Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs

eingereicht an der Technischen Universität Wien, Fakultät für Bauingenieurwesen

von

Anna Freuis, BSc

Matr.Nr.: 1226048

unter der Anleitung von

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

Dipl.-Ing. Dr.techn. **Roman Markiewicz**

Institut für Geotechnik
Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik
Technische Universität Wien
Karlsplatz 13/E220, A-1040 Wien

Wien, im November 2018



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

KURZFASSUNG

Die geothermische Nutzung mit erdberührten Bauteilen wird in Österreich, der Schweiz, Deutschland, England und Japan schon häufig angewendet. Mit Großbohrpfählen gegründete Bauwerke können mit Energiepfählen ausgestattet werden. Die Pfähle werden hiermit nicht nur zur Lastabtragung verwendet, sondern auch zur thermischen Energienutzung. In den meisten Klimazonen Europas sind in einer Tiefe von 10 m bis 15 m aufgrund der thermodynamischen Trägheit des Bodens nur geringe Schwankungen im Temperaturverlauf über die Jahreszeiten vorzufinden. Bis in eine Tiefe von 50 m beträgt die Temperatur im Jahresmittel rund 10 °C bis 15 °C. Diese nahezu konstanten Temperaturverhältnisse im Untergrund werden bei Energiepfählen ausgenutzt, um thermische Energie nutzbar zu machen.

Die Stadt Wien ermöglichte im Zuge des Forschungsprojekts „*Unteres Hausfeld*“ FPUH die Versuche an Energiepfählen. Das Ziel war den Einfluss der geothermischen Nutzung auf das Last-Verformungsverhalten von Pfählen zu untersuchen.

Es wurden zwei Pfähle mit unterschiedlichen Längen hergestellt, da das Lastabtragungsverhalten in zwei verschiedenen Bodenschichten untersucht werden sollte. Ein längerer Pfahl, der in die tiefer gelegene Schicht des Miozän einband und ein kürzerer Pfahl, der nur bis in den oberflächennäheren Donauschotter reichte. Heiz- und Kühlzyklen wurden über die Versuchsdauer von zwei bis drei Monaten für jeden Pfahl simuliert. Die Last wurde während der Zyklen konstant gehalten, um die Reaktion des Pfahls auf die thermische Belastung zu ermitteln, wobei zu Beginn, zwischen den Zyklen und am Ende des Versuchs Lastspiele durchgeführt wurden.

In der gegenständlichen Diplomarbeit wird nach einer kurzen Einleitung in Kapitel 1 das Forschungsprojekt „*Unteres Hausfeld*“ FPUH in Kapitel 2 vorgestellt. Es werden die örtlichen Gegebenheiten im Bezug auf den Untergrund und andere Rahmenbedingungen des Forschungsprojekts erläutert.

Das Prinzip von Geothermie-Anlagen wird allgemein beschrieben, um einen Einblick in deren grundsätzliche Funktionsweise zu bekommen. In Kapitel 3 wird im Besonderen auf die Normen und Richtlinien betreffend Energiepfähle eingegangen. Die Bemessung von Großbohrpfählen wird ebenfalls behandelt, da die statische Bemessung von Energiepfählen identisch zu Großbohrpfählen ist.

Im nächsten Abschnitt werden die Energiepfahlversuche des Forschungsprojekts „*Unteres Hausfeld*“ FPUH betrachtet. Die Versuche werden in Kapitel 4 detailliert beschrieben, da diese die Grundlage für die folgende Auswertung bilden. Es wird nicht nur die Geometrie der Versuchskörper, sondern auch die Instrumentierung und im Speziellen der Versuchsablauf erläutert. In diesem Kapitel ist auch eine Fotodokumentation der Versuchsaufbauten und der installierten Instrumentierung zu finden.

Die Auswertemethodik und die Theorie, auf der die Auswertung basiert, wird im folgenden Kapitel 5 vorgestellt. In einem ersten Schritt werden Auszüge aus den Rohdaten und aus der Auswertung gezeigt. Die Versuchsergebnisse werden schließlich in Diagrammen dargestellt und beschrieben. Von zwei ausgewählten Großbohrpfählen des gegenständlichen Forschungsprojekts „*Unteres Hausfeld*“ werden die Ergebnisse der statischen Pfahlprobelastung für den Vergleich mit den Ergebnissen der Energiepfahlversuche herangezogen.

Abschließend werden die Versuche an den Energiepfählen zusammengefasst und einer ersten Beurteilung unterzogen.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

ABSTRACT

Geothermal systems are frequently used in Austria, Switzerland, Germany, England and Japan to use thermal energy from ground and groundwater. The most proficient way is via geothermal activation of the foundation elements, like energy piles and other energy geostructures. The main advantage of these systems is that the structural components are not only used for static reasons, but also provide thermal energy for heating and/or cooling of the building. In the most climatic zones of Europe, at a depth of 10 m to 15 m, due to the thermal inertia of the soil, a nearly constant temperature on an annual basis can be found. Up to a depth of 50 m, the annual average temperature usually varies only in the range of 10 °C to 15 °C. These almost constant temperature conditions in the ground serve to generate thermal energy with energy piles.

The city of Vienna initiated the research project “Unteres Hausfeld” FPUH, which included experiments on energy piles among other geotechnical investigations. The aim of the experiments on energy piles is to show whether and to what extent the load-deformation behavior of the piles is influenced by the thermal loading of the piles.

Two energy piles of different lengths were installed in two different soil layers. A longer pile embedded in the lower layer the Miozän and a shorter pile embedded into the gravel (“Danube gravel”) on top of the Miozän were installed. For these tests, the piles were not only loaded mechanically but also thermally over defined periods. Heating and cooling cycles were simulated over the test period of two to three months for each pile. The load was kept constant throughout the cycles to determine the response of the piles to the thermal loading. Load cycles were performed at the beginning, in between, and at the end of the tests.

After a short introduction in Chapter 1, the research project "Unteres Hausfeld" FPUH is presented in Chapter 2. The local conditions and other determining factors of the research project are explained.

Geothermal systems are generally described to get information about their basic operation. Chapter 3 also deals with the standards and guidelines for energy piles. The dimensioning of large bore piles is also considered, as the static design of energy piles is identical to large bored piles.

The next section of this work includes the energy pile experiments of the research project "Unteres Hausfeld" FPUH. The experiments are described in detail in Chapter 4, as these form the basis for the following evaluation. Not only the geometry of the test specimens is explained, but also the instrumentation and the experimental procedure. This chapter also includes a photo documentation of the experimental setup and the installed instrumentation.

The evaluation methodology is presented in the following Chapter 5. In a first step, the collected data and the evaluation are shown. The test results are finally presented in diagrams and described. The results of two large bored piles from the research project "Unteres Hausfeld" have been selected for comparison with the results of the energy pile tests.

Finally, the experiments on the energy piles are summarized and subjected to a basic assessment.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

VORWORT

Ich wurde auf dieses Forschungsprojekt während eines Gesprächs mit Herrn Dipl.-Ing. Dr.techn. Stefan Blovsky aufmerksam, was dann schnell zu meiner Beteiligung am Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“ in Form dieser Diplomarbeit führte. Die Gelegenheit bei einem derartig großen Forschungsprojekt mitzuwirken war sehr interessant, da ich viele neue Erfahrungen machen durfte. An dieser Stelle möchte ich mich bei allen bedanken, die durch ihre fachliche und persönliche Unterstützung zum Gelingen meiner Diplomarbeit beigetragen haben.

Großer Dank gilt Herrn Univ.Prof. Dipl.-Ing. Dr.techn. Dietmar Adam, der sich für die Betreuung der Diplomarbeit Zeit genommen hat. Besonders möchte ich sein Engagement bei der Korrektur der Diplomarbeit erwähnen, da für diese aufgrund des straffen Zeitplans nur ein kurzer Zeitraum zur Verfügung stand.

Mein ganz besonderer Dank gilt Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Markiewicz, der mir bei der Auswertung der Versuche zur Seite gestanden ist. Dank seiner Geduld konnte ich viel von seiner langjährigen Erfahrung im Bereich der Forschung lernen. In unserer Zusammenarbeit wurde mir klar wie wichtig es ist, in Bezug auf wissenschaftliches Arbeiten, alles zu hinterfragen.

Joachim Wagner, welcher das Forschungsprojekt als Projektassistent der TU Wien begleitete, legte immer große Hilfsbereitschaft an den Tag und war stets erreichbar für jegliche Fragen. Es gab keine Probleme, die nicht zu lösen waren und für dieses Engagement möchte ich mich recht herzlich bedanken. Meinen Kolleginnen und Kollegen, die ihre Diplomarbeit ebenfalls im Zuge des Forschungsprojektes erstellt haben, möchte ich ebenfalls für die gute Zusammenarbeit danken. Generell hätte ich mir kein besseres Team an der TU Wien vorstellen können.

Den verantwortlichen Mitarbeitern der MA 29 (Brückenbau und Grundbau) gebührt auch mein Dank. Allen voran möchte ich mich beim Projektleiter Herrn Ing. Franz Urban für die Initiierung des Forschungsprojektes und seiner Zustimmung zur Absolvierung der Diplomarbeit im Rahmen dieses Forschungsprojektes bedanken. Darüber hinaus gilt mein herzlicher Dank der ÖBA am Versuchsfeld, Frau Dipl.-Ing. Juliana Reimoser und Herrn Eduard Kuresch, für die angenehme Zusammenarbeit und die Unterstützung.

Des Weiteren möchte ich meinen Dank allen Mitarbeitern der ARGE FPUH – Keller Grundbau GmbH und Porr Bau GmbH – für die gute Zusammenarbeit aussprechen. Obwohl derartige Versuchsdurchführungen sicherlich in der Baubranche nicht üblich sind, wurde gegenseitiges Verständnis an den Tag gelegt.

Zu guter Letzt möchte ich meinen besonderen Dank meiner Familie aussprechen, die mir nicht nur das Studium ermöglicht haben, sondern die mir mit ihrer stetigen Selbstlosigkeit beiseite stehen. Ihr habt mich in jeglichen Phasen meines Lebens unterstützt.

Außerdem möchte ich meinen Freunden und im Besonderen jenen Freunden, die mit mir das Studium bestritten haben danken. Ohne euch wäre meine Studienzeit nicht zu einem solchen Erlebnis geworden.

Wien, am 11.11.2018

Anna Freuis



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

INHALTSVERZEICHNIS

1	Einleitung	15
2	Forschungsprojekt Unteres Hausfeld	17
2.1	Veranlassung und Ziel der Untersuchungen	17
2.2	Normative Grundlagen	18
2.3	Geologie im Projektgebiet	19
2.3.1	Höhenlage und Morphologie	19
2.3.2	Allgemeine Geologie und Schichten	20
2.3.3	Schichtgrenzen und Störungen	20
2.4	Baugrunduntersuchungen	21
2.4.1	Kernbohrungen	21
2.4.2	Bodenphysikalische Laboruntersuchungen	23
2.4.3	Charakteristische Bodenkennwerte	25
2.4.4	Grundwasser	25
2.5	Projektüberblick	25
2.6	Versuchsvariationen	26
2.6.1	Großbohrpfähle	26
2.6.2	Mikropfähle	29
2.6.3	Düsenstrahlkörper	30
2.6.3.1	Düsenstrahlsäulen (DS-Säulen)	31
2.6.4	Verankerungen	32
2.6.5	Sonderversuche	33
2.6.5.1	Rückverankerte-Düsenstrahl-Dichtsohle (Herausziehversuche)	33
2.6.5.2	Energiepfähle	35
2.6.5.3	Horizontalverschiebeversuche	36
2.7	Eigene Mitwirkung am Forschungsprojekt	39
3	Energiepfähle – Allgemeines und Bemessungsgrundlagen	41
3.1	Geothermieanlagen	41
3.2	Energiepfähle	44
3.2.1	Massivabsorberanlagen	44
3.2.1.1	Bestandteile einer Massivabsorberanlage (Energiepfähle)	44
3.2.1.2	Einflussparameter - Dimensionierung Massivabsorberanlage	45
3.2.2	Herstellung eines Energiepfahls aus Ortbeton	46

3.2.3	Versuche an Energiepfählen.....	49
3.2.4	Potentielle Faktoren, welche das mechanische Tragverhalten der Pfähle beeinflussen können	50
3.3	Tragverhalten von axial statisch belasteten Pfählen	51
3.3.1.1	Allgemeines	51
3.3.1.2	Einflüsse auf das axiale Tragverhalten	53
3.3.1.3	Ermittlung des axialen Trag- und Verformungsverhaltens	56
3.4	Pfahlprobelastungen.....	59
3.4.1	Statische Probelastungen	59
3.4.1.1	Allgemeines	59
3.4.1.2	Axiale Probelastungen.....	60
3.5	Normen und Richtlinien.....	67
3.5.1	Normen und Richtlinien in Bezug auf Energiepfähle.....	67
3.5.2	Normen und Richtlinien in Bezug auf Pfähle im Allgemeinen	68
3.6	Bemessung von Pfählen.....	70
3.6.1	Allgemeines.....	70
3.6.2	Einwirkungen	70
3.6.3	Widerstände.....	71
3.6.3.1	Allgemeines	71
3.6.3.2	Pfahlwiderstände.....	71
3.6.4	Grenzzustand der Tragfähigkeit	74
3.6.4.1	Axial auf Druck beanspruchte Einzelpfähle.....	74
3.6.4.2	Axial auf Zug beanspruchte Einzelpfähle	76
3.6.4.3	Quer zur Achse beanspruchte Einzelpfähle	76
3.6.4.4	Grenzzustand der Tragfähigkeit des Pfahlbaustoffs.....	78
3.6.5	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit	78
3.6.5.1	Axial auf Druck und/oder Zug beanspruchte Einzelpfähle	78
3.6.5.2	Quer zur Achse beanspruchte Einzelpfähle	79
3.6.5.3	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit des Pfahlbaustoffs	79
3.6.6	Modellfaktoren	79
3.6.7	Streuungsfaktoren.....	79

4 Energiepfahlversuche (FPUH) 81

4.1	Lage der Energiepfähle in den Prüffeldern und Baugrundsituation.....	81
4.1.1	Untergrundverhältnisse.....	83
4.1.1.1	Untergrundaufschlüsse bei den Energiepfählen.....	84
4.1.2	Grundwasser.....	84
4.2	Bemessung der Energiepfähle B.EM und B.EK.....	84

4.3	Beschreibung der hergestellten Pfähle sowie von anderen Komponenten der Versuchsdurchführung.....	87
4.3.1	Miozänpfahl B.EM.....	89
4.3.1.1	Absorber und Instrumentierung	90
4.3.2	Kiespfahl B.EK	93
4.3.2.1	Absorber und Instrumentierung	94
4.3.3	Reaktionspfähle R53, R54 und R63	97
4.3.4	Zusatzbohrungen	98
4.4	Versuchsaufbau.....	98
4.4.1	Mechanische- und thermische Belastungseinrichtung	98
4.4.2	Messeinrichtung	105
4.4.2.1	Allgemein.....	105
4.4.2.2	Messwerterfassungssystem I (MWES I).....	106
4.4.2.3	Messwerterfassungssystem II (MWES II)	111
4.4.2.4	Messwerterfassungssystem III (MWES III)	115
4.4.2.5	Messwerterfassungssystem IV (MWES IV).....	116
4.4.2.6	Messwerterfassungssystem V (MWES V).....	117
4.4.2.7	Schutz der Mess- und Belastungseinrichtung	118
4.5	Versuchsablauf	119
4.5.1	Versuchsvorbereitung.....	119
4.5.2	Versuchsdurchführung	120
5	Auswertung und Ergebnisse der Energiepfahlversuche (FPUH)	125
5.1	Allgemeines	125
5.1.1	Generelle Auswertungsmethodik	125
5.1.1.1	Aufzeichnung der Versuchsdaten	125
5.1.1.2	Rohdatenaufbereitung	126
5.2	Auswertung.....	129
5.2.1	Eingabedaten	131
5.2.1.1	Instrumentierung.....	132
5.2.1.2	Pfahlgeometrie und Materialkennwerte	133
5.2.2	Erklärung und Darstellung der Daten der Phase 0 bis 5.....	134
5.2.2.1	MWES I – Pfahlkopfverformungen und Kraftmessdose	134
5.2.2.2	MWES II – Dehnungen	136
5.2.2.3	MWES II, IV und V – Temperatur	142
5.2.3	Längsdehnungen und prinzipielles Verformungsverhalten eines Energiepfahls	145
5.2.3.1	Fall A – Ausschließlich Temperaturbeanspruchung.....	145

5.2.3.2	Fall B - Temperaturbeanspruchung und mechanische Beanspruchung	149
5.2.3.3	Berücksichtigung von Temperaturänderungen bei der Anwendung von Messsystemen mit schwingender Saite	152
5.2.4	Auswertung der Längsdehnungen am Beispiel Miozänpfahl B.EM	155
5.2.4.1	Betrachtungszeitpunkte	155
5.2.4.2	Allgemeines und Bezeichnungen	156
5.2.4.3	Übersichtsdiagramm	157
5.2.4.4	Längsdehnungen zufolge der mechanischen Last	157
5.2.4.5	Längsdehnungen zufolge der thermischen Last bei konstanter mechanischer Last	159
5.2.4.6	Anwendung der angeführten Formeln für den Miozänpfahlversuch B.EM	161
5.3	Ergebnisse Miozänpfahlversuch B.EM	169
5.3.1	Ergebnisse Phasen 0 bis 5	169
5.3.2	Ergebnisse Phase 6 Miozänpfahl B.EM im Vergleich mit Großbohrpfahl B.M5	169
5.3.2.1	Allgemein	169
5.3.2.2	Vergleich B.EM mit B.M5	171
5.4	Ergebnisse Kiepfahlversuch B.EK	173
5.4.1	Ergebnisse Phasen 0 bis 5	173
5.4.1.1	MWES I – Pfahlkopfverformungen und Kraftmessdose	173
5.4.1.2	MWES II – Dehnungen	175
5.4.1.3	MWES II, IV und V – Temperatur	180
5.4.1.4	Grundwassertemperatur	182
5.4.2	Ergebnisse Phase 6 Kiespfahl B.EK im Vergleich mit Großbohrpfahl B.K5	182
5.4.2.1	Allgemein	182
5.4.2.2	Vergleich Kiespfahl B.EK mit Großbohrpfahl B.K55	184
6	Zusammenfassung und Ausblick	187
6.1	Zusammenfassung der Energiepfahlversuche	187
6.2	Kritische Beurteilung der Energiepfahlversuche	189

ANHANG A

Durchführungsprotokoll B.EM Teil 1

Durchführungsprotokoll B.EM Teil 2

Durchführungsprotokoll B.EK Teil 1

Durchführungsprotokoll B.EK Teil 2

ANHANG B

Ketteneextensometer Einbauprotokoll B.EM

Ketteneextensometer Einbauprotokoll B.EK

ANHANG C

Protokoll Instrumentierung B.EM

Protokoll Instrumentierung B.EK

ANHANG D

Bohrprofil Kernbohrung Z3

Bohrprofil Kernbohrung KB13

ANHANG E

Ergebnisse Phase 0-5 B.EM

Ergebnisse Phase 6 B.EM

Ergebnisse B.M5

ANHANG F

Ergebnisse Phase 0-5 B.EK

Ergebnisse Phase 6 B.EK

Ergebnisse B.K55



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

KAPITEL 1

Einleitung

Im Jahr 1855 erfand der österreichische Montanist Peter Ritter von Rittinger die Wärmepumpe und machte somit die Erdwärmenutzung möglich. Damit schuf er eine ökonomische und ökologische Variante der Energieerzeugung. Seit den 1980 Jahren nahm die Nutzung von geothermischer Energie über erdberührte Bauteile stark zu. (*Brandl (2006)[12]*) Die Nachfrage nach erneuerbaren Energieträgern ist in der heutigen Zeit groß und die Geothermie ist global gesehen eine langfristig nutzbare Energiequelle. In Österreich, der Schweiz, Deutschland, England und Japan werden erdberührte Bauteile zur geothermischen Nutzung schon häufig verwendet. In Österreich beweisen sich diese Bauten schon seit Jahren und das System wird heute oft in Pfahlfundamenten von Hochhäusern eingebaut. Der große Vorteil dieses Systems ist, dass die Betonbauteile aus statischen Gründen gebraucht werden und somit keine zusätzlichen Elemente für die thermische Energieversorgung gebaut werden müssen. Energiepfähle werden schon seit geraumer Zeit eingebaut und bis heute konnten keine Schäden auf die geothermische Nutzung dieser Pfähle zurückgeführt werden. Es gibt jedoch bis dato nur ein sehr begrenztes Verständnis für das thermomechanische Verhalten dieser Pfähle. Die meisten Versuchsprogramme in Bezug auf Geothermieanlagen, die in der Literatur zu finden sind, untersuchen die thermodynamischen Eigenschaften und deren Heiz- und Kühlleistung. In Kapitel 3.2.3 wird eine kurze Übersicht über die bisher durchgeführten Versuche im Bezug auf das thermomechanische Verhalten von Energiepfählen gegeben.

Die Stadt Wien, als einer der größten Auftraggeber Österreichs, initiierte, aufgrund der neuen Normenlage im Bereich des Spezialtiefbaus, das Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“ (FPUH). In den aktuellen Normen gibt es die Möglichkeit der Bemessung der Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit anhand von Probelastungen, um auf die vorhandenen Bodenwiderstände schließen zu können. Generell wurden diese Versuche im „typischen“ Wiener Baugrund durchgeführt, um Vergleichswerte für zukünftige Projekte zu schaffen. In diesem Forschungsprojekt wurden die in Österreich häufig angewandten Spezialtiefbauverfahren verschiedenen Grundsatz- und Eignungsprüfungen unterzogen. Ein großes Versuchsprogramm wurde erstellt, in dem ein wesentlicher Teil axiale Probelastungen an Großbohrpfählen einnahmen. Als Sonderversuche wurden unter anderem Horizontalverschiebeversuche an Großbohrpfählen unter gleichzeitiger axialer Belastung durchgeführt, um Erkenntnisse für Gründungspfähle integraler Brücken zu erlangen.

In Rahmen des Forschungsprojekts „Unteres Hausfeld“ (FPUH) wurden Energiepfahlversuche ins Versuchsprogramm aufgenommen, um den Einfluss der geothermischen Nutzung auf die Tragfähigkeit und das Lastabtragungsverhalten von Pfählen zu untersuchen. Die Untersuchungen sollten zeigen, ob und in welcher Größenordnung die Pfahltragfähigkeit und das Last-Verformungsverhalten durch die thermische Belastung beeinträchtigt würde. Dazu musste der Pfahl nicht nur mechanisch, sondern auch thermisch über bestimmte Zeiträume belastet werden. Für diese Sonderversuche wurden zwei verrohrte Bohrpfähle hergestellt. Ein längerer Pfahl, der in die tiefer gelegene Schicht des Miozän einbindet und ein kürzerer Pfahl, der nur bis in den oberflächennäheren Donauschotter reicht. Heiz- und Kühlzyklen wurden über die Versuchsdauer von zwei bis drei Monaten für jeden Pfahl simuliert. Die Last wurde während der Zyklen konstant gehalten, um die Reaktion des Pfahls auf die

thermische Belastung ersichtlich zu machen, wobei zu Beginn, zwischen den Zyklen und am Ende des Versuchs Lastspiele durchgeführt wurden.

Im Rahmen dieser Diplomarbeit wurde die Überwachung der Versuchsdurchführung, das Sammeln und Aufbereiten der Rohdaten sowie eine Erstausswertung gemacht. In einem nächsten Schritt werden die Daten vom Büro *Geotechnik Adam ZT GmbH* einer genaueren Auswertung und Interpretation unterzogen.

Die näheren Projektbeteiligten, die bei der Durchführung der Energiepfahlversuche beteiligt waren sind: *MA29, TU Wien - Institut für Geotechnik, Geotechnik Adam ZT GmbH, Wien Energie, Arge FPUH, Red Bernard, ZT Mayer GmbH*.

Nutzung von Synergien

An diesem Projekt war ein ganzes Team des Institut für Geotechnik der TU Wien beteiligt, weshalb gewisse Teile der jeweiligen Arbeiten in die eigenen übernommen werden konnten. Die Übernahme von Textpassagen oder einzelner ganzer Abschnitte soll weniger zur eigenen Aufwandsminderung dienen, sondern vielmehr zur Nutzung von Synergien, um die jeweilige Thematik letztlich im Kontext besser zu erläutern.

Der (aktuelle) Umfang an wissenschaftlichen Arbeiten im Rahmen des FPUH, aus denen entsprechende Teile zitiert werden können, ist in Tab. 1.1 zusammengefasst. Die Übernahme von jenen Teilen wurde unter den unten genannten Personen vereinbart und ist im jeweiligen Abschnitt entsprechend gekennzeichnet.

Ergänzend dazu wird angemerkt, dass die Abschnitte 2.1 bis 2.3 in enger Abstimmung mit dem Auftraggeber des Forschungsprojektes (Magistratsabteilung 29) und Stefan Blovsky [SB], früherer Mitarbeiter am Institut für Geotechnik der TU Wien, verfasst wurden. Auch sie sind einheitlich in den wissenschaftlichen Arbeiten.

Tab. 1.1: Wissenschaftliche Arbeiten im Rahmen der Probelastungen (PB) des FPUH

Themengebiet	Art	Bearbeiter/in	Abk.	Stand
Großbohrpfähle (axiale PB)	Projektarbeit	Manuel Stadlbauer	[MS]	abgeschlossen
Mikropfähle und Anker	Diplomarbeit	Johannes Meusburger	[JM]	abgeschlossen
DSV-Körper und Herausziehversuche	Diplomarbeit	Christina Marzy	[CM]	abgeschlossen
Energiepfähle	Diplomarbeit	Anna Freuis	[AF]	abgeschlossen
Horizontalverschiebeversuche	Diplomarbeit	Alexander Stöglehner	[AS]	abgeschlossen

KAPITEL 2

Forschungsprojekt Unteres Hausfeld

2.1 Veranlassung und Ziel der Untersuchungen

Die Stadt Wien hat als einer der größten Auftraggeber Österreichs ein Forschungsprojekt initiiert, dessen Ziel die Erfassung von Baugrundwiderständen diverser Gründungselemente für den repräsentativen Wiener Baugrund ist.

Die geologischen Verhältnisse im größten Wiener Stadterweiterungsgebiet, dem 21. und 22. Wiener Gemeindegebiet, sind großräumig sehr homogen. Es ist daher zu erwarten, dass die Versuchsergebnisse Eingang in viele zukünftige Bauprojekte in diesem Bereich finden können. Denkbar ist darüber hinaus eine Einbeziehung der Ergebnisse auch für vergleichbare geologische Strukturen, wie z.B. den Donauschotter in anderen Stadtteilen. Voraussetzung hierfür ist eine Prüfung der Vergleichbarkeit durch einen Sachverständigen für Geotechnik.

Im Einzelnen wurden

- Großbohrpfähle
- Mikropfähle
- Verpressanker
- Düsenstrahl-Gründungssäulen
- Mikropfähle als Verankerungen in Düsenstrahl-Sohlen
- Großbohrpfähle mit Nutzung als Energiepfähle
- Großbohrpfähle mit kombinierter (vertikaler und horizontaler) Beanspruchung

im Sinne von Probelastungen bzw. Grundsatzprüfungen untersucht. Ziel der Untersuchungen war in der Regel das Herbeiführen eines Versagenszustandes für jeden einzelnen Bauteil.

Im Falle von Pfahlgründungen steht normativ (ÖNORM B 1997-1-3 [32]) neben Pfahlprobelastungen unter anderem auch die Möglichkeit einer Bemessung nach Tabellenwerten zur Verfügung. Diese Tabellenwerte sind auf der sicheren Seite gewählte charakteristische Widerstände, die für das gesamte Gebiet Österreichs Gültigkeit besitzen.

Bei Ausführung von Pfahlprobelastungen sind in der Regel verlässlichere Pfahlwiderstände ableitbar und eine wirtschaftlichere Bemessung unter tatsächlichen Verhältnissen möglich. Darüber hinaus lässt sich naturgemäß das Verformungsverhalten bzw. die Gebrauchstauglichkeit anhand von Pfahlprobelastungen für Druckbeanspruchung besser einschätzen, als unter Zugrundelegung von Tabellenwerten. Für die Beurteilung des Gebrauchstauglichkeitsverhaltens zugbeanspruchter Pfähle sind ohnehin Probelastungen zwingend erforderlich.

Die vorliegende Diplomarbeit befasst sich mit der Durchführung und Auswertung der Versuche an:

Energiepfählen

Eine überblickmäßige Beschreibung aller Versuchsvariationen in Abschnitt 2.6 enthalten. Die detaillierte Auseinandersetzung mit den verschiedenen Versuchen erfolgt in der jeweiligen wissenschaftlichen Arbeit (siehe **Tab. 1.1**). Die detaillierte Versuchsbeschreibung der vorliegenden Arbeit befindet sich in Kapitel 4, – die Ergebnisse sind in Kapitel 5 enthalten.

2.2 Normative Grundlagen

Die österreichische Normengrundlage basierte mit der ÖNORM EN 1997-1 [36] aus dem Jahr 2006 sowie der ÖNORM B 1997-1-1 [31] aus den Jahren 2010 und 2013 vor dem Erscheinen der aktuellen ÖNORM B 1997-1-3 [32] im Jahr 2015 in der gängigen Praxis vielfach auf Erfahrungswerten vergleichbarer Projekte oder Tabellenwerten der ÖNORM B 4440 [33]. Letztere stammt aus dem Jahr 2001, beruhte auf dem globalen Sicherheitskonzept und sah demnach eine globale Absicherung zur Grenzkraft in der Größenordnung von $\eta = 1,3$ bis $2,0$ je nach Lastfallgruppe und Anzahl der unter gleichen Verhältnissen ausgeführten Probelastungen vor.

In der Entwurfsfassung der ÖNORM B 1997-1 aus dem Jahr 2006, die bereits auf dem Teilsicherheitskonzept des Eurocode 7 basierte, wurden erstmals national Streuungsfaktoren ζ_1 und ζ_2 zur Ableitung charakteristischer Werte aus statischen Pfahlprobelastungen für alle Bemessungssituationen eingeführt. Diese Streuungsfaktoren sind umso kleiner, je größer die Anzahl der durchgeführten Probelastungen ist.

Für die Ermittlung der axialen charakteristischen Werte der Pfahlwiderstände stehen gemäß der aktuellen Pfahlbemessung (ÖNORM EN 1997-1 in Kombination mit ÖNORM B 1997-1-1 und ÖNORM B 1997-1-3) folgende unterschiedliche Vorgehensweisen zur Verfügung:

- a) Statische Pfahlprobelastungen
 - Absicherung der versuchstechnisch erhaltenen Grenztragfähigkeiten mittels
 - Streuungsfaktoren (ζ_1 und ζ_2) und
 - Teilsicherheiten (γ_E und γ_R).
- b) Dynamische Pfahlprobelastungen (für axial auf Druck beanspruchte Pfähle nur dann, wenn deren Ergebnisse an statischen Probelastungen kalibriert wurden).
 - Absicherung der versuchstechnisch erhaltenen Grenztragfähigkeiten mittels
 - Streuungsfaktoren (ζ_5 und ζ_6) und
 - Teilsicherheiten (γ_E und γ_R).
- c) Auswertung von Proberammungen mittels anerkannter Rammformeln für auf Druck beanspruchte Verdrängungspfähle
 - Absicherung der versuchstechnisch erhaltenen Grenztragfähigkeiten mittels
 - Streuungsfaktoren (ζ_5 und ζ_6) und
 - Teilsicherheiten (γ_E und γ_R).
- d) Berechnungen mit Hilfe von Tabellenwerten für axial auf Druck und/oder Zug beanspruchte Bohrpfähle gemäß Anhang C der Norm unter Anwendung von
 - Modellfaktoren ($\eta_{P;c}$ und $\eta_{P;t}$)
 - Teilsicherheiten (γ_E und γ_R).

Gemäß ÖNORM EN 1997-1 [36] dürfen die mit einem Rechenmodell erzielten Ergebnisse durch Modellfaktoren angepasst werden, um auf der sicheren Seite zu liegen. Für Verfahren zur Ermittlung von Pfahlwiderständen mit Hilfe von Tabellenwerten müssen Modellfaktoren berücksichtigt werden, um das bisherige Sicherheitsniveau des globalen Sicherheitskonzepts zu erhalten.

- e) Ermittlung der Pfahlwiderstände von axial auf Druck beanspruchten Mikropfählen gemäß Anhang D (Tabellenwerte) der Norm unter Anwendung von
- Modellfaktoren ($\eta_{P;c}$ und $\eta_{P;t}$)
 - Teilsicherheiten (γ_E und γ_R).
- f) Ermittlung der Pfahlwiderstände von axial auf Druck und/oder Zug beanspruchten Pfählen mit Hilfe von Erfahrungswerten von ausgeführten Pfahlgründungen und/oder Probelastungen, deren Zuverlässigkeit unter vergleichbaren Bedingungen nachgewiesen wurde unter Anwendung von
- Modellfaktoren ($\eta_{P;c}$ und $\eta_{P;t}$)
 - Teilsicherheiten (γ_E und γ_R).

Gemäß normativem Anhang A der ÖNORM B 1997-1-3 [32] gilt: „Werden charakteristische Pfahlwiderstände weder aus Pfahlprobelastungen, noch aus den Tabellen (Anhänge C und D) hergeleitet, sondern auf der Grundlage von Erfahrungswerten festgelegt, so sind auch auf diese die Modellfaktoren gemäß den Zeilen 5 und 6 der Tabelle A.1 anzuwenden.“

Die ÖNORM B 1997-1-3 [32] ermöglicht für axiale Beanspruchung nunmehr eine getrennte Nachweisführung für den Grenzzustand der Tragfähigkeit und den Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit.

Im Detail wurden im Anhang A der ÖNORM B 1997-1-3 [32] folgende Modellfaktoren festgelegt:

Tab. 2.1: Modellfaktoren gemäß Anhang A der ÖNORM B 1997-1-3 aus [32] (adaptiert)

	Fall	Symbol	Wert
1	Pfahlwiderstände auf axialen Druck aus statischen Pfahlprobelastungen	$\eta_{P;c}$	1,0
2	Pfahlwiderstände auf axialen Zug aus statischen Pfahlprobelastungen	$\eta_{P;t}$	1,0
3	Pfahlwiderstände auf axialen Druck mittels Tabellenwerten der Anhänge C und D	$\eta_{P;c}$	1,3
4	Pfahlwiderstände auf axialen Zug mittels Tabellenwerten der Anhänge C und D	$\eta_{P;t}$	2,5
5	Pfahlwiderstände auf axialen Druck aufgrund von vergleichbarer Erfahrung	$\eta_{P;c}$	$\geq 1,3$
6	Pfahlwiderstände auf axialen Zug aufgrund von vergleichbarer Erfahrung	$\eta_{P;t}$	$\geq 2,5$

Grundsätzlich ist festzuhalten, dass durch die Wahl von Pfahlprobelastungen als Bemessungsmöglichkeit anstelle von Tabellen- oder Erfahrungswerten keine Änderung des Sicherheitsniveaus im Sinne einer Veränderung von Teilsicherheitsbeiwerten vorgenommen wird.

2.3 Geologie im Projektgebiet

2.3.1 Höhenlage und Morphologie

Geomorphologisch liegt das Gebiet gemäß [46] am Rand der eigentlichen Donauniederung zum Marchfeld. Es wurde von nacheiszeitlichen Ablagerungen des Donaustromes und seiner Zubringer

aufgeschüttet und geologisch und morphologisch geprägt. Aufgrund der Entfernung zur Donau stand es jedoch nicht mehr im Einflussbereich der regelmäßigen Überschwemmungen und auch am Rand bzw. außerhalb des vor der Regulierung weitverzweigten Netzes von Altarmen. Die in der geologischen Karte eingetragene „äußerste beobachtete Hochwassergrenze an der Donau“ liegt jedoch noch deutlich nördlicher.

Das weitgehend ebene und flache Gelände liegt etwa zwischen 158,7 bis 158,8 m ü. A. Mögliche natürliche Senken und Rinnen, bzw. ehemals wassergefüllte Flussarme wurden im Zuge der menschlichen Besiedlung und Nutzung weitgehend aufgefüllt und eingeebnet.

2.3.2 Allgemeine Geologie und Schichten

Geologisch liegt das Gebiet gemäß [46] im Wiener Becken und in den Talalluvionen der Donau. Nach der geologischen Karte der GBA 1:50.000, Blatt Wien, liegt es an der Grenze zwischen „Auen des jüngeren Anteils der heutigen Talböden an der Donau (Postglazial)“ und den „älteren und höheren Fluren des jüngeren Anteils der heutigen Talböden“. Auf der geologischen Karte von *Brix (1972) 1:50.000* liegt es im Bereich der Praterterrasse, daher auf dem Niveau der jüngsten (würmzeitlichen) Terrasse, die von der rezenten Donau morphologisch und sedimentär überprägt wurde. Es ist jedenfalls dem Quartär/Holozän zuzurechnen. Unter dem Quartär folgen die miozänen Sedimente des Wiener Beckens (Oberes Pannonium).

Gemäß [46] ist folgender Schichtaufbau zu erwarten:

- Anschüttungen (Schicht A)
- Mutterboden (Schicht A)
- Ausedimente (Schicht B)
- Donauschotter (Schicht C)
- Miozäne Sedimente des Oberen Pannonium des Wiener Beckens (Schicht D)

An der Oberfläche liegt Mutterboden bzw. Anschüttungen. Darunter ist für den natürlichen Untergrund mit bis zu mehreren Metern mächtigen Ausedimenten (Aulehmen und Ausanden) zu rechnen. Dabei handelt es sich um schluffige Feinsande bis Schluffe von geringer Lagerungsdichte bzw. weicher Konsistenz und graubrauner Farbe. Meist sind sie humos und durchwurzelt.

Die darunter folgenden rezenten Donauschotter sind sandige Kiese von mitteldichter bis dichter Lagerung und graubrauner Farbe. Sandarme bis sandfreie Lagen können vorkommen, ebenso einzelne Sandschichten. Stein- und Blockanteile, sowie einzelne Stein- und Blocklagen, sind ebenso bekannt. Unter den Donauschottern folgen die miozänen Ablagerungen des Wiener Beckens (Oberes Pannonium). Dabei handelt es sich um feinkörnige Sedimente in Form von (schluffigen) Sanden bis tonigen Schluffen.

2.3.3 Schichtgrenzen und Störungen

Das Wiener Becken ist gemäß [46] als tektonisches Einbruchsbecken entstanden und daher von einem Störungssystem begrenzt sowie von Störungen und Brüchen durchzogen. Infolge dessen werden im Wiener Becken immer wieder Erdbeben registriert. Die meisten Störungen sind nur in tieferen Schichten des Wiener Beckens, z.B. durch Sprünge in der Lage der Schichtgrenzen oder in seismischen Profilen erkennbar.

Im gegenständlichen Gebiet zeigt die Unterkante der Ausedimente (bzw. die Donauschotteroberkante) ein gewisses natürliches Relief um wenige Meter, ebenso, wenn auch in geringerem Ausmaß, die Unterkante der Donauschotter. Dieses Relief ist jedoch als ablagerungsbedingte Schichtgrenze (durch Erosion und Sedimentation entstanden), und nicht als tektonische Störung zu sehen.

2.4 Baugrunduntersuchungen

In diesem Kapitel sind die Baugrunduntersuchungen gemäß dem geotechnischen Gutachten [46] des Forschungsprojektes „Unteres Hausfeld“ angeführt.

2.4.1 Kernbohrungen

Die nachfolgend angeführten Kernbohrungen wurden an den in Abb. 2. rot markierten Stellen abgeteuft.

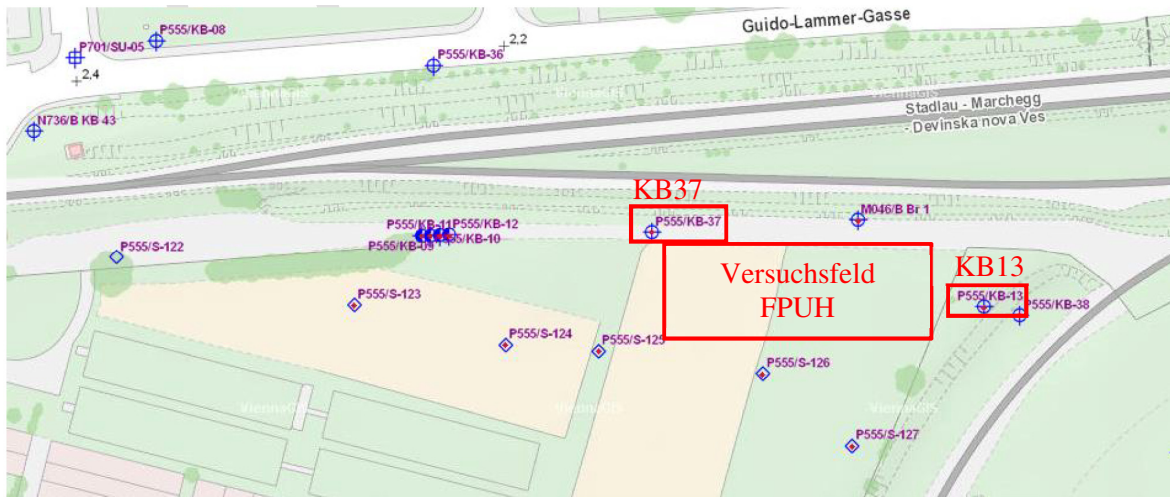


Abb. 2.1: Lage der Aufschlussstellen im Gebiet des Forschungsprojektes aus [46] (adaptiert)

Es ist anzumerken das während der Versuchsdurchführung drei weitere Kernbohrungen (Zusatzbohrung 1-3) auf dem Versuchsfeld erstellt wurden. Die Kernbohrungen in **Abb. 2.2** und **Abb. 2.3** sind gemäß geotechnischem Gutachten [46] folgendermaßen beschrieben:

„Deutlich zu erkennen ist, dass zumeist die Ausedimente praktisch nicht mehr vorhanden sind und unter den Anschüttungen oder dem Mutterboden gleich der Donauschotter ansteht. Freies Grundwasser wurde in allen Bohrungen im Donauschotter angetroffen.“

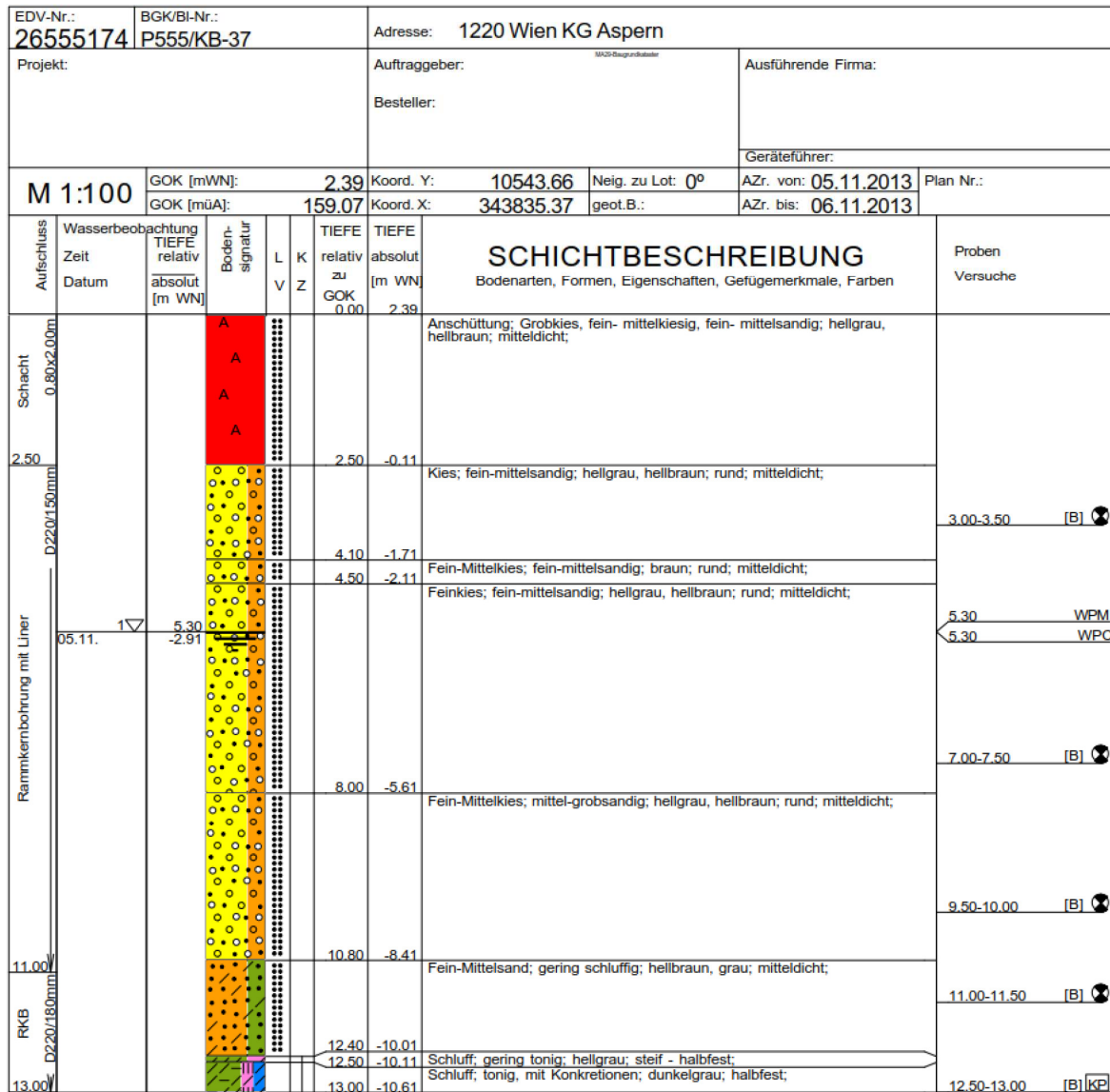


Abb. 2.2: Kernbohrung KB-37 aus [46]

EDV-Nr.: 26555048		BGK/BI-Nr.: P555/KB-13		Adresse: 1220 Wien KG Aspern, Grst.Nr.: 563/5					
Projekt:				Auftraggeber:		Ausführende Firma:			
				Besteller:		Geräteführer:			
M 1:100		GOK [mWN]: 2.11		Koord. Y: 10615.11		Neig. zu Lot: 0°	AZr. von: 21.08.2012	Plan Nr.:	
		GOK [müA]: 158.79		Koord. X: 343819.19		geot.B.:	AZr. bis: 24.08.2012		
Aufschluss	Wasserbeobachtung Zeit Datum	TIEFE relativ absolut [m WN]	Boden- signatur	L V	K Z	TIEFE relativ zu GOK 0.00	TIEFE absolut [m WN] 2.11	SCHICHTBESCHREIBUNG Bodenarten, Formen, Eigenschaften, Gefügemerkmale, Farben	Proben Versuche
Schacht 0.80x2.00m								Mittelkies; grobkiesig, sandig; hellbraun, hellgrau;	1.00-1.50 [B] ⊗
2.50						2.00	0.11	Mittelkies; grobkiesig, sehr fein-mittelsandig; hellbraun, dunkelbraun;	
D220/160mm	17	3.85 -1.74				3.50	-1.39	Fein-Mittelkies, Mittel-Grobsand; grobkiesig, steinig > 70, steinig>80; hellbraun;	4.00-4.50 [A] ○
Rammkernbohrung mit Liner						6.00	-3.89	Fein-Mittelkies, Grobsand; gering grobkiesig; hellgrau, hellbraun;	6.00 WPM
						10.40	-8.29		8.00-8.50 [B] ⊗
						10.60	-8.49	Fein-Mittelsand; feinkiesig, steinig > 70; hellbraun;	0.00-10.00 MC
						10.80	-8.69	Feinsand; gering schluffig, steinig > 50; hellbraun;	
						11.00	-8.89	Fein-Mittelkies; sehr mittel-grobsandig; hellbraun;	
						11.40	-9.29	Mittel-Grobsand; fein-mittelkiesig; hellbraun;	
						11.60	-9.49	Fein-Mittelkies, Mittel-Grobsand; braun;	11.00-11.50 [B] ⊗
						12.00	-9.89	Fein-Mittelkies; mäßig mittelsandig; braun;	
						12.30	-10.19	Mittel-Grobsand; feinkiesig; hellgrau;	
						13.00	-10.89	Fein-Mittelkies; gering grobkiesig, sehr mittel-grobsandig, steinig>60; rostfarben, hellbraun;	
13.00						13.10	-10.99	Schluff; sandig, mit Konkretionen; dunkelbraun, rostfarben;	
						13.70	-11.59	Schluff; feinsandig; hellbraun, rostfarben;	
						14.10	-11.99	Feinsand; gering schluffig; hellbraun;	
						14.30	-12.19	Feinsand; schluffig; Sandsteinverfestigt; hellbraun, grüngrau;	14.30-14.70 [B] [KP]
								Feinsand; schluffig; grüngrau;	15.00-15.40 [B] [KP]
						16.15	-14.04	Schluff; Grobkalk; grüngrau;	
						16.20	-14.09	Schluff; gering feinsandig; Grobkalkführend; grüngrau;	16.40-16.80 [B] [KP]
						17.20	-15.09		
						17.90	-15.79	Feinsand; gering schluffig; hellgrau, grüngrau;	
						18.20	-16.09	Feinsand; gering schluffig; rostfarben;	
								Feinsand; gering schluffig; hellbraun, rostfarben;	18.00-18.50 [B] ⊗
20.00						20.00	-17.89		

Abb. 2.3: Kernbohrung KB-13 aus [46]

2.4.2 Bodenphysikalische Laboruntersuchungen

In diesem Abschnitt sind die Korngrößenverteilungen des Donauschotter und des Miozän im erweiterten Projektumgebung gemäß geotechnischem Gutachten [46] dargestellt und erklärt.

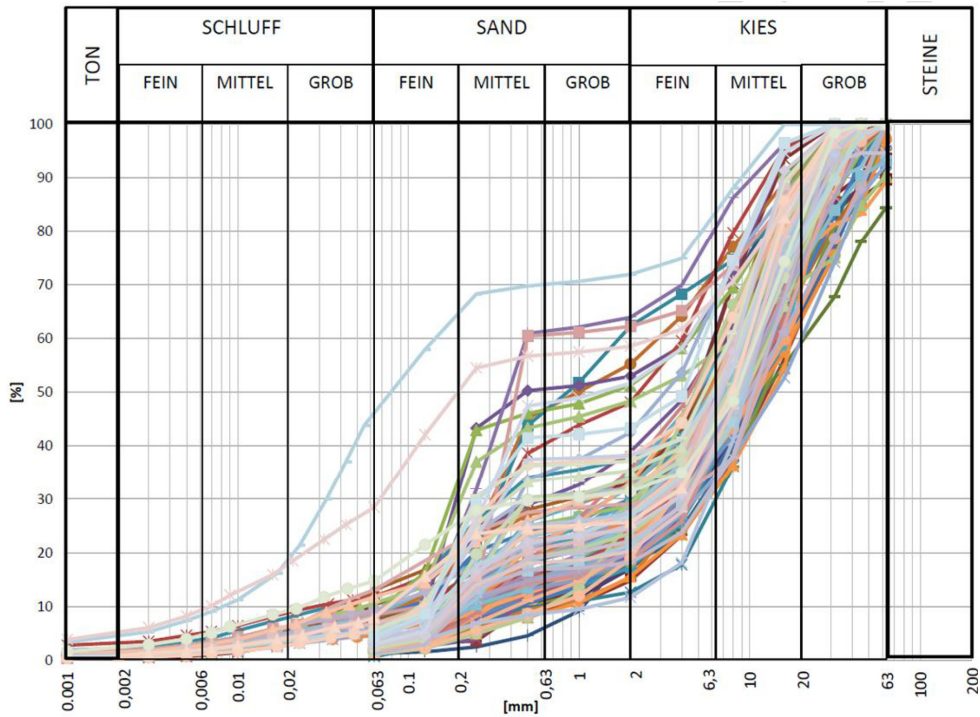


Abb. 2.4: Korngrößenverteilungen des Donauschotter aus der weiteren Projektumgebung aus [46]

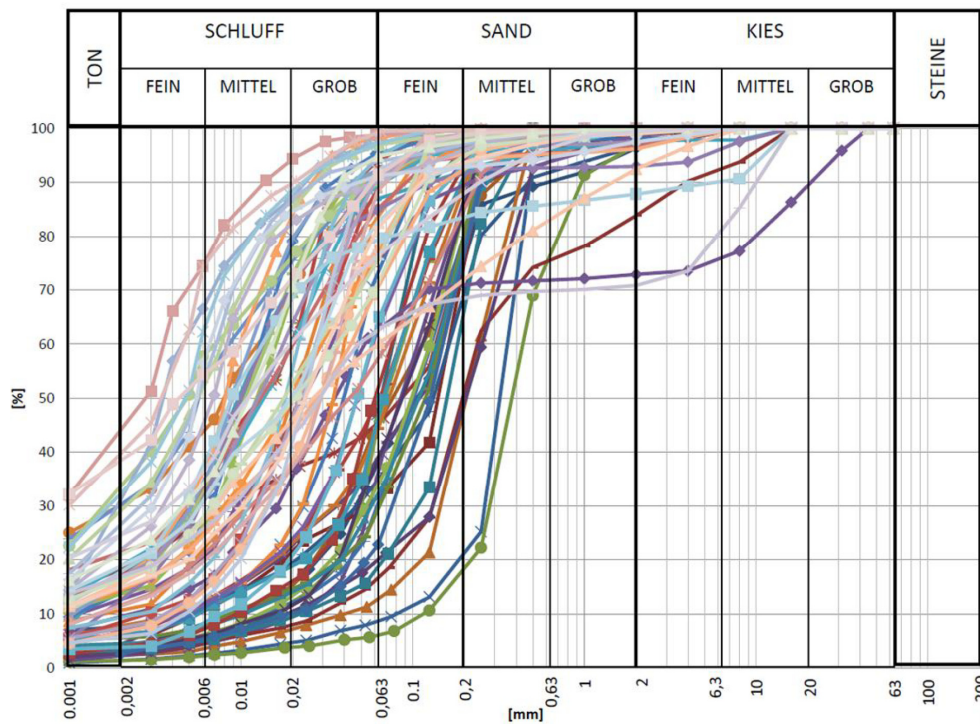


Abb. 2.5: Korngrößenverteilungen miozäner Wechsellagerungen aus der weiteren Projektumgebung aus [46]

Die Erklärung zu den bodenphysikalischen Eigenschaften gemäß Geotechnischem Gutachten [46] sind:

„Für den Donauschotter wurden mehrere Korngrößenverteilungskurven aus dem weiteren Projektgebiet in einer Abbildung zusammengefasst um die relative Gleichförmigkeit und Vergleichbarkeit zu illustrieren.“

„Für die miozänen Wechsellagerungen wurden mehrere Korngrößenverteilungskurven aus dem weiteren Projektgebiet in einer Abbildung zusammengefasst um die relative Gleichförmigkeit und Vergleichbarkeit zu illustrieren.“

„Aus den beiden Diagrammen ist eindeutig der große Unterschied in den beiden Bodenarten ersichtlich. Handelt es sich beim Donauschotter um nicht bindige grobkörnige Sande und Kiese so sind die miozänen Wechsellagerungen bindig, schluffdominiert und nur sehr feinkörnig. Auch ist, alleine durch die Korngrößenverteilung erkennbar das die Durchlässigkeiten stark variieren. Wesentliche Eigenschaften als Baugrund, wie z.B. die Mantelreibung sind ursächlich von der „Verzahnung“ des Bauteiles mit dem Boden abhängig.“

2.4.3 Charakteristische Bodenkennwerte

Tab. 2.2: Charakteristische Wichte und Scherparameter aus [46] (adaptiert)

Schichtpaket		γ_k [kN/m ³]	γ'_k [kN/m ³]	φ_k [°]	c_k [kN/m ²]
A	Anschüttung, Mutterboden	19	-	25	0
B	Ausedimente	18,5	10,5	25	10
C	Donauschotter (sandiger Kies)	21	12	35	0
D	Miozäne Wechsellagerung	20	10	25	15

2.4.4 Grundwasser

Da Informationen über das Grundwasser vorkommen und dessen Fließrichtung von Interesse sind für die Energiepfahlversuche, wird auf die Verhältnisse vor Ort hier noch kurz eingegangen.

In den Ausedimenten ist noch kein Grundwasser vorhanden. In 4-7m Tiefe ist dann der erste freie Grundwasserspiegel zu finden. Die Donauschotter sind somit meist Grundwasser gefüllt, des hängt jedoch von der Tiefe der Ausedimente ab. Ab einer Tiefe von 10-15m, in die der Donauschotter reicht, sind die miozänen Schichten zu finden. Diese haben wie zuvor erwähnt oft Wechsellagerungen. In den sandigen Schichten ist gespanntes Grundwasser anzutreffen, aufgrund der höheren Dichte des umgebenden Materials (sandig-tonig). Die Durchlässigkeit des Miozän hängt stark vom Sandanteil bzw. Schluffanteil der jeweiligen Schichten ab, jedoch sollten die miozänen Wechsellagerungen nicht als absoluter Stauer betrachtet werden. Dieses gespannte Grundwasser kann bis zum freien Grundwasserspiegel im Donauschotter aufspiegeln. [59]

2.5 Projektüberblick

(Dieser Abschnitt stammt von Johannes Meusburger [JM]; siehe Kapitel 1 bzw. **Tab. 1.1**)

Das Projektgebiet des Forschungsprojektes „Unteres Hausfeld“ befindet sich im 22. Wiener Gemeindebezirk. Die Versuchsanordnungen erfolgten südlich der Ostbahn-Strecke 117. In diesem Bereich verläuft die Guido-Lammer-Gasse parallel zum Versuchsfeld und der Contiweg verläuft westlich davon. Im Osten wird das Gebiet durch die Anschlussbahn des Logistikzentrums Hirschstetten begrenzt.

Die unterschiedlich hergestellten Prüfkörper (Gründungselemente) wurden auf dem Versuchsfeld zwei Prüffeldern zugeordnet: zum einen dem Prüffeld 1 im Westen und zum anderen dem Prüffeld 2 im Osten (siehe Abb. 2.6).

Im Prüffeld 1 wurden Großbohrpfähle im Miozän und Verpressanker im Kies auf ihre Tragfähigkeit geprüft. Außerdem wurden die abdichtenden Eigenschaften von DSV-Körpern qualitativ bewertet. Weiters wurden die Auswirkungen der Bauverfahren auf die chemischen Eigenschaften des Grundwassers im und um den Baukörper untersucht [69].

Im Prüffeld 2 wurden Großbohrpfähle im Kies, Mikropfähle im Kies und Miozän und DSV-Säulen auf ihre Tragfähigkeit geprüft. Außerdem fanden in Prüffeld 2 die Horizontalverschiebeversuche und die Energiepfahlversuche statt [69].

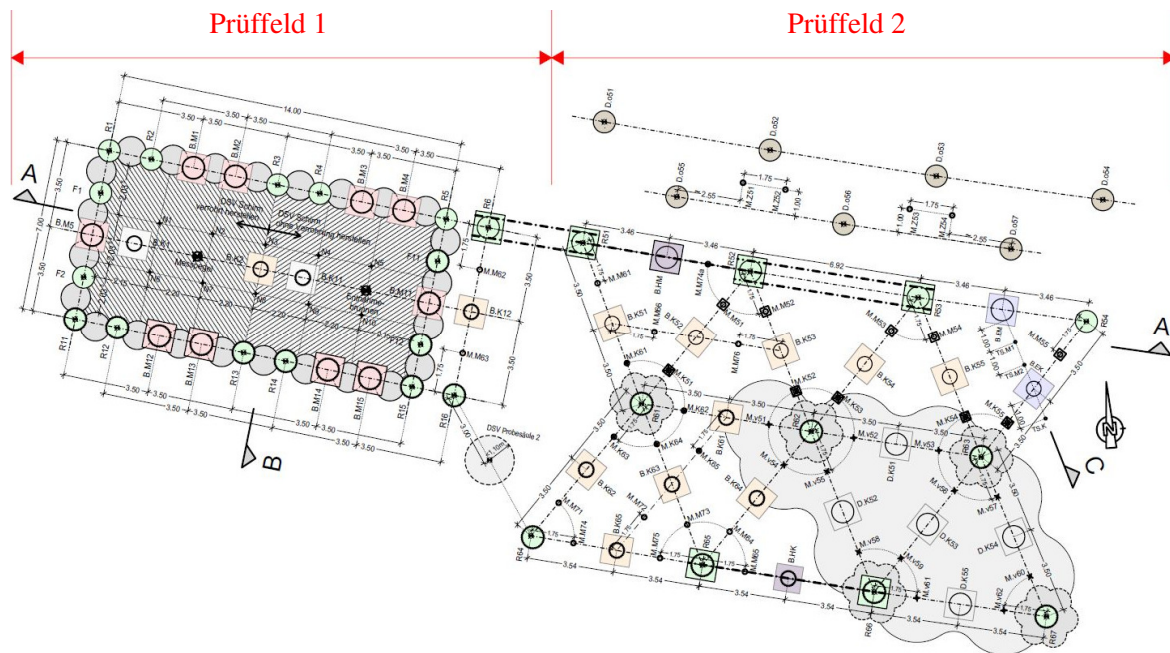


Abb. 2.6: Lageplan von Prüffeld 1 und 2 des Forschungsprojektes „Unteres Hausfeld“ aus [46] (adaptiert)

2.6 Versuchsvariationen

2.6.1 Großbohrpfähle

Die Prüfungen an den Großbohrpfählen wurden als statische Pfahlprobelastung mit Belastung in axialer Richtung und Druckbelastung ausgeführt [62].

Die Großbohrpfähle wurden im

- SOB-Verfahren (Schneckenortbetonpfähle) und
- mittels verrohrt hergestellter Bohrung

ausgeführt. Die unterschiedlichen Herstellungsarten sollen Unterschiede im Tragverhalten aufzeigen. Der Pfahlmantel und die Pfahlsole wurden in den folgenden zwei verschiedenen Bodenarten geprüft:

- Quartäre Sedimente („Donauschotter“)
- Miozäne Sedimente („Wiener Tegel“)

Bei Pfählen mit der Prüfstrecke im Miozän wurde die Mantelreibung in der darüberliegenden Kies-schicht mittels Doppelmantelrohr überbrückt.

Je Herstellungsverfahren und Bodenart wurden jeweils fünf Elemente hergestellt. Somit können die Streuungsfaktoren gemäß ÖNORM B 1997-1-3 [32] auf das Minimum von $\xi_1 = \xi_2 = 1,0$ reduziert werden. Es wurden insgesamt 55 Stück, davon sind 27 Füll- und Reaktionspfähle, hergestellt.

Im Prüffeld 1 wurden Großbohrpfähle getestet, die mit einer Länge von 17 m bis in die miozänen Sedimente reichen. Bei diesem Versuch können somit die ermittelten Pfahlwiderstände dem Miozän zugeordnet werden. 4 Prüfpfähle wurden mit abweichenden (CO_2 -armen) Zementen hergestellt, um allfällige Abweichungen im Tragverhalten, wie z.B. aufgrund eines anderen Eindringverhaltens in den Kiesen, zu ermitteln. In diesem Prüffeld wurden auch Füllpfähle für die geplante Schachtwand hergestellt. In der nachfolgenden Tab. 2.3 sind die hergestellten Großbohrpfähle, die im Prüffeld 1 untersucht wurden, aufgelistet.

Tab. 2.3: Anzahl hergestellter Bohrpfähle im Prüffeld 1 aus [46]

Herstellverfahren	Miozän	Sonderversuch Kies (Zement)
Herstellung verrohrt	5	2
Herstellung SOB	5	2

Im Prüffeld 2 wurden die Pfähle getestet, die mit einer weitaus kürzeren Länge von 7 m nur in die Kiesschicht einbinden. Sie weisen auch einen weitaus kleineren Durchmesser von 60 cm auf im Gegensatz zu den langen Miozän Pfählen, die einen Durchmesser von 90 cm aufweisen. Diese Pfähle enden über der Miozänschicht und sind im oberflächennahen Bereich mit einer Ummantelung vor oberflächennahen Einflüssen geschützt. Im Prüffeld 2 wurden unter anderem auch 2 Großbohrpfähle für die Energiepfahlversuche hergestellt, um die Auswirkung der thermischen Belastung auf die Tragfähigkeit zu ermitteln. In der nachfolgenden Tab. 2.4 sind die hergestellten Großbohrpfähle, die im Prüffeld 2 untersucht wurden, aufgelistet.

Tab. 2.4: Anzahl hergestellter Bohrpfähle im Prüffeld 2 aus [46]

Herstellverfahren	Miozän	Sonderversuch Kies (Zement)
Herstellung verrohrt	-	5
Herstellung SOB	-	5
Energiepfahl	1	1
Horizontalverschiebeversuch	1	1

Die Reaktionspfähle, die sowohl im Prüffeld 1 als auch 2 hergestellt wurden, dienen der möglichst verformungsarmen Einleitung der Reaktionskräfte in den Baugrund. Die Reaktionspfähle werden somit auf Zug belastet [69].

Die Belastung wird mit einem Hydraulikzylinder (Presse) axial und zentrisch auf den Prüfpfahl aufgebracht. Diese Belastungseinrichtung wurde in der Regel so bemessen, dass die maximale erforderliche Prüfkraft aufbringbar ist, um ein Versagen des Pfahls herbeizuführen.

Aus der Kraftmessung am Pfahlkopf erhält man den gesamten Pfahlwiderstand R und mittels der Instrumentierung des Pfahlschaftes lassen sich daraus Pfahlfußwiderstand R_b und Pfahlmantelwiderstand R_s getrennt ermitteln. Das folgende Diagramm zeigt eine Widerstands-Setzungslinie eines Pfahls aus [23].

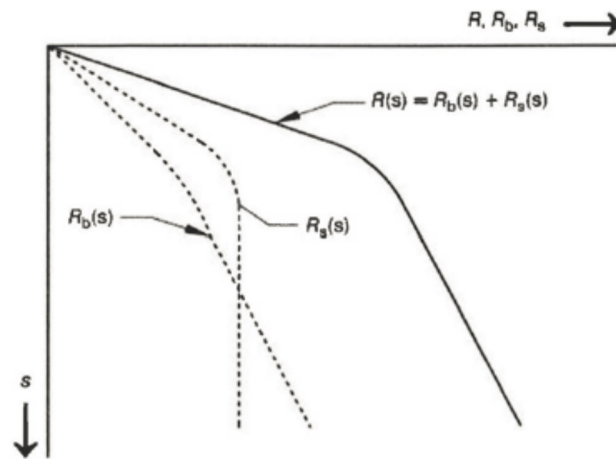


Abb. 2.7: Widerstands-Setzungslinien Diagramm aus [23]

Für die Verschiebungsmessung am Pfahlkopf wurden 3 vertikale Wegaufnehmer im Bereich des Pfahlkopfes angeordnet. Zusätzlich wurden auch zwei in einem Winkel von 90° horizontale Wegaufnehmer positioniert, um eventuelle Exzentrizitäten bzw. unplanmäßige Horizontalverformungen zu messen. Zur Erfassung des Pfahlfußwiderstandes wurde bei Pfählen vom Typ 1 jeweils eine Druckmessdose am Pfahlfuß installiert. Dehnungsaufnehmer sowie Kettenextensiometer wurden verwendet, um den Pfahlmantelwiderstand zu ermitteln.

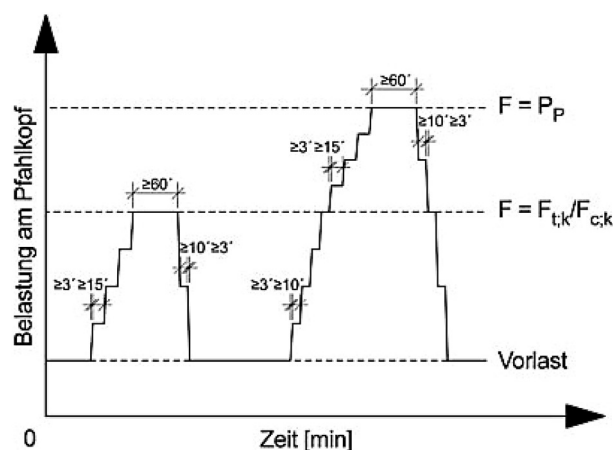


Abb. 2.8: Belastungsstufen aus [23]

Wie auch in den anderen Prüfungen des Forschungsprojekts wird hierbei die Last in 2 Zyklen aufgebracht. Wie in der Abb. 2.8 zu sehen ist, gibt es somit einen Erstbelastungszyklus, bei dem der Pfahl mit dem charakteristischen Wert der Pfahlbeanspruchung $F_{c;k}$ (Gebrauchslast) belastet wird. Der zweite Zyklus ist der Widerbelastungszyklus, bei dem der Pfahl mit der maximalen Last, der Prüflast P_P , die zum Versagen des Pfahls führt, belastet wird.

Es wurden Mindestbeobachtungszeiten für jede Laststufe definiert, wie in Abb. 2.8 zu sehen ist. Die Laststufe muss generell solange konstant gehalten werden, bis der Verschiebungszuwachs auf 0,1 mm innerhalb von 20 min zurückgegangen ist. Die Mindestbeobachtungsdauer einer Laststufe bei Erstbelastung bis zum Erreichen der charakteristischen Pfahlbeanspruchung $F_{c;k}$ ist 15 Minuten. In der Laststufe $F_{c;k}$ selbst sind längere Mindestbeobachtungszeiten gefordert, damit das Langzeitverhalten und allfällige Kriechumlagerungen erfasst werden können. Im Kies ist eine Mindestbeobachtungszeit der Laststufe $F_{c;k}$ von 60 Minuten und in den miozänen Sedimenten von 180 Minuten erforderlich. Nachdem die Pfahlbeanspruchung $F_{c;k}$ erreicht wurde, wird der Pfahl in zwei Stufen bis auf die Vorlast entlastet.

Im zweiten Zyklus, der Widerbelastung, darf die Beobachtungsdauer bei den Laststufen ab der charakteristischen Pfahlbeanspruchung reduziert werden. Ist der Verschiebungszuwachs unter 0,1 mm innerhalb von 5 min abgeklungen, darf auf die nächste Laststufe angefahren werden. Die Mindestbeobachtungszeiten sind jedoch laut Abb. 2.8 zu beachten. Diese sind bis zur charakteristischen Pfahllast $F_{c;k}$ 10 Minuten und darüber 15 Minuten bei der Widerbelastung. Nach der Entlastung bis auf die Vorlast ist der Versuch beendet [62].

2.6.2 Mikropfähle

(Dieser Abschnitt stammt von Johannes Meusburger [JM]; siehe Kapitel 1 bzw. **Tab. 1.1**)

In diesem Abschnitt wird das Gebrauchstauglichkeitsverhalten von Mikropfählen im repräsentativen Wiener Baugrund untersucht. Es wurden insgesamt 27 Pfahlprobelastungen durchgeführt, um so die bei der Bemessung von Mikropfählen aufzuschlagenden Modellfaktoren laut ÖNORM B 1997-1-3 [32] reduzieren zu können.

Die ÖNORM B 1997-1-3 [32] schreibt 5 Probelastungen je Pfahltyp vor. Somit ergeben sich insgesamt 25 Probelastungen von Mikropfählen [62]. Nachträglich wurden noch zwei Mikropfähle hergestellt und geprüft. Die Gründe für die Herstellung der zusätzlichen Pfähle sind in Kapitel 5.3.4 [der Diplomarbeit von JM] beschrieben. In Tab. 2.5 sind die jeweiligen Prüfvariationen dargestellt.

Tab. 2.5: Prüfvariationen Mikropfähle nach [62]

Bodenart im Lastabtragungsbereich	Art der Beanspruchung
Quartäre Sedimente („Donauschotter“, sandiger Kies)	<ul style="list-style-type: none"> • Axiale Druckbeanspruchung <ul style="list-style-type: none"> ◦ ohne Nachverpressung • Axiale Zugbeanspruchung <ul style="list-style-type: none"> ◦ ohne Nachverpressung
Miozäne Sedimente („Tegel“, tonige Schluffe bis Feinsande)	<ul style="list-style-type: none"> • Axiale Druckbeanspruchung <ul style="list-style-type: none"> ◦ ohne Nachverpressung • Axiale Zugbeanspruchung <ul style="list-style-type: none"> ◦ ohne Nachverpressung ◦ mit Nachverpressung

Die Traglastprüfungen beziehen sich auf die in Tab. 2.5 genannten Bodenschichten. Um diese Schichten ansprechen zu können, wurde die Mantelreibung in der anderen Schicht durch ein Hüllrohr ausgeschaltet [69]. Jene Pfähle, deren Lastabtragung im quartären Kies untersucht wurden, weisen eine gesamte Pfahllänge von 7 m auf, jene, deren Lastabtragung im miozänen Sand/Schluff untersucht wurden, weisen eine gesamte Pfahllänge von 17,8 m auf. Die Prüfstrecke im Kies betrug dabei 4 m und die Prüfstrecke im Miozän 7 m.

Die Instrumentierung der Pfähle erfolgte gemäß den Anforderungen der EA-Pfähle [23]. Die hohe Anforderungsstufe der EA-Pfähle beinhaltet folgende Messdaten:

- Erfassung des Pfahlwiderstandes und des Pfahlmantelwiderstandes
 - Aufgebrachte Belastung
 - Verschiebung des Pfahlkopfes
 - Pfahldehnung
 - Zeit

Die Prüfkraft wurde zentrisch und axial mittels Hydraulikzylinder aufgebracht. Die maximal mögliche Kraft und somit der notwendige Kolbenhub wurde auf die erforderliche maximale Prüfkraft, die

zu erwartenden Verschiebungen des Pfahles, die Beanspruchungsrichtungen und die Widerlagerkonstruktion angepasst. Die Pfahlbelastung wurde dabei in zwei Zyklen aufgebracht:

- Erstbelastung
- Entlastung
- Wiederbelastung
- Entlastung

Die maximale Last des ersten Zyklus entspricht dem charakteristischen Wert der Pfahlbeanspruchung $F_{c,k}$ (Gebrauchslast). Die maximale Last des zweiten Zyklus entspricht der Prüflast P_p . Während der Beobachtungsdauer einer Laststufe wurde die Last konstant gehalten.

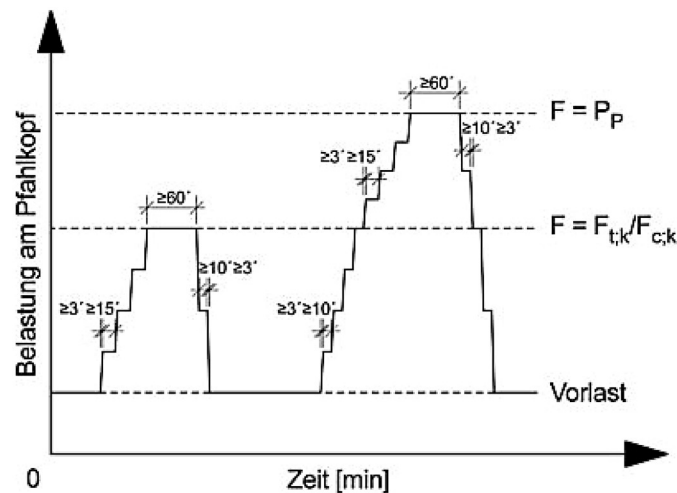


Abb. 2.9: Belastungsstufen aus [23]

Um die Pfahlkopfverschiebung ermitteln zu können, wurden zwei voneinander unabhängige Messsysteme verwendet: zum einen induktive Wegaufnehmer mit einer Messgenauigkeit von 0,001 mm und zum anderen ein Präzisionsnivellelement für periodische Kontrollmessungen der Messbrücke. Insgesamt wurden drei Wegaufnehmer in vertikaler und zwei in horizontaler Richtung angeordnet.

Die Pfahldehnung wurde in fünf verschiedenen, über die Pfahlänge verteilten Querschnitten mittels Bewehrungssensoren gemessen. Mit diesen Dehnungen entlang des Verpresskörpers wurde der Pfahlmantelwiderstand rechnerisch bestimmt [62].

2.6.3 Düsenstrahlkörper

(Dieser Abschnitt stammt von Christina Marzy [CM]; siehe Kapitel 1 bzw. Tab. 1.1)

Im Rahmen des Forschungsprojekts werden die Herstellbarkeit und das Tragverhalten von verschiedenen Düsenstrahlkörpern im Wiener Baugrund untersucht. Dazu wurde das Düsenstrahlverfahren (DSV) in den gegenständlichen Versuchsfeldern für die Herstellung folgender Bauteile verwendet:

- Prüffeld 1:
 - Zwickelabdichtung und zwischen den Großbohrpfählen
 - Hoch liegende DSV-Dichtsole, welche mit Zugverpresspfählen verankert wird
- Prüffeld 2:
 - Pfahlähnliche, unbewehrte Tragelemente (DS-Säulen)

- Horizontaler DSV-Dichtschild zur Verankerung der Zugpfähle

Eine Instrumentierung und Probelastung der Düsenstrahlkörper im Prüffeld 1 ist nicht vorgesehen. Im Folgenden werden die Elemente im Prüffeld 2 näher erläutert.

2.6.3.1 Düsenstrahlsäulen (DS-Säulen)

Im quartären Kies wurden 12 DS-Säulen im Sinne pfahlähnlicher Tragelemente mit einem planmäßigen Durchmesser von $D = 90$ cm und einer Länge von $L = 3$ m hergestellt. Dabei wurden jeweils zwei Säulen mit gleicher Zementsorte ausgeführt. Dadurch sollten die Herstelleigenschaften der DSV-Körper in Abhängigkeit der angewandten Zementsorten geprüft werden.

Zur Feststellung der Reichweite des DSV während der Herstellung und somit des Säulendurchmessers wurden zwei Verfahren angewandt: die thermische Reichweitenmessung (Verfahren *Meinhard*) und die Reichweitenmessung mittels Pegelstangen.

Ein Teil der Säulen wurde einer statischen Probelastung im Sinne pfahlähnlicher Tragelemente in Anlehnung an die bestehende Norm unterzogen. Die ÖNORM B 1997-1-3 – Anhang B [32] empfiehlt, für die Vorbereitung, Durchführung und Dokumentation der Ergebnisse von Pfahlprobelastungen das Merkblatt „Empfehlungen für statische und dynamische Probelastungen“ aus dem Jahr 1988 heranzuziehen. Als Nachfolgewerk dieses Merkblattes können die „Empfehlungen des Arbeitskreises Pfähle – EA Pfähle“ [23] angesehen werden, welche im Jahr 2012 erschienen sind. Diese werden von der deutschen Gesellschaft für Geotechnik (DGGT) herausgegeben. Die Vorgaben der EA-Pfähle wurden im vorliegenden Projekt herangezogen, da bis dato noch keine entsprechende europäische Prüfnorm erschienen ist.

Die Versuchsdurchführung erfolgte analog der in den vorigen Kapiteln genannten Prüfkörper und in Anlehnung an die EA Pfähle. Auch hier wurden zur Erfassung des Pfahlwiderstandes und des Pfahlmantelwiderstandes folgende Messdaten aufgezeichnet:

- Aufgebrachte Prüfkraft
- Verschiebungen des Pfahlkopfes
- Stauchungen der DS-Säulen
- Zeit

Das Aufbringen des Prüfdrucks erfolgte axial mittels eines Hydraulikzylinders in 2 Zyklen. Dabei entsprach die maximale Last im ersten Zyklus dem charakteristischen Wert der Pfahlbeanspruchung $F_{c,k}$. Die maximale Last des zweiten Zyklus (Wiederbelastung) entsprach der Prüflast P_p und sollte ein Versagen des Prüfkörpers verlässlich herbeiführen [62].

Während der Beobachtungsdauer der einzelnen Laststufen wurde die Kraft konstant gehalten. Die Dauer der Laststufen war von einer vorgegebenen Mindestzeit sowie vom Verschiebungszuwachs abhängig. Im Falle von Kriecherscheinungen wurden die Beobachtungszeiten verlängert, um das Langzeitverhalten erfassen zu können.

Die Instrumentierung der Probekörper war aufgrund des Herstellungsverfahrens ohne den Einbau einer Bewehrung eingeschränkt. Die DS-Säulen selbst wurden im Wesentlichen nur mit Lehrrohren versehen, in welchen mittels Kettenextensometer die Stauchungen während der Belastung gemessen werden. Damit erfasste man sowohl die integrale Verformung jedes Säulenabschnitts als auch die Gesamtverformung der Säule, durch welche der Mantelwiderstand rechnerisch bestimmt werden konnte. Die Verschiebungsmessung am Säulenkopf erfolgte durch den Einsatz von induktiven Wegaufnehmern, welche die vertikalen und horizontalen Kopfverschiebungen kontinuierlich aufzeichneten.

Bei der Auswertung und Interpretation der Messergebnisse der Düsenstrahlsäulen sind naturgemäß Einschränkungen zu erwarten. Diese sind durch die unregelmäßige Form der Säulen sowie die Verzahnungseffekte an der Oberfläche bedingt.

Es erfolgte nachträglich eine photogrammetrische Oberflächenvermessung an einigen freigelegten Säulen. Dies sollte einen Bezug der Oberfläche einerseits zur Zementsorte und andererseits zur Interpretation des Tragverhaltens der Säulen erleichtern.

2.6.4 Verankerungen

(Dieser Abschnitt stammt von Johannes Meusburger [JM]; siehe Kapitel 1 bzw. **Tab. 1.1**)

Allgemein werden für Verankerungselemente die Bezeichnungen laut ÖNORM B 1997-1-1 [31] verwendet:

4.6 Verankerungen

4.6.1 Allgemeines

Für Verankerungen von Baukonstruktionen für Baugrubensicherungen, Stützbauwerke und Hangsicherungen werden folgende Konstruktionselemente verwendet:

- Verpressanker: Verpressanker sind vorgespannte oder nicht vorgespannte Konstruktionselemente mit einer freien Länge des Zugliedes gemäß ÖNORM EN 1537.
- Verpresspfähle: Verpresspfähle sind verpresste Mikropfähle gemäß ÖNORM EN 14199 oder verpresste Verdrängungspfähle gemäß ÖNORM EN 12699, die als Verankerungen auf Zug beansprucht werden und als Einzeltragglieder wirken.
- Nägel: Nägel sind stabförmige Konstruktionselemente gemäß ÖNORM EN 14490, die als Bodenbewehrung mit dem umgebenden Baugrund einen Verbundkörper (Bodenvernagelung) bilden. Wesentlicher Parameter ist der Abstand der Nägel untereinander. Dieser Abstand ist ausreichend klein zu wählen, um eine monolithische Gesamttragwirkung sicherzustellen. Üblicherweise ist der horizontale Abstand im Lockergestein mit etwa 1,5 m zu begrenzen. Nägel wirken immer als Kollektiv.

Abb. 2.10: Definition von Verankerungen nach ÖNORM B 1997-1-1 aus [31]

An den Verpressankern wurden Untersuchungsprüfungen laut ÖNORM EN 1537 [35] durchgeführt. Dabei wurden folgende Parameter ermittelt:

- Herauszieh Widerstand des Verpressankers an der Baugrund-Verpressmörtel-Fuge
- Kriechverhalten des Ankers bis zum Bruch
- kritische Kriechkraft P_c
- rechnerische freie Stahllänge L_{app}
- rechnerische mittlere Mantelreibung in der Haftstrecke
- Reibungsverlust ΔP_f

Aufgrund von geometrischen Randbedingungen im Versuchsfeld wurden verschiedene Variationen hergestellt, um eine voneinander unbeeinflusste Haftstrecke sicherzustellen. Der Mindestabstand zwischen den Haftstrecken beträgt 1,5 m. Die Haftstrecke befindet sich bei allen Anker im quartären sandigen Kies. Es wurden folgende Variationen ausgeführt:

- Ankersystem
 - Litzenanker
 - Stabanker
- Ankerlänge/Haftstreckenlänge
 - $L = 22,65$ m (4 m Haftstrecke)
 - $L = 22,15$ m (6 m Haftstrecke)

- $L = 11,65$ m (4 m Haftstrecke)
- $L = 13,10$ m (6 m Haftstrecke)
- Ankerneigung
 - $\alpha = 7,0^\circ$
 - $\alpha = 17,5^\circ$
 - $\alpha = 35,0^\circ$

Es wurden für jedes Ankersystem und einer Haftstrecke von 4 m und 6 m jeweils fünf Anker geprüft. Somit ergibt sich eine Gesamtanzahl von 20 Stück. Für die Erstellung der Prüfabläufe und die Bestimmung der Prüfkraft wurden die beiden Normen ÖNORM EN ISO 22477-5 [38] und ÖNORM EN 1537 [35] herangezogen. Bei der ÖNORM EN ISO 22477-5 [38] handelte es sich zum Zeitpunkt der Versuchsdurchführungen noch um einen Normenentwurf.

Bei der Ankerprüfung wurden folgende Parameter elektronisch erfasst:

- Pressenkraft
- Ankerkopfverschiebung
- Zeit

Die Prüfkraft wurde wie bei den Mikropfahlversuchen zentrisch und axial mittels einer hydraulischen Presse aufgebracht. Die maximal mögliche Kraft und der damit zusammenhängende Kolbenhub wurden auf die erforderliche maximale Prüfkraft, die erwartete Ankerkopfverschiebung und die Widerlagerkonstruktion ausgelegt.

Für die Messung der axialen Ankerkopfverschiebung kam folgende Messeinrichtung zum Einsatz:

- Kontinuierlich aufzeichnender induktiver Wegaufnehmer (Messgenauigkeit 0,01 mm)
- Periodische Kontrolle mittels geodätischer Messung

Im Zuge der Untersuchungsprüfung wurde das in Österreich gebräuchliche Prüfverfahren 1 angewendet, bei dem der Anker von der Vorlast in mindestens sechs Zyklen bis zur Prüflast belastet wird. Dabei wurde für jeden Zyklus die Verschiebung des Ankerkopfes bei der maximalen Spannkraft über einen festgelegten Zeitraum gemessen.

2.6.5 Sonderversuche

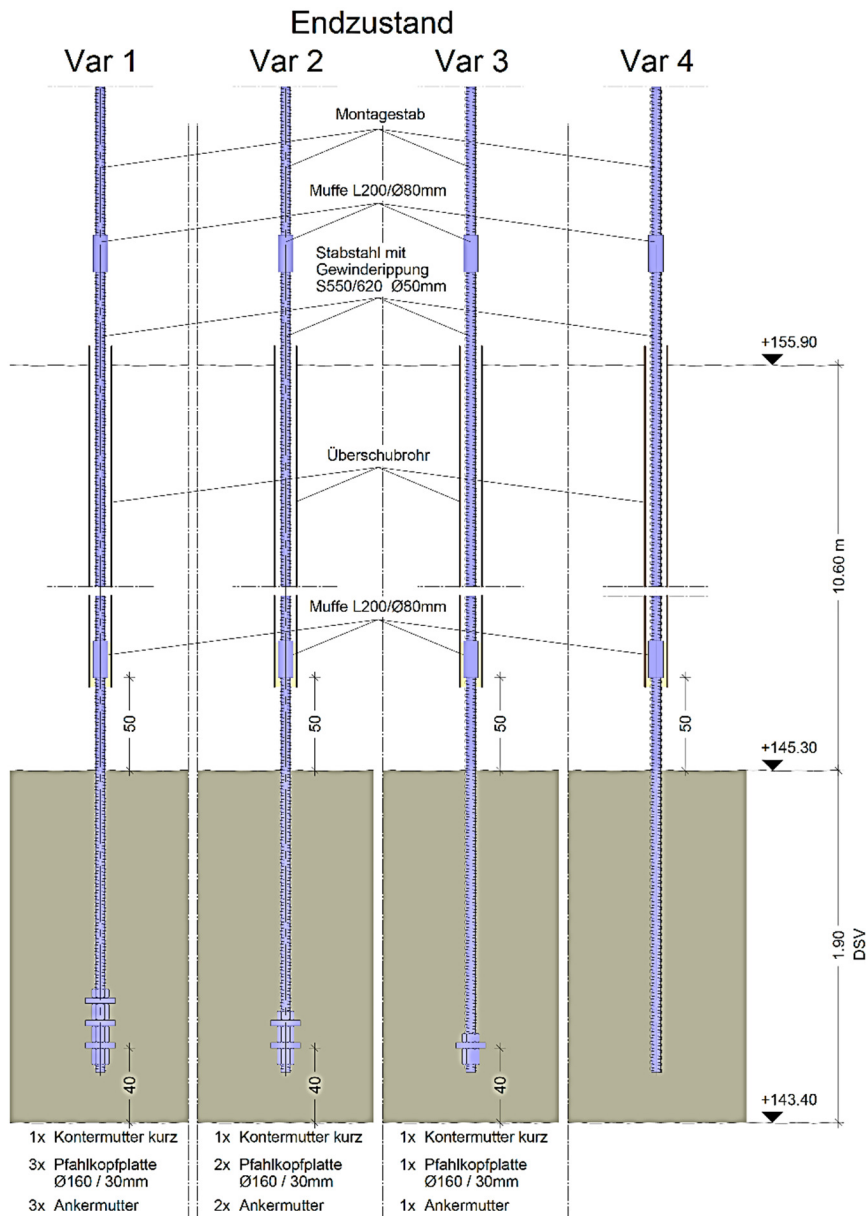
2.6.5.1 Rückverankerte-Düsenstrahl-Dichtsohle (Herausziehversuche)

(Dieser Abschnitt stammt von Christina Marzy [CM]; siehe Kapitel 1 bzw. Tab. 1.1)

Um das Trag- und Verankerungsverhalten von Ankerkörpern in Düsenstrahlkörpern zu erproben, wurden im Zuge des Forschungsprojekts Herausziehversuche an Mikropfählen durchgeführt. Bei diesen Versuchen wurde ausschließlich die Verankerung der Kopfausbildung in einer Düsenstrahlsohle untersucht. Zu diesem Zweck wurden die Zugpfähle - entgegen ihrer üblichen Ausführung - von der DS-Sohle nach oben ausgerichtet.

Es wurden 12 Mikropfähle ca. 13,6 m in das Miozän abgeteuft. Die Pfahlköpfe der Zugglieder wurden mit vier unterschiedlichen Verankerungskörpern ausgeführt, wobei jeweils 3 Zugpfähle eines Typs hergestellt wurden. Wie in Abb. 2.11 ersichtlich, reichte die Variation der Pfahlkopfausführungen von der Verankerung mit 3 Kopfplatten bis zur Ausbildung ohne Kopfplatte.

Die Einbindung der Zugpfähle erfolgte durch einen nachträglich hergestellten DSV-Schirm im Miozän. Die Einbindelänge betrug dabei ca. 1,50 m. Um das Tragverhalten der Ankerkörper im DSV-Körper gesondert betrachten zu können, wurde die nicht gewollte Mantelreibung im Baugrund durch ein Hüllrohr unterbunden.



Das Trag- und Verankerungsverhalten der Fuge zwischen Dichtsohle und Zugglied sollte anhand von Herausziehversuchen und entsprechender Messwerterfassung ermittelt werden. Die Versuchsdurchführung erfolgte, analog den oben genannten normativen Vorgaben, in Anlehnung an die EA-Pfähle [23]. Hier wurden jedoch zur Erfassung des Pfahlwiderstandes nur folgende Messdaten aufgezeichnet:

- Aufgebrachte Prüfkraft
- Verschiebungen des Pfahlkopfes
- Zeit

Das Aufbringen des Prüfdrucks erfolgte axial mittels eines Hydraulikzylinders in 2 Zyklen. Dabei entsprach die maximale Last im ersten Zyklus dem charakteristischen Wert der Pfahlbeanspruchung $F_{c,k}$. Die maximale Last des zweiten Zyklus (Wiederbelastung) entsprach der Prüflast P_p und sollte ein Versagen des Prüfkörpers verlässlich herbeiführen [62].

Während der Beobachtungsdauer der einzelnen Laststufen wurde die Kraft konstant gehalten. Die Dauer der Laststufen war von einer vorgegebenen Mindestzeit sowie vom Verschiebungszuwachs abhängig. Im Falle von Kriecherscheinungen wurden die Beobachtungszeiten verlängert, um das Langzeitverhalten erfassen zu können.

Die Verschiebungsmessung am Pfahlkopf erfolgte durch den Einsatz von induktiven Wegaufnehmern, welche die axialen Pfahlkopfverschiebungen kontinuierlich aufzeichneten.

2.6.5.2 Energiepfähle

Bei den Versuchen mit Energiepfählen sollen die thermischen Einflüsse auf das Tragverhalten von Pfählen bestimmt werden. Dafür wurden, genau wie bei den normalen Großbohrpfählen, zwei Großbohrpfähle mit Verrohrung hergestellt. In den Bereichen, in denen keine Mantelreibung wirken sollte, wurden, wie zuvor erklärt, Doppelwandrohre eingebaut. Einer der Pfähle band dabei im Miozän (B.EM) ein und der andere Pfahl in den Kieskörper (B.EK). Die Energiepfähle wurden im Prüffeld 2 hergestellt und im Nahbereich wurden noch drei Zusatzbohrungen abgeteuft, die zur Temperaturmessung dienten. Der Pfahl B.EM wurde im unteren Bereich mit 8 Absorberleitungen ausgestattet und der Pfahl B.EK mit 6 Absorberleitungen. Diese wurden am Bewehrungskorb aufgebracht, um den Pfahl mit Wärme und Kälte über einen Wärmetauscher zu belasten. In der folgenden Abb. 2.12 ist der Querschnitt des Pfahls mit der Anordnung der Absorberleitungen zu sehen [69].

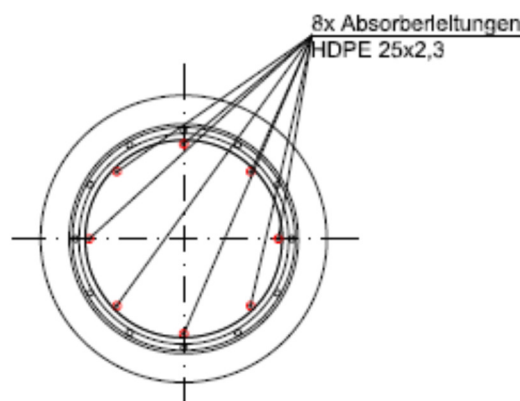


Abb. 2.12: Querschnitt Pfahl B.EM mit Absorberleitungen aus [28]

Es wurden auch Reaktionspfähle hergestellt, um die Belastung aus der hydraulischen Presse in den Baugrund abzuleiten. Im Unterschied zu den anderen Probelastungen wurde die Presse aber nur noch am Ende des Versuchs, somit bei der Belastung bis zum Versagen des Pfahls, verwendet. Da die Versuchsdauer je Pfahl rund drei Monate betrug und die Laststufen mehrere Tage konstant gehalten werden mussten, wurde eine Belastungseinrichtung mit Totlast gewählt. Die hydraulischen Pressen hätten nachjustiert werden müssen und die Last hätte nicht über mehrere Stunden konstant gehalten werden können. In der folgenden Abb. 2.13 ist der Prüfaufbau mit Totlast zu sehen.

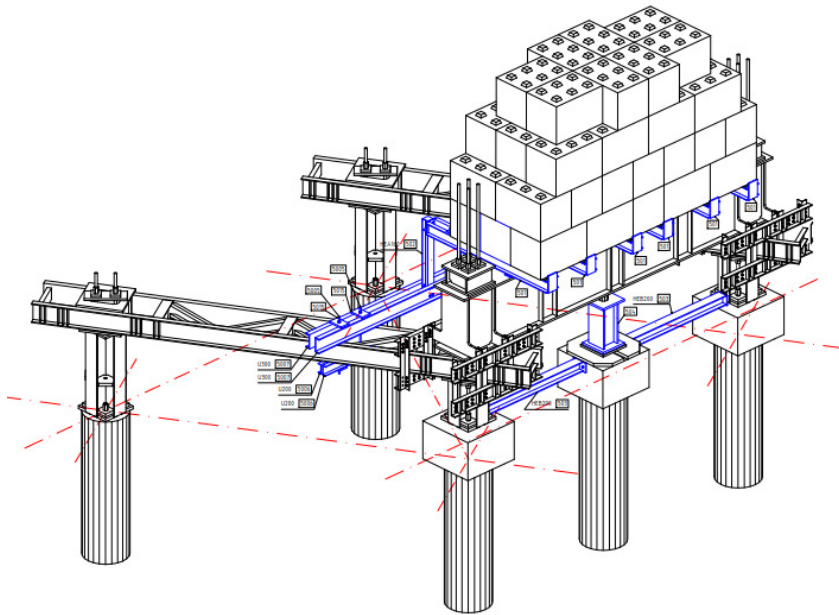


Abb. 2.13: Probelastung mit Totlast [28]

Die Instrumentierung der Energiepfähle ist im Wesentlichen analog zu der in den Großbohrpfählen, jedoch wurde diese noch mit 3 Messsystemen ergänzt. Es wurden Bewehrungssensoren, Kettenextensometer und Dehnungssensoren zur Aufzeichnung der Dehnungen sowie mehrere Temperatursensoren und ein Glasfasermesssystem installiert. Der Pfahl wurde im Laufe des Versuchs nicht nur mechanisch, sondern auch thermisch belastet. Es wurden mehrere Lastzyklen durchgeführt und bestimmte Laststufen dann für mehrere Tage gehalten. Während eine Laststufe konstant gehalten wurde, wurde der Pfahl entweder aufgeheizt oder abgekühlt. Diese Last- und Temperaturwechsel wurden mehrmals wiederholt und abschließend der Pfahl zu Bruch gefahren.

2.6.5.3 Horizontalverschiebeversuche

(Dieser Abschnitt stammt von Alexander Stöglehner [AS]; siehe Kapitel 1 bzw. **Tab. 1.1**)

Die beiden Horizontalverschiebeversuche waren die ersten von einer Reihe von Sonderversuchen zur Untersuchung spezieller Fragestellungen. In zwei separaten Versuchen wird dabei jeweils ein Großbohrpfahl statisch probelastet, während wechselseitig zyklische (nicht dynamische) horizontale Verschiebungen am Pfahlkopf eingepreßt werden. Damit soll untersucht werden, ob horizontale Pfahlkopfbeanspruchungen, wie sie beispielsweise infolge jahreszyklischer Temperaturschwankungen bei integralen Brücken auftreten, einen Einfluss auf das vertikale Tragverhalten haben. Gleichzeitig lieferten die Versuche Aussagen über die Bettungseigenschaften im vorliegenden, repräsentativen Wiener Baugrund [63].

Die beiden Probepfähle befinden sich im Prüffeld 2 der Versuchsbaustelle. Abb. 2.14 zeigt die Lage der Probepfähle „B.HM“ und „B.HK“ innerhalb des Prüffelds.

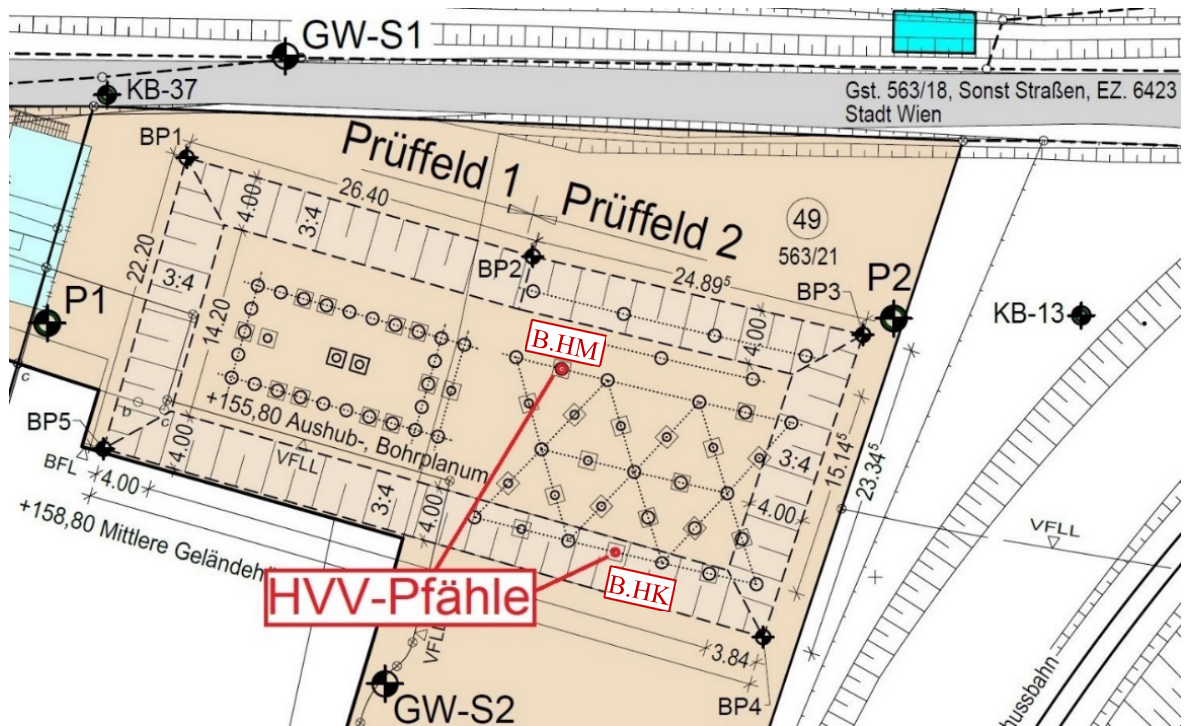


Abb. 2.14: Lage der Probestpfähle der Horizontalverschiebeversuche (HVV), Planausschnitt aus [46]

In Abb. 2.15 sind die jeweils dem Probestpfahl zugehörigen Reaktionspfähle dargestellt. In beiden Fällen ist die Stützkonstruktion zur Kippsicherung des Prüfträgers jeweils auf den Reaktionspfählen „R61“ und „R61“ gelagert.

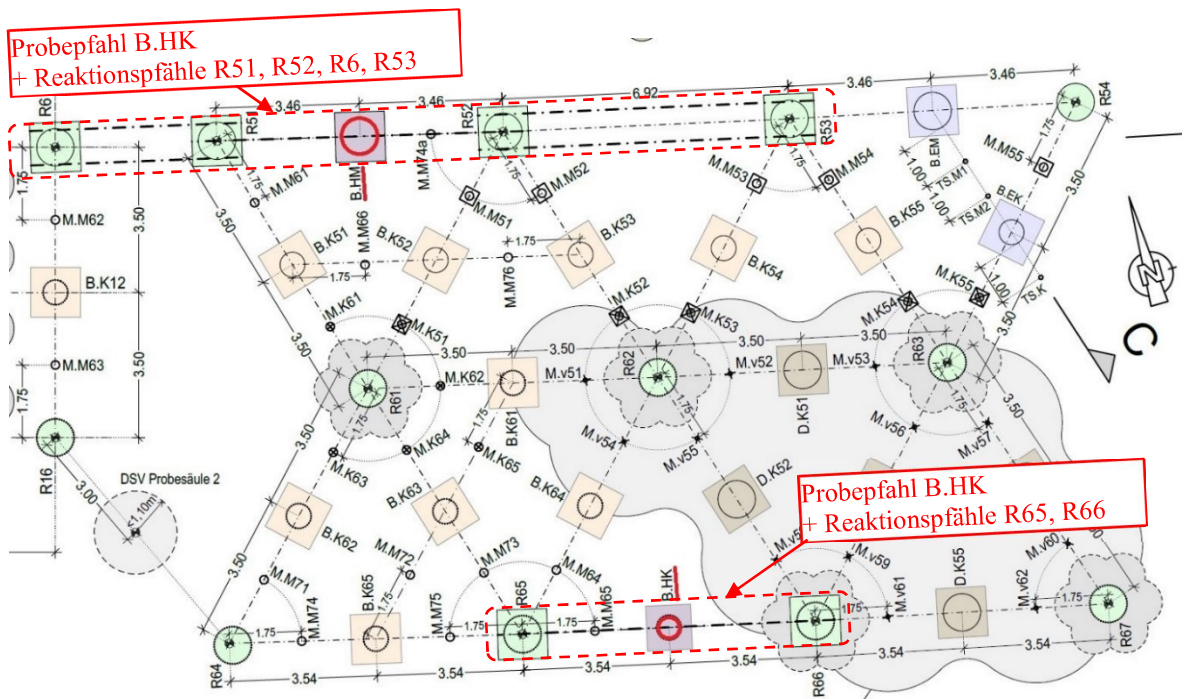


Abb. 2.15: Lage der Probestpfähle und zugehöriger Reaktionspfähle, Planausschnitt aus [46]

Die beiden Probestpfähle unterscheiden sich gemäß Tab. 2.6 voneinander. Demnach kommt der Pfahl „B.HK“ durch seine Länge von 6 m nur im quartären Kies zu liegen. Zusätzlich wurde hier ein

Doppelmantelrohr eingebaut, um einerseits dieselbe Geometrie wie bei den konventionellen Probelastungen (2.6.1) für etwaige Vergleichszwecke zu erhalten und andererseits um eine deutlichere Ausbildung einer Biegelinie zu erzielen. Dies resultierte in einer Kräfteinleitungsstrecke von rund 4 m.

Der Lastabtragungsbereich des Probepfahls „B.HM“ umfasste aufgrund seiner Länge von 16 m sowohl die obenliegende Quartär (sandiger Kies, „Donauschotter“) als auch das darunterliegende Miozän (tonige Schluffe bis Feinsande, „Wiener Tegel“). Denn im Gegensatz zu den konventionellen Probelastungen wurde hier kein Doppelmantelrohr installiert.

Tab. 2.6: Probepfahltypen der Horizontalverschiebversuche

Bezeichnung	Herstellung	Bodenart im Lastabtragungsbereich	Zementart	Länge ¹	D
B.HK	SOB	Quartär	konventionell	6 m	60 cm
B.HM	verrohrt	Quartär & Miozän	konventionell	16 m	90 cm

¹ Länge = Pfahlunterkante – Pfahlkopfunterkante gemäß [46] bzw. Abb. 2.16

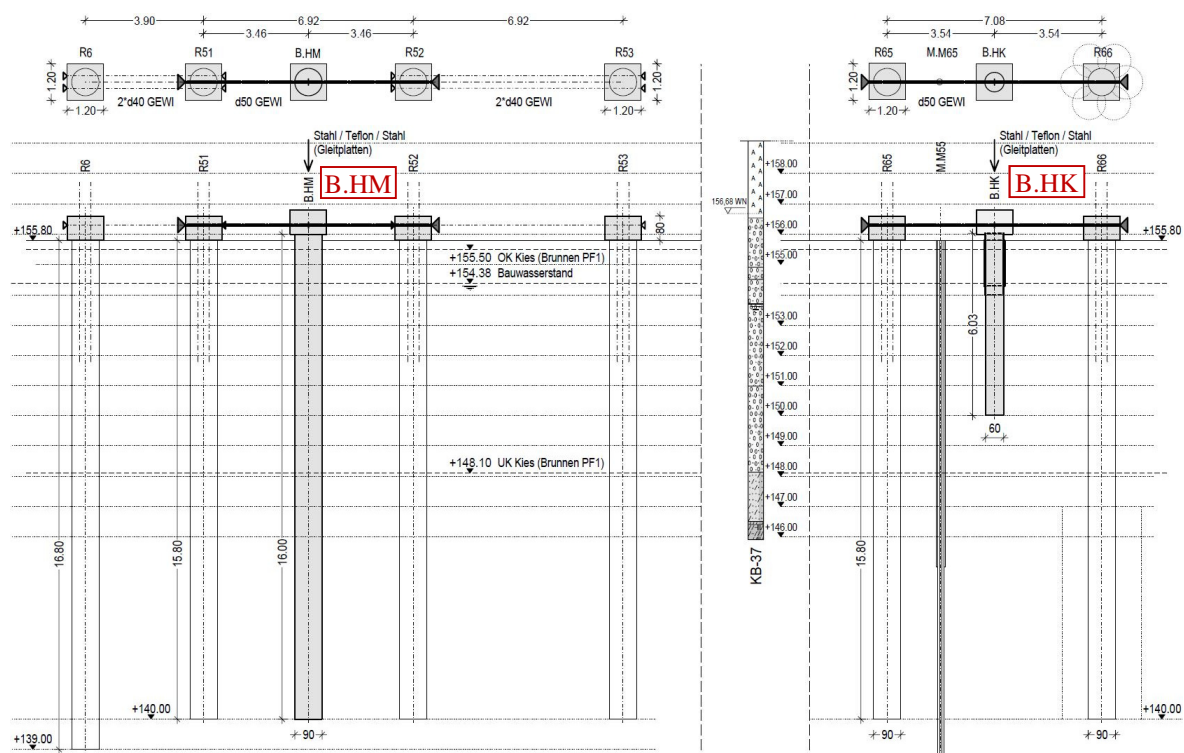


Abb. 2.16: Baugrundsituation & Prinzip der Versuchsanordnung, Planausschnitt aus [71]

Die Konzepterstellung für die Versuchsdurchführung erfolgte auf Basis der EA-Pfähle [23]. Für die Erfassung der diversen Messgrößen wurden die beiden bisher verwendeten Messwerterfassungssysteme (MWES I & II) um ein weiteres (MWES III) ergänzt (Tab. 2.7).

Der erste Horizontalverschiebversuch fand am Probepfahl B.HM von 19.02.2018 bis 23.02.2018 statt. Der Probepfahl B.HK wurde schließlich exakt einen Monat später (19.03.2018 bis 23.03.2018) einem geringfügig abweichenden Versuchsprogramm unterzogen. Demzufolge nahmen beide Versuche eine Arbeitswoche in Anspruch, wobei die Versuche auch über Nacht durchliefen.

Die genaue Versuchsbeschreibung erfolgt im Kapitel 4 der vorliegenden Arbeit.

Tab. 2.7: Messwerterfassungssysteme (MWES) für die Horizontalverschiebeversuche

MWES	Erfassung der	Instrumentierung
I	vertikalen und horizontalen Pfahlkopfbelastungen und -verschiebungen	elektronische Wegaufnehmer und mechanische Messuhr
II	Längsdehnungen und der Untergrundtemperatur (punktuell und abschnittsweise)	Bewehrungssensoren (Schwingsaite) und Kettenextensometer
III	Biegelinie und Untergrundtemperatur (punktuell)	Ketteninklinometer

2.7 Eigene Mitwirkung am Forschungsprojekt

Im Herbst 2017 wurde die Autorin der Diplomarbeit das erste Mal aufmerksam auf das Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. Das offizielle Mitwirken begann aber erst Anfang des Jahres 2018 als die Energiepfahlversuche noch mitten in der Planung steckten. Zu diesem Zeitpunkt waren die zwei Energiepfähle schon hergestellt und der geplante Versuchsstart im Februar 2018. Aufgrund verschiedener Faktoren verschob sich dann jedoch der Versuchsstart auf Mai 2018.

Generell könnte man die Hauptaufgaben der gegenständlichen Diplomarbeit in folgende Punkte fassen:

- Betreuung und Überwachung des laufenden Energiepfahlversuchs
- Entwicklung der Auswertung der Daten (in Zusammenarbeit mit dem Büro *Geotechnik Adam ZT GmbH*)
- Auswertung der Messergebnisse

Da diese Langzeitversuche dafür ausgelegt waren, dass keine ständige Überwachung vor Ort nötig war, wurde der Versuchsaufbau in regelmäßigen Abständen kontrolliert. Die Probelastungen zu Beginn und am Ende des Versuchs sowie die Lastschleifen zwischen den einzelnen Heiz- und Kühlphasen wurden von der Verfasserin der Diplomarbeit vor Ort betreut. Diese Betreuung beinhaltete unter anderem folgende Punkte:

- Kontrolle der Messsysteme sowie der Versuchsaufbauten
- Erläuterung der Durchführung des jeweiligen Versuchsabschnittes für alle Beteiligten vor Ort und Überwachung der Durchführung
- Kontrolle der Beobachtungszeiten und des Kriechmaßes der einzelnen Laststufen sowie Treffen von Entscheidungen bei div. Verlängerungen der Beobachtungszeit.

Da es noch kein Schema für derartige Versuche gab, war eine fortlaufende Analyse der Daten notwendig. Eine sequenzielle Rohdatenaufbereitung sowie erste Darstellungen der Daten in Diagrammen war nötig, um eine geeignete Entscheidungsbasis zu schaffen.

Nachdem der erste Versuch (BEM Energiepfahl) im Juli 2018 beendet war konnte die gesamte Auswertung der Daten des abgeschlossenen Versuchs gestartet werden. Vorerst musste jedoch das bestehende Auswertungsschema angepasst bzw. teilweise ein Neues entwickelt werden. Dies erfolgte in Zusammenarbeit mit Dipl.-Ing. Dr.techn. Roman Markiewicz vom Büro *Geotechnik Adam ZT GmbH*.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

KAPITEL 3

Energiepfähle – Allgemeines und Bemessungsgrundlagen

3.1 Geothermieranlagen

In den meisten Klimazonen Europas ist in einer Tiefe von 10 bis 15m, wegen der thermischen Trägheit des Bodens, ein beinahe konstanter Temperaturverlauf über die Jahreszeiten vorzufinden. Bis in eine Tiefe von 50 m schwankt die Temperatur meist nur im Bereich von 10 bis 15°C. [1]

Das physikalische Prinzip des Wärmetauschens zwischen einem Nutzersystem (z.B.: Gebäude mit Heizbedarf) und einem Absorbersystem (z.B.: Massivabsorbersystem) liegt der Funktionsweise nach eine Geothermieanlage zu Grunde. Das Nutzersystem wird auf die Bedürfnisse des Nutzers und der Gegebenheiten, wie z.B.: die Gebäudeart, meteorologische und standortbezogene Gegebenheiten, angepasst und die Geothermieanlage dementsprechend ausgelegt. Beim Absorbersystem ist der Unterschied zu konventionellen Anlagen die fossilen Brennstoffe oder Biomasse zu beachten. Die Leistung von Anlage, welche fossile Brennstoffe und dergleichen verwenden, hängt von der Rohstoffzufuhr ab, hingegen Geothermieanlagen weisen ein dynamisches Verhalten auf. Durch den Energieaustausch mit dem Untergrund wird die Untergrundtemperatur beeinflusst und dadurch ist die Leistung des Absorbersystems nicht konstant. [28]

In der Regel wird eine Wärmepumpe für Heizzwecke in solchen Systemen installiert. Die Wärmepumpe hebt die Temperatur des Absorbersystem (Erdreich) auf ein nutzbares Temperaturniveau für das Nutzersystem (Gebäude) unter Zufuhr einer höherwertigen Fremdenergie. Wärmepumpen sind sehr ökonomisch im Bezug auf die Fremdenergie, die zugeführt werden muss. Bei leistungsfähigen Wärmepumpen ist nur 20-25% Fremdenergie der nutzbaren Gesamtenergie notwendig, um die gespeicherte Wärme aus dem Untergrund zu fördern. Auf die Funktionsweise der Wärmepumpe wird in dieser Diplomarbeit nicht genauer eingegangen. Dies ist aber unter anderem in der Dissertation von R. Markiewicz *Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau* [18] zu finden.

Die Wärmepumpe besitzt einen Primär- und einen Sekundärkreislauf, wobei mit dem Primärkreislauf dem Boden die Wärme entzogen und der Wärmepumpe zugeführt wird. Der Sekundärkreislauf ist dazu da, die Wärme der Wärmepumpe an das Gebäude abzugeben. Eine schematische Darstellung dieser Kreisläufe ist in **Abb. 3.** zu sehen. [1]

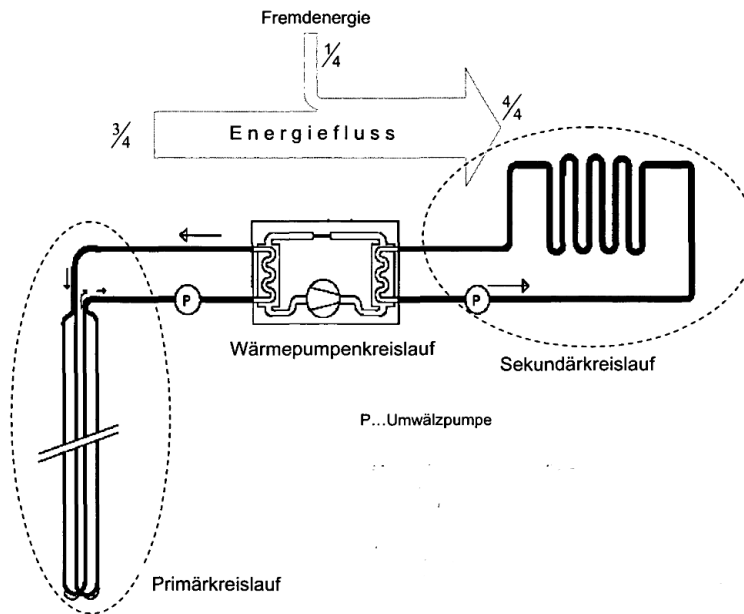


Abb. 3.1: Schematische Darstellung einer geothermischen Anlage (Primärkreislauf, Wärmepumpenkreislauf, Sekundärkreislauf) [18]

Betriebs- und Bewirtschaftungsarten

Erdwärmearbeiten werden nicht nur zur Gewinnung von Heizenergie, sondern auch zur Gewinnung von Kühlenergie verwendet. Im Folgenden sind die Nutzungsarten einer Erdwärmearbeit aufgelistet:

- Heizung mit Wärmepumpe
- Free Heating
- Kühlung mit Kältemaschine
- Free Cooling

Für Heizzwecke wird in der Regel eine Wärmepumpe installiert, welche die der Erde entzogene Energie auf ein höheres Temperaturniveau anhebt. Als „Free Heating“ wird bezeichnet, wenn die Temperatur der Absorberflüssigkeit direkt für niederthermale Zwecke verwendet wird. Im Sommer kann eine Kältemaschine zur Kühlung verwendet werden, indem die Abwärme des Gebäudes in das Erdreich transportiert wird. In günstigen Fällen kann ohne Kältemaschine das Auslangen gefunden werden und es wird nur die Umwälzpumpe betrieben. Dieser Fall wird als „Free Cooling“ und bedeutet, dass die Kühlung ohne aufwendiges Klimagerät auskommt und nur Fremdenergie für die Umwälzung des Trägermediums benötigt. Wärmepumpen, die umschaltbar sind, können somit nicht nur zum Heizen, sondern auch zum Kühlen verwendet werden.

Basierend auf der gewählten Betriebsart und den Randbedingungen vor Ort (Untergrund- und Grundwasserverhältnisse) ergeben sich zwei unterschiedliche Arten, wie eine Erdwärmearbeit bewirtschaftet werden kann:

- Einfache geothermische Energieentnahme bzw. -zufuhr
- Saisonaler Betrieb mit Wärme- und Kältespeicherung

Beim einfachen geothermischen Betrieb wird die Energie ausschließlich dem Boden entnommen oder in den Boden eingetragen. Somit erfolgt der Energiefluss lediglich in eine Richtung. Die thermodynamische Trägheit des Bodens wird beim saisonalen Betrieb ausgenutzt, indem die Energie im Boden gespeichert wird und zu einem späteren Zeitpunkt wieder entnommen werden kann. [1]

Systeme

Der Transport der Wärme im Untergrund erfolgt grundsätzlich über unterschiedliche Mechanismen. In gering durchlässigen Böden überwiegt die Wärmeleitung (Konduktion) und in stark durchlässigen Böden überwiegt in den grundwasserführenden Schichten die Wärmeströmung (Konvektion). Die Wahl der Systemart hängt stark von den Gegebenheiten im Untergrund ab. Um den Temperaturunterschied zwischen Untergrund und Gebäude zu nutzen, gibt es zwei verschiedene Systeme:

- Geschlossene Systeme (Absorberkreislauf)
- Offene Systeme (direkte Grundwasserentnahme)

Beim geschlossenen System handelt es sich um ein Wärmeträgermedium (z.B.: Wasser), welches in Absorberleitungen zirkuliert und bei Durchströmen des Untergrunds entweder erwärmt oder abgekühlt wird. Beim offenen System wird direkt das Grundwasser entnommen, welches als Wärmeträgermedium fungiert. Anschließend wird das Grundwasser wieder in den Aquifer eingebracht. **Abb. 3.2** zeigt ein Prinzipschema des offenen Systems.

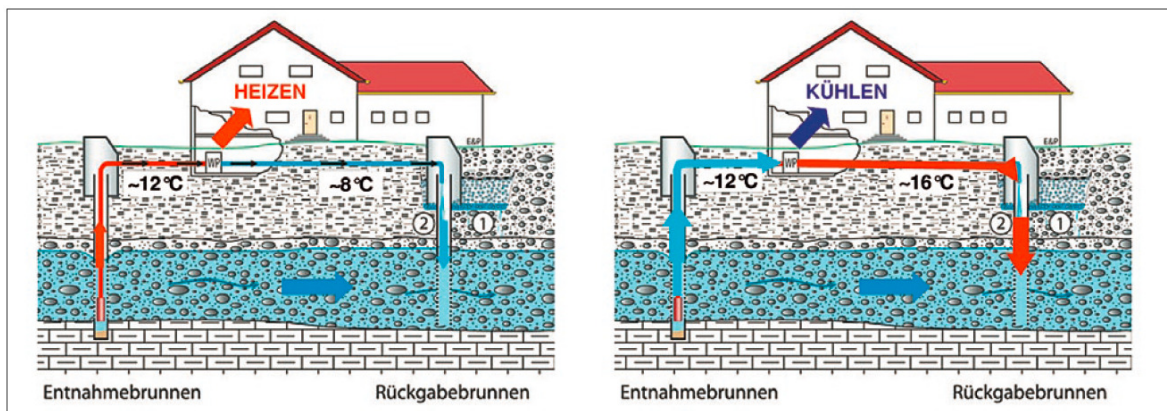


Abb. 3.2: Prinzipschema der direkten thermischen Grundwassernutzung, links für Heizzwecke und rechts für Kühlzwecke [1]

Die Planung einer Geothermieanlage und die grundsätzliche Entscheidung, welches System verwendet wird, hängt hauptsächlich von zwei Faktoren ab. Diese sind einerseits die Eigenschaften des vorhandenen Bodens und dessen thermische Parameter andererseits der Bedarf an Wärme- und Kälteenergie. [1]

Beispiele für geothermisch bewirtschaftete Elemente

Nicht nur klassische „Erdwärmesonden“ und „Erdwärmekollektoren“ können für die geothermische Nutzung herangezogen werden, sondern auch erdberührte Bauwerksteile, wobei dies hauptsächlich Teile aus Beton betrifft („Massivabsorber“). Tieffundierungen eignen sich dabei besonders gut, da diese tiefere Regionen des Untergrunds erschließen, welche nicht mehr unter dem Einfluss der saisonalen Temperaturschwankungen stehen. Der sogenannte Energiepfahl wird deswegen am häufigsten einer geothermischen Energiebewirtschaftung unterzogen. Im Folgenden sind Möglichkeiten der geothermischen Nutzung aufgelistet:

- Erdwärmesonden, Erdwärmekollektoren
- Energiepfähle, Energieschlitzwände, Energiebodenplatten
- Energievlies
- Energieanker
- Energietübbing, Energietunnel (Tunnel Thermi ©)
- Energie aus Abwasser

- Energiebrunnen

Erdwärmesonden sind eigens dafür abgeteuft Bohrungen, die das Erdreich über die gesamte Tiefe thermisch aktivieren. Bei Erdwärmekollektoren werden Absorberleitungen in einer Tiefe von ca. 1,2m bis ca. 1,5m im Erdreich verlegt wobei das oberflächennahe Erdreich thermisch aktiviert wird. Im Folgenden wird auf den Energiepfahl genauer eingegangen. [1]

3.2 Energiepfähle

Energiepfähle zählen zu den Massivabsorbern, da sie Betonelemente sind, welche gleichzeitig als Erdwärmeabsorber genutzt werden. Energiepfähle sind statisch bzw. konstruktiv erforderliche Betonpfähle, die mit Absorberleitungen zum Wärmeaustausch bestückt werden. Es wird zwischen folgenden Systemen unterschieden:

- Bohrpfähle aus Ortbeton
- Fertigteil-Rammpfähle aus Beton
- Mikropfähle (z.B.: GEWI- Pfahl, MESI- Pfahl)

Ortbetonbohrpfähle werden, wie schon der Name sagt, vor Ort hergestellt. Die Absorberleitungen werden meist an der Innenseite des Bewehrungskorbs befestigt, bevor dieser im Bohrloch versenkt wird. Nach dem Einbringen des Bewehrungskorbs wird der Pfahl betoniert. Da die Energiepfahlversuche in diesem Forschungsprojekt als Ortbetonbohrpfähle hergestellt wurden, wird auf diese Herstellungsmethode in 3.2.2 genauer eingegangen.

Bei der Herstellung der Fertigteil-Rammpfähle werden die Absorber bereits werkseitig in den Pfahl integriert. Die fertig betonierten Pfähle werden auf die Baustelle geliefert und in den Boden gerammt. Der Vorteil bei vorgefertigten Pfählen ist die höhere Herstellungsgenauigkeit. Kurzfristige Änderungen an der Pfahlgeometrie können jedoch nur unter erheblichen Aufwand und mit einer hohen Beschädigungsgefahr der Absorberleitungen durch Schrämarbeiten erfolgen. Fertigteil-Rammpfähle können auch als Hohlquerschnitt verwendet werden. Dabei werden üblicherweise zwei U-Rohre eingerammt, anschließend die Absorber eingebaut und mit einem Verfüllmedium eingegossen.

Pfähle mit einem Durchmesser $< 0,3$ m werden als Mikropfähle bezeichnet, wobei es unterschiedliche Herstellungsmöglichkeiten gibt. Beim MESI-Pfahl wird zuerst ein hohles Stahlrohr in den Boden eingerammt und in dem Innenraum werden die Absorber installiert. Beim GEWI-Pfahl wird ein verrohrtes Bohrloch hergestellt und darin der Einstab-GEWI-Stahl, an dem die Absorber befestigt sind, versenkt.

Diese Systeme werden oft im Hochbau, z.B.: in der Gebäudefundierung oder in der Pfahlwand eines Tiefgeschosses und im Tunnelbau verwendet. [28]

3.2.1 Massivabsorberanlagen

3.2.1.1 Bestandteile einer Massivabsorberanlage (Energiepfähle)

Eine gängige Massivabsorber - Energiepfahlanlage besteht aus folgenden Elementen:

- Energiepfähle mit integrierten Absorberleitungen
- Anbindeleitungen (Verbindung und zwischen Absorberkreislauf und Verteiler)
- Verteiler
- Sammelleitung (Verbindung zwischen Verteiler und Wärmepumpe)
- Wärmepumpe

In der folgenden **Abb. 3.3** sind diese Bestandteile in einem typischen Leitungsschema gezeigt.

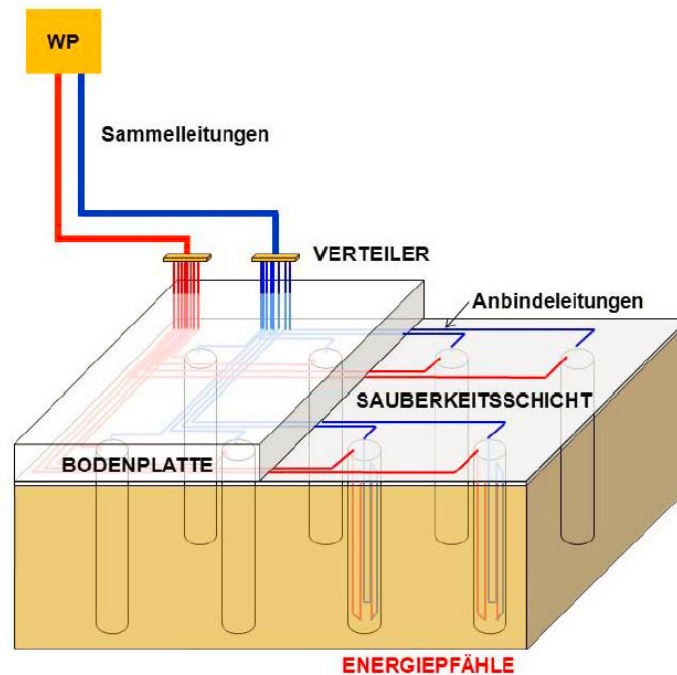


Abb. 3.3: Typisches Leitungsschema bei einem Hochbau mit Energiepfählen [28]

Die Absorber, die aus den Energiepfählen herausgeführt werden, schließen an die Anbindeleitungen an. Diese werden im Verteiler gesammelt und in der Sammelleitung zur Wärmepumpe geführt. [28]

3.2.1.2 Einflussparameter - Dimensionierung Massivabsorberanlage

Zur Auslegung einer Massivabsorberanlage, insbesondere zur Bestimmung des thermischen Potentials einer Massivabsorberanlage, sind folgende Parameter von besonderer Bedeutung:

- Oberflächentemperatur (Geländeoberfläche)
- Bodenprofil (Untergrunderkundung)
- Thermische Materialkennwerte der unterschiedlichen Schichten (ungestörte Bodentemperatur, Wärmeleitfähigkeit, spezifische Wärmekapazität, Dichte)
- Grundwasserverhältnisse (Tiefenlage, Strömungsgeschwindigkeit, Temperatur)
- Terrestrische Wärmestromdichte bzw. geothermischer Gradient

Für die Dimensionierung einer Massivabsorberanlage sind nicht nur diese thermischen Parameter von Bedeutung, sondern auch die Energieparameter (Heizenergiebedarf, Raumtemperatur, etc.).

- Bedarf an Spitzenheizleistung/Spitzenkühlleistung
- Heizenergiebedarf/Kühlenergiebedarf
- Soll-Temperatur im Sekundärkreislauf (Vor- und Rücklauf) bei Heizbetrieb/Kühlbetrieb
- Raumtemperaturen

Generell sollte bei der Simulation und Dimensionierung einer derartigen Anlage das Gesamtsystem mit sämtlichen Einflussparametern simuliert werden. Das Gesamtsystem „Untergrund - Massivabsorber – Primärkreislauf – Wärmepumpenkreislauf - Sekundärkreislauf“ und der Wärmetransport ist in **Abb. 3.4** zu sehen [28].

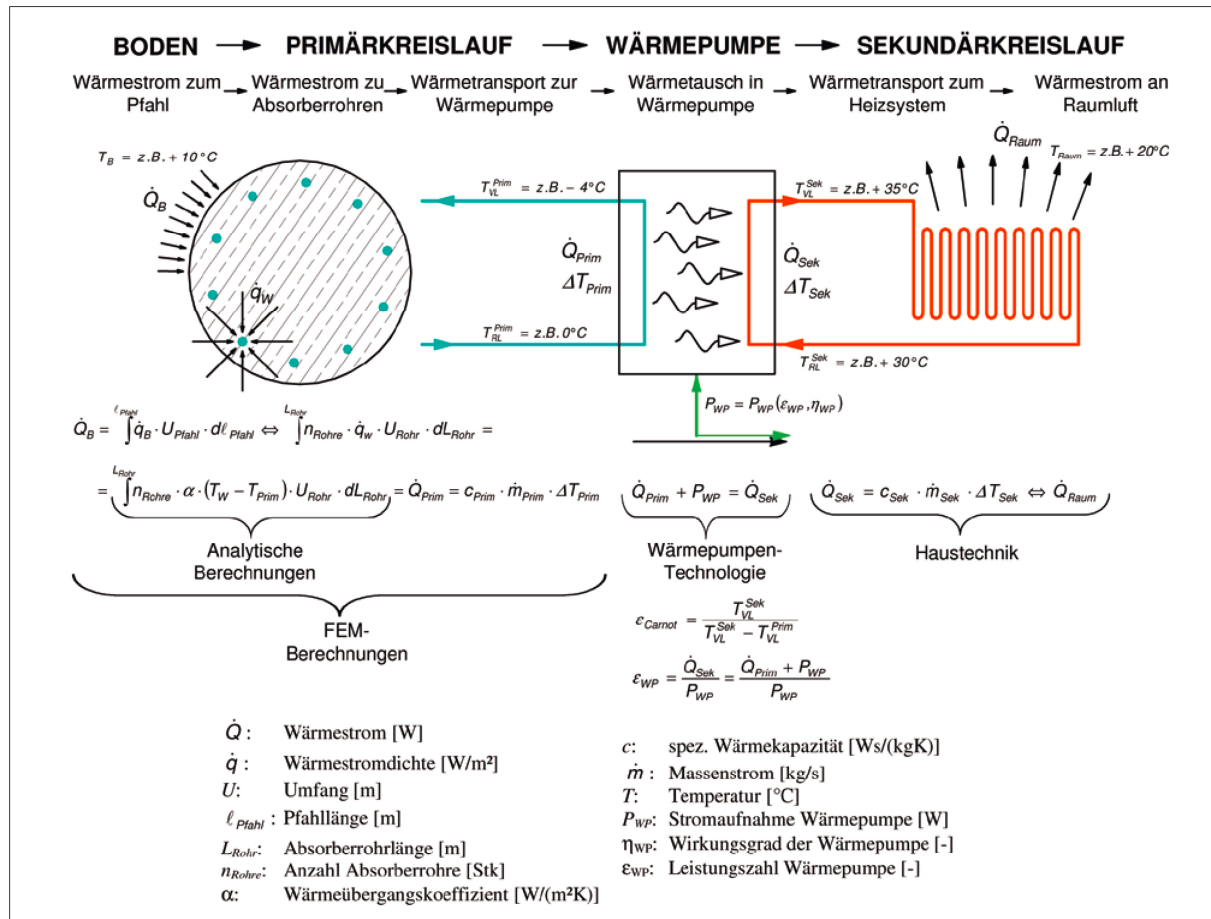


Abb. 3.4: Schematische Übersicht des Wärmetransportes einer Energiepfahlanlage im Heizfall [1]

Die Planung, Dimensionierung und Auslegung einer Massivabsorberanlage wird auf Basis dieser Parameter in dieser Diplomarbeit nicht genauer ausgeführt. Eine detaillierte Erläuterung dieses Themas ist in der *Richtlinie für Erdwärmenutzung mit Massivabsorbern* der ÖBV (Österreichische Bau­technik Vereinigung) [28] zu finden.

3.2.2 Herstellung eines Energiepfahls aus Ort­beton

Allgemeiner Ablauf der Herstellung

Je nach Bodenart werden Großbohrpfähle mit unterschiedlichen Bohrverfahren verrohrt oder unverrohrt hergestellt. Im Fall der Energiepfahlversuche des Forschungsprojekts „Unteres Hausfeld“ wurden die Pfähle im Kelly- Bohrverfahren mit Verrohrung ausgeführt. In der folgenden **Abb. 3.5** ist eine Fotodokumentation der Herstellung eines Energiepfahls zu sehen.

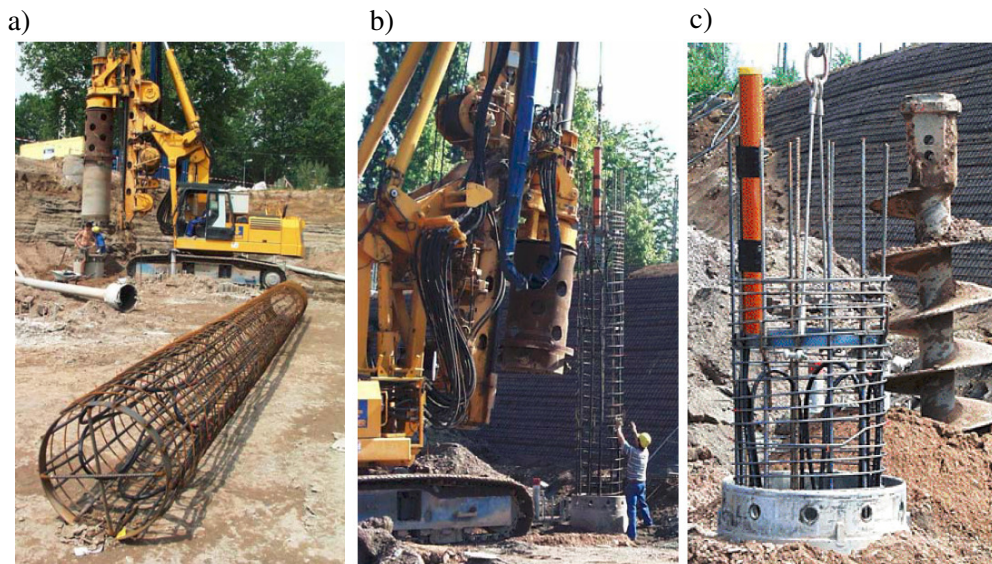


Abb. 3.5: a) Herstellung Bohrloch, b) Einbau Bewehrungskorb, c) Eingebauter Bewehrungskorb [28]

Nach der Herstellung des Bohrlochs wird der Bewehrungskorb mit den Absorberleitungen bestückt. Bevor der Bewehrungskorb im Bohrloch versenkt wird, werden Druckprüfungen an den Absorberleitungen gemacht. Die Vorlauf- und Rücklaufleitungen werden anschließend am Pfahlkopf an die Anbindeleitungen mittels geeigneter Muffen angeschlossen (siehe **Abb. 3.8**).

Absorber

Im Regelfall werden für Absorberleitungen PE-HD-Rohre (Polyethylen- Hoher Dichte) verwendet, da dieses Material sehr robust ist. Üblicherweise werden Absorber mit den Dimensionen 25 x 2,3mm (Außendurchmesser x Wandstärke) verwendet.



Abb. 3.6: Absorberleitung *Rehau PE-Xa* [22]

In der *Richtlinie für Erdwärmenutzung mit Massivabsorbern* werden folgende Richtwerte für die Abstände der Absorberleitungen im Pfahl gegeben:

Bei einem Energiepfahl mit einem Durchmesser von $D = 90$ cm können 8 – 10 Absorber über den Querschnitt aufgeteilt werden. Die Absorber sollten generell so installiert werden, dass Beschädigungen während der Pfahlherstellung vermieden werden. Bei Ortbetonpfählen werden die Absorber normalerweise an der Innenseite des Bewehrungskorbs befestigt, um die Leitungen während des Einbaus des Bewehrungskorbs und beim Ziehen der Bohrverrohrung zu schützen. Sie werden meist mit Kabelbinder oder dergleichen am Bewehrungskorb befestigt und die Rohrenden, um Verschmutzung zu vermeiden, verschlossen [28].

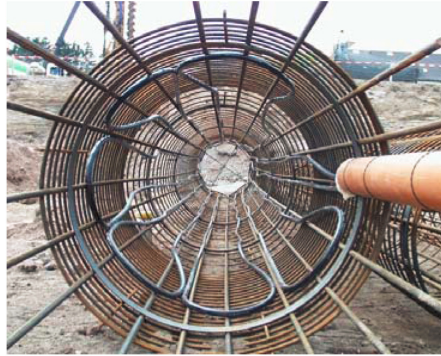


Abb. 3.7: Bewehrungskorb mit befestigten Absorberleitungen [28]

Es sollten während der Herstellung des Energiepfahls Druckprüfungen mit Druckluft nach jedem wesentlichen Arbeitsschritt zur Dichtheitskontrolle der Absorberleitungen gemacht werden. Zusätzlich sollten Durchflussprüfungen nach dem Betoniervorgang und nach dem Freilegen der Anschlussstellen gemacht werden.

Als Wärmeträger kann in den Absorberleitungen entweder reines Wasser bzw. enthärtetes Wasser mit Korrosionsinhibitoren oder ein Gemisch aus Wasser und Frostschutzmittel verwendet werden. Bei der Wahl kommt es auf die geplanten Betriebstemperaturen der Anlage an, wobei zu beachten ist, dass das Wasser-Frostschutzmittelgemisch eine höhere Viskosität aufweist, was einen Einfluss auf die Dimensionierung der Umwälzpumpe und deren Stromverbrauch hat. Es sollte dabei auch auf die Umweltverträglichkeit des Gemisches geachtet werden, da bei größeren Anlagen oft mehrere tausend Liter des Wärmeträgers gebraucht werden. Korrosionsinhibitoren konservieren die im Absorberkreislauf vorhandenen Stahloberflächen (z.B.: Pumpe).

Nach dem Füllen der Anlage ist dieser Kreislauf zu entlüften. Damit wird sichergestellt, dass alle Absorber gleichmäßig durchströmt werden. Um die Luftblasen aus dem System abzutransportieren, wird die Flüssigkeit mit hoher Geschwindigkeit durch den Kreislauf gepumpt. [28]

Beton

An den Beton werden in diesem Fall mehrere Anforderungen gestellt. Zu den statisch-konstruktiven, umweltrelevanten und einbaurelevanten Anforderungen kommen nun auch thermische Anforderungen, da die Wärmeleitfähigkeit des Betons einen wesentlichen Einfluss auf den Wärmeaustausch hat. Im Regelfall wird jedoch die Betonrezeptur verwendet, die auch bei nicht thermisch belasteten Bauteilen zum Einsatz kommt. Sind die Absorberabstände wie oben erklärt eingehalten, hat die Erfahrung bisher gezeigt, dass keine Probleme beim Einbau oder der Verdichtung des Betons auftreten. Die Betonrezeptur ist anzupassen, wenn engere Abstände verwendet werden. Die eingebauten Absorber sollten während des Betoniervorgangs unter Druck stehen, um dem Betondruck entgegen zu wirken.

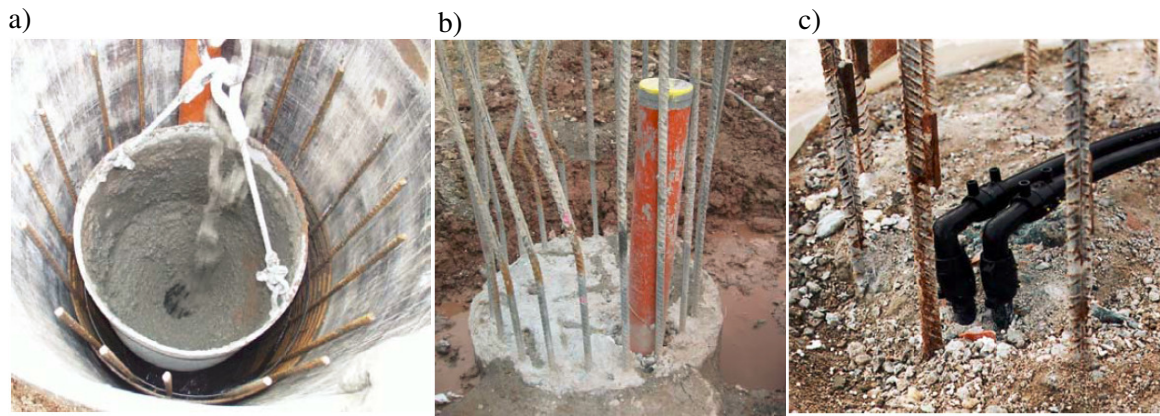


Abb. 3.8: a) Betonieren des Bohrpfahls b) Anschluss Pfahlkopf c) Verbindung der Absorberleitungen zu den Anbindeleitungen [28]

In der **Abb. 3.8** ist eine Fotodokumentation der Fertigstellung des Pfahls zu sehen. Zuerst wird das Einbringen des Betons im Bohrloch gezeigt. In der Mitte ist der Schutz der Vorlauf und Rücklaufschläuche am Pfahlkopf während des Herstellungsvorgangs zu sehen und rechts der fertige Anschluss der Absorberleitungen zu den Anbindeleitungen. [28]

3.2.3 Versuche an Energiepfählen

Wie zuvor in Kapitel 1 erwähnt wurden noch nicht viele Versuche im Bezug auf das thermomechanische Verhalten von Energiepfählen durchgeführt. Die meisten Versuchsprogramme in Bezug auf Geothermieanlagen, die in der Literatur zu finden sind, untersuchen die thermodynamischen Eigenschaften und deren Heiz- und Kühlleistung. Modellversuche wurden zum Thema thermomechanisches Verhalten von Energiepfählen schon gemacht, welche jedoch nicht so aussagekräftig sind wie großmaßstäbliche Versuch im natürlichen Untergrund. Im Folgenden werden drei großmaßstäbliche Versuche an Energiepfählen kurz beschrieben.

Brandl H. (1998) führte, als einer der Ersten, einen Energiepfahlversuch in Bad Schallerbach in Österreich durch. Dafür wurde ein Energiepfahl instrumentiert der Teil einer Geothermie-Anlage, die 143 Energiepfählen umfasste, war. Der Versuchspfahl war ein direkter Bestandteil der Fundierung eines Rehabilitationszentrums in Bad Schallerbach und wurde somit durch den Bauvorgang belastet. Das Gebäude in Hanglage hatte sieben Stockwerke. Der Pfahl wies eine Länge von 9 m auf und einen Durchmesser von 1,2 m. Die Last, die auf den Pfahl aufgebracht wurde lag bei ca. 500 kN bis 900 kN. Der Untergrund bestand im oberflächennahen Bereich aus Tonen und im unteren Bereich aus tonig-sandige Schluffe. Der Pfahl wurde mit einer Kraftmessdose am Pfahlkopf und Pfahlfuß, Extensometern und Thermolemente (zur Temperaturmessung) instrumentiert. Die Daten wurden an drei Zeitpunkten im Jahr während der normalen Nutzung der Geothermie-Anlage ausgelesen. In der vorliegenden Veröffentlichung „*Energy foundations and other thermo-active ground structures*“ wurden die Daten vom Februar 1996 bis Februar 1998 präsentiert. [12]

Laloui et al. (2006) hat das Verhalten eines Energiepfahls in Lausanne (Schweiz) untersucht, der mit einer Kombination aus thermischer und mechanischer Last belastet wurde. Dieser Versuch wurde an der Ecole Polytechnique Federale de Lausanne in der Schweiz durchgeführt. Der Versuchspfahl war ein direkter Bestandteil der Fundierung des neuen Gebäudes und wurde somit durch den Bauvorgang belastet. Der Pfahl wies eine Länge von 25,8 m auf und einen Durchmesser von 0,96 m bis 1,17 m. Die maximale Last, die auf den Pfahl aufgebracht wurde lag bei ca. 1300 kN. Der Untergrund bestand im oberflächennahen Bereich aus Tonen und im unteren Bereich aus sandig-kiesige Tone. Der Pfahl wurde mit einem Glasfasermesssystem, Extensometern und einer Kraftmessdose am Pfahlfuß instrumentiert. Der Pfahl wurde immer bei der Fertigstellung eines Geschosses mit einem thermischen Zyklus belastet wobei anzumerken ist, dass das Gebäude vier Stockwerke hatte. Ein thermischer Zyklus dauerte ca. 28 Tage und bestand aus einer Aufheiz- und einer Wiederherstellungsphase. [17]

Darauffolgend wurde dann ein weiterer Versuch dieser Art am Lambeth College in London durchgeführt (*Amis et al. (2008)[8]* und *Bourne- Webb et al. (2009)[11]*), wobei es sich in diesem Fall um einen freistehenden Prüfpfahl unter Versuchsbedingungen handelte. Der Versuchsaufbau bestand aus einem Energiepfahl als Versuchskörper und einem Energiepfahl zur Bereitstellung der benötigten thermischen Energie. Beide Pfähle wurden mit Glasfasermesssystemen ausgestattet zur Messung der Dehnungen und der Temperatur. Der Versuchspfahl wies eine Länge von 23 m auf und einen Durchmesser von 0,55 m bis 0,61 m. Die maximale Last, die auf den Pfahl aufgebracht wurde lag bei ca. 1200 kN. Der Untergrund bestand im oberflächennahen Bereich aus Sand und Kiesen und im unteren Bereich aus steifen schluffigen Tonen. Der Pfahl wurde mit einer Last von 1200 kN über einen Zeitraum von 46 Tagen belastet. In dieser Phase wurde der Pfahl für 31 Tage gekühlt, im Weiteren für 12 Tage geheizt und dann in Tageszyklen abwechselnd gekühlt und geheizt für die verbleibenden 3 Tage. Der gesamte Versuch dauerte 53 Tage. [8] [11]

3.2.4 Potentielle Faktoren, welche das mechanische Tragverhalten der Pfähle beeinflussen können

Kontaktfläche Pfahl/Beton

Die äußere Tragfähigkeit eines Pfahls darf nicht durch die geothermische Nutzung beeinträchtigt werden. Es darf kein Bodengefrieren auftreten, da dann die Kontaktfläche zwischen Pfahl und Boden negativ beeinflusst wird. Es könnten bei Frost-Tau-Wechseln zu Schäden kommen, die die Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit drastisch vermindern können. Bei der Dimensionierung der Massivabsorberanlage ist darauf zu achten, dass die Temperatur des Wärmeträgers immer $\geq +2$ °C beträgt und ein Bodengefrieren somit vermieden wird. Während des Betriebs sollte die Anlage auch messtechnisch überwacht werden.

Querschnittsreduktion

Die mechanisch wirksame Betonquerschnittsfläche wird durch die Absorber reduziert. Die Dichte der Absorberbelegung und die Pfahlgeometrie bestimmten diesen Einfluss, z.B. hat dies auf Pfähle mit kleinem Durchmesser (Mikropfähle) einen wesentlich größeren Einfluss und sollte demzufolge in der Pfahlstatik berücksichtigt werden.

Verbund Bewehrung/Beton

Die Absorber werden üblicherweise auf der Bewehrung mit Kabelbinder befestigt, wobei zu beachten ist, dass der Verbund in diesem Bereich zwischen Bewehrung und Beton vermindert werden kann. Für diese Überlegung gibt es noch keine näheren Untersuchungen, welche Aufschlüsse dazu geben. Jedoch sollte dies abhängig von den jeweils vorliegenden Randbedingungen beurteilt werden. Ist zwischen den tragenden Bewehrungsstäben und den parallel dazu geführten Absorbern ein Mindestabstand, wie für Bewehrungsstäbe in *ÖNORM EN 1992- Serie* vorgegeben, eingehalten, kann davon abgeleitet werden, dass die Verbundwirkung nicht beeinflusst wird. Es obliegt andernfalls dem Tragwerksplaner, aufgrund der vorliegenden Verhältnisse, eine Entscheidung zu treffen, ob dieser Einfluss in der Nachweisführung berücksichtigt wird oder nicht.

Temperaturbeanspruchung

Der Massivabsorber wird während des Betriebs mit starken Temperaturschwankungen beansprucht. Die Materialien dehnen sich aus bzw. stauchen sich je nach Temperaturänderung zusammen. Kann sich der Massivabsorber (Pfahl) ungehindert ausdehnen (statisch bestimmtes System), entstehen keine zusätzlichen Schnittkräfte. Normalerweise ist ein Pfahl jedoch in seiner Ausdehnung durch den umliegenden Boden und das Bauwerk behindert und es entstehen zusätzliche Spannungen im Pfahl, die auch Zwängsspannungen genannt werden, welche möglicherweise nicht zu vernachlässigen sind.

Die Dehnung und Stauchung des Pfahls kann auch die Mantelreibung und den Spitzendruck des Pfahls beeinflussen. Es sollte darauf geachtet werden, dass es zu ungleichmäßigen Verformungen des Fundierungsbauwerk kommen kann, wenn nicht alle Elemente der Fundierung mit Absorbieren bestückt wurden. Die Teile der Fundierung die geothermische genutzt werden verformen (stauchen oder dehnen) sich entsprechend der thermischen Belastung, wobei die Teile ohne Absorberbelegung in ihrer Ausgangslage bleiben.

In Österreich kann auf eine langjährige Erfahrung mit Energiepfählen zurückgegriffen werden. Diese zeigt, dass bisher keine Schäden im Bereich der Fundierung aufgetreten sind. Es konnte somit keine Verschlechterung der Tragfähigkeit von Fundierungselementen, die zugleich als Massivabsorber genutzt werden, festgestellt werden. Es ist dennoch zu empfehlen, dass die zuvor angesprochenen Faktoren durch den Tragwerksplaner im Einzelfall beurteilt und eventuell mit einbezogen werden. [28]

3.3 Tragverhalten von axial statisch belasteten Pfählen

Es wird in diesem Kapitel das Tragverhalten eines Pfahls unter axialer statischer Belastung erläutert. Um das Bild zu vervollständigen, soll hier das natürliche Verhalten des Pfahls ohne thermische Belastung aufgezeigt werden.

(Dieser Abschnitt stammt von Alexander Stöglehner [AS]; siehe Kapitel 1 bzw. Tab. 1.1)

Bei der Betrachtung des Tragverhaltens von Pfählen ist zwischen innerem und äußerem Tragverhalten zu unterscheiden.

Das innere Tragverhalten beschreibt die Beanspruchbarkeit des Pfahlbaustoffes an sich, der den Einwirkungen aus den Bauwerkslasten, der Herstellung, des Transportes (bei Fertigteilepfählen) und des Einbringvorgangs widerstehen muss [10]. Der innere Tragwiderstand eines Pfahls ist nach den einschlägigen Normen aus dem Stahl-, Stahlbeton-, Verbund- oder Holzbau nachzuweisen und kann meist getrennt vom umgebenden Baugrund betrachtet werden [16]. Aus diesem Grund wird auf das innere Tragverhalten in diesem Abschnitt nicht näher eingegangen.

Das äußere Tragverhalten umfasst die Übertragung der in den Pfahl eingeleiteten Lasten auf den umgebenden Boden, der dadurch keine unzulässigen Verformungen oder Bruchzustände aufweisen soll [10] [16]. Gemäß ÖNORM B 1997-1-3 [32] sind hinsichtlich der äußeren Belastung von Pfählen folgende Fälle zu unterscheiden:

- axial auf Druck oder Zug belastete Pfähle
- quer zur Achse belastete Pfähle
- axial und querbelastete Pfähle

Der folgende Abschnitt erläutert das Tragverhalten von Einzelpfählen unter statischen (ruhenden) axialer Belastungen.

3.3.1.1 Allgemeines

Meist werden Pfähle in vertikaler bzw. axialer Richtung auf Druck belastet. Dabei ergibt sich der äußere Gesamtwiderstand eines Pfahls R_c [MN] aus der Summe folgender zwei Anteile [10]:

- Pfahlfußwiderstand R_b [MN] (Index b für base resistance)
- Pfahlmantelwiderstand R_s [MN] (Index s für shaft resistance)

$$R_c(s) = R_b(s) + R_s(s) \quad (3.1)$$

Der Pfahlfußwiderstand (oder auch Pfahlsohlendruckwiderstand) baut sich als Druckspannung an der Sohlfläche des Pfahles auf, während es sich beim Pfahlmantelwiderstand um Mantelreibung zwischen Pfahl und Boden bzw. Fels handelt [16]:

$$R_c = R_b + R_s = q_b \cdot A_b + \sum_i q_{s,i} \cdot A_{s,i} \quad (3.2)$$

q_b Pfahlfußwiderstand [MN/m²]

$q_{s,i}$ Pfahlmantelwiderstand in der jeweiligen Schicht i [MN/m²]

A_b Pfahlfußfläche [m²]

$A_{s,i}$ Pfahlmantelfläche in der jeweiligen Schicht i [m²]

Aufgrund der beiden Anteile des Pfahlwiderstands kann man zwei unterschiedliche (theoretische) Grenzfälle im Tragverhalten betrachten [2] [16]:

- Man spricht von einem *stehenden Pfahl* oder „Fußwiderstandspfahl“, wenn sein Schaft in einer geringtragfähigen Schicht liegt und dessen Fuß in eine relativ steife, verformungsarme Schicht einbindet. In diesem Fall werden (nahezu) sämtliche Lasten über den Pfahlfußwiderstand aufgenommen (Abb. 3.9, links).
- Im Gegensatz dazu trägt ein *schwimmender Pfahl* oder „Mantelwiderstandspfahl“ einwirkende Lasten aufgrund der fehlenden Einbindung in eine tragfähige Schichte (fast) ausschließlich über die Mantelreibung entlang des Schaftes ab (Abb. 3.9 (b)).

Da Spitzendruck und Mantelreibung die alten Begriffe für Fußwiderstand und Mantelwiderstand sind, sind die Bezeichnungen Spitzendruck- bzw. Mantelreibungspfahl zwar weiterhin geläufig, werden in der vorliegenden Arbeit jedoch nicht verwendet.

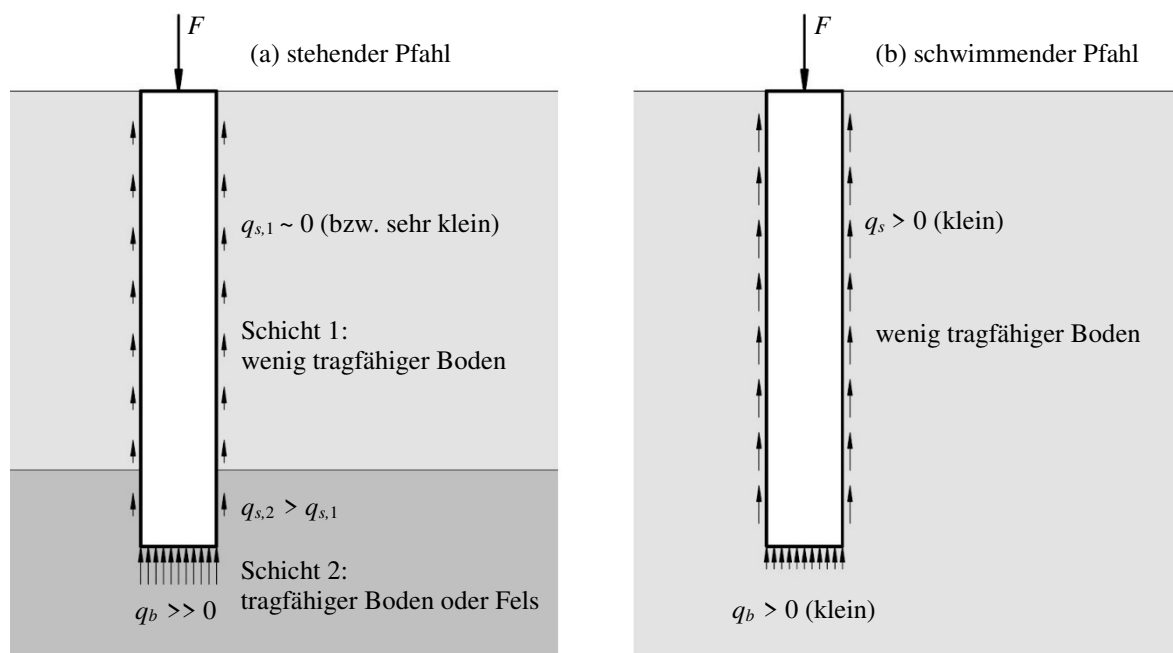


Abb. 3.9: Stehender Pfahl (a) und schwimmender Pfahl (b) nach [2]

Bei Zugpfählen entspricht der Gesamtwiderstand dem Pfahlmantelwiderstand, da ein Pfahlfußwiderstand nicht aktiviert werden kann [2].

Sowohl der Pfahlmantel- als auch Pfahlfußwiderstand werden von der Herstellungsmethode, von den Baugrundeigenschaften, vom Pfahlbaustoff, von der Pfahlsetzung sowie von der Einbindetiefe beeinflusst [15]. Einige dieser Einflüsse werden im folgenden Abschnitt erläutert.

3.3.1.2 Einflüsse auf das axiale Tragverhalten

Setzungsabhängigkeit

Sowohl der Anteil des Pfahlmantel- als auch des Pfahlfußwiderstands hängen von der unter der (Druck-) Belastung auftretenden Setzung ab, weshalb der Pfahlwiderstand wie in Gleichung (3.1) auch als Funktion der Setzung s geschrieben wird. Graphisch wird dieser Zusammenhang durch die Widerstands-Setzungslinie (WSL) dargestellt [16]. Bei Zugpfählen handelt es sich dementsprechend um Widerstands-Hebungslinien [10].

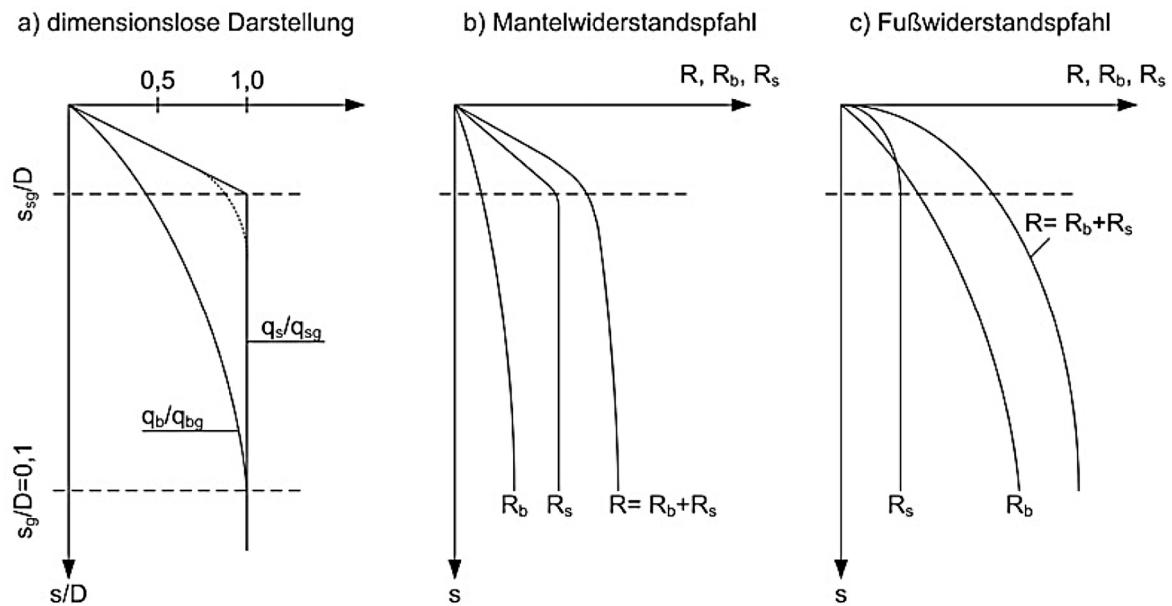


Abb. 3.10: Widerstands-Setzungslinien je nach Anteil Fuß- und Mantelwiderstand aus [10]: a) dimensionslose WSL, b) Mantelwiderstandspfahl, c) Fußwiderstandspfahl

Abb. 3.10 a) zeigt den mehr oder weniger parabolischen Verlauf des Pfahlfußwiderstands und die idealisierte, bilineare Annäherung an den Pfahlmantelwiderstand [16]. Demnach wird die größtmögliche Mantelreibung bei der Grenzsetzung s_{sg} [cm] erreicht (Gleichung (3.3)). Dort findet der Übergang von einem elastischen zu einem plastischen Tragverhalten des Mantelwiderstands statt. Ab der Grenzsetzung kann kein zusätzlicher Mantelwiderstand mehr aktiviert werden.

$$s_{sg} = 0,5 \cdot (1 + R_{s,k}(s_{sg})) \leq 3 \text{ cm} \quad (3.3)$$

mit dem charakteristischen Pfahlmantelwiderstand $R_{s,k}$ in [MN]

Beim Vergleich von Abb. 3.10 b) und c) erkennt man, dass der Knick in der Mantel-Widerstands-Setzungslinie umso undeutlicher ausfällt, je kleiner der Anteil des Pfahlfußwiderstands am Gesamtwiderstand ist – also ob es sich um einen Mantelreibungspfahl oder Fußwiderstandspfahl handelt [10]. Da infolge dessen ein mögliches Bruchversagen schwer erkennbar ist, wurde für den Grenzzustand der Tragfähigkeit (ULS) eine Grenzsetzung s_g von 10 % des Pfahldurchmessers D festgelegt [16] (vgl. Abb. 3.10 a)):

$$s_g = 0,10 \cdot D \quad (3.4)$$

Aufgrund der Setzungsabhängigkeit ist beim Ansatz von Mantelreibung und Sohldruckwiderstand stets deren jeweiliger Mobilisierungsgrad zu berücksichtigen. Dies lässt sich bei abermaliger Betrachtung von Abb. 3.9 nachvollziehen. Während es bei einem stehenden Pfahl schon bei einer relativ

geringen Setzung zur vollen Aktivierung des Sohldruckwiderstands kommt, würde die Mantelreibung erst bei einer größeren Setzung voll mobilisiert werden [2].

Tiefenabhängigkeit

Die Größe der Mantelreibung steigt im Allgemeinen zunächst mit zunehmender Pfahltiefe, ehe sie im Pfahlfußbereich wieder absinkt. Dieses Phänomen fällt unter den Begriff „Falltüreffekt“, der modellhaft in Abb. 3.11 dargestellt ist. Dabei sackt nach dem Ausweichen der Falltür Boden nach, wodurch sich eine Gewölbetragswirkung einstellt.

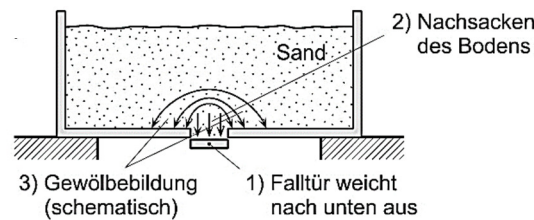


Abb. 3.11: „Falltüreffekt“ aus [19]

Die folgende Abb. 3.12 zeigt den Falltüreffekt bei einem Druckpfahl. Infolge der Last Q wird der Boden unter dem Pfahlfuß zusammengedrückt, wodurch Boden ringsum des Pfahls nachsackt. Dadurch wird der umgebende Boden in vertikaler Richtung entlastet, woraufhin sich eine Gewölbetragswirkung einstellt. Mit der vertikalen geht auch eine horizontale Entlastung einher, wodurch es im Bereich des Pfahlfußes zu einer Abnahme der Mantelreibung [10] und insgesamt zu einer Verspannung des Bodens [16] kommt. Die Abnahme der Mantelreibung hängt dabei vor allem von der Pfahlherstellungsart (Rammen, Bohren, etc.) und dem vorliegenden Untergrund (Sand, Ton, etc.) ab [10]. Die Zusammendrückung kann bei Sanden oder Kiesen auch dadurch verstärkt werden, wenn es aufgrund des hohen Spitzendrucks zu Kornbrüchen kommt [16]. Nach [10] kann ab einem Verhältnis der Pfahleinbindetiefe d zum Durchmesser D von 15 von einem konstanten Verlauf der Mantelreibung ausgegangen werden.

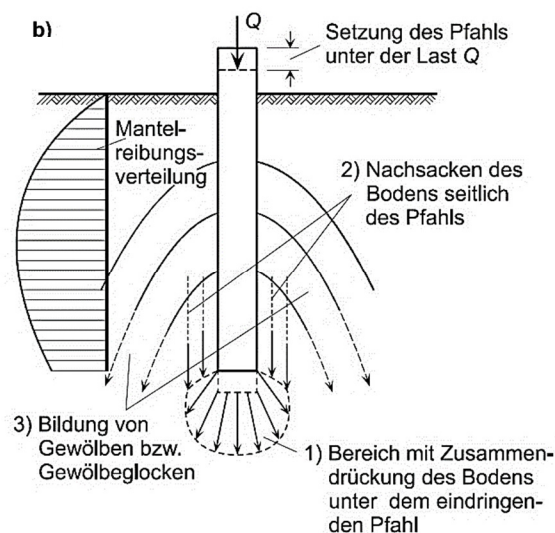


Abb. 3.12: Tragmodell bei einem Druckpfahl aus [19]

Bei Zugpfählen tritt keine Abnahme der Mantelreibung im Pfahlfußbereich auf [16].

Eine Tiefenabhängigkeit ist auch beim Pfahlfußwiderstand gegeben. In der Realität tritt nämlich der aus der naheliegenden Folgerung einer linearen Zunahme des Pfahlfußwiderstands mit zunehmender Tiefe analog zur Überlagerungsspannung nicht uneingeschränkt ein [16]. Stattdessen stellt sich der

Mittels Mantel- und Fußverpressungen lässt sich im Vergleich zu einem unverpressten Pfahl eine Traglaststeigerung um rund 50 bis 100 % erreichen. Rechnerisch kann die Wirkung dieser Maßnahmen jedoch schwer abgebildet werden [10].

Eine Fußaufweitung ist bei genauerer Betrachtung nur mäßig effektiv. Zwar wächst der Pfahlfußwiderstand mit dem Quadrat des Durchmessers, gleichzeitig nehmen jedoch auch die Setzungen mit steigendem Durchmesser linear zu, weshalb die Tragfähigkeit insgesamt mit dem Fußdurchmesser nur proportional steigt. Außerdem besteht beispielsweise bei nicht standfesten (nichtbindigen) Böden die Gefahr, dass Boden in den Aufweitungshohlraum nachrutscht und dadurch die Mantelreibung im darüberliegenden Bereich herabgesetzt wird [2]. Nach [16] ist weiters zu bedenken, dass beispielsweise die Erfahrungswerte für den Pfahlsplitzendruck nach [23] nur zu 75 % angesetzt werden dürfen.

Negative Mantelreibung

In den meisten Fällen setzt sich ein druckbelasteter Pfahl in größerem Ausmaß als der ihn umgebende Boden, wodurch die (günstig) entgegenwirkende (positive) Mantelreibung entsteht. Das Gegenteil ist die negative Mantelreibung, die auftreten kann, wenn sich der Boden ringsum stärker setzt als der Pfahl selbst [16]. Da sich der Boden infolgedessen gewissermaßen am Pfahl „aufhängt“, entsteht eine Zusatzbeanspruchung, die auf den Pfahl wirkt [10]. In der Literatur und Normung [32] wird die negative Mantelreibung mit τ_n [MN/m²] bezeichnet. Sie kann vor allem bei weichen, bindigen Schichten [16], aber auch sehr locker gelagerten, grobkörnigen Schichten auftreten [32].

Ursachen für die Relativsetzung zwischen dem Pfahl und solcher Schichten können beispielsweise nachträgliche Aufschüttungen (Abb. 3.14), Grundwasserabsenkungen oder Konsolidationsvorgänge sein [10] [16].

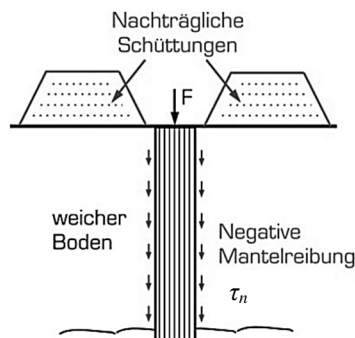


Abb. 3.14: Negative Mantelreibung zufolge nachträglicher Schüttungen aus [2] (adaptiert)

Bei Zugpfählen kann dieses Phänomen in umgekehrter Weise auftreten, indem etwa durch einen Aushub nach der Pfahlherstellung infolge der Entlastung Hebungen auftreten, und der Boden den Pfahl gewissermaßen nach oben zieht [10].

3.3.1.3 Ermittlung des axialen Trag- und Verformungsverhaltens

Erdstatische Ansätze aus der Literatur

Im Wesentlichen gehen erdstatische bzw. bodenmechanische Ansätze zur Berechnung des Pfahlfußwiderstands von einem grundbruchartigen Versagen unterhalb des Pfahlfußes aus, bei dem der Boden seitlich verdrängt und verdichtet wird [2]. Aufgrund teilweise signifikanter Unterschiede in den Ergebnissen gelten derartige Ansätze heute als überholt und dürfen zu Bemessung nicht mehr angewandt werden [16]. Folglich werden sie hier nicht weiter behandelt.

Ansätze für den Pfahlmantelwiderstand beruhen auf dem Reibungsgesetz. Die horizontale Erddruckkraft infolge Bodenauflast bewirkt eine Normalspannung auf den Pfahlmantel. Die übertragbare

Reibungskraft hängt dann vom Wandreibungswinkel zwischen Pfahlmantel und Boden ab. Eine etwaige Kohäsion wirkt direkt als Spannung auf den Pfahlmantel [2]. Aus dem gleichen Grund wie beim Pfahlfußwiderstand werden auch sie hier nicht angeführt (für Details siehe [2])

Empirische Ansätze

Empirische Ansätze werden an verschiedenen Labor- und Feldversuchen kalibriert, wonach auch die Einteilung erfolgt [16]:

- Rammsondierungen (DPH) in nichtbindigen Böden
- Drucksondierungen (CPT) in nichtbindigen Böden
- Standard Penetration Tests (SPT)
- Pressiometerversuch (PMT)
- α -Methode (c_u -Werte)

Da die einzelnen Verfahren vorwiegend auf Verdrängungspfähle abgestimmt sind, werden sie hier nicht weiter behandelt. Gleiches gilt für die vor allem früher verwendeten Rammformeln.

Numerische Berechnungen

Numerische Berechnungen werden heutzutage in vielen Bereichen der Geotechnik angewendet – eben auch zur Ermittlung von Pfahlwiderständen und -verschiebungen. Wichtig dabei ist die Modellierung des Pfahls sowie des Bodens mit geeigneten Stoffgesetzen [16]. Detaillierte Beschreibungen der einzelnen Stoffmodelle sind in [2] zu finden.

Grundsätzlich lässt sich das Untergrundverhalten umso realistischer modellieren, je höherwertig das Stoffgesetz ist. Jedoch steigt damit auch die Anzahl der bodenmechanischen Eingabeparameter, deren ausreichende Kenntnis oft schwierig oder gar nicht zu erlangen ist [16]. Ebenso gehen mit steigender Modellkomplexität auch längere Rechenzeiten einher.

Die Modellierung des Pfahles verlangt neben der Definition des Materialverhaltens des Pfahlkontinuums auch die Modellierung des Kontaktbereichs zwischen Boden und Pfahl [16].

Eine numerische Berechnung für Bohrpfähle liefert insofern bessere Ergebnisse als für Verdrängungspfähle, da beim Bohren der umgebende Boden weniger gestört wird. Bei der numerischen Berechnung von Bohrpfähle ist auf eine mögliche Überschätzung der Mantelreibung infolge des Einflusses der Dilatanz hinzuweisen. Um dem entgegenzuwirken, kann beispielsweise im Hardening-Soil-Modell die Dilatanz über die Lagerungsdichte und Porenzahl begrenzt werden. Weiters kann die Auflockerungszone unterhalb der Sohlfläche eines Bohrpfahls mit Schicht geringerer Steifigkeit berücksichtigt werden [16].

Ermittlung nach aktueller Normung

Nach ÖNORM B 1997-1-3 [32] bestehen zur Ermittlung der axialen Pfahlwiderstände folgende Möglichkeiten:

- 1) statische Probelastungen
- 2) dynamische Probelastungen
- 3) Auswertung von Proberammungen mittels Rammformeln
- 4) Berechnung mittels Tabellenwerten
- 5) Erfahrungswerte

Probelastungen in repräsentativem bzw. vergleichbarem Baugrund liefern in der Regel die verlässlichsten Ergebnisse über die erzielbaren Pfahlwiderstände und stellen daher das bevorzugte Verfahren dar. Schließlich stammen sowohl Tabellen- als auch Erfahrungswerte ebenfalls aus

Probelastungen oder Baugrundversuchen und Rammformeln müssen an Proberammungen kalibriert sein [32]. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit und des Zeitbedarfes wird jedoch zumeist auf Erfahrungs- oder Tabellenwerte zurückgegriffen, die jedoch in der Bemessung mit Modellfaktoren abgesichert werden.

Die verlässlichste Methode zur Bestimmung von Pfahlwiderständen sind statische Probelastungen. Dies äußert sich auch in der Bemessung (siehe Abschnitt 3.6) [32]. Im Allgemeinen wird der charakteristische Pfahlwiderstand aus dem mit Streuungsfaktoren abgeminderten Mittelwert und Minimum der gemessenen Werte ermittelt [32]. Mit den Streuungsfaktoren werden Unsicherheiten aus der Pfahlherstellung und dem Baugrund abgedeckt. Die Höhe der Abminderung hängt von Art und Anzahl der Probelastungen ab (siehe ebenfalls Abschnitt 3.6). Aus statischen Probelastungen können aber auch vollständige Widerstands-Setzungs-Linien (WSL) bzw. Widerstands-Hebungslinien (WHL) abgeleitet werden (vgl. Abb. 3.10) Dabei muss zwischen dem Grenzzustand der Tragfähigkeit (GZT) und dem Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit (GZG) unterschieden werden. Ist für den GZT der Grenzwiderstand aus der WSL nicht eindeutig ableitbar, so ist Gleichung (3.4) heranzuziehen [16].

Erfahrungswerte sind nichts anderes, als charakteristische Widerstands-Setzungs-Linien, die auf Grundlage von Erfahrungen mit Probelastungen definiert worden sind. Abb. 3.15 a) zeigt die charakteristische WSL eines druckbeanspruchten Bohrpfahls. Ab der Grenzsetzung s_{sg} nach Gleichung (3.3) kann kein zusätzlicher Mantelwiderstand $R_{s,k}$ mehr aktiviert werden. Das Maximum des Pfahlfußwiderstands $R_{b,k}$ ist ebenso bei der Grenzsetzung s_g (vgl. Gleichung (3.4)) definiert wie der Gesamtwiderstand des Druckpfahls $R_{c,k}$.

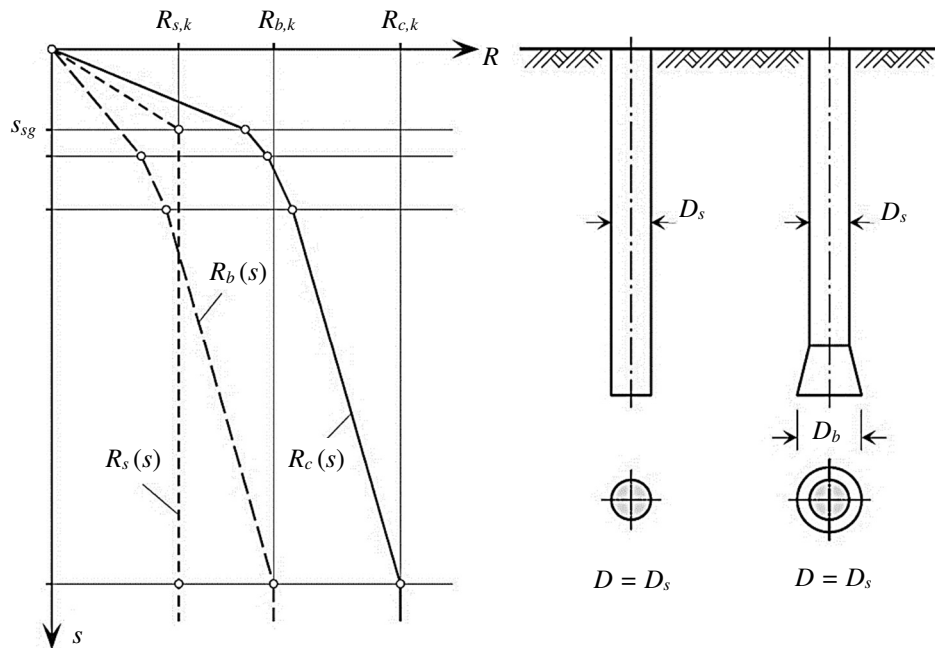


Abb. 3.15: a) Charakteristische Widerstands-Setzungs-Linie für Bohrpfähle, b) Definition des maßgebenden Pfahldurchmessers D ohne und mit Pfahlfußaufweitung, nach EA-Pfähle [23] aus [2] (adaptiert)

Aus dynamischen Probelastungen dürfen Pfahlwiderstände nach [32] nur dann abgeleitet werden, wenn eine Kalibrierung an statischen Probelastungen erfolgte.

Die Vorbereitung und Durchführung einer statischen Probelastung wird im folgenden Abschnitt erläutert.

3.4 Pfahlprobelastungen

In diesem Kapitel wird kurz erläutert wie eine konventionelle statische Pfahlprobelastung laut Norm durchgeführt wird. Dies war die Grundlage für den Entwurf der Lastspiele des Energiepfahlversuchs.

(Dieser Abschnitt stammt von Alexander Stöglehner [AS]; siehe Kapitel 1 bzw. Tab. 1.1)

In ÖNORM EN 1536 [34] wird bei Versuchen an Bohrpfählen zwischen Belastungsversuchen an Bohrpfählen und Integritätsprüfungen unterschieden sowie folgendes angemerkt:

„Belastungsversuche an Pfählen werden üblicherweise durchgeführt, um die Reaktion eines repräsentativen Pfahles und des angrenzenden Baugrundes auf Einwirkungen sowohl hinsichtlich der Setzung als auch der Grenztragfähigkeit zu bestimmen und umfassen:

- *statische Belastungsprüfungen (lastgesteuerte Probelastungen oder weggesteuerte Probelastungen); oder*
- *dynamische Pfahlversuche*

Integritätsprüfungen werden üblicherweise durchgeführt, um die Solidität und die korrekte Ausführung eines Pfahles nachzuweisen. Es werden die akustischen oder die Schwingungseigenschaften des Bohrpfahlbetons gemessen, um das Vorhandensein möglicher Fehlstellen im Pfahlkörper festzustellen.“

Integritätsprüfungen und dynamische Pfahlversuche werden in dieser Arbeit nicht behandelt. Informationen zu den dynamischen Pfahlversuchen sind in der Diplomarbeit von *Alexander Stöglehner [AS]* zu finden und Informationen zu den Integritätsprüfungen beispielsweise in [2] und [16].

3.4.1 Statische Probelastungen

3.4.1.1 Allgemeines

Statische Probelastungen sollten lt. ÖNORM B 1997-1-3 [32] dann durchgeführt werden, „wenn

- *keine Erfahrungen an vergleichbaren Pfahlgründungen vorliegen,*
- *der tragfähige Untergrund nicht aus mindestens mitteldicht gelagerten grobkörnigen oder mindestens steifen feinkörnigen (bindigen) Böden von ausreichender Schichtdicke aufgebaut ist,*
- *beim Abteufen der Pfähle (Bohren, Rammen, Vibrieren) unerwartete Untergrundverhältnisse angetroffen werden oder Zweifel bei der Ausführung der Pfähle auftreten, oder wenn*
- *Pfähle vorwiegend auf Zug beansprucht werden.“*

Weiters wird angemerkt: *„Probepfähle sind in der Regel keine Bauwerkspfähle. Sie sollten jedoch den geplanten Bauwerkspfählen möglichst entsprechen, und zwar hinsichtlich*

- *der Boden- und Grundwasserverhältnisse,*
- *der Pfahlart und des Herstellungsvorganges,*
- *der Pfahlabmessungen (Durchmesser, Länge bzw. Einbindetiefe) und*
- *der verwendeten Baustoffe (z. B. Beton, Bewehrung).“*

Die ÖNORM B 1997-1-3 [32] verweist hinsichtlich Vorbereitung, Durchführung und Dokumentation auf die EA-Pfähle [23].

3.4.1.2 Axiale Probelastungen

Herstellung der Probepfähle

Probepfähle sollen an Stellen mit repräsentativen Baugrundverhältnissen für das spätere Bauwerk positioniert werden. Es soll immer mindestens ein Probepfahl an der Stelle platziert werden, wo die ungünstigsten Baugrundverhältnisse erwartet werden [23].

Die Mobilisierung von Mantelreibung kann auf Abschnitten des Pfahlschaftes unterbunden werden, indem der Kontakt zwischen Pfahl und Boden verhindert wird. Dies mithilfe folgender Maßnahmen erfolgen [23]:

- Ummantelung des Bewehrungskorbes mit Gleitfolien
- Überbohren des Pfahles mit Verrohrung und Verfüllen des Ringraums mit Bentonitsuspension
- Auflockerungsbohrungen
- Hülsen mit Gleitmitteln (z.B. Bentonitsuspension)
- Doppelhülsen (vgl. Abschnitt 2.6.1)
- Herstellung eines Magerbetonpfahles größeren Durchmessers und Wiederaufbohren

Es muss ausreichend Aushärtungszeit für den Pfahlbeton eingeplant werden. Erst nach Erreichen der notwendigen Festigkeit dürfen die Probelastungen durchgeführt werden [23].

Es sollte für jede Pfahlart und für jede geotechnische einheitliche Baugrundsituation mindestens ein Probepfahl hergestellt werden. Jeweils mehrere Probepfähle haben den Vorteil, dass sich die anzusetzenden Streuungsfaktoren nach ÖNORM B 1997-1-3 [32] verringern [23].

Prüflast und Kriechmaß

Prinzipiell soll mit der Prüflast P_p [kN] der Grenzzustand der Tragfähigkeit (Nachweisverfahren GEO-2) erreicht werden. Der Pfahlwiderstand im GZT ist dann erreicht, wenn

- bei einem Druckpfahl die Pfahlsetzung $s = s_g$ nach Gleichung (3.4) oder bei einem Zugpfahl die Hebung $s = s_{sg}$ nach Gleichung (3.3) erreicht ist [23]:

$$R_{c;m} = R(s_g) \text{ oder } R_{t;m} = R(s_{sg}) \quad (3.6)$$

- ein definiertes Kriechmaß α_y (häufig: $\alpha_y \sim 2$ mm) auftritt [23]:

$$R_y = R(\alpha_y) \text{ oder } R_{t;m} = R(\alpha_y) \quad (3.7)$$

Das Kriechmaß α_y [mm] ist dabei die zeitabhängige Verschiebung des Pfahlkopfes unter konstanter Belastung [23] (hier wird für das Kriechmaß die Bezeichnung α_y aus ÖNORM B 1997-1-3 statt k_s aus EA-Pfähle) und wird nach ÖNORM B 1997-1-3 [32] wie folgt definiert:

$$\alpha_y = \frac{s_2 - s_1}{\log t_2 - \log t_1} \quad (3.8)$$

mit der Pfahlkopf-Setzungszunahme $s_2 - s_1$ [mm] im Zeitintervall $t_2 - t_1$ [min]. Das Kriechmaß kann im Diagramm ermittelt werden, wobei die Pfahlkopfsetzungen über die Zeit im logarithmischen Maßstab aufgetragen werden (Abb. 3.16 a)). Für die Ermittlung des Kriechmaßes am Ende jeder Laststufe müssen mindestens die letzten drei Wertepaare auf einer Geraden liegen. Der Kriechwiderstand R_y ist in Abb. 3.16 b) dort, wo das Krümmungsmaximum im α - P_p -Diagramm auftritt [32].

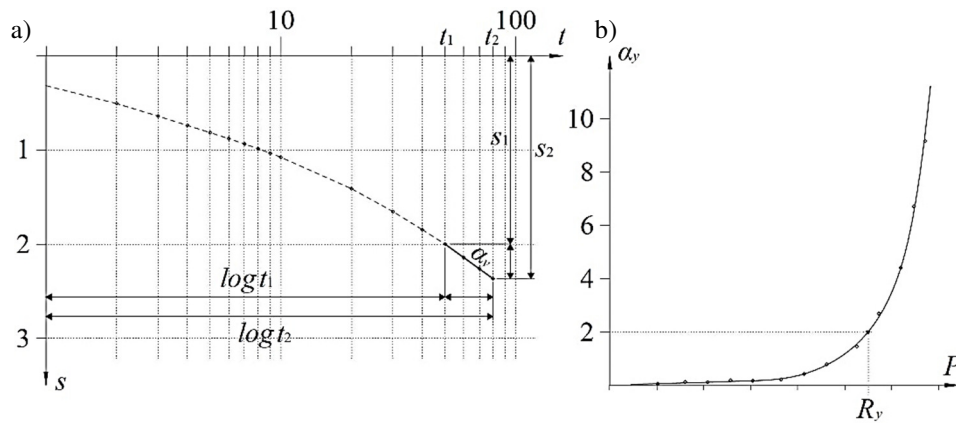


Abb. 3.16: a) Definition des Kriechmaßes α_y , b) Definition des Kriechwiderstands R_y teils nach EA-Pfähle teils nach ÖNORM B 1997-1-3 [32]

Die Prüflast P_p wird für Druck- bzw. Zugbelastung schließlich folgendermaßen festgelegt [23]:

$$\text{für Druckbelastung:} \quad P_p = F_{c,d} \cdot \gamma_t \cdot \xi_1 \quad (3.9)$$

$$\text{für Zugbelastung:} \quad P_p = F_{t,d} \cdot \gamma_{s,t} \cdot \xi_1 \quad (3.10)$$

$F_{c,d}$ Bemessungswert der Pfahlbeanspruchung auf Druck

$F_{t,d}$ Bemessungswert der Pfahlbeanspruchung auf Zug

γ_t Teilsicherheitsbeiwert für den Gesamtwiderstand eines Pfahls

$\gamma_{s,t}$ Teilsicherheitsbeiwert für den Zugwiderstand eines Pfahls

ξ_1 Streuungsfaktor für gemessene Probebelastungswiderstände

Anforderungsstufen

Hinsichtlich Umfang der Instrumentierung gibt es drei Anforderungsstufen laut EA-Pfähle [23]:

a) *Grundsätzliche Anforderungen:*

Erfassung des Pfahlwiderstandes: hierfür sind die Verschiebung des Pfahlkopfes, die aufgebrachte Belastung sowie die Zeit zu messen. Die getrennte Erfassung von Pfahlspitzendruck und Pfahlmantelreibung ist nicht erforderlich.

b) *Erhöhte Anforderungen:*

Erfassung des Pfahlfußwiderstandes und des Pfahlmantelwiderstandes: hierfür sind die Verschiebung des Pfahlkopfes, die aufgebrachte Belastung, der Pfahlspitzendruck q_b sowie die Zeit zu messen. Aus q_b wird der Pfahlfußwiderstand R_b berechnet. Der Pfahlmantelwiderstand R_s ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Gesamtwiderstand des Pfahles und dem Pfahlfußwiderstand. Hierzu ist eine spezielle Instrumentierung am Pfahlfuß erforderlich.

c) *Hohe Anforderungen:*

Erfassung des Pfahlfußwiderstandes und der Längsverteilung der Pfahlmantelreibung: hierfür sind die Verschiebung des Pfahlkopfes, die aufgebrachte Belastung, die Pfahldehnung in verschiedenen, über die Pfahllänge verteilten Querschnitten, der Pfahlspitzendruck q_b sowie die Zeit zu messen. Hierzu ist eine spezielle Instrumentierung am Pfahlfuß und entlang des Pfahlschaftes erforderlich.

Erhöhte oder hohe Anforderungen sind laut EA-Pfähle [23] zu erfüllen:

- wenn die Mantelreibung nach Überschreitung eines Spitzenwertes auf einen geringeren Restwert abfallen kann,
- bei stark geschichtetem Baugrund,
- bei zu erwartender größerer negativer Mantelreibung,
- wenn die Pfahlköpfe der Probepfähle versuchstechnisch bedingt wesentlich höher liegen als die der Bauwerkspfähle,
- wenn besondere Anforderungen an die Begrenzung der Verformungen gestellt werden,
- bei Maßnahmen zur Mantelreibungsreduzierung, [...]

Belastungseinrichtung

Dabei ist prinzipiell zwischen Belastungseinrichtungen mit und ohne Widerlager zu unterscheiden. Als Widerlager kann gemäß Abb. 3.18 beispielsweise Folgendes dienen [23]:

- 1) Totlast
- 2) parallel zum Probepfahl angeordnete Verpressanker
- 3) sternförmig angeordnete, geneigte Verpressanker

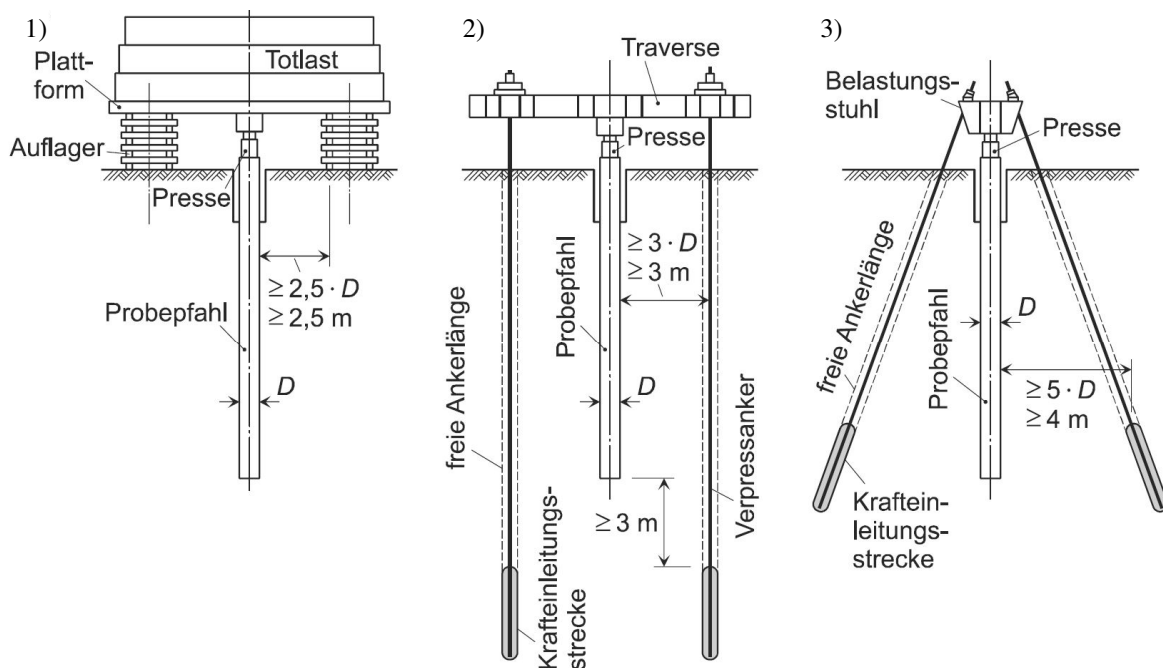


Abb. 3.17: Mögliche Belastungseinrichtungen und geometrische Vorgaben nach EA-Pfähle aus [19]

Dabei sind die Mindestabstände der Verankerungselemente einzuhalten. Als Widerlager können auch neben dem Probepfahl hergestellte Zugpfähle herangezogen werden (Abb. 3.18). Diese Belastungseinrichtung eignet sich gut für Druck- und Zugprobekbelastungen. Dabei sind dieselben Abstände wie in Abb. 3.17 1) einzuhalten. Für reine Zugprobekbelastungen kann bei geeigneter Widerlagerkonstruktion (z.B. Kreuzstoß) aber auch der umliegende Untergrund als Widerlager genutzt werden [23].

Die Lastaufbringung erfolgt entweder mit einer oder mehreren hydraulischen Pressen, kann aber auch mittels Totlast erfolgen. Die Last wird dabei von einem Lastverteilungsträger (Traverse), einer Plattform oder einem Belastungsstuhl auf den Probepfahl übertragen [23].

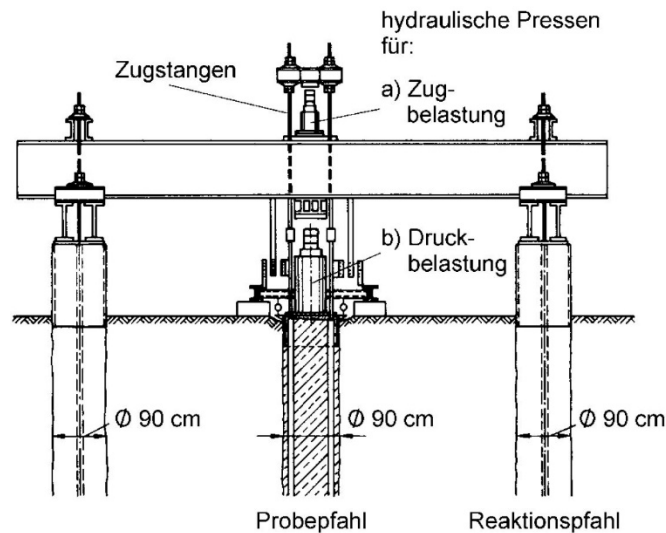


Abb. 3.18: Belastungseinrichtung Druck- und Zugbelastungen [19]

Zwischen Zylinderkolben und Lastverteilungskonstruktion empfiehlt sich ein Kalottenlager zum Ausgleich von Schiefstellungen. Bei zu geringem Kolbenhub muss dazwischen zusätzlich ausgefüllt werden (z.B. mit Stahlplatten). Für die Hydraulikpresse und die Pfahlkopfinstrumentierung muss der Pfahlkopf genügend Platz bieten und ist gegebenenfalls aufzuweiten. In diesem Fall muss unterhalb des Pfahlkopfes ausreichend Platz vorgesehen werden, sodass dieser infolge der Setzung nicht am Boden „aufsetzt“ [23].

Eine Variante, bei der der Probepfahl selbst oder Teile von ihm als Widerlager dienen, ist die Probebelastung mit einbetonierten Osterberg-Pressen (Abb. 3.19). In Abb. 3.19 a) wird das Prinzip des Single-Leveltests mit einer Osterberg-Presse und in Abb. 3.19 b) des Multi-Level-Tests mit zwei Osterberg-Pressen erläutert. Die Widerlagerkräfte werden dabei über Mantelreibung bzw. Spitzendruck abgetragen [23].

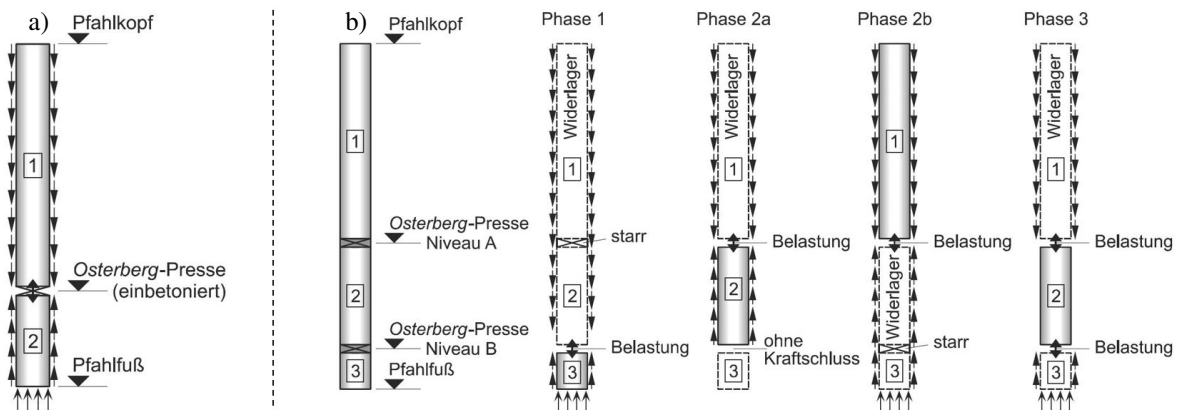


Abb. 3.19: Aufbau und Belastungsablauf beim a) Single-Level Test und b) Multi-Level Test aus [19]

Dieser Versuchsaufbau erfordert aufwändige Instrumentierungen für Kraft- und Verschiebungsmessungen. Er eignet sich deshalb für hohe Anforderungen sowie beengte Verhältnisse ohne Platz für Widerlagerkonstruktionen ober Tage [23].

Messbrücke und Pfahlkopfinstrumentierung

Für die Anbringung der Pfahlkopfinstrumentierung ist eine entsprechende Messbrücke (Referenzsystem) zu errichten, deren Auflager die Mindestabstände zum Probepfahlschaft gemäß Abb. 3.20

einhalten müssen. Die Messbrücke besteht aus den beiden Auflagerkonstruktionen (z.B. Kreuzstoß aus Kanthölzern) sowie zwei Messträgern und ggf. weiteren Querträgern. Die Messbrücke und die Instrumentierung ist während der Probelastung vor Erschütterungen und vor Witterungseinflüssen (Temperaturschwankungen, Niederschlag, Frost) zu schützen [23].

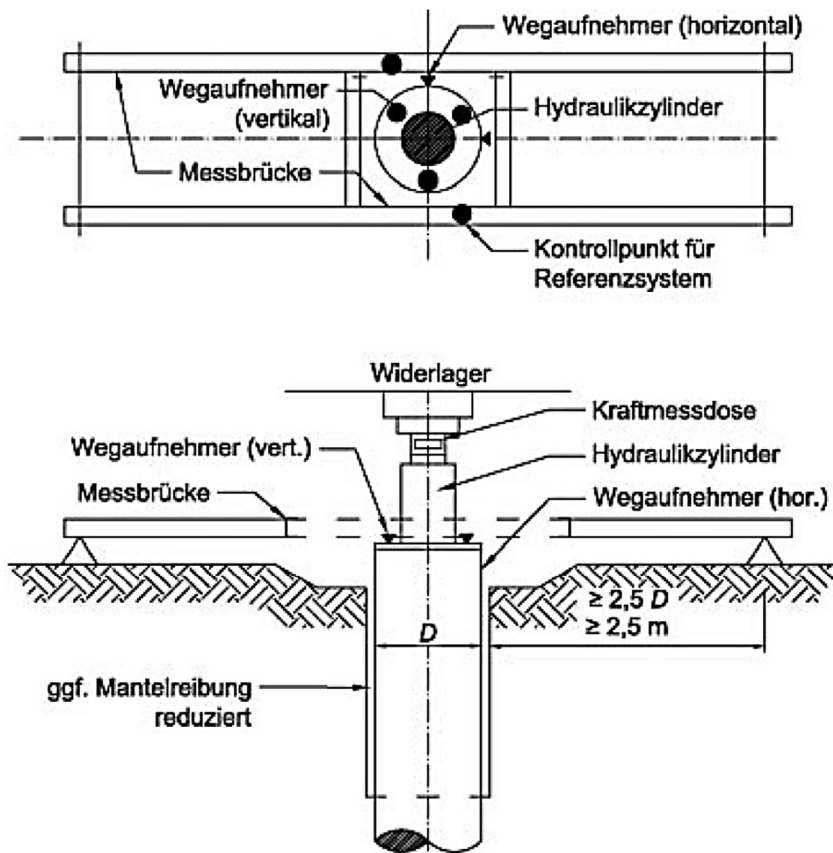


Abb. 3.20: Anordnung der Messbrücke und Pfahlkopfinstrumentierung aus [23]

In Tab. 3.1 ist der erforderliche Umfang an Instrumentierungen im Pfahlkopfbereich und deren Anforderungen zusammengefasst. Die Abtastpunkte der Wegaufnehmer sollten möglichst reibungsfrei gestaltet werden. Die kann beispielsweise durch Anbringen von Glasplättchen erfolgen. Die Wegaufnehmer sollten einen den erwarteten Setzungen angepassten Messbereich aufweisen, um allzu häufiges Umsetzen während der Probelastung zu vermeiden [23].

Tab. 3.1: Instrumentierung am Pfahlkopf und auf der Messbrücke nach EA-Pfähle [23]

Instrumentierung	Anzahl	Zweck	Anforderung
Kraftmessdose	1	Messung der Prüflast	Kalibrierung < 12 Monate Genauigkeitsklasse I
elektronische Vertikalwegaufnehmer	2-3	Messung der Vertikalverschiebung	Anordnung: symmetrisch Genauigkeit: 0,01 mm
mechanische Feinmessuhr	1	redundante Messung der Vertikalverschiebung	Anordnung: bei elektr. WA Genauigkeit: 0,01 mm
elektronische Horizontalwegaufnehmer	2	Messung der Horizontalverschiebungen	Anordnung: orthogonal Genauigkeit: 0,01 mm
Messstellen für Präzisionsnivellement	2	Kontrollmessung der Messbrücke	Nivelliergerät außerhalb des Einflussbereichs

Pfahlinstrumentierung

Die Pfahlinstrumentierung dient im Wesentlichen zur Ermittlung des Pfahlfuß- und Pfahlmantelwiderstands und befindet sich innerhalb des Pfahlbetons.

Der Pfahlfußwiderstand kann mithilfe von hydraulischen oder elektrischen Druckmesskissen (Abb. 3.21) erfasst werden. Sie werden unterhalb der Pfahlsohlfläche im Zuge der Herstellung eingebaut. Wichtig dabei ist, dass die mit der Setzung mobilisierte Pfahlfußkraft gleichmäßig und vollständig über das Druckmesskissen hinweggeleitet wird. Moosgummieinlagen können bei der Herstellung eines ordnungsgemäßen Kraftschlusses helfen. Für die formschlüssige Auflage des Druckmesskissens wird ebenjenes schon vor der Herstellung in ein Mörtelbett (Fertigbeton) mit gekrümmter Untersicht gebettet. Der damit hergestellte Pfahlfuß wird gemeinsam mit dem Bewehrungskorb schließlich eingebaut und dabei in einer Ortbeton-Ausgleichsschicht gebettet [23]. (Moosgummi wird von *Geokon* kritisch gesehen und wurde daher beim FPUH nicht ausgeführt.)

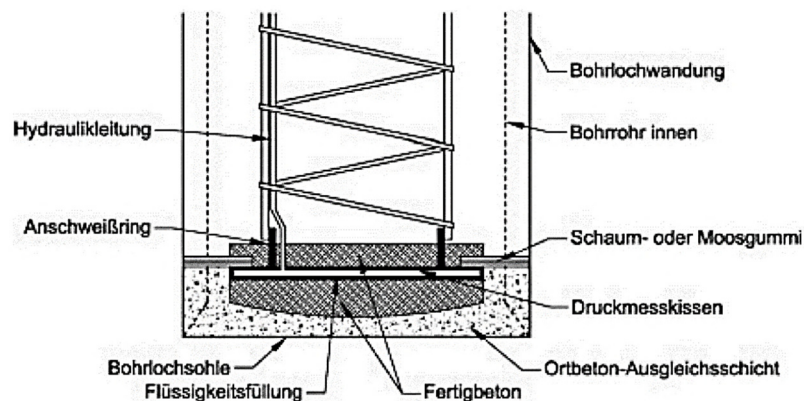


Abb. 3.21: Druckmesskissen im Pfahlfußbereich aus [23]

Nach [23] ist die Erfassung des Pfahlmantelwiderstands nur über indirektem Wege möglich. Dies erfolgt entweder

- durch Differenzbildung aus gemessener, aufgebracht Prüflast und gemessenem, aktivierten Pfahlfußwiderstand (Abb. 3.22 a)) oder
- durch Erfassung der Pfahllängsdehnungen und Ermittlung der Pfahllängskraft über Hooke'sche Gesetz ($\sigma = E \cdot \epsilon$) (Abb. 3.22 b) bis d))

Zur Messung der Pfahllängsdehnungen gibt es demnach drei Möglichkeiten (Abb. 3.22) [23]:

- Betondehnungsaufnehmer (Abb. 3.22 b):
Die Ermittlung der Längsdehnung erfolgt mittels elektronischer Dehnmessstreifen oder Schwingsaitenaufnehmern, von denen zwei bis drei je festgelegten Horizont am Bewehrungskorb vor dessen Einbringung montiert werden. Durch den Verbund kann somit die Betondehnung gemessen werden, womit die Längenänderungen und schließlich der Längskraftverlauf errechnet werden können.
- Extensometer (Abb. 3.22 c)):
Die Ermittlung der Längsdehnung von Abschnitten verschiedener Länge erfolgt mit mehreren Extensometern. Durch Differenzbildung erhält man die Dehnungsverteilung über die Pfahllänge, womit die Längenänderungen und schließlich der Längskraftverlauf errechnet werden können. (Alternativ kann statt mehreren Extensometern ein Kettenextensometer verwendet werden, das alleine schon die Ermittlung Längsdehnungen von festgelegten Abschnitten über die ganze Pfahllänge ermöglicht.)

- Gleitmikrometer (Abb. 3.22 d)):

Die Messung der Pfahldehnung erfolgt mit einer mobilen Sonde im Rohr mit vormontierten Fixpunkten. Für die Messungen muss das Rohr zugänglich sein.

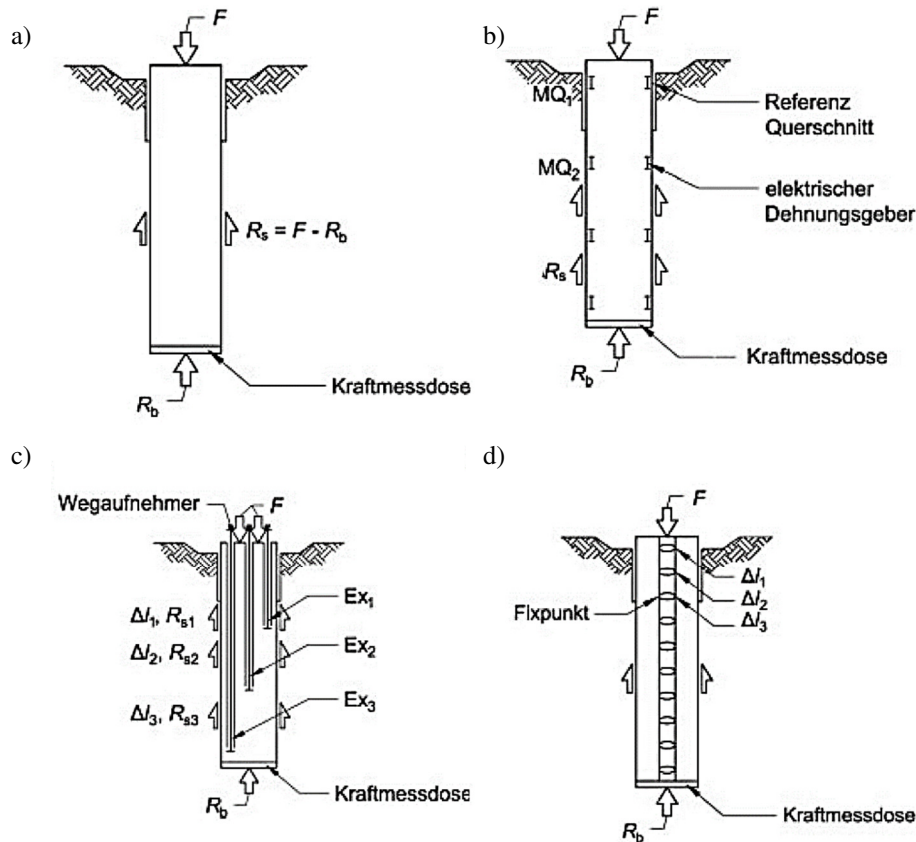


Abb. 3.22: Möglichkeiten zur Erfassung des Pfahlfußwiderstands aus [23]

Versuchsablauf

Die Probelastung sollte mind. 2 Lastzyklen umfassen (Abb. 3.23). Die Maximallaststufe des 1. Zyklus sollte auf Höhe des charakteristischen Werts der Pfahlbeanspruchung F_k (Gebrauchslast) liegen und wird in 4 Laststufen aufgebracht. Die Maximallast im letzten (hier 2.) Zyklus ist gleich der Prüflast P_p . Sie wird bis zum Wiedererreichen der Gebrauchslast in denselben Laststufen wie jene des 1. Zyklus aufgebracht - danach in 4 weiteren Laststufen. Die Mindestbeobachtungszeiten auf den Laststufen sowie die Mindestzeit der Laststufenaufbringung sind Abb. 3.23 zu entnehmen. Bei erhöhten und hohen Anforderungen (siehe oben) kommt zu den Mindestbeobachtungszeiten noch das Kriterium zum Abklingen der Verschiebungsgeschwindigkeit unter einen bestimmten Wert hinzu. Im 1. Lastzyklus muss bis zum Erreichen der Gebrauchslast die Verschiebungsgeschwindigkeit auf der jeweiligen Laststufe bis auf einen Wert von 0,1 mm in 20 mm abgeklungen sein. Auf allen weiteren Laststufen darf die Verschiebungsgeschwindigkeit maximal 0,1 mm in 5 mm betragen, ehe die nächste Laststufe aufgebracht werden kann. Bei Entlastungen gibt es nur Vorgaben hinsichtlich Mindestbeobachtungszeit [23].

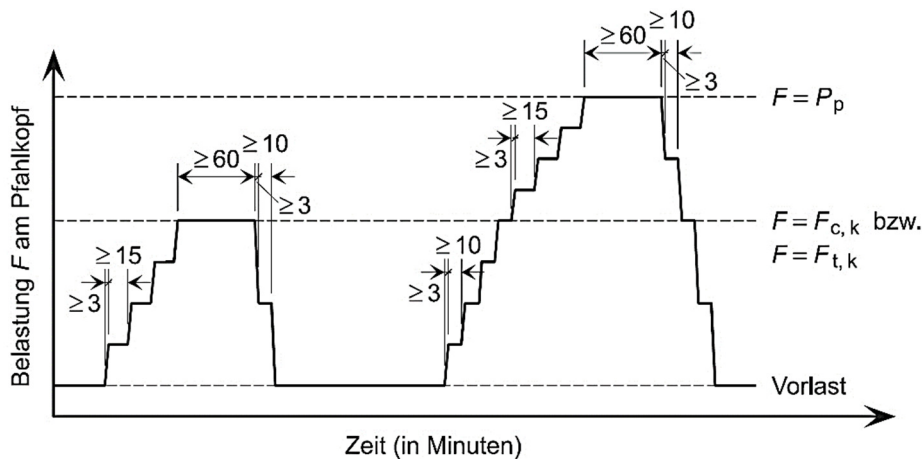


Abb. 3.23: Möglichkeiten zur Erfassung des Pfahlfußwiderstands nach [23] aus [19]

Bei grundsätzlichen Anforderungen kann die Last auf den Laststufen manuell konstant gehalten werden. Bei erhöhten und hohen Anforderungen ist eine automatische Lastkonstanthaltung nötig [23].

Messintervalle und Aufzeichnungen

Diesbezüglich wird auf die EA-Pfähle [23] verwiesen.

Auswertung

Der erforderliche Umfang der Auswertung richtet sich nach den Anforderungen [23]:

- *grundsätzliche Anforderungen*: nur WSL bzw. WHL
- *erhöhte Anforderungen*: WSL/WHL, Zeit-Verschiebungslinie, Kriechmaßbestimmung
- *hohe Anforderungen*: WSL/WHL, Zeit-Verschiebungslinie, Kriechmaßbestimmung, Darstellung des Dehnungsverlaufs, Längskraftverlaufs und Mantelreibungsverlauf

Generell sind die Pfahlwiderstandsanteile darzustellen, sofern sie getrennt erfasst wurden [23].

Dokumentation und Berichte

Für die erforderlichen Inhalte der Dokumentation sowie des Versuchs- und Ergebnisberichts wird auf die EA-Pfähle [23] verwiesen.

3.5 Normen und Richtlinien

3.5.1 Normen und Richtlinien in Bezug auf Energiepfähle

Folgende Normen gibt es, in Bezug auf die geothermische Energienutzung, auf europäischer Ebene und wurden in Österreich auf nationaler Ebene bereits umgesetzt:

ÖNORM EN 15450: Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen; 2008 [29]

ÖNORM EN 378 (Teil 1 bis 4): Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen; 2017 [30]

Diese Normen befassen sich im Wesentlichen nur mit Wärmepumpen, speziell deren Auslegungsparametern und Dimensionierung.

Dokumente aus dem deutschsprachigen Raum, die sich mit der geothermischen Energienutzung auf nationaler Ebene befassen werden im Folgenden aufgelistet:

- Österreich
 - ÖBV Richtlinie „Erdwärmennutzung mit Massivabsorbern“; 2017 [28]
 - ÖWAV-Regelblatt 207: Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrund-Heizen und Kühlen; 2009 [39]
 - LB-VI: Standardisierte Leistungsbeschreibung Verkehr und Infrastruktur; Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr; derzeit noch in Bearbeitung. (sollte Angaben zur oberflächennahen Geothermie enthalten) [26]
- Deutschland
 - EA Geothermie: Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie- Planung, Bau, Betrieb und Überwachung; 2015 [24]
 - VBI-Leitfaden „Oberflächennahe Geothermie“; Verband Beratender Ingenieure (VBI); 2012. [44]
 - VBI-Leitfaden „Shallow Geothermal Energy – VBI Guidelines for Projects in Germany“; Verband Beratender Ingenieure (VBI); Berlin; 2010 [43]
 - VDI 46440 Blatt 1 bis 44: Thermische Nutzung des Untergrunds; Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI); 2010 [45]
 - BASt-Bericht B96: Geothermische Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken; Bundesanstalt für Straßenwesen – Brücken – und Ingenieurbau [6]
- Schweiz
 - AWP T1: Wärmepumpenheizungsanlagen mit Erdwärmesonden. Technisches Merkblatt der Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen; 2007 [23]
 - SIA 384/6: Erdwärmesonden; 2010 [40]
 - SIA D 0136: Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme; 1996 [41]
 - SIA D 0190: Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdberührten Betonbauteilen- Leitfaden zu Planung, Bau und Betrieb; 2005 [42]

Dies sollte einen Überblick über die Regelwerke in Bezug auf die geothermische Energienutzung geben. Bisher wurde in dieser Diplomarbeit hauptsächlich auf die Richtlinie *Erdwärmennutzung mit Massivabsorbern* [28] eingegangen, da diese auch die Planung, Ausführung und den Betrieb derartiger Anlagen aufzeigt.

3.5.2 Normen und Richtlinien in Bezug auf Pfähle im Allgemeinen

ÖNORM EN 1997-1 (2009-05-15) – „Eurocode 7“

Das Technische Komitee CEN/TC 250 erarbeitete diese Norm EN 1997-1 den sogenannten Eurocode 7 (EC7). Die EN 1997-1 behandelt generell den Entwurf, die Bemessung und Berechnung in der Geotechnik. Es gibt einen Nationalen Anhang für diese Norm (ÖNORM B 1997-1), in welchem alle national festgelegten Kenngrößen für die Bemessung und Planung von Hoch- und Ingenieurbauwerken enthalten sind. Im Kapitel 7 dieser Norm wird genauer auf Pfahlgründungen eingegangen [36].

Die zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Diplomarbeit aktuelle Ausgabe der ÖNORM EN 1997-1 stammt aus dem Jahr 2014. Das aktuelle nationale Anwendungsdokument (ÖNORM B 1997-1-1) bezieht sich jedoch auf den Stand 2009.

ÖNORM EN 1536 (2015-08-01)

Wie der Eurocode 7 (ÖNORM EN 1997-1) wurde auch diese Ausführungsnorm vom einem Technischen Komitee des CEN (TC288) erarbeitet. Die Ausführungsphase bei Pfahlgründungen verlangt Erfahrung und Kenntnis, deswegen erfordert dieses spezielle Aufgabengebiet geschultes Fachpersonal. Diese Norm kann somit die Erfahrungen von Fachunternehmen nicht ersetzen. Die EN 1536 wurde als Ergänzung zum EC 7 erarbeitet und beschäftigt sich mit Fragen der Bemessung nur in jenen Fällen, wenn es für die Ausführung notwendig ist. Diese Norm enthält in vollem Umfang die Bauausführung und Überwachung von Pfahlgründungen [34].

ÖNORM B 1997-1-1 (2013-09-01)

Mit dieser Norm wurden die nationalen Festlegungen und Ergänzungen für eine Nachweisführung gemäß Eurocode 7 präzisiert. Wie schon zuvor erwähnt, wurden in der ÖNORM EN 1997-1 Angaben zu Kenngrößen für nationale Anpassungen offen gelassen. Diese hier festgelegten nationalen Parameter gelten für den jeweiligen Staat im gegenständlichen Fall ausschließlich für Österreich. Diese Norm ist somit gemeinsam mit dem Eurocode 7 anzuwenden [31].

ÖNORM B 1997-1-3 (2015-08-01)

Diese Norm enthält den Entwurf, die Berechnung sowie die Bemessung von Pfahlgründungen nach ÖNORM EN 1997-1. Die Nachweise von Pfahlgründungen in dieser Norm gelten für die Ableitung von Lasten über Pfähle in den Untergrund. Es handelt sich dabei um den Nachweis des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit und der Tragfähigkeit differenziert je nach Art, Baustoff und Herstellungsweise des Pfahls. Im folgenden Kapitel wird genauer auf diese Norm eingegangen im Speziellen auf die Bemessung von Pfahlgründungen [32].

ÖBV RL Bohrpfähle (Ausgabe Nov. 2013)

Die ÖBV Richtlinie für Bohrpfähle ist eine der Richtlinien, die von der Österreichischen Bautechnik Vereinigung erarbeitet wurde. Richtlinien der ÖBV beinhalten den Stand der Technik und sind ein Hilfsmittel für Planung und Ausführung. In dieser Richtlinie werden Verfahrensgrenzen von den gebräuchlichsten Bohrverfahren aufgezeigt. Die Richtlinie für Bohrpfähle hat ihren Geltungsbereich im Allgemeinen für die Herstellung und Planung von Bohrpfähle, die laut ÖNORM EN 1536 einen kreisrunden Querschnitt und einem Durchmesser von ≥ 30 cm bis 300 cm haben. Im Folgenden ist eine kurze Übersicht über die Richtlinie zu finden [23].

Vorarbeiten für die Planung von Bohrpfählen werden am Anfang der Richtlinie behandelt. Dies umfasst unter anderem die Projektangaben, Baugrunduntersuchungen und Erkundung von benachbarten Anlagen. Im Folgenden werden dann Klassifizierungen der Wasserdichtheit von Bohrpfahlwänden erörtert. Es werden dafür je nach Wasserdruckhöhe und Konstruktionsklasse, Anforderungsklassen bestimmt welche, wie in der Richtlinie für „Dichte Schlitzwände“, beginnen mit A3 als dichteste Klasse aufsteigen bis A5. Bei der Planung und Bemessung von Bohrpfählen wird auf die ÖNORM EN 1997-1 bzw. deren nationale Ergänzungsnormen verwiesen. Es sind außerdem Angaben zur konstruktiven Bewehrung sowie zur Fugenausbildung enthalten. Ein Kapitel widmet sich primär den Betonstandards für „Dichte Bohrpfahlwände“ wobei für die Herstellung, Transport und den Einbau von Beton grundsätzlich die ÖNORM B 4710-1 gilt. Jedoch werden unter anderem auch genaue Anforderungen an die Betonausgangsstoffe gestellt sowie eine Betonprüfung definiert. Die verschiedenen Verfahren zur Herstellung der Bohrpfähle werden sehr anschaulich dargestellt und die verschiedenen Merkmale der Verfahren zur Wahl der Herstellungsart erläutert. Als Abschluss werden dann Sondermaßnahmen und Sonderlösungen, wie z.B. Pfahlfußaufweitung, Pfahlmantelverpressung sowie nachträgliche Abdichtungsmaßnahmen, diskutiert [23].

3.6 Bemessung von Pfählen

Da bis jetzt noch keine österreichische Norm bzw. Gesetzgebung Bezug auf die statische Bemessung von Energiepfählen genommen hat, wird im Folgenden die Bemessung von konventionellen Pfahlgründungen unter rein mechanischer Belastung erläutert.

(Dieser Abschnitt entstand in Zusammenarbeit mit Alexander Stöglehner [AS] mit Ergänzungen von Christina Marzy [CM]; siehe Kapitel 1 bzw. Tab. 1.1)

3.6.1 Allgemeines

Die Bemessung von Pfahlgründungen in Österreich ist in ÖNORM B 1997-1-3 [32] geregelt. Diese nationale Norm basiert auf dem semiprobabilistischen Bemessungskonzept mit Teilsicherheiten gemäß ÖNORM EN 1997-1 (Eurocode 7) [36] und ersetzt seit 2015 die bis dahin gültige Bemessung mit globalen Sicherheiten. ÖNORM EN 1997-1 sieht drei Geotechnische Kategorien (GK 1 bis GK 3) vor, die für die Festlegung von geotechnischen Anforderungen eines Projekts anzuwenden sind. Diese Kategorien beruhen sowohl auf dem Schwierigkeitsgrad des Bauwerks als auch auf dem Schwierigkeitsgrad des Baugrundes. Zuerst wird ein Projekt vorläufig eingestuft. Diese Einstufung ist aber im Laufe der Planungsphase, besonders nach der geotechnischen Erkundung, zu überprüfen und zu adaptieren [32]. Das Grunddokument ÖNORM EN 1997-1 sieht zunächst folgende Einteilung vor.

In die Geotechnische Kategorie 1 werden kleine und relativ einfache Bauwerke eingeordnet. Diese müssen folgende Eigenschaften erfüllen:

- Der Grund muss aus Erfahrung und qualitativen geotechnischen Untersuchungen die Anforderungen erfüllen.
- Das Risiko muss vernachlässigbar sein.

Zur Geotechnischen Kategorie 2 zählen konventionelle Gründungen und Bauwerke, die kein ungewöhnliches Risiko mit sich bringen sowie keine schwierigen Baugrund- und Belastungsverhältnisse aufweisen. Die Geotechnische Kategorie 3 beinhaltet alle Bauwerke sowie Bauwerksteile, die nicht in GK 1 oder GK 2 gehören. Im Allgemeinen bedeutet dies, dass in dieser Kategorie große, ungewöhnliche Bauwerke oder zum Beispiel Bauwerke mit außergewöhnlich hohem Risiko umfasst [36]. Das österreichische Anwendungsdokument ÖNORM B 1997-1-1 [31] verweist auf eine davon abweichende Einteilung im Dokument ÖNORM B 1997-2 [37]. Darin sind im Anhang A Beispiele für geotechnische Bauwerke der GK 1 und GK 3 angeführt. Im Unterschied zur ÖNORM EN 1997-1 fallen nun allerdings alle Bauwerke, die nicht der GK 1 oder GK 3 zuzuordnen sind, in GK 2.

Nach ÖNORM EN 1536 [34] sind Pfahlgründungen zumindest der Geotechnischen Kategorie 2 (GK 2) zuzuordnen. Bei Zutreffen eines der folgenden Kriterien fallen diese jedoch unter GK 3:

- Vorliegen von besonders hoher Last oder Verformungsempfindlichkeit
- Planung von Mantel- und/oder Fußnachverpressungen zur Erhöhung der Tragfähigkeit
- Keine Erfahrung mit vorliegender Wechsel-, Schwell- und dynamischer Beanspruchung
- Ausführung einer Kastengründung oder Kombinierten Pfahl-Plattengründung

Kastengründungen und kombinierte Pfahl-Plattengründungen werden generell der Geotechnischen Kategorie 3 zugeordnet.

3.6.2 Einwirkungen

Folgende Einwirkungen müssen beim Nachweis einer Pfahlgründung nach [32] beachtet werden:

- Ständige und veränderliche Einwirkungen (Eigengewicht, Nutzlast)
- Baugrundabhängige Einwirkungen (negative Mantelreibung, Seitendruck und aus Setzungen resultierende Biegebeanspruchungen)
- Wasserdrücke und Auftrieb

Generell werden in der Bemessung von Pfählen die charakteristischen Werte der Einwirkungen verwendet und aus diesen leiten sich dann die charakteristischen Beanspruchungen der Pfähle ab.

Seitendruck

Aufgrund von Bodenbewegungen rund um den Pfahl können Seitendrucke auf den Pfahl auftreten diese müssen dann bei der Berechnung berücksichtigt werden [32].

Negative Mantelreibung

Negative Mantelreibung bewirkt eine zusätzliche vertikale Belastung des Pfahlschaftes und tritt dann auf, wenn der umgebende Boden durch flächige Auflasten zusammengedrückt wird. Dies kann vor allem in flüssigen, breiigen, feinkörnigen Bodenschichten, die eine größere Zusammendrückbarkeit haben als die darüber oder darunter liegenden Bodenschichten, auf. Die negative Mantelreibung kann vor allem durch die gewählte Pfahlform und -art beeinflusst werden [32].

Erdbeben

Die Erdbebeneinwirkungen müssen gemäß ÖNORM EN 1998-1 und ÖNORM EN 1998-5 sowie deren nationale Anwendungsdokumente beachtet werden [32].

3.6.3 Widerstände

3.6.3.1 Allgemeines

Die Art der Belastung gibt vor, welche der folgenden Pfahlwiderstände vorhanden sind [32]:

- Pfahlwiderstand durch axialen Druck belastete Pfähle
- Pfahlwiderstand durch axial auf Zug beanspruchte Pfähle
- Pfahlwiderstand durch quer zur Achse beanspruchte Pfähle

Die Belastung gibt vor, welche der folgenden Pfahlwiderstände in der Berechnung berücksichtigt werden [32]:

- Mantelwiderstand R_s
- Fuß- bzw. Sohlwiderstand R_b bei Druckbeanspruchung; bei Zug wird dies nur berücksichtigt, wenn eine Fußaufweitung vorhanden ist
- Widerstand quer zur Achse R_r

3.6.3.2 Pfahlwiderstände

Axiale Pfahlwiderstände auf Zug und Druck Belastung in Böden und Fels

Es gibt mehrere Möglichkeiten, um die charakteristischen Werte für axiale Pfahlwiderstände zu erhalten. Die folgenden Daten gelten nur für Einzelpfähle. Pfahlgruppen sowie Pfahlwände haben ein anderes Widerstands-Setzungsverhalten als Einzelpfähle. Die folgende Auflistung enthält die zuvor erwähnten Ermittlungsmöglichkeiten und stammt aus [32]:

- Statische Pfahlprobelastungen

- Dynamische Pfahlprobelastungen für axial auf Druck beanspruchte Pfähle nur dann, wenn deren Ergebnisse an statischen Probelastungen kalibriert wurden.
- Auswertung von Proberammungen mittels anerkannter Rammformeln für Druck beanspruchte Verdrängungspfähle
- Berechnung mit Hilfe von Tabellenwerten für axial auf Druck und/oder Zug beanspruchte Bohrpfähle gemäß Anhang C der ÖNORM B 1997-1-3 (2015-8-01)
- Ermittlung der Pfahlwiderstände von axial auf Druck beanspruchten verpressten Mikropfählen gemäß Anhang D der ÖNORM B 1997-1-3 (2015-8-01)
- Ermittlung der Pfahlwiderstände von axial auf Druck und/oder Zug beanspruchten Pfählen mit Hilfe von Erfahrungswerten von ausgeführten Pfahlgründungen und/oder Probelastungen, deren Zuverlässigkeit unter vergleichbaren Bedingungen nachgewiesen wurden.

Der letzte Punkt ist von besonderem Interesse, da sich die Thematik des Forschungsprojekts diesem Teil der Norm widmet.

Pfahlwiderstände quer zur Pfahlachse

Es gibt auch für diese Art der Beanspruchung mehrere Möglichkeiten, die Pfahlwiderstände zu ermitteln [32]:

- Statische Pfahlprobelastung
- Berechnungen
- Erfahrungswerte

Pfahlwiderstände axial und quer zur Pfahlachse

Bei einer kombinierten Pfahlbelastung, also axial und quer zur Pfahlachse, werden für die Nachweisführung die Pfahlwiderstände getrennt voneinander ermittelt [32].

Pfahlwiderstände bei nicht ruhenden Einwirkungen

Für Hinweise zu dynamischen, zyklischen und stoßartigen Belastungen wird in [32] auf die EA-Pfähle [23] verwiesen.

Charakteristische Werte der Pfahlwiderstände

Die Werte für den inneren Tragwiderstand $R_{m,k}$ ist nach den Materialien und den Bestimmungen der Bauartnormen zu ermitteln.

Für die charakteristischen Werte des äußeren Tragwiderstandes werden in [32] drei Fälle unterschieden.

(1) Äußerer Tragwiderstand $R_{c,k}$ für **axial auf Druck** beanspruchte Einzelpfähle:

$$R_{c,k} = R_{b;k} + R_{s;k} \quad (3.11)$$

$R_{b;k}$ charakteristischer Wert des Widerstands aus der Mantelreibung [MN]

$R_{s;k}$ charakteristischer Wert des Widerstands aus der Mantelreibung [MN]

Bei Tragwerken, die nicht in der Lage sind, Lasten von „weichen“ zu „steifen“ Pfählen umzulagern, gilt hinsichtlich der Auswertung von Pfahlprobelastungen folgende Beziehung:

$$R_{c,k} = \min \left\{ \frac{(R_{c;m})_{\text{mitt}}}{\xi_1}; \frac{(R_{c;m})_{\text{min}}}{\xi_2} \right\} \quad (3.12)$$

$(R_{c,m})_{mitt}$... Mittelwert der Messungen aus Pfahlprobebelastungen

$(R_{c,m})_{min}$... kleinster Wert von allen Messungen $R_{c,m}$

Hier müssen Streuungsfaktoren ξ_1 und ξ_2 laut ÖNORM EN 1997-1 (genauere Erklärung siehe Abschnitt 3.6.7) angewendet werden. Diese wurden zur Abdeckung von durch Belastungsversuche möglichen Unsicherheiten eingeführt.

Bei Tragwerken, die in der Lage sind Lasten von „schwachen“ zu „starken“ Pfählen umzulagern, gilt folgende Beziehung:

$$R_{c;k} = \min \left\{ \frac{(R_{c,m})_{mitt}}{\xi_{1/1,1}}; \frac{(R_{c,m})_{min}}{\xi_{2/1,1}} \right\} \text{ mit } \xi_{1/1,1} \geq 1,0 \quad (3.13)$$

ξ_1 Streuungsfaktor bezogen auf den Mittelwert von statischen Pfahlprobebelastungen

ξ_2 Streuungsfaktor bezogen auf den Minimalwert von statischen Pfahlprobebelastungen

$(R_{c,m})_{mitt}$... Mittelwert der Messungen aus Pfahlprobebelastungen

$(R_{c,m})_{min}$... kleinster Wert von allen Messungen $R_{c,m}$

Wird der Pfahlwiderstand aufgrund der Ergebnisse aus Baugrunduntersuchungen ermittelt, gelten die Gleichungen (3.14) und (3.15):

$$R_{b;k} = A_b \cdot q_{b;k} \quad (3.14)$$

$R_{b;k}$ charakteristischer Wert des Pfahlfußwiderstands [MN]

A_b Pfahlfußfläche [m²]

$q_{b;k}$ charakteristischer Wert des Pfahlsohlwiderstands [MN/m²]

Anmerkung: In ÖNORM B 1997-1-3, 7.2.6.2 wird begrifflich nicht zwischen dem Pfahlfußwiderstand $R_{b;k}$ als Kraft [MN] und dem Pfahlfußwiderstand $q_{b;k}$ als Spannung [MN/m²] unterschieden. In Anhang C wird $q_{b;k}$ [MN/m²] wiederum als Pfahlsohlwiderstand bezeichnet, was sich hier zur besseren Unterscheidung zu Nutze gemacht wird.

$$R_{s;k} = \sum_i A_{s;i} \cdot q_{s;i;k} \quad (3.15)$$

$R_{s;k}$ charakteristischer Wert des Widerstands aus der Mantelreibung [MN]

$A_{s;i}$ Pfahlmantelfläche in der Schicht i [m²]

$q_{s;i;k}$ charakteristischer Wert des Pfahlmantelwiderstands in der Schicht i [MN/m²]

Anmerkung: In ÖNORM B 1997-1-3, 7.2.6.2 wird begrifflich nicht zwischen dem Widerstand aus der Mantelreibung $R_{s;k}$ als Kraft [MN] und dem dem Widerstand aus der Mantelreibung $q_{s;k}$ als Spannung [MN/m²] unterschieden. In Anhang C wird $q_{s;k}$ [MN/m²] wiederum als Pfahlmantelwiderstand bezeichnet, was sich hier zur besseren Unterscheidung zu Nutze gemacht wird.

(2) Äußerer Tragwiderstand $R_{t;k}$ für **axial auf Zug** beanspruchte Einzelpfähle:

Hier müssen Streuungsfaktoren ξ_1 und ξ_2 laut ÖNORM B 1997-1-1 angewendet werden. Diese wurden zur Abdeckung von durch Belastungsversuche möglichen Unsicherheiten eingeführt. Der charakteristische Wert des äußeren Zugtragwiderstandes $R_{t;k}$ beträgt dann:

$$R_{t;k} = \min \left\{ \frac{(R_{t,m})_{mitt}}{\xi_1}; \frac{(R_{t,m})_{min}}{\xi_2} \right\} \quad (3.16)$$

$(R_{t,m})_{mitt}$... Mittelwert der Messungen $R_{t,m}$ aus Pfahlprobebelastungen

$(R_{t,m})_{min}$... kleinster Wert von allen Messungen $R_{t,m}$

Wird der Pfahlwiderstand aufgrund der Ergebnisse aus Baugrunduntersuchungen ermittelt, gilt folgende Gleichung:

$$R_{t;k} = \sum_i A_{s;i} \cdot q_{s;i;k} \quad (3.17)$$

$A_{s;i}$ Pfahlmantelfläche in der Schicht i [m²]

$q_{s;i;k}$ charakteristischer Wert des Pfahlmantelwiderstands in der Schicht i [MN/m²]

(3) Äußerer Tragwiderstand $R_{tr;k}$ für **quer zur Achse** beanspruchte Einzelpfähle:

Der äußere Pfahlwiderstandes gegenüber Querbelastung $R_{tr;k}$ berechnet sich nach Gleichung (3.18). Werden die charakteristischen Werte des Pfahlwiderstands über Belastungsversuche ermittelt, müssen Streuungsfaktoren ζ_1 und ζ_2 laut ÖNORM EN 1997-1 angewendet werden. Diese wurden zur Abdeckung von durch Belastungsversuche möglichen Unsicherheiten eingeführt.

$$R_{tr;k} = \min \left\{ \frac{(R_{tr;m})_{mitt}}{\zeta_1}; \frac{(R_{tr;m})_{min}}{\zeta_2} \right\} \quad (3.18)$$

$(R_{tr;m})_{mitt}$.. Mittelwert der Messungen $R_{tr;m}$ aus Pfahlprobebelastungen

$(R_{tr;m})_{min}$... kleinster Wert von allen Messungen $R_{tr;m}$

Werden die Werte des Tragwiderstandes $R_{tr;k}$ mit den Ergebnissen aus Baugrunduntersuchungen sowie Berechnung des Bettungsmoduls bestimmt, gilt die Berechnung gemäß Abschnitt 3.6.4.3.

3.6.4 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Im Folgenden wird auf die für die Thematik der Diplomarbeit wesentlichen Nachweise für den Grenzzustand der Tragfähigkeit eingegangen. In ÖNORM EN 1997-1 sind darüber hinaus weitere Nachweismethoden bei Pfahlgründungen angegeben. Im Folgenden werden die Nachweise für Einzelpfähle und nicht für Pfahlgruppen erläutert.

3.6.4.1 Axial auf Druck beanspruchte Einzelpfähle

Der folgende Nachweis gemäß Gleichung (3.19) gilt für den äußeren Tragwiderstand von Einzelpfählen. Mit diesem Bemessungskriterium gilt eine ausreichende Sicherheit gegen das Versagen, eines Einzelpfahls mit axialer Druckbelastung, durch Bruch des pfahlumgebenden Bodens.

$$F_{c;d} \leq R_{c;d} \quad (3.19)$$

$F_{c;d}$ Bemessungswert der Druckbelastung eines Pfahles

$R_{c;d}$ Bemessungswiderstand einer auf Druck belasteten Pfahles

Dabei stellt $F_{c;d}$ den Bemessungswert der Druckbelastung eines Pfahles dar und $R_{c;d}$ den Bemessungswiderstand eines auf Druck belasteten Pfahles.

Nachweis über Ergebnissen aus Baugrunduntersuchungen bzw. aufgrund von Erfahrungswerten

Wird der charakteristische Pfahlwiderstand aus den Ergebnissen von Baugrunduntersuchungen bzw. aus Erfahrungswerten abgeleitet, muss der Bemessungswert des Pfahlwiderstands $R_{c;d}$ für Druckpfähle nach Gleichung (3.20) bzw. (3.21) ermittelt werden.

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\eta_{P;c} \cdot \gamma_t} \quad (3.20)$$

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\eta_{P;c} \cdot \gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\eta_{P;c} \cdot \gamma_s} \quad (3.21)$$

$R_{b;k}$ charakteristischer Wert des Pfahlfußwiderstands

$R_{s;k}$ charakteristischer Wert des Widerstands aus der Mantelreibung

$\eta_{P;c}$ Modellfaktor für Druckpfähle je nach Ermittlungsverfahren (s. Abschnitt 3.6.3.2) gemäß **Tab. 3.2**

$\gamma_b, \gamma_s, \gamma_t$ Teilsicherheitsbeiwerte für Pfahlwiderstände gemäß **Tab. 3.3**

Die charakteristischen Pfahlwiderstände können mit unterschiedlichen Verfahren ermittelt werden. In Kapitle 3.6.3.2 wurden die unterschiedlichen Ermittlungsverfahren für die Pfahlwiderstände erläutert. Der Nachweis der Tragfähigkeit ist identisch für die unterschiedlich Ermittlungsverfahren der Pfahlwiderstände es fließen jedoch je nach Ermittlungsverfahren unterschiedliche Modellfaktor in die Berechnung ein. Die Modellfaktoren für alle Bemessungssituationen wurden gemäß Anhang A der ÖNORM B 1997-1-3 [32] in folgender Tabelle angegeben:

Tab. 3.2: Modellfaktoren gemäß Anhang A der ÖNORM B 1997-1-3 aus [32] (adaptiert)

	Fall	Symbol	Wert
1	Pfahlwiderstände auf axialen Druck aus statischen Pfahlprobelastungen	$\eta_{P;c}$	1,0
2	Pfahlwiderstände auf axialen Zug aus statischen Pfahlprobelastungen	$\eta_{P;t}$	1,0
3	Pfahlwiderstände auf axialen Druck mittels Tabellenwerten der Anhänge C und D	$\eta_{P;c}$	1,3
4	Pfahlwiderstände auf axialen Zug mittels Tabellenwerten der Anhänge C und D	$\eta_{P;t}$	2,5
5	Pfahlwiderstände auf axialen Druck aufgrund von vergleichbarer Erfahrung	$\eta_{P;c}$	$\geq 1,3$
6	Pfahlwiderstände auf axialen Zug aufgrund von vergleichbarer Erfahrung	$\eta_{P;t}$	$\geq 2,5$

Nachweis über Ergebnissen aus statischen Pfahlprobelastungen

Wird der charakteristische Pfahlwiderstand aus den Ergebnissen von statischen Probelastungen nach Gleichung abgeleitet, muss der Bemessungswert des Pfahlwiderstands $R_{c;d}$ für Druckpfähle nach Gleichung (3.22) bzw. (3.23) ermittelt werden.

$$R_{c;d} = \frac{R_{c;k}}{\gamma_t} \quad (3.22)$$

$$R_{c;d} = \frac{R_{b;k}}{\gamma_b} + \frac{R_{s;k}}{\gamma_s} \quad (3.23)$$

$\gamma_b, \gamma_s, \gamma_t$ Teilsicherheitsbeiwerte für Pfahlwiderstände gemäß **Tab. 3.3**

Zusätzlich müssen sehr schlanke Pfähle, die in einem sehr weichen bzw. fast flüssigen Boden gebettet sind, mit einem passenden Rechenmodell auf Knickversagen untersucht werden.

Die Teilsicherheitsbeiwerte für die Pfahlwiderstände wurden in ÖNORM B 1997-1-1 [31] festgelegt:

Tab. 3.3: Teilsicherheitsbeiwerte gemäß ÖNORM B 1997-1-1 [31]

Widerstand	Symbol	Wert
Spitzendruck	γ_b	1,10
Mantelreibung	γ_s	1,10
Gesamtwiderstand	γ_t	1,10
Mantelreibung bei Zug	$\gamma_{s,t}$	1,15

3.6.4.2 Axial auf Zug beanspruchte Einzelpfähle

Für den Nachweis der äußeren Tragfähigkeit von auf Zug beanspruchten Einzelpfählen nach dem Teilsicherheitskonzept sind gemäß ÖNORM EN 1997-1 [36] zunächst zwei Versagensmechanismen zu untersuchen:

- Herausziehen des Einzelpfahls aus dem Boden oder
- Anheben des an einem Zugpfahl hängenden Bodenkörpers

Der Herausziehewiderstand von axial auf Zug beanspruchten Einzelpfählen kann analog zu den auf Druck beanspruchten Einzelpfählen nach Gleichung (3.20) bis (3.21) ermittelt werden.

Nachweis gegen das Anheben des an einem Zugpfahl hängenden Bodenkörpers

Für Zugpfähle muss nicht nur die Sicherheit gegen Herausziehen des Pfahls aus dem Boden nachgewiesen werden, sondern auch die Sicherheit gegen das Anheben des am Zugpfahl hängenden Bodenkörpers.

Die Ermittlung der Geometrie des am Pfahl hängenden Bodenkörpers ist in ÖNORM B 1997-1-3 [32] zu finden. Der Nachweis gegen das Anheben des Bodenkörpers gemäß ÖNORM B 1997-1-1 [31] ist wie folgt zu führen:

$$G_{dst;d} + Q_{dst;d} = G_{stb;d} \quad (3.24)$$

$$G_{dst;d} = G_{dst;k} \cdot \gamma_{G;dst} \quad (3.25)$$

$$Q_{dst;d} = Q_{dst;k} \cdot \gamma_{Q;dst} \quad (3.26)$$

$$G_{stb;d} = G_{stb;k} \cdot \gamma_{G;stb} \quad (3.27)$$

$G_{dst;k}$ charakteristische Wert der destabilisierenden, ungünstigen ständigen Einwirkung

$Q_{dst;k}$ charakteristische Wert der destabilisierenden, ungünstigen veränderlichen Einwirkung

$G_{stb;k}$ charakteristische Wert der stabilisierenden, günstigen ständigen Einwirkung

$\gamma_{G;dst}$, $\gamma_{Q;dst}$, $\gamma_{G;stb}$ Teilsicherheitsbeiwerte

3.6.4.3 Quer zur Achse beanspruchte Einzelpfähle

Mit dem Bemessungskriterium gemäß Gleichung (3.28) gilt eine ausreichende Sicherheit gegen das Versagen eines querbeanspruchten Einzelpfahls durch Bruch des pfahlumgebenden Bodens.

$$E_{tr;d} < R_{tr;d} \quad (3.28)$$

$E_{tr;d}$ Bemessungswert der Querbeanspruchung des Pfahls

$R_{tr;d}$ Bemessungswert des Querwiderstands des Pfahls

Nachweis über Ergebnisse aus Baugrunduntersuchungen bzw. aufgrund von Erfahrungswerten

Sind die charakteristischen Werte aus den Ergebnissen von Baugrunduntersuchungen abgeleitet, ist der Nachweis der Tragfähigkeit folgendermaßen zu führen:

$$E_{tr;d} \cdot \gamma_E \leq \frac{R_{tr;k}}{\gamma_{R;e}} \quad (3.29)$$

- $E_{tr;k}$ char. Wert der resultierenden Beanspruchung des Bodens
 γ_E Teilsicherheitsbeiwert auf den char. Wert der Beanspruchung gemäß [31]
 $R_{tr;k}$ char. Wert des resultierenden passiven Erddrucks des Bodens
 $\gamma_{R;e}$ Teilsicherheitsbeiwert auf den char. Wert des Erdwiderstands gemäß [31]

Der Bettungsmodul darf entweder aus vergleichbaren Erfahrungen mit Ergebnissen aus Baugrunduntersuchungen abgeleitet werden oder aus Steifemoduln von Laboruntersuchungen nach Gleichung (3.30) errechnet werden:

$$k_{tr;k} = \frac{E_{s;k}}{b_k} \quad (3.30)$$

- $k_{tr;k}$ charakteristischer Wert des Bettungsmoduls [MN/m³]
 $E_{s;k}$ char. Wert des Steifemoduls in Richtung der Pfahlverschiebung [MN/m²]
 b_k maßgebender charakteristischer Wert der Einflussbreite [m]

Die Einflussbreite ergibt sich für Pfahldurchmesser $D \leq 1,0$ m zu $b_k = D$ bzw. für $D \geq 1,0$ m zu $b_k = 1,0$ m. Allerdings kann sich die Einflussbreite in Abhängigkeit der Festigkeits- und Verformungseigenschaften des Baugrunds auf einen Wert von bis zu $3 \cdot D$ erhöhen. Die Festlegung der Einflussbreite bzw. der Bettungsspannungen erfolgt üblicherweise durch den geotechnischen Gutachter und ist gegebenenfalls durch jene Erdwiderstandsspannungen zu begrenzen, die aus der räumlichen Erddruckberechnung resultieren.

Aus den Bettungsmoduln nach Gleichung (3.30) kann ein tiefenabhängiger Bettungsmodul $k_{tr;k}(z)$ mit Gleichung (3.31) berechnet werden.

$$k_{tr;k}(z) = k_{tr;k} \left(\frac{z}{d} \right)^n \quad (3.31)$$

- d Pfahleinbindetiefe [m]
 z betrachtete Tiefe [m]
 n Exponent, der den Bettungsmodulverlauf folgendermaßen beschreibt:
 $n = 0$ konstanter (oberer Grenzwert für überkonsolidierte, feinkörnige Böden)
 $n = 1$ linear zunehmend (grobkörnige und normalkonsolidierte, feinkörnige Böden)
 $n = 0,5$ parabolisch zunehmend (wirklichkeitsnaher Ansatz gem. Verfahren nach *Titze*)

Laterale Probelastungen sind allerdings dann unverzichtbar, wenn keine Erfahrungen zur Pfahl-Bodeninteraktion bei Querbeanspruchung vorliegen bzw. die Verformungen für den Grenzzustand der Tragfähigkeit maßgebend sind.

Nachweis über Ergebnisse aus statischen Pfahlprobelastungen

Der Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit muss mit Kenngrößen berechnet werden, die aus den Ergebnissen von statischen Pfahlprobelastungen abgeleitet werden. Der Bemessungswert des Querwiderstands ergibt sich dann aus folgender Gleichung:

$$R_{tr;d} = \frac{R_{tr;k}}{\gamma_{R;e}} \quad (3.32)$$

$R_{tr;k}$ charakteristischer Wert des äußeren Querwiderstands eines Pfahls

$\gamma_{R;e}$ Teilsicherheitsbeiwert auf den char. Querwiderstand aus Belastungsversuchen

Der Teilsicherheitsbeiwert ist mit $\gamma_{R;e} = 1,10$ gleich groß wie jener für Pfähle, die axial auf Druck beansprucht sind.

3.6.4.4 Grenzzustand der Tragfähigkeit des Pfahlbaustoffs

Das Bemessungskriterium für die Sicherheit gegen Erreichen der inneren Tragsicherheit ist wie folgt definiert:

$$E_d < R_{m;d} \quad (3.33)$$

E_d Bemessungswert der Beanspruchung

$R_{m;d}$ Bemessungswert des inneren Tragwiderstands (z.B. nach EC 2 für STB-Pfähle)

Die Bemessungswerte der Beanspruchung E_d ergeben sich durch Multiplikation der charakteristischen Schnittgrößen mit den Teilsicherheitsbeiwerten γ_Q und γ_G gemäß ÖNORM B 1997-1-1 [31].

3.6.5 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit

Generell werden die Anforderungen an die Gebrauchstauglichkeit durch absolute Setzungen und/oder Setzungsdifferenzen angegeben. Es gibt jedoch keine fixen Grenzwerte da diese projektspezifisch an die Anforderungen, die an das gesamte Bauwerk gestellt werden, abzuleiten sind. Der Nachweis kann jedoch auf Probelastungen, vergleichbaren Erfahrungen oder durch Anwendung der Tabellenwerte gemäß ÖNORM B 1997-1-3 [32] basieren. Liegen eine verformungsempfindliche Konstruktion und ein relativ heterogener Baugrund vor, sind die für den Nachweis maßgebende Kenngrößen mit Hilfe einer Parameterstudie zu berücksichtigen. Das Bemessungskriterium für die Sicherheit gegen Erreichen des Grenzzustandes der Gebrauchstauglichkeit ist wie folgt definiert:

$$E_d < C_d \quad (3.34)$$

Die Auswirkungen der Einwirkungen – im Regelfall handelt es sich hierbei um Verformungen, Verdrehungen oder Verzerrungen – aufgrund der maßgebenden Lastkombination werden mit E_d bezeichnet. Die Grenze für das maßgebende Gebrauchstauglichkeitskriterium wird mit C_d definiert.

Der Teilsicherheitsbeiwert für die Beanspruchung E_d ist beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit mit 1,0 anzunehmen, soweit keine andere spezifische Festlegung vorhanden ist. Der Designwert ist somit gleich dem charakteristischen Wert. Der Modellfaktor η ist für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit ebenfalls 1,0.

Der Grenzwert C_d ist entsprechend den Nutzungsanforderungen und in Absprache mit dem Bauherrn festzulegen. Natürlich muss dies auch den Anforderungen nach ÖNORM EN 1990 genügen.

3.6.5.1 Axial auf Druck und/oder Zug beanspruchte Einzelpfähle

Der Gebrauchstauglichkeitsnachweis ist bei Pfählen die auf Zug und bei Pfählen die auf Druck belastet werden unterschiedliche.

Die Verformungen E_d , hervorgerufen durch die Einwirkungen, können im Fall von Pfahlprobelastungen direkt aus den Ergebnissen dieser Versuche abgeleitet werden. Bei vergleichbaren

Baugrundverhältnissen können diese aus den Ergebnissen abgeleiteten Werte auch bei anderen Anwendungsfällen verwendet werden.

Setzungen von Druckpfählen können mit anerkannten Berechnungsmethoden mit Hilfe eines Baugrundmodells abgeschätzt werden. Bei derartigen Berechnungen mit Vertikalverschiebungen muss eine eventuelle negative Mantelreibung berücksichtigt werden.

Die Hebungen eines auf Zug belasteten Pfahls können nur auf Basis von Versuchsergebnisse verlässlich abgeschätzt werden.

3.6.5.2 Quer zur Achse beanspruchte Einzelpfähle

Die Bemessungswerte der Grenze für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit C_d müssen mit einem geeigneten Berechnungsmodell, zum Beispiel numerisches Verfahren oder Bettungsmodulverfahren, nachgewiesen werden. Die dazu notwendigen Kennwerte werden aus der Baugrunduntersuchung abgeleitet.

Es müssen Probelastungen quer zur Achse durchgeführt werden, falls die Verformungen des Bauwerks maßgebend beim Nachweis der Gebrauchstauglichkeit sind und keinerlei Erfahrungen des Verhaltens von Baugrund und quer beanspruchten Pfahls vorhanden sind.

3.6.5.3 Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit des Pfahlbaustoffs

Wie beim Beton üblich, müssen Rissweiten, Spannungen und dergleichen für den Nachweis der Gebrauchstauglichkeit nachgewiesen werden.

Es sind Kontrollmessungen, üblicherweise Setzungsmessungen, während und nach Fertigstellung des Bauwerks durchzuführen. In manchen Fällen können diese Kontrollmessungen auch während der gesamten Lebensdauer notwendig sein.

3.6.6 Modellfaktoren

Im Anhang A der ÖNORM B 1997-1-3 [32] sind die Modellfaktoren η erläutert. Diese werden, wie zuvor erwähnt, beim Nachweis im Grenzzustand der Tragfähigkeit für axial auf Druck und/oder axial auf Zug belastete Pfähle verwendet. Die Modellfaktoren für alle Bemessungssituationen wurden gemäß Anhang A der ÖNORM B 1997-1-3 [32] in folgender Tabelle angegeben:

Tab. 3.4: Modellfaktoren gemäß Anhang A der ÖNORM B 1997-1-3 aus [32] (adaptiert)

	Fall	Symbol	Wert
1	Pfahlwiderstände auf axialen Druck aus statischen Pfahlprobelastungen	$\eta_{P;c}$	1,0
2	Pfahlwiderstände auf axialen Zug aus statischen Pfahlprobelastungen	$\eta_{P;t}$	1,0
3	Pfahlwiderstände auf axialen Druck mittels Tabellenwerten der Anhänge C und D	$\eta_{P;c}$	1,3
4	Pfahlwiderstände auf axialen Zug mittels Tabellenwerten der Anhänge C und D	$\eta_{P;t}$	2,5
5	Pfahlwiderstände auf axialen Druck aufgrund von vergleichbarer Erfahrung	$\eta_{P;c}$	$\geq 1,3$
6	Pfahlwiderstände auf axialen Zug aufgrund von vergleichbarer Erfahrung	$\eta_{P;t}$	$\geq 2,5$

3.6.7 Streuungsfaktoren

Wird der Wert des charakteristischen Pfahlwiderstandes nicht durch Berechnung oder Verwendung von Tabellenwerten ermittelt, sondern mit Pfahlprobelastung, kommen Streuungsfaktoren in den Nachweisverfahren zum Einsatz (siehe Abschnitt 3.6.3.2, Pfahlwiderstände). Diese gelten für alle

Bemessungssituationen. In der folgenden Tabelle sind die Streuungsfaktoren ζ je nach Anzahl n der probebelasten Pfähle.

Tab. 3.5: Streuungsfaktoren gemäß ÖNORM B 1997-1-1 [31]

ζ für $n =$	1	2	3	4	≥ 5
ζ_1	1,40	1,30	1,20	1,10	1,00
ζ_2	1,40	1,20	1,05	1,00	1,00

Diese Festlegung der Streuungsfaktoren ermöglicht eine umso wirtschaftlichere Pfahlbemessung, je mehr Pfahlprobebelastungen unter vergleichbaren Bedingungen durchgeführt werden. Die Anzahl der beim Forschungsprojekt Unteres Hausfeld durchgeführten gleichartigen Pfahlprobebelastungen wurde anhand dieses Kriteriums festgelegt.

KAPITEL 4

Energiepfahlversuche (FPUH)

4.1 Lage der Energiepfähle in den Prüffeldern und Baugrundsituation

Für die Energiepfahlversuche im Rahmen des Forschungsprojekts „Unteres Hausfeld“ (FPUH) wurden zwei Großbohrpfähle als Energiepfähle hergestellt und untersucht.

B.EM Energiepfahl Miozän

B.EK Energiepfahl Kies

Abb. 4.1 zeigt den Übersichtslageplan, in dem die Anordnung der Prüffelder sowie die Lage der Energiepfähle im Prüffeld 2 zu sehen sind.

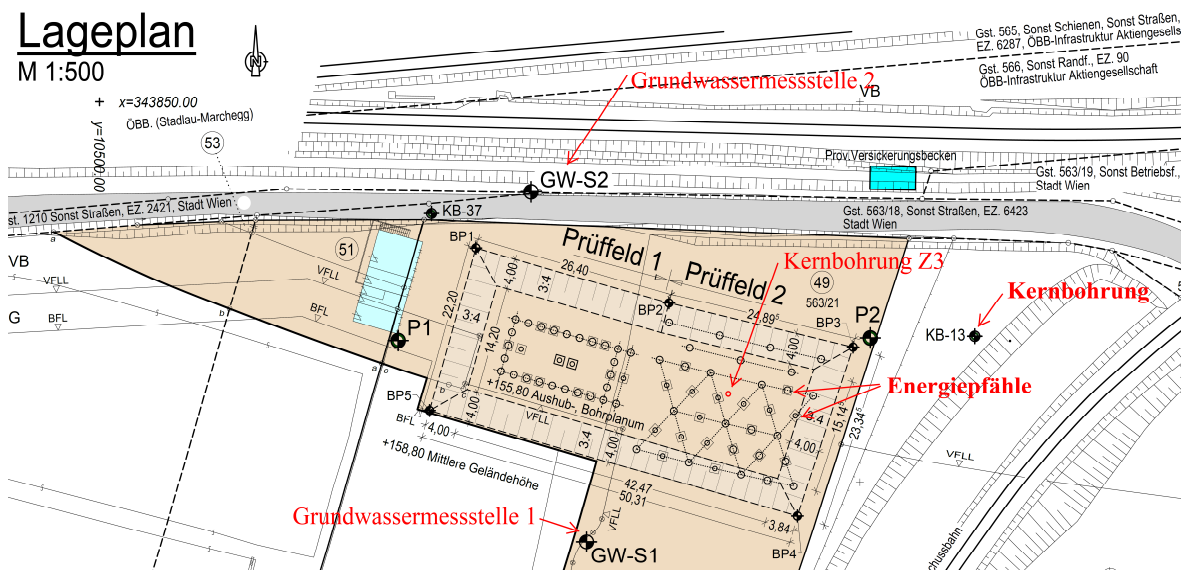


Abb. 4.1: Lageplan der Prüffelder mit Situierung der beiden Energiepfähle, der nächstgelegenen Kernbohrungen sowie von zwei Grundwassermessstellen. [46]

Ein Energiepfahl reicht bis in das Miozän; dieser wird im Folgenden als B.EM (Energiepfahl Miozän) bezeichnet. Beim zweiten Energiepfahl befindet sich die Pfahlsole innerhalb der Kiesschichten und wird deswegen im Folgenden als B.EK (Energiepfahl Kies) bezeichnet. Zusätzlich wurden drei Reaktionspfähle (R53, R54, R63) hergestellt, um die auf die Energiepfähle aufgebrachtten Kräfte von der hydraulischen Presse in den Boden ableiten zu können. Weiters wurden Zusatzbohrungen in bestimmten Abständen zu den Energiepfählen abgeteuft, um die Temperaturentwicklung in der umgebenden Bodenregion zu überwachen. Die drei Zusatzbohrungen werden als TS.M1, TS.M2 und TS.K bezeichnet. Die drei Zusatzbohrungen werden als TS.M1, TS.M2 und TS.K bezeichnet. In der Abb. 4.2 ist die Lage der Energie- und Reaktionspfähle sowie die Zusatzbohrungen im Prüffeld 2 ersichtlich.

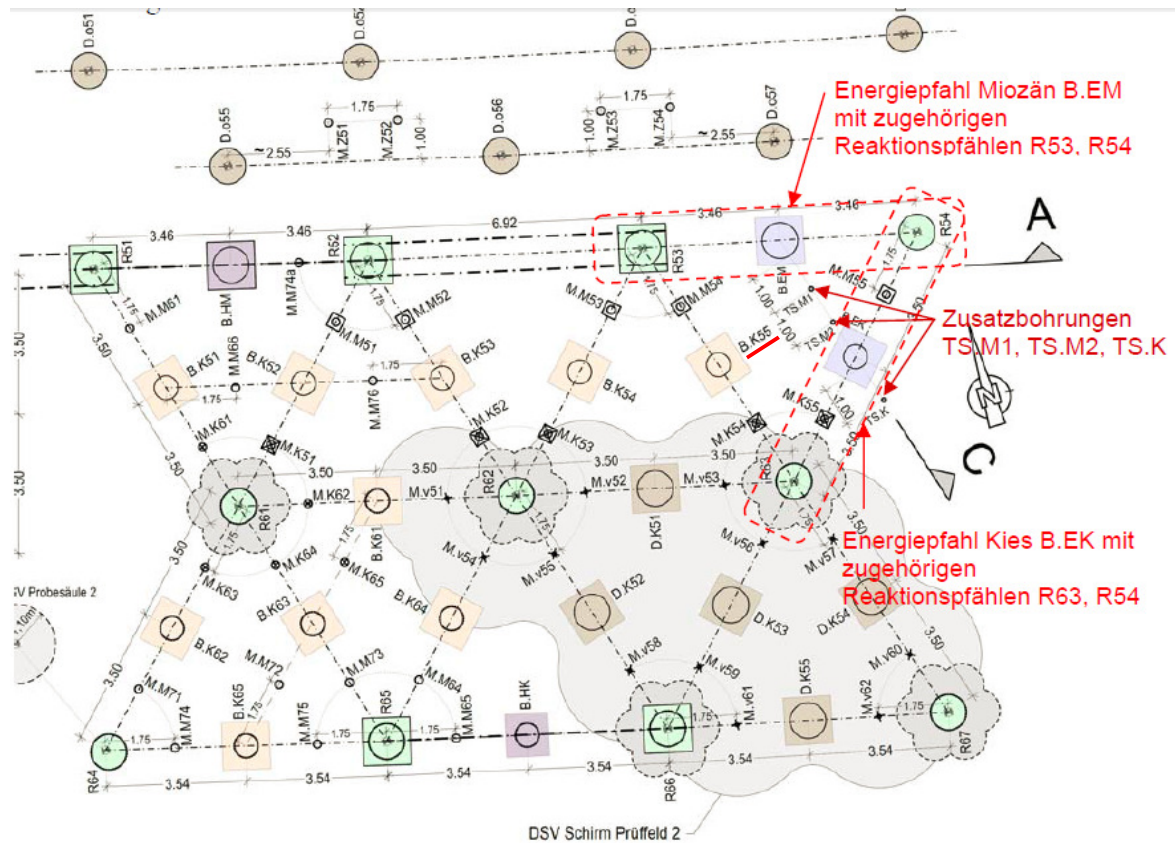


Abb. 4.2: Grundriss des Prüffeld 2 mit Lage der Energiepfähle, Reaktionspfähle und Zusatzbohrungen, Plan-ausschnitt aus [46]

Anmerkung: Die Lage der Zusatzbohrungen in **Abb. 4.2** hat sich geändert; die tatsächlich ausgeführte Lage der Zusatzbohrungen ist in **Abb. 4.3** dargestellt.

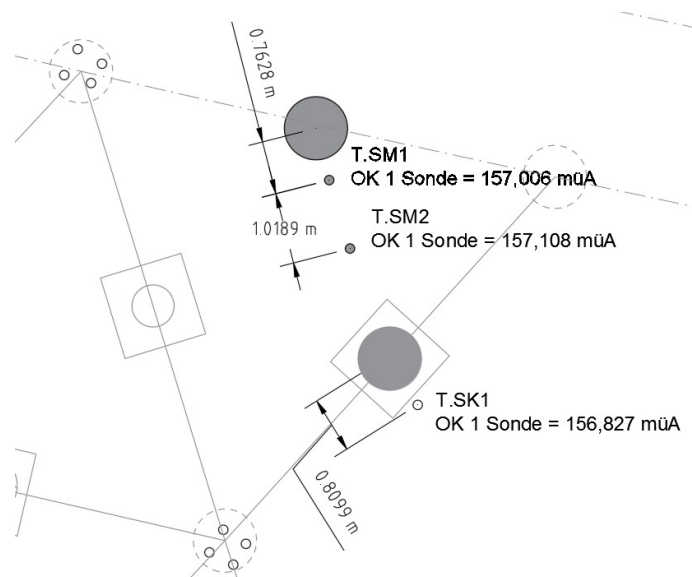


Abb. 4.3: Vermessung Zusatzbohrung [Vermessung FPUH Porr/MA41]

In der folgenden **Abb. 4.4** ist ein Schnitt durch das Prüffeld zu sehen. Links ist ein Ausschnitt des Schnitts A-A und rechts ein Ausschnitt des Schnitts C-C gezeigt (Lage der Schnitte siehe **Abb. 4.2**).

Diese Ausschnitte zeigen die beiden Energiepfähle (B.EM und B.EK), die Reaktionspfähle (R53, R54) und die drei Zusatzbohrungen (TS.M1, TS.M2 und TS.K).

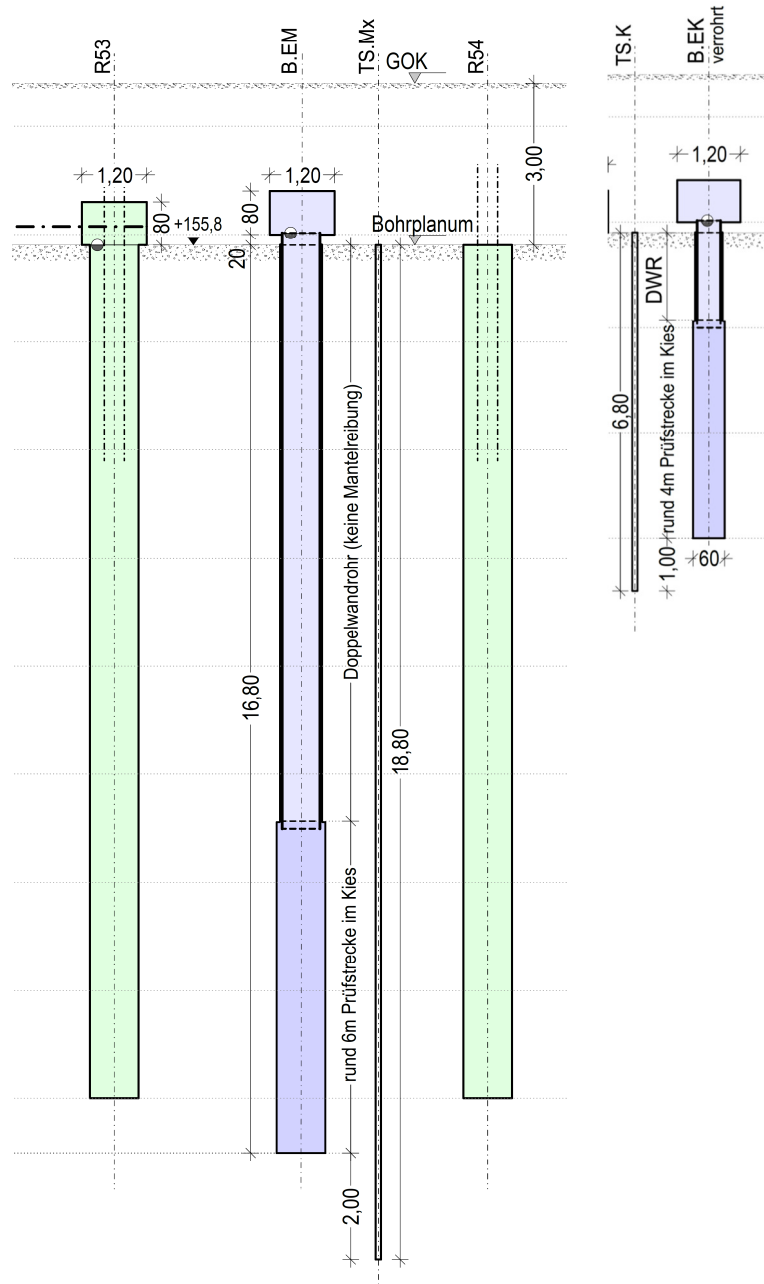


Abb. 4.4: Schnitt A (links) mit dem B.EM (blau), den Reaktionspfählen R53 und R54 (grün) und den Zusatzbohrungen (TS.Mx) sowie Schnitt C (rechts) mit dem B.EK (blau) und der Zusatzbohrung TS.K [46]

4.1.1 Untergrundverhältnisse

In Kapitel 1 wurde schon näher auf die Untergrundverhältnisse eingegangen, jedoch werden im Weiteren die Informationen zusammengefasst, die für die Energiepfahlversuche von Bedeutung sind.

Die Lage der Prüffelder im Wiener Becken und in den Talalluvionen der Donau lässt grundsätzlich auf folgenden Schichtaufbau schließen:

- Anschüttung (Schicht A)

- Mutterboden (Schicht A)
- Ausedimente (Schicht B)
- Donauschotter (Schicht C)
- Miozäne Sedimente des Wiener Beckens (Schicht D)

4.1.1.1 Untergrundaufschlüsse bei den Energiepfählen

Die im Bereich der Energiepfähle vorhandenen Untergrundverhältnisse ergeben sich aus der KB 13 und der Zusatzbohrung Z3. Wie in **Abb. 4.2** zu sehen ist, liegen diese in unmittelbarer Nähe der Energiepfähle.

In **ANHANG D** ist das Bohrprofil der KB 13 dargestellt: im Bereich der Energiepfähle sind die ersten beiden Schichten (Schicht A- Mutterboden/Anschüttung, Schicht B- Ausedimente) nicht vorhanden. Dies bedeutet, dass die Donauschotter (Schicht C) direkt an der Geländeoberkante anstehen und in einer Tiefe von 13 m unter GOK der Übergang zu den miozänen Sedimenten ist. Der Grundwasserspiegel zum Zeitpunkt der Bohrung (22.08.2012) lag in einer Tiefe von 3,85 m unter GOK.

Die Zusatzbohrung Z3 war eine von drei Bohrungen die nachträglich abgeteuft wurden. In **ANHANG D** ist das Bohrprofil der Zusatzbohrung Z3 zu finden. Die oberste Schicht besteht aus Anschüttungen mit einer Mächtigkeit von 2 m. Anschließend folgen die Donauschotter (Schicht C) bis in einer Tiefe von 12,8 m unter GOK. Darunter sind dann die miozänen Sedimente vorzufinden. Grundwasser wurde zum Zeitpunkt der Bohrung (15.08.2018) in einer Tiefe von 3,50 m unter GOK angetroffen.

4.1.2 Grundwasser

In der KB 13 lag der Grundwasserspiegel zum Zeitpunkt der Bohrung (22.08.2012) in einer Tiefe von 3,85 m unter GOK; dies entspricht einer Absoluthöhe von -1,74 m WN. Bei der Zusatzbohrung Z3 lag der Grundwasserspiegel zum Zeitpunkt der Bohrung (15.08.2018) in einer Tiefe von 3,50 m unter GOK bzw. auf Kote -3,23 m WN, wobei auch im Miozän in einer Tiefe von 16,0 m unter GOK bzw. -15,73 m WN ein zweiter Grundwasserhorizont angetroffen wurde.

Auf dem Prüffeld waren zwei Grundwasserpegelmessstellen vorhanden, deren Lage im Übersichtslageplan in **Abb. 4.1** zu sehen ist. In diesen Pegelmessstellen wurden jeweils der Grundwasserstand und die Grundwassertemperatur gemessen. Nachdem es sich bei diesen beiden Messstellen um Quartärpegel handelt, dienten diese insbesondere der Beobachtung etwaiger Einflüsse aus dem Energiebetrieb des B.EK. Anzumerken ist in diesem Zusammenhang, dass nur die Messergebnisse der Grundwassermessstelle 1 relevant sind, da die Grundwassermessstelle 2 vor der Versuchsdurchführung umgebaut wurde.

4.2 Bemessung der Energiepfähle B.EM und B.EK

Die statische Bemessung von Energiepfählen unterscheidet sich laut österreichischer Norm und Gesetzgebung nicht von der normalen Pfahlbemessung, deswegen folgt die folgende statische Berechnung der in Kapitel 3.6 erklärten Nachweisführung für konventionelle axial Druck beanspruchte Pfähle.

Das Büro *Mayer Ingenieurleistungen ZT-GmbH* war für die gesamte Statik des Versuchsprojekts zuständig. Im Zuge dessen wurde ein statischer Bericht [66] verfasst, der nicht nur die Bemessung der Prüfkörper, sondern auch die Ermittlung der für die Versuchsdurchführung verwendeten Belastungen, enthält.

Die für die statische Berechnung verwendeten Materialparameter für Beton und Stahl sind in der **Abb. 4.5** zu sehen.

Beton

$$f_{cd} = \alpha \cdot f_{ck} / \gamma_c \quad \alpha = 1,0$$

Pfähle d90	C25/30
Pfähle d60	C25/30
Pfahlroste für Versuchsdurchführung	C30/37
Ankerrost und Schacht	C30/37

Stahl

Doppelwandrohre	S235
Bewehrungsstahl	B550B
Gewindestangen Reaktionspfähle	B550B
Verbindungen für Horizontalversuch	B550B
Kleinbohrpfähle in DSV Schirmen	SAS 550
Kleinbohrpfähle nicht in DSV Schirmen	SAS 950
Stabanker	Y 1050 H
Litzenanker	Y 1770 S7

Abb. 4.5: Materialparameter für Beton und Stahl aus [66]

Als weitere Grundlage der statischen Berechnungen dient das Geotechnische Gutachten für das Forschungsprojekt [61] und zusätzlich wurden noch folgenden Annahmen für die Bodenkennwerte verwendet.

Bodenwiderstände - FPUH											
Mantelreibung (q_s) bzw. Spitzendruck (q_b)											
[kN/m ²]	SLS		ULS			Mittelwert des Widerstandes			Obergrenze des Widerstandes		
	s/D<0,02		s/D<0,1			Druck	Druck	Zug	Druck	Druck	Zug
	Druck	Zug	Druck	Druck	Zug						
Großbohrpfähle bzw. DSV Säulen - d60 + d90 - gemäß ÖN B 1997-1-3											
Donauschotter / Kies	70	40	100	500	60	150	2.250	x	200	4.000	x
Miozän	45	30	60	300	40	80	1.650	x	100	3.000	x
Kleinbohrpfähle - d20 - gemäß ÖN B 1997-1-3											
Donauschotter / Kies	70	40	100	x	60	150	x	80	200	x	100
Miozän	45	30	60	x	40	80	x	45	100	x	50
Nachverpresste Anker und nachverpresste Kleinbohrpfähle - d16 bzw. d20 - gemäß ÖN B 1997-1-1 bzw. ÖN B 1997-1-3											
Donauschotter / Kies	x	40	x	x	60	x	x	130	x	x	200
Miozän	x	30	x	x	40	x	x	70	x	x	100

Abb. 4.6: Annahme Bodenkennwerte aus [66]

Die charakteristischen Gewichts- und Scherparameter der unterschiedlichen Schichten wurden schon im Kapitel 2.4.3 gezeigt. Die folgende **Tab. 4.1** zeigt die geotechnischen Rechenwerte, welche aus dem Geotechnischen Gutachten [61] stammen.

Tab. 4.1: Geotechnische Rechenwerte- Spannung und Verformung aus [61]

Schichtpaket		Steifemodul	horizontaler Bettungsmodul	vertikaler Bettungsmodul
		$E_{s, Bel1}^{1)}$	max. $k_{tr,k}$	max. $k_{v,k}$
		[MN/m ²]	[MN/m ³]	[MN/m ³]
A	Anschüttung, Mutterboden	-	0	-
B	Ausediment	5	20	-
C	Donauschotter (sandiger Kies)	80	80	25-65 ²⁾
D	Miozäne Wechsellagerungen	20	30	30-60 ²⁾

1) E-Modul für die Erstbelastung unter geologische Auflast
2) Schwankungsbereich für Extremwertbetrachtung

Die statische Bemessung der Pfähle erfolgt hierbei mit der Abschätzung der maximal zu erwartenden äußeren Tragfähigkeit (Bodenkennwerte 95% Fraktile). Die Abschätzungen der äußeren Widerstände $R_{c,0,95}$ für den B.EM und B.EK Pfahl sind in **Abb. 4.7** und **Abb. 4.8** zu sehen.

2.1.1.1 Prüfstrecke Miozän - Druck

$$d_{\text{Pfahl}} = 0,90\text{m} \quad U_{\text{Pfahl}} = 2,83\text{m} \quad A_{\text{Pfahl}} = 0,64\text{m}^2$$

$$L_{\text{max, Prüfstrecke}} = 6,2\text{m}$$

$$q_{s,k;0,95} = 100\text{kN/m}^2$$

$$q_{b,k;0,95} = 3.000\text{kN/m}^2$$

$$R_{s,k;0,95} = 100\text{kN/m}^2 * (6,2\text{m} * 2,83\text{m}) = 1753 \text{ kN}$$

$$R_{B,k;0,95} = 3.000\text{kN/m}^2 * (0,64\text{m}^2) = 1909 \text{ kN}$$

$$R_{C;0,95} = 3670 \text{ kN}$$

Es wird davon ausgegangen, dass die Obergrenze des Erdwiderstandes bei 3670kN erreicht wird.

Abb. 4.7: Auszug aus dem Statischen Bericht [66]- Äußerer Widerstand für den B.EM

2.1.1.2 Prüfstrecke Kies - Druck

$$d_{\text{Pfahl}} = 0,60\text{m} \quad U_{\text{Pfahl}} = 1,88\text{m} \quad A_{\text{Pfahl}} = 0,28\text{m}^2$$

$$L_{\text{max, Prüfstrecke}} = 4,2\text{m}$$

$$q_{s,k;0,95} = 200 \text{ kN/m}^2$$

$$q_{b,k;0,95} = 4.000 \text{ kN/m}^2$$

$$R_{s,k;0,95} = 200\text{kN/m}^2 * (4,2\text{m} * 1,88\text{m}) = 1583 \text{ kN}$$

$$R_{B,k;0,95} = 4.000\text{kN/m}^2 * (0,28\text{m}^2) = 1131 \text{ kN}$$

$$R_{C;0,95} = 2720 \text{ kN}$$

Es wird davon ausgegangen, dass die Obergrenze des Erdwiderstandes bei 2720kN erreicht wird.

Abb. 4.8: Auszug aus dem Statischen Bericht [66]- Äußerer Widerstand für den B.EK

Basierend auf den Tabellenwerten in **Abb. 4.6** ergibt sich eine Gebrauchslast von 800 kN für die Pfähle. Diese Gebrauchslast wurde als Basis für die Dimensionierung der Belastung auf den Pfählen während des Versuchs und der statischen Pfahlprobebelastung genommen.

Der Stahlaufbau der Totlast wurde auch statisch nachgewiesen, darauf wird hier aber nicht näher eingegangen, da dies nur den Stahlbau und nicht den eigentlichen Pfahl betrifft.[66]

4.3 Beschreibung der hergestellten Pfähle sowie von anderen Komponenten der Versuchsdurchführung

Beim Energiepfahl B.EM handelt es sich um jenen Pfahl, der die aktivierte Mantelreibungsstrecke im Miozän hat; der Energiepfahl B.EK hat diese im Donauschotter bzw. im Kies. Die Mantelreibung sollte nur in diesen Bereichen wirken, weshalb darüber jeweils ein Doppelwandrohr eingebaut wurde, um die Mantelreibung zu deaktivieren. Es handelt sich hierbei um zwei ineinander liegende Stahlrohre, welche eine Bewegung des Pfahls ermöglichen. Das äußere Stahlrohr wird hierbei durch das umliegende Erdreich gehalten, das Innere kann jedoch nahezu ohne Mantelreibung nach unten/oben bewegt werden. In **Abb. 4.9** ist ein Detail dargestellt, das den Übergang zwischen dem Doppelwandrohr und dem Bereich mit aktiver Mantelreibung zeigt.

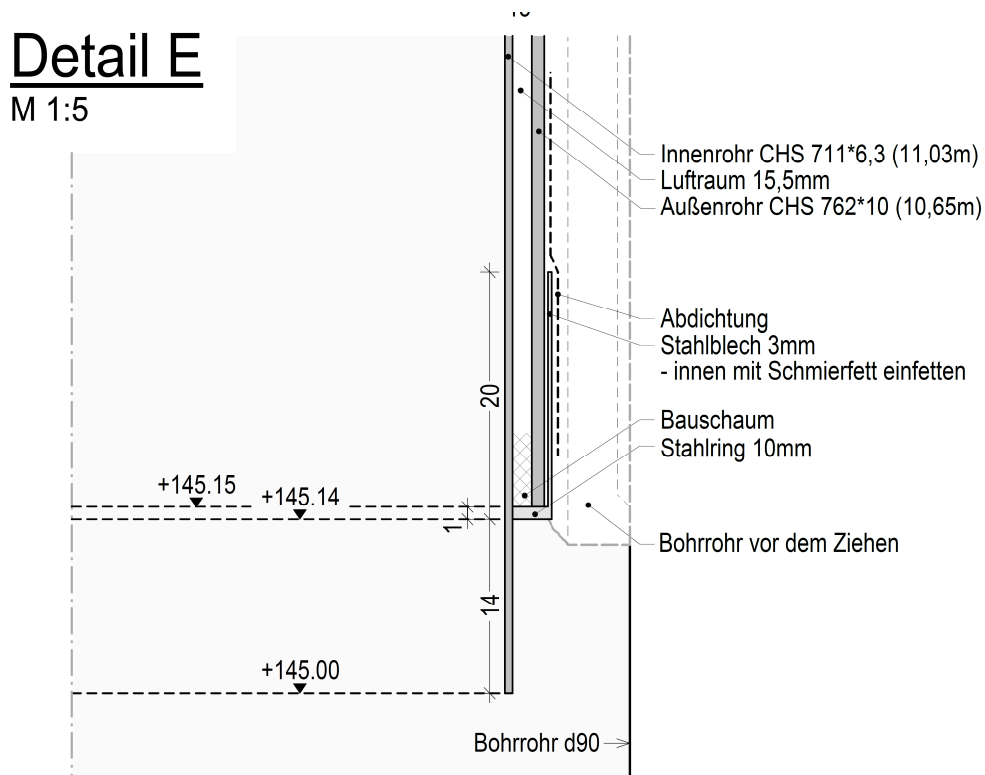


Abb. 4.9: Doppelwandrohr Detail [51]

Der Energiepfahl B.EM wurde, wie die anderen Großbohrpfähle, die in das Miozän reichen, mit einem Durchmesser von 90 cm und einer Länge von 16,8 m ausgeführt. Der Kiespfahl B.EK ist mit einer Länge von 6,03 m wesentlich kürzer und weist auch einen geringeren Durchmesser von 60 cm auf.

Tab. 4.2 gibt eine Übersicht über die wesentlichen Herstellungsparameter der Energiepfähle.

Tab. 4.2: Wesentliche Herstellungsparameter der Energiepfählen [59]

		ENERGIEPFAHL MIOZÄN B.EM	ENERGIEPFAHL KIES B.EK
PFAHL	Bezeichnung	B.EM	B.EK
	Prüfstrecke	Miozän	Kies
	Pfahldurchmesser	90 cm	60 cm
	Pfahldurchmesser Doppelwandrohr	71,1 cm	45,7 cm
	Pfahl-OK	155,80 m ü. A.	155,80 m ü. A.
	Pfahl-UK	139,00 m ü. A.	150,00 m ü. A.
	Pfahlgesamtlänge	16,80 m	6,0 m
	Pfahllänge mit Man- telreibung	6,0 m	4,14 m
	Herstellungsmethode	verrohrter Bohrpfahl	
	Herstelldatum	11.04.2017	10.04.2017
ABSORBER	Absorberbezeichnung	PE-Xa 2,3mm/25; PN15; SDR 11	
	mit Absorber belegte Pfahllänge	5,80 m	5,30 m
	Anzahl Absorber im Querschnitt	8 Stück	6 Stück
	Befestigung Absorber	Innenseite Bewehrungs- korb	Außenseite Beweh- rungskorb
	Absorbergesamtlänge	ca. 80 m	ca. 37 m
INSTRUMENTIERUNG	Instrumentierungstyp	Typ IIIb	IIIa
	Kettenextensometer	1 Stück	1 Stück
	Temperatursensoren	4 Stück (bei Absorbern) 5 Stück (in Pfahlachse)	3 Stück (bei Absorbern) 5 Stück (in Pfahlachse)
	Dehnungsaufnehmer längs	5x 2 Stück	5x 2 Stück
	Dehnungsaufnehmer Umfang	4x 4 Stück	4x 4 Stück
	Pfahlsohldruckmess- dose	keine	keine
	Glasfaser für Tempe- raturmessung	190 m	-
	Glasfaser für Deh- nungsmessung	300 m	-

Die Energiepfähle wurden im Kelly-Bohrverfahren mit Verrohrung hergestellt. Das an der Kellystange angebrachte Bohrwerkzeug löst und fördert das Bohrgut. Je nach Bodenverhältnissen wird das verwendete Bohrwerkzeug angepasst. Ein Foto der Herstellung eines Pfahls am Versuchsfeld mit dem Kellydrehbohrverfahren ist in **Abb. 4.10** zu sehen. Die Verrohrung wird ausreichend vorseilend eingebracht, um die Stabilität des Bohrlochs zu gewährleisten.

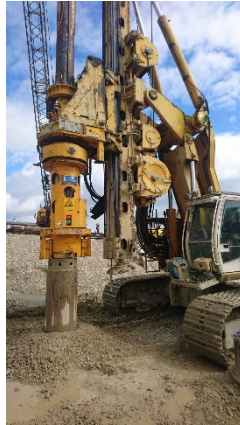


Abb. 4.10: Herstellung mit Kelly-Drehbohrverfahren

Auf dem fertig verschweißten Bewehrungskorb wurden mittig ein Kettenextensometerrohr fixiert sowie die Absorberleitungen und alle Messaufnehmer befestigt. Anschließend wurde der Bewehrungskorb zentrisch ins Bohrrohr eingebracht. Alle Messsensoren sowie das Kettenextensometerrohr wurden vor dem Betoniervorgang auf Funktionsfähigkeit geprüft und die Absorberleitungen einer Druckluftprüfung unterzogen [68]. Eine genauere Beschreibung der Instrumentierung ist in Kapitel 0 zu finden.

Die Ausführung der Pfahlherstellung beruht auf dem technischen Ausführungsbericht sowie den Schalungs- und Bewehrungsplänen. In der folgenden Tabelle werden die jeweiligen Unterlagen den Versuchs- und Reaktionspfählen zugeordnet.

Tab. 4.3: Projektunterlagen im Quellenverzeichnis

Großbohrpfahl	Technischer Ausführungsbericht	Schalungsplan	Bewehrungsplan
B.EM	[68]	[51]	[50]
B.EK	[68]	[49]	[48]
R54 & R53	[68]	[55]	[54]
R63	[67]	[53]	[52]

4.3.1 Miozänpfahl B.EM

Wie schon in Kapitel 4.3 erwähnt, diente dieser Pfahl zur Untersuchung des Lastabtragungsverhaltens in den miozänen Sedimenten. In einer Tiefe von etwa 11 m band dieser Pfahl in die miozäne Schicht ein. Er wies im Lastabtragungsbereich einen Durchmesser von 90 cm bei einer gesamten Pfahllänge von 16,8 m auf. Um die Mantelreibung in den darüberliegenden Schichten zu deaktivieren, wurde ein Doppelwandrohr aus Metall eingesetzt. Der Pfahldurchmesser war in diesem Bereich reduziert. Aufgrund des Doppelwandrohres war somit nur eine aktive Mantelreibung auf einer Pfahllänge von ca. 6 m innerhalb der miozänen Schichten möglich. Die wichtigsten Pfahlabmessungen sind in der folgenden Tabelle zusammengefasst.

Tab. 4.4: Höhenlage Miozänpfahl B.EM

Probepfahl	PKOK ¹ [m ü. A.]	POK ² [m ü. A.]	PUK ³ [m ü. A.]	OK KES [m.ü.A.]	Länge [m]	D [cm]
B.EM	156,8	155,80	139,0	145,00	16,8	90

¹ PKOKPfahlkopfoberkante

² POKPfahloberkante

³ PUKPfahlunterkante

³ OK KES.....Oberkante Krafteinleitungsstrecke

4.3.1.1 Absorber und Instrumentierung

Absorber

Für die thermische Belastung des Pfahls wurden acht Absorber des Typs *PE-Xa 2,3mm/25 PN15 SDR 11* über den Querschnitt verteilt eingebaut. Diese wurden an der Innenseite des Bewehrungskorb mit Kabelbindern befestigt. In **Abb. 4.11** ist die Befestigung der Absorberleitungen am Bewehrungskorb zu sehen.



Abb. 4.11: Absorber befestigt auf Bewehrungskorb des Miozänpfahl B.EM

Es wurde nur der untere Bereich des Pfahls (mit aktiver Mantelreibung) belegt. In **Abb. 4.12** ist links ein Schnitt durch den Pfahl mit den Absorbern zu sehen und in **Abb. 4.13** ist der zugehörige Querschnitt dargestellt. Vier Temperatursensoren wurden direkt auf den Absorberleitungen installiert, um deren Temperatur zu überwachen. Die Temperaturfühler sind am Vorlauf und Rücklauf (Oberkante der Lasteinleitungsstrecke) sowie an der Unterkante der Absorberschlaufen befestigt. Die Absorberleitungen weisen beim Pfahl B.EM eine Länge von ca. 80 m auf.

ENERGIEPFAHL B.EM

INSTRUMENTIERUNG

ABWICKLUNG ABSORBERLEITUNG

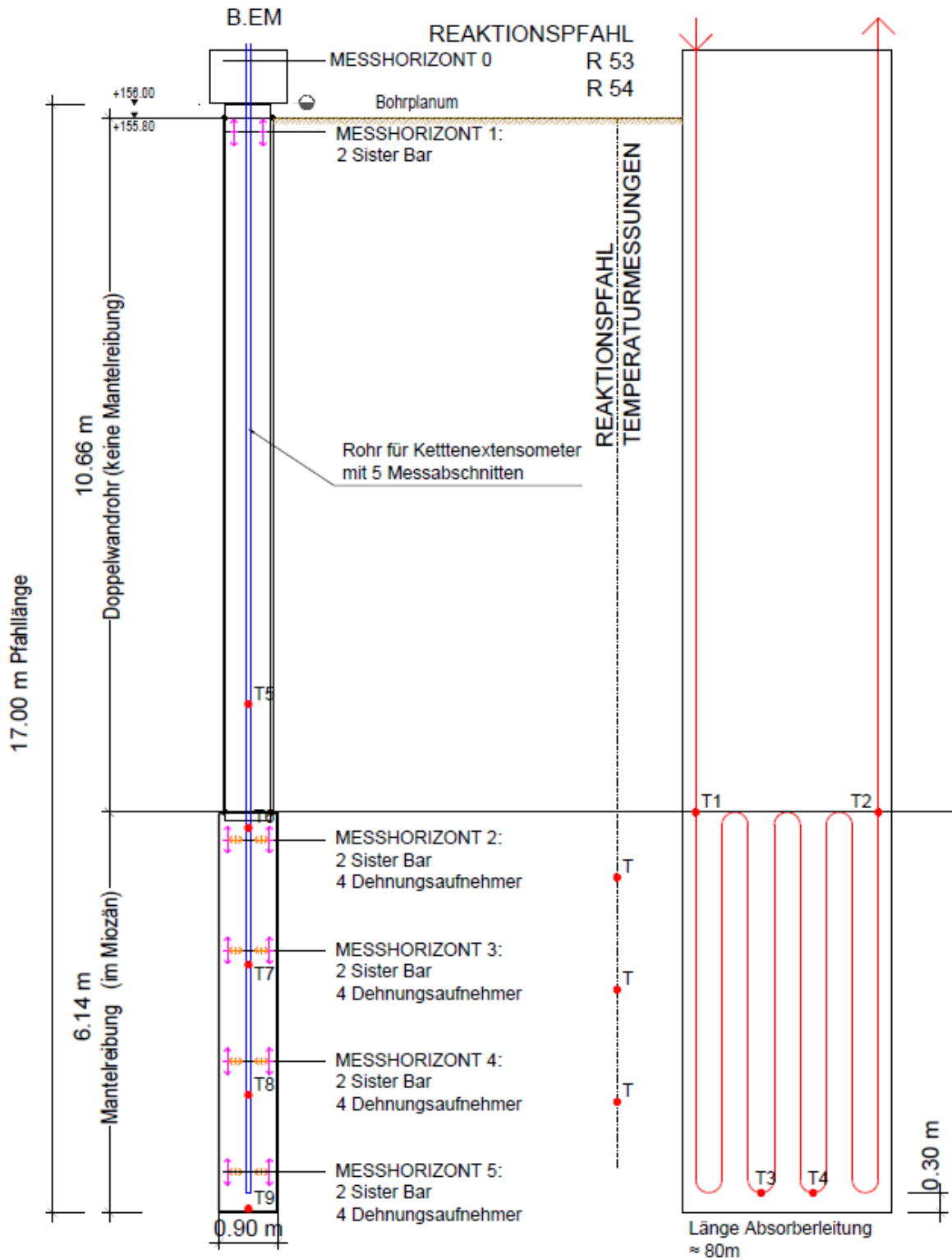


Abb. 4.12: Schnitt Miozänpfahl B.EM mit Absorberleitungen und Instrumentierung [58]

QUERSCHNITT PFAHL DN 900mm

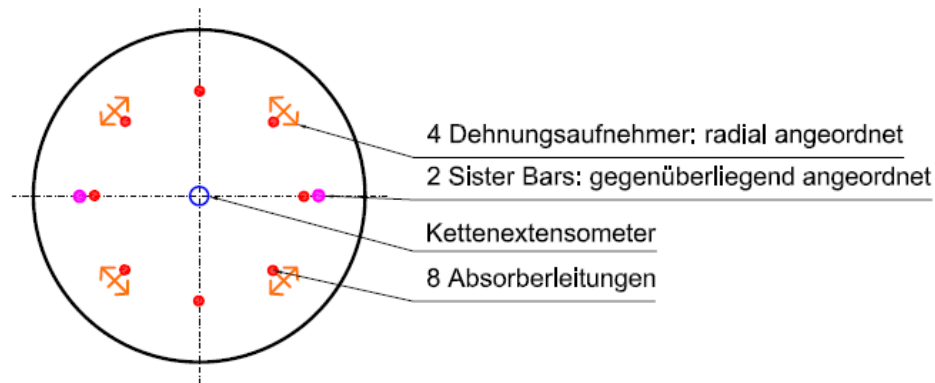


Abb. 4.13: Querschnitt des Miozänpfahls B.EM mit Instrumentierung [58]

Instrumentierung

In **Abb. 4.12** und **Abb. 4.13** ist die Instrumentierung des Pfahls dargestellt. Folgende Instrumentierung wurde im Pfahl eingebaut:

- 1 Kettenextensometer in Pfahlachsrichtung mit Stahlrohr als Führung
- 9 Temperatursensoren des Typs *Geokon 3800-2-1* (2x bei Absorber OK und 2x bei Absorber UK, 5x in Pfahlmitte)
- 10 Längsdehnungsaufnehmer des Typs *Geokon 4911* (5 Messebenen mit jeweils 2 Sensoren gegenüberliegend angeordnet)
- 16 Dehnungsaufnehmer zur Messung der Umfangsdehnung vom Typ *Geokon 4200* (4 Messebenen mit jeweils 4 radial angeordneten Sensoren)
- 190 lfm Glasfaserkabel zur Temperaturmessung (Daten werden in dieser Diplomarbeit nicht behandelt)
- 300 lfm Glasfaserkabel zur Dehnungsmessung (Daten werden in dieser Diplomarbeit nicht behandelt)

Die genaue Höhenlage der einzelnen Sensoren ist in **Tab. 4.5** angegeben.

Tab. 4.5: Sensoren und deren Höhenlage im Miozänpfahl B.EM

Sensor	BS 1.1/1.2	BS 2.1/2.2	BS 3.1/3.2	BS 4.1/4.2	BS 5.1/5.2
Höhenlage [m.ü.A.]	155,35	144,5	142,8	141,1	139,4
Sensor	DS 1 A/B/C/D	DS 2 A/B/C/D	DS 3 A/B/C/D	DS 4 A/B/C/D	
Höhenlage [m.ü.A.]	144,5	142,8	141,1	139,4	
Sensor	KEX 1	KEX 2	KEX 3	KEX 4	KEX 5
Höhenlage [m.ü.A.]	156,67	144,98	143,52	142,05	140,59
Sensor	TEMP OK-RL	TEMP OK-VL	TEMP UK-2	TEMP UK-3	
Höhenlage [m.ü.A.]	145,03	145,03	139,23	139,23	
Sensor	TEMP M-1	TEMP M-2	TEMP M-3	TEMP M-4	TEMP M-5
Höhenlage [m.ü.A.]	146,83	144,93	142,83	140,83	139,03

Die in der Tabelle verwendeten Abkürzungen bedeuten:

BS X.X..... Längsdehnungsaufnehmer (2 je Messquerschnitt)

DS X A/B/C/DUmfangsdehnungsaufnehmer (4 je Messquerschnitt)

KEX XKettenextensometer

Temp OK-RL.....Temperatursensoren Oberkante Rücklauf

Temp OK-VL.....Temperatursensoren Oberkante Vorlauf

Temp UK-X.....Temperatursensoren an den Absorberleitungen

Temp M-X..... Temperatursensoren in der Mitte des Pfahls

Die Einbau- und Prüfprotokolle der Instrumentierungen sind im **ANHANG C** zu finden.

4.3.2 Kiespfahl B.EK

Beim Kiespfahl B.EK wurde das Lastabtragungsverhalten im Donauschotter bzw. im Kies untersucht. Im oberen Bereich wurde wieder ein Doppelwandrohr eingebaut, um die Mantelreibung zu verhindern. Die Lastabtragung über Mantelreibung erfolgt dadurch nur über eine Länge von 4,14 m innerhalb der Kiese. Der Pfahl hatte einen Durchmesser von 60 cm (im Bereich des Doppelwandrohres reduziert) und wies eine gesamte Pfahllänge von 6,03 m auf. Die wichtigsten Pfahlabmessungen sind in der folgenden **Tab. 4.6** zusammengefasst.

Tab. 4.6: Höhenlage Kiespfahl B.EK

Probepfahl	PKOK ¹ [m ü. A.]	POK ² [m ü. A.]	PUK ³ [m ü. A.]	OK KES [m.ü.A.]	Länge [m]	D [cm]
B.EK	156,8	156,0	150,00	154,14	6,0	60

¹ PKOKPfahlkopfoberkante

² POKPfahloberkante

³ PUKPfahlunterkante

³ OK KES.....Oberkante Krafteinleitungsstrecke

4.3.2.1 Absorber und Instrumentierung

Absorber

Im Kiespfahl wurden dieselben Absorber (*PE-Xa 2,3mm/25 PN15 SDR 11*) eingebaut, wie im Miozänpfahl. Diese wurden allerdings an der Außenseite des Bewehrungskorbs auf einer Länge von 5,3m befestigt wobei die Absorberunterkante 30 cm über der Pfahlkopfohle ist. Der belegte und instrumentierte Bewehrungskorb ist in **Abb. 4.14** und der **Abb. 4.15** zu sehen.



Abb. 4.14: Absorber befestigt am Bewehrungskorb des Kiespfahl B.EK



Abb. 4.15: Absorber befestigt am Bewehrungskorb des Kiespfahl B.EK

Es wurde wieder nur der untere Teil des Pfahls (mit aktivierter Mantelreibung) mit den Absorbieren bestückt. Aufgrund des geringeren Durchmessers sind nur 6 Absorber im Querschnitt verteilt. In **Abb. 4.16** ist links ein Schnitt durch den Pfahl mit den Absorbieren und der Instrumentierung dargestellt; **Abb. 4.17** zeigt den zugehörigen Querschnitt. Drei Temperatursensoren wurden direkt auf den Absorberleitungen installiert, um deren Temperatur zu überwachen. Die Temperaturfühler sind am Vorlauf und Rücklauf (Oberkante der Lasteinleitungsstrecke) sowie an der Unterkante einer Absorberschleufe befestigt. Die Absorberleitungen weisen beim Kiespfahl B.EK eine Länge von ca. 37 m auf.

ENERGIEPFAHL B.EK

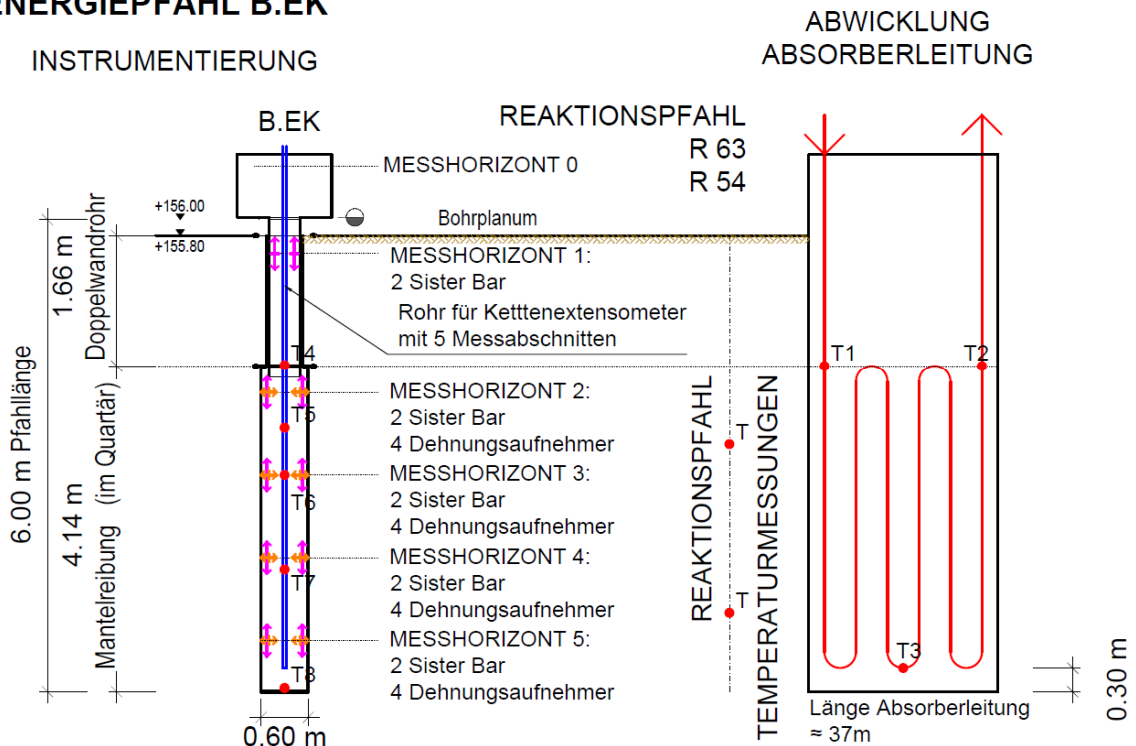


Abb. 4.16: Schnitt Kiespfahl- mit Absorberleitungen und Instrumentierung [58]

QUERSCHNITT PFAHL DN 600mm

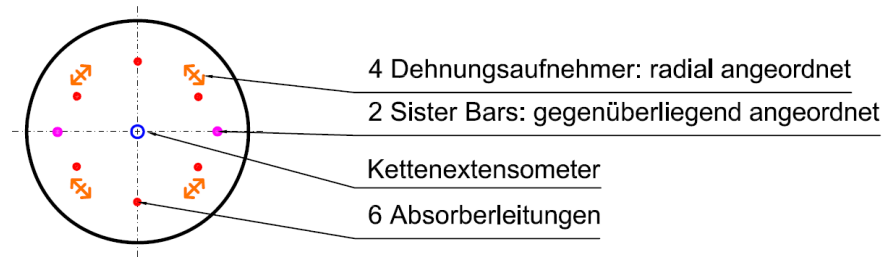


Abb. 4.17: Querschnitt mit Instrumentierung des Kiespfahls [58]

Instrumentierung

In Abb. 4.16 und Abb. 4.17 ist die Instrumentierung des Pfahls dargestellt. Die eingebauten Messsysteme werden im Folgenden aufgelistet:

- 1 Kettenextensometer in Pfahlachsrichtung mit Stahlrohr als Führung
- 7 Temperatursensoren des Typs Geokon 3800-2-1 (2x bei Absorber OK und 1x bei Absorber UK, 4x in Pfahlmitte)
- 10 Längsdehnungsaufnehmer des Typs Geokon 4911 (5 Messebenen mit jeweils 2 Sensoren gegenüberliegend angeordnet)
- 16 Dehnungsaufnehmer zur Messung der Umfangsdehnung vom Typ Geokon 4200 (4 Messebenen mit jeweils 4 radial angeordneten Sensoren)

Die genaue Höhenlage der einzelnen Sensoren ist in Tab. 4.7 angegeben.

Tab. 4.7: Sensoren und deren Höhenlage im Kiespfahl B.EK

Sensor	BS 1.1/1.2	BS 2.1/2.2	BS 3.1/3.2	BS 4.1/4.2	BS 5.1/5.2
Höhenlage [m.ü.A.]	155,4	153,5	152,55	151,5	150,45
Sensor	DS 1 A/B/C/D	DS 2 A/B/C/D	DS 3 A/B/C/D	DS 4 A/B/C/D	
Höhenlage [m.ü.A.]	153,7	152,75	151,7	150,65	
Sensor	KEX 1	KEX 2	KEX 3	KEX 4	KEX 5
Höhenlage [m.ü.A.]	156,65	154,12	153,10	152,09	151,07
Sensor	TEMP OK-RL	TEMP OK-VL	TEMP UK-2		
Höhenlage [m.ü.A.]	154,42	154,42	150,58		
Sensor	TEMP M-1	TEMP M-2	TEMP M-3	TEMP M-4	
Höhenlage [m.ü.A.]	154,1	154,1	150,3	150,3	

Die in der Tabelle verwendeten Abkürzungen bedeuten:

BS X.X..... Längsdehnungsaufnehmer (2 je Messquerschnitt)

DS X A/B/C/DUmfangsdehnungsaufnehmer (4 je Messquerschnitt)

KEX XKettenextensometer

Temp OK-RL.....Temperatursensoren Oberkante Rücklauf

Temp OK-VL.....Temperatursensoren Oberkante Vorlauf

Temp UK-X.....Temperatursensoren an den Absorberleitungen

Temp M-X..... Temperatursensoren in der Mitte des Pfahls

Die Einbau- und Prüfprotokolle der Instrumentierungen sind im **ANHANG C** zu finden.

4.3.3 Reaktionspfähle R53, R54 und R63

Die Reaktionspfähle wurden hergestellt, um die Kräfte abzutragen, die beim Pfahlversuch mit Presse resultieren. Die Kräfte der hydraulischen Versuchspresse werden über den Prüfbalken zu den Pfählen und über diese dann in den Baugrund abgeleitet. Somit werden die Reaktionspfähle auf Zug beansprucht, während der zu prüfende Pfahl über die Presse auf Druck belastet wird. Für die Versuche am Miozänpfahl wurden die Reaktionspfähle R53 und R54 benützt und für den Kiespfahl die Reaktionspfähle R63 und R54.

Aufgrund der langen Versuchsdauer wurde der Pfahlversuche die meiste Zeit mit einer Totlast durchgeführt. Die Presse wurde dennoch benötigt, da die Energiepfähle am Ende der thermischen und mechanischen Belastungszyklen wie bei einem Standard Pfahlversuch bis zum Bruch gefahren wurden. Der Versuchsablauf wird in Kapitel 4.5 genauer erklärt.

Die drei Reaktionspfähle haben einen Durchmesser von 90 cm und eine Länge von 16,8 m. Die Pfähle R53 und R54 wurden im Kelly- Bohrverfahren mit Verrohrung hergestellt. Der Reaktionspfahl R63 wurde hingegen im SOB- Verfahren, dem Schnecken-Ortbeton Verfahren, gefertigt. Dabei wird mit einer langen, durchgehenden Schnecke gebohrt, die eine kontinuierliche Materialförderung ermöglicht.

Tab. 4.8: Höhenlage Reaktionspfähle R53, R54 und R63

Probepfahl	PKOK ¹ [m ü. A.]	POK ² [m ü. A.]	PUK ³ [m ü. A.]	Länge [m]	D [cm]
R53	157,0	156,6	139,8	16,8	90
R54	155,9	155,6	138,8	16,8	90
R63	155,9	155,6	138,8	16,8	90

¹ PKOK Pfahlkopfoberkante

² POK Pfahloberkante

³ PUK Pfahlunterkante

³ OK KES Oberkante Kraffeinleitungsstrecke

In den Reaktionspfählen wurden auch Temperatursensoren eingebaut, welche zur Beobachtung der Temperaturentbreitung im Boden dienen sollten. In **Tab. 4.9** sind die Sensoren und deren Höhenlage aufgelistet.

Tab. 4.9: Sensoren und deren Höhenlage in den Reaktionspfählen R53, R54 und R63

Sensor R53	S1 -R53	S2 -R53	S3 -R53		
Höhenlage [m.ü.A.]	144,9	141,5	143,2		
Sensor R54	S1-R54	S2 -R54	S3 -R54	S4 -R54	S5 -R54
Höhenlage [m.ü.A.]	154,14	151,04	144,79	143,09	141,39
Sensor R63	S1 -R63	S2 -R63			
Höhenlage [m.ü.A.]	153,14	151,04			

In **Abb. 4.12** und **Abb. 4.16** ist die Lage der Temperatursensoren verzeichnet.

4.3.4 Zusatzbohrungen

Um die Temperatursausbreitung bzw. die Temperaturverhältnisse in der direkten Umgebung der Energiepfähle zu überwachen, wurden Zusatzbohrungen ausgeführt. Es wurden drei Zusatzbohrungen hergestellt, wobei zwei in direkter Nähe des B.EM lagen und eine in der Nähe des B.EK. Die genaue Lage der Zusatzbohrungen ist in **Abb. 4.2** und **Abb. 4.3** dargestellt.

Die zwei Zusatzbohrungen im Miozän (TS.M1 und TS.M2) wurden bis auf eine Tiefe von 2 m unter die Pfahlunterkante abgeteuft, dann wurden die Temperatursensoren eingebaut und das Bohrloch wurde mit Zementsuspension verfüllt. In gleicher Weise wurde die Zusatzbohrung im Kies (TS.K) hergestellt, jedoch wurde diese nur bis in eine Tiefe von 1 m unter die Pfahlunterkante abgeteuft. Dies ergab eine Gesamtlänge der Bohrungen TS.M1 und TS.M2 von jeweils 18,8 m und eine Länge von 6,8 m für die Bohrung TS.K. In **Abb. 4.4** ist ein Schnitt der Zusatzbohrungen zu erkennen.

Die Sensoren wurden im Abstand von jeweils 30 cm eingebaut. Insgesamt wurden 65 Sensoren in den Bohrungen TS.M1 und TS.M2 verbaut und 26 Sensoren in der Bohrung TS.K. Diese Daten sind Bestandteil des Messwerterfassungssystem 4, welches in 4.4.2.5 genauer erläutert wird.

4.4 Versuchsaufbau

4.4.1 Mechanische- und thermische Belastungseinrichtung

Ursprünglich war geplant, wie bei den übrigen statischen Pfahlprobebelastungen des gegenständlichen Forschungsprojektes über die ganze Versuchsdauer die mechanische Belastung mittels einer hydraulischen Presse durchzuführen. Inwiefern die hydraulischen Pressen die Kraft konstant halten können, wurde in einem Vorversuch getestet.

Dieser Vorversuch bestand daraus, dass der Prüfkörper D.K55 mittels einer hydraulischen Presse mit 800 kN belastet wurde und dann die Pressensteuerung abgeschaltet wurde, um die Laständerung zu beobachten. Innerhalb von ca. 7 Stunden war ein Lastabfall auf 745 kN zu beobachten.

Der Druckabfall innerhalb des Hydrauliksystems hätte somit ständig nachgeregelt werden müssen um die Last auf den Pfahl über mehrere Tage konstant halten zu könnten. Aus diesem Grund wurde für die lange Versuchsdauer eine Belastungseinrichtung mit Totlast eingepplant.

Mechanische Belastungseinrichtung - Phasen 0 bis 5

Für die Phasen 0 bis 5 wurde aufgrund der langen Versuchsdauer ein Belastungskonzept mit einer Totlast entwickelt. Die Reaktionspfähle haben dabei keine lastabtragende Wirkung, sondern dienen nur der Stabilisierung. Eine perspektivische Ansicht des Prüfaufbaus mit der Totlast ist in **Abb. 4.18** zu sehen.

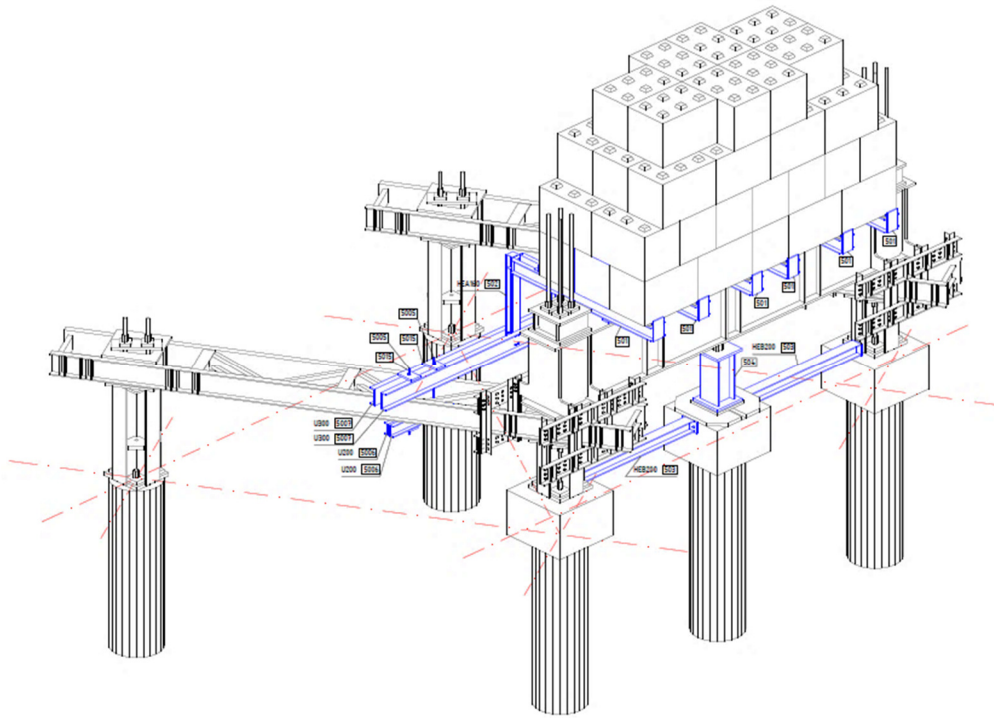


Abb. 4.18: Räumliche Darstellung des Prüfaufbaus mit Totlast [56]

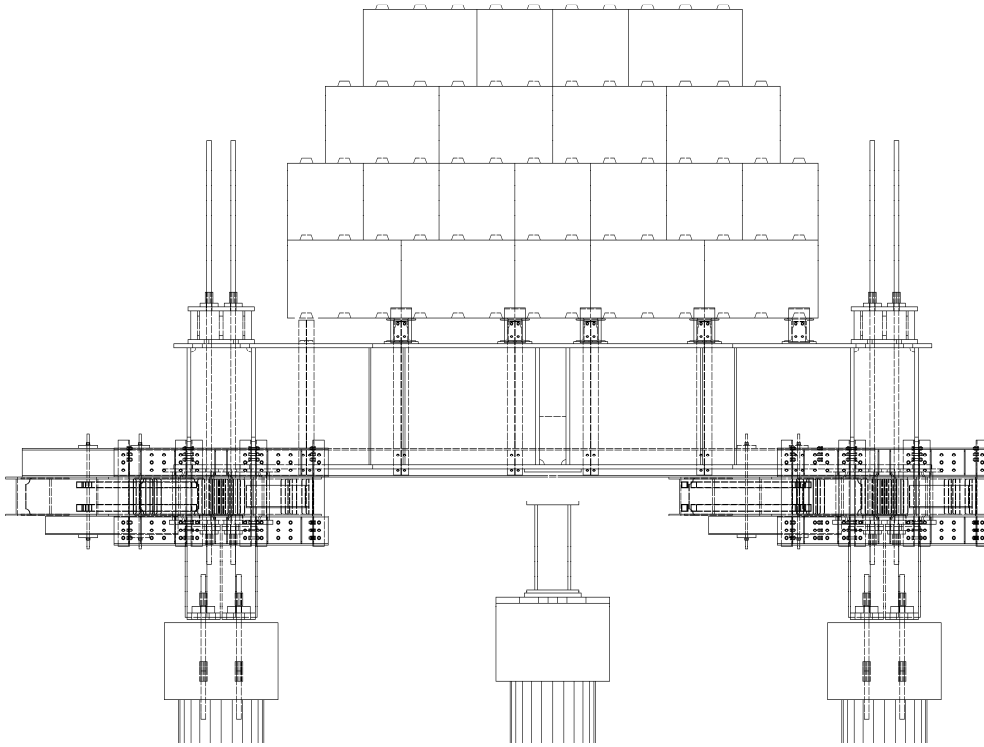


Abb. 4.19: Ansicht Prüfaufbau mit Totlast [57]

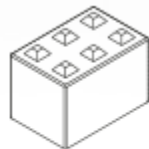
Der Aufbau war analog zu einem Schwebebalken konzipiert. Ein Stahlträger war in der Mitte auf dem Pfahlkopf gelagert und wurde durch die Reaktionspfähle links und rechts des Pfahls vor dem Verkippen geschützt. Dies war notwendig, da der gesamte Aufbau eine große Angriffsfläche für Wind bot und daher entsprechend stabilisiert werden musste. Der Träger wurde links und rechts mit vorgespannten Gewindestabankern auf den Reaktionspfählen gehalten. Wenn das System zu kippen drohte, wurden die Gewindestabanker, die den Träger mit dem Reaktionspfahl verbanden, auf Zug belastet und sicherten somit den Aufbau. Ein Foto dieser Verbindung wird in **Abb. 4.20** gezeigt.



Abb. 4.20: Verbindung Stahlträger- Reaktionspfahl

Der gesamte Aufbau wurde auch in Querrichtung mit zwei Reaktionspfähle ausgesteift, wie in **Abb. 4.18** zu sehen ist.

Auf dem Stahlträger wurde im Weiteren eine kleine Plattform gebaut, die eine Aufstandsfläche für die Totlast bot. Das System wurde mit mehreren Betonblöcken, die jeweils eine Größe von 1,2 m x 0,8 m x 0,8 m und ein Gewicht von 1,86 t aufwiesen, belastet. Ein Bild der sogenannten *Beton- Bloxx* ist in **Abb. 4.21** zu sehen.



120 x 80 x 80
ca. 1.860 kg

Abb. 4.21: Beton-Bloxx - Totlast [21]

Nachfolgende Abbildungen veranschaulichen die Versuchsdurchführung.



Abb. 4.22: Betonbloxx auf der Baustelle

Die Betonblöcke wurden mit Hilfe eines Krans auf den Aufbau geschichtet. Die Noppen der Blöcke stellten eine gute Verbindung zwischen den Blöcken her. Die Betonblöcke wurden in mehreren Lagen gestapelt.

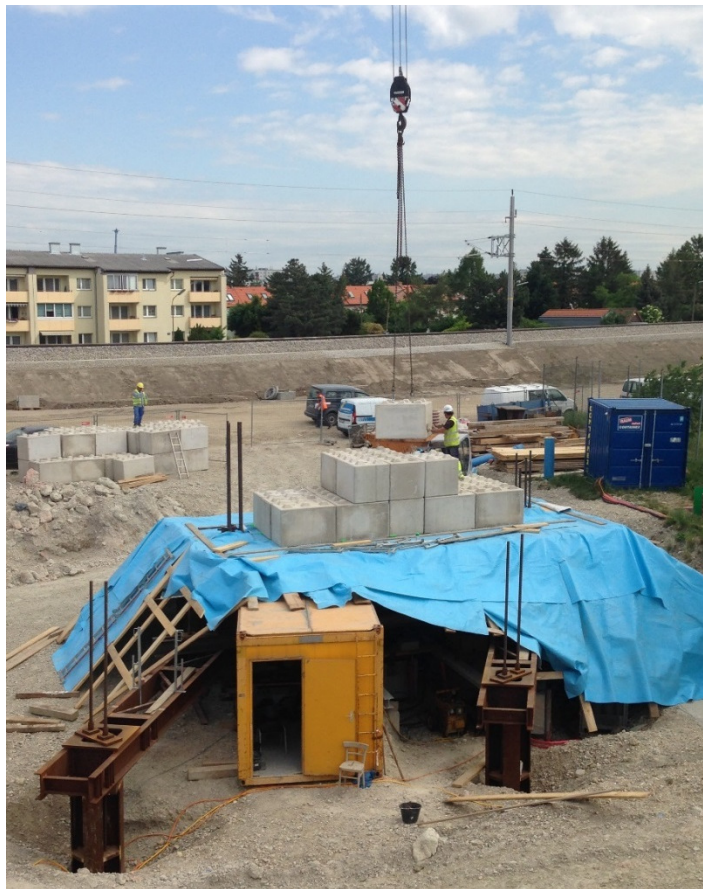


Abb. 4.23: Belastung mittels Kran (Miozänpfahl B.EM)

Links und rechts des Pfahlkopfs wurden Sockel hergestellt, auf denen zwei hydraulische Pressen platziert wurden. Diese trugen die Last des Aufbaus bis zu Versuchsbeginn. Nach der Nullmessung aller Messsysteme wurden die Pressen gesenkt und das System lag auf dem Pfahlkopf auf.



Abb. 4.24: Pressen links und rechts - mittig der Pfahlkopf (Miozänpfahl B.EM)

Auf den aufbetonierten Pfahlkopf wurde ein Stahlsockel gestellt. Zwischen dem Stahlaufbau und dem Sockel wurde die Kraft-Druckmessdose platziert. Diese maß kontinuierlich die Last, die tatsächlich auf den Pfahlkopf wirkte. Diese Messdaten waren Teil des Messwerterfassungssystem I (siehe 4.4.2.2).

Mechanische Belastungseinrichtung - Phase 6

Am Ende des Versuchsprogramms wurde der Pfahl abschließend einer konventionellen Pfahlprobebelastung ohne thermische Belastung unterzogen. Diese Phase des Versuchs wird im Weiteren als Phase 6 bezeichnet. Der Pfahl wurde hierfür wieder auf seine Ausgangstemperatur gebracht und einer konventionellen Pfahlprobebelastung für Großbohrpfähle unterzogen. Dabei wurde der gesamte Aufbau auf einen Prüfaufbau mit Presse umgebaut.



Abb. 4.25: Prüfbalken mit Presse (Kiespfahl B.EK)

Der gesamte Stahlaufbau wurde dabei bis auf den Stahlträger (Prüfbalken) zurückgebaut und die Presse anstelle des Stahlsockels unten eingeschoben. Die Kraftmessdose wurde auf die Presse gestellt, um eine genaue Aufzeichnung der Kraft im Pfahl zu bekommen. Die Ableitung der Kräfte erfolgte in dieser Versuchsphase über die Reaktionspfähle.



Abb. 4.26: Hydraulikpresse mit Kraftmessdose (Kiespfahl B.EK)

Thermische Belastungseinrichtung

Das Aufheizen und Abkühlen des Pfahls erfolgte über die Absorberleitungen, die im Pfahl installiert wurden. Die thermische Belastungseinrichtung, zur Erzeugung der notwendigen Temperaturen, wurde von der *Wien Energie GmbH* bereitgestellt, betrieben und betreut.

Im Wesentlichen war diese aus einer Heizvorrichtung und einer Kühlvorrichtung aufgebaut. Zur Heizvorrichtung gehörte ein 500 l Pufferspeicher, der mit einer 6 kW Heizpatrone beheizt wurde. Die Temperatur des Pufferspeichers konnte über eine Steuerung geregelt werden. Der Wärmeträger in den Absorberleitungen war reines Wasser, da während des Versuchszeitraums (Mai-Oktober) keine Minusgrade zu erwarten waren.

Die gesamte Anlage wurde während des Betriebs über die Temperaturdifferenz zwischen Vorlauf und Rücklauf geregelt. Für eine gleichmäßige Temperaturbeanspruchung im Pfahl wurde eine maximale Temperaturdifferenz von ≤ 2 °C zwischen Vorlauf- und Rücklauf-temperatur festgelegt. Die Durchflussgeschwindigkeit in den Absorberleitungen wurde mit einer Pumpe geregelt, die so eingestellt wurde, dass die vorgegebene Temperaturdifferenz eingehalten wurde.

Nach Herstellung der Anlage wurde ein kurzer Testbetrieb durchgeführt, um die Dichtheit der Verbindungen und die generelle Funktionalität zu testen. Dieser Testbetrieb erfolgte jedoch nicht mit den Absorbern im Energiepfahl, sondern mit einer separaten Testleitung, damit die Energiepfähle nicht schon frühzeitig mit Temperatur beaufschlagt wurden. [59]

Nach Abschluss der Versuchsdurchführung wurden bei beiden Versuchen die Absorberleitungen hinsichtlich deren Dichtheit überprüft. Da die Pfähle am Ende des Versuchsprogramm bis zum Bruch belastet wurden, hätten die Absorberleitungen beschädigt werden können. Dies war jedoch bei beiden Pfählen nicht der Fall und das System blieb weiterhin intakt.

4.4.2 Messeinrichtung

4.4.2.1 Allgemein

Zur Erfassung der unterschiedlichen Messdaten wurden die im Rahmen des Forschungsprojektes bislang verwendeten Messwerterfassungssysteme (MWES I und MWES II) durch drei weitere (MWES III, MWES IV und MWES V) ergänzt. **Tab. 4.10** gibt einen Überblick über die einzelnen Messwerterfassungssysteme.

Tab. 4.10: Messwerterfassungssysteme (MWES I) - Übersicht

MWES	Erfassung der	Instrumentierung
I	Vertikalen Belastungen und vertikale- bzw. horizontale Pfahlkopfverschiebungen	Elektronische Wegaufnehmer und mechanische Messuhr
II	Längsdehnungen & Umfangsdehnungen	Bewehrungssensoren, Kettenextensometer und Dehnungsaufnehmern
III	Dehnungen & Temperatur	Glasfasermesssystem
IV	Temperatur im umliegenden Boden	Zusatzbohrungen Temperatursensoren
V	Temperatur und Energiezentrale	Temperatursensoren und Energiedaten

Da die Instrumentierungen beim Versuch des Miozänpfahls B.EM und Kiespfahls B.EK bis auf das MWES III identisch waren, gelten die folgenden Erläuterungen für beide Pfähle.

4.4.2.2 Messwerterfassungssystem I (MWES I)

Das MWES I umfasste die gesamte Instrumentierung am Pfahlkopf.

Für die kontinuierliche Messung der vertikalen Pfahlkopfverformung wurden drei induktive Wegaufnehmer der Firma *HBM* vom Typ *Wegtaster WA/100MM-T* verwendet. Diese Wegtaster haben einen Messbereich von 0-100 mm. Es wurde ebenfalls eine mechanische Messuhr vom Typ *GM 80-100T* zur Messung der Vertikalverschiebung verwendet. Diese wurde immer zu Beginn und am Ende einer Laststufe abgelesen und der Messwert im Feldprotokoll für die Auswertung der Rohdaten vermerkt. Die Wegaufnehmer wurden auf der Messbrücke jeweils im Bereich eines Eckes des Pfahlkopfs befestigt. Um eine ebene Messoberfläche zu schaffen, wurden auf dem Betonpfahlkopf Stahlwinkel befestigt, auf denen Plexiglasplatten aufgeklebt wurden. Ein Foto dieses Aufbaus ist in **Abb. 4.33** zu sehen.

Zur Aufzeichnung der horizontalen Pfahlkopfverformung wurden zwei induktive Wegaufnehmer der Firma *HBM* vom Typ *Wegtaster WA/100MM-T* mit einem Messbereich 0-100 mm verwendet. Diese wurden an zwei Messpunkten mit 90° zueinander verdreht und jeweils in der Mitte der Seitenfläche des Pfahlkopfs angeordnet. Ein Foto eines montierten horizontalen Wegaufnehmers ist in **Abb. 4.32** zu sehen.

Die Halterungen der Wegaufnehmer wurden auf zwei Messbrücken, die unabhängig von der Probelastung waren und neben dem Pfahlkopf platziert wurden, befestigt. Der Aufbau der Messbrücke war derselbe wie bei einer konventionellen Pfahlprobelastung. Laut EA-Pfähle müssen die Auflager der Messbrücken mindestens 2,5 m vom Pfahlmantel des zu prüfenden Pfahls entfernt sein.[23] Dieser Abstand wurde eingehalten und für die Auflager Betonfundamente, die bis in frostfreie Tiefen reichten, hergestellt. Die Auflager bestanden aus übereinander gestapelten Kanthölzern, auf denen die Messbrücke auflag. Die Lagesicherung wurde mit Ankerstäben gewährleistet. Die genaue Lage der Wegaufnehmer und der Messbrücke ist in den Skizzen in **Abb. 4.27**, **Abb. 4.28**, **Abb. 4.29**, **Abb. 4.30** ersichtlich.

Die auf den Pfahl aufgebrachte Last wurde mit der Kraftmessdose kontinuierlich aufgezeichnet. Dafür wurde eine Kraftmessdose der Firma *HBM* vom Typ *I-C6A/5MN* verwendet (Foto siehe **Abb. 4.34**). Die Außentemperatur wurde ebenfalls am Pfahlkopf mithilfe eines Temperatursensors des Typs *PS-PT1000* aufgezeichnet.

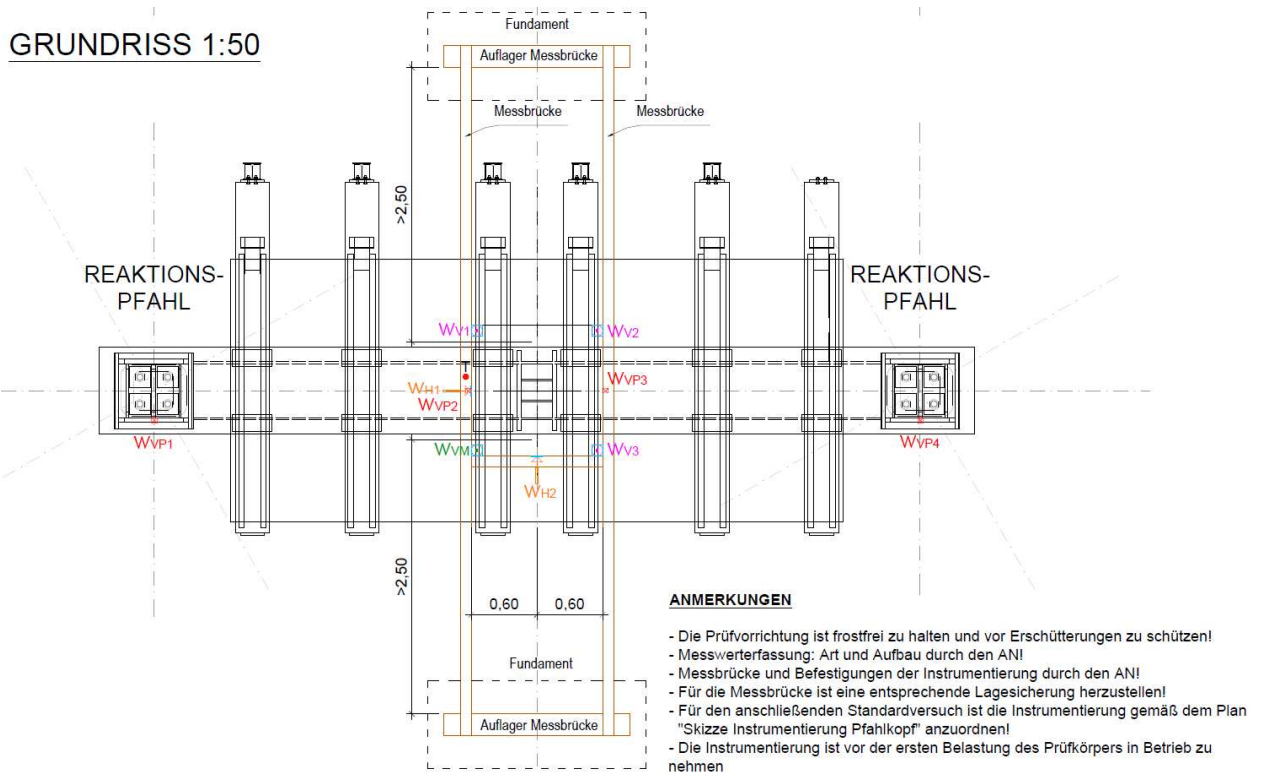
Die Lage der Messbrücke und der Reaktionspfähle wurde mittels Präzisionsnivellement kontinuierlich an Kontrollpunkten beobachtet, um eine unbeabsichtigte Verschiebung festzustellen. Der gesamte Versuchsaufbau wurde mittels einer Einhausung vor übermäßiger Sonneneinstrahlung und Unwetter geschützt, da vor allem die Messinstrumente sehr sensibel reagieren.

In Tab. 4.11 sind die Komponenten des MWES I zusammengefasst.

Tab. 4.11: Bestandteile des MWES I je Pfahl, Miozänpfahl B.EM und Kiespfahl B.EK

Komponente	Bez.	Typ	Beschreibung	Stk
Kraftmessdose	KMD 1	HBM 1-C6A/5MN	Messung der Vertikalkraft	1
Temperaturfühler	T	PT 1000	Temperaturmessung am Probepfahlkopf	1
Wegaufnehmer vertikal	$W_{V,1-3}$	HBM WA100 0,1% Linearitätsabw.	Messung der Vertikalverschiebung am Probepfahlkopf	3
Mechanische Messuhr	W_{mech}	GM 80/100 T	Kontrolle der Vertikalverschiebung am Probepfahlkopf	1
Wegaufnehmer horizontal	$W_{H,1-2}$	HBM WA100 0,1% Linearitätsabw.	Messung der Horizontalverschiebung am Probepfahlkopf	2
Präzisionsnivelement	$W_{VP,1-4}$	LE 71	Kontrolle der Vertikalverschiebung der Messbrücke und Reaktionspfähle	1

In den folgenden Abbildungen ist die Lage der Messeinrichtung des MWES I dokumentiert.

**Abb. 4.27:** Skizze des Versuchsaufbaus mit Messeinrichtung MWES I- Grundriss

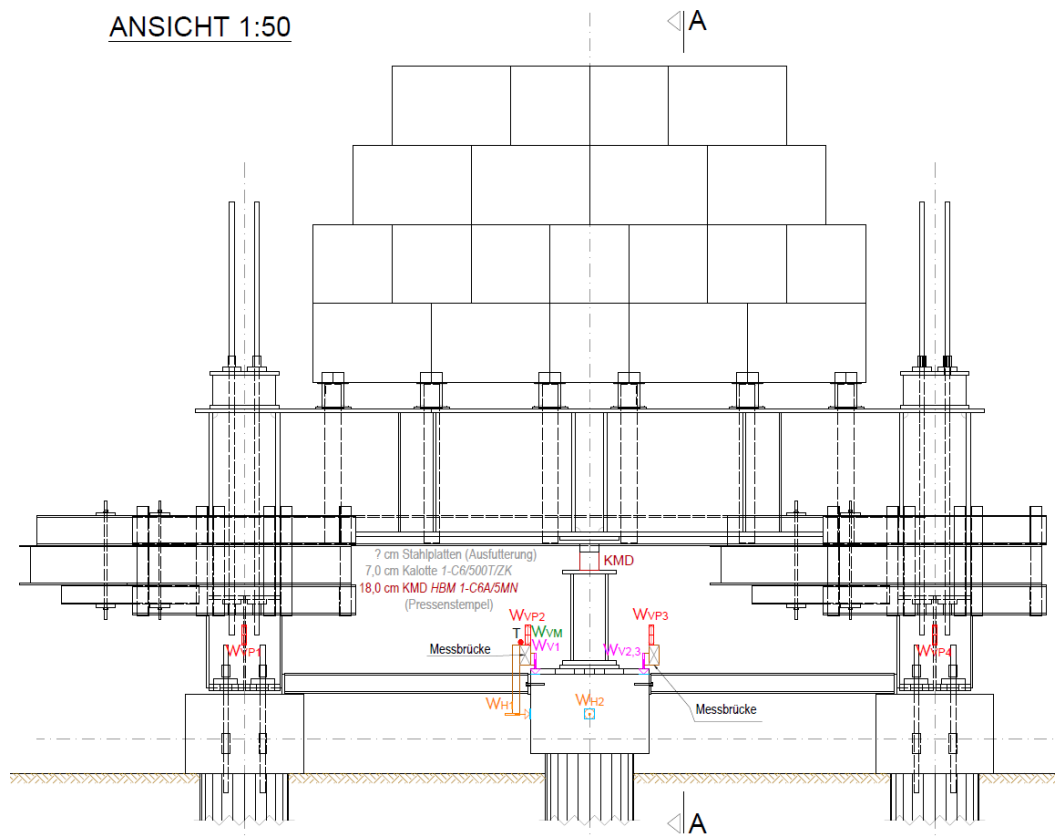


Abb. 4.28: Skizze des Versuchsaufbaus mit Messeinrichtung MWES I – Ansicht

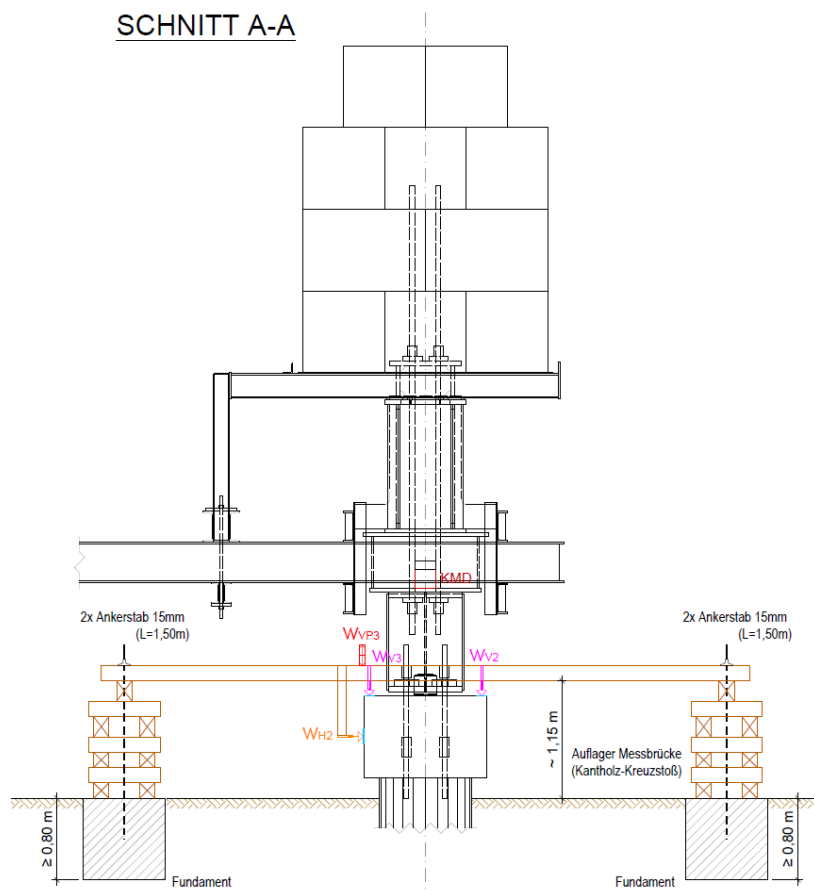


Abb. 4.29: Skizze des Versuchsaufbaus mit Messeinrichtung MWES I - Schnitt A-A

LEGENDE INSTRUMENTIERUNG:

- KMD** Kraftmessdose: Typ: HBM 1-C6A/5MN bei ZPE 1000
- WVPx** Vertikalverschiebungen periodisch mittels Präzisionsnivellement:
 - System LE71
 - 4 Messpunkte: OK Reaktionspfahl 1+4 und Mitte OK Messbrücke 2+3
 - Grundeinstellungen Messbereich (Hebung / Setzung): $W_{VP1,4} = 90\% / 10\%$, $W_{VP2,3} = 50\% / 50\%$
- Wvx** Vertikalverschiebungen am Pfahlkopf, kontinuierlich, mit Nachstellmöglichkeit:
 -Typ:HBM WA/20MM-T (0,1% Linearitätsabweichung)
 -3 Messpunkte: jeweils von der Messbrücke auf OK Pfahlkopf
 -Grundeinstellungen Messbereich (Hebung / Setzung): $WV1,2,3 = 0\% / 100\%$
 -Auflager Taster am Pfahlkopf: Plexiglasplatte 10x10cm mit 2K Kleber befestigt
- WVM** Vertikalverschiebungen am Pfahlkopf, mechanisch:
 -Typ mechanische Messuhr: GM 80-100T
 -1 Messpunkt: von der Messbrücke auf OK Pfahlkopf
 -Grundeinstellungen Messbereich (Hebung / Setzung): $WVM = 5\% / 95\%$
 -Auflager Taster am Pfahlkopf: Plexiglasplatte 10x10cm mit 2K Kleber befestigt
- WHx** Horizontalverschiebungen am Pfahlkopf, kontinuierlich:
 -Typ:HBM WA/100MM-T (0,2% Linearitätsabweichung)
 -2 Messpunkte um 90° verdreht, jeweils Mitte Seitenfläche Pfahlkopf
 -Grundeinstellungen Messbereich (Hebung / Setzung): $WH1,2 = 50\% / 50\%$
 -Auflager Taster am Pfahlkopf: Plexiglasplatte 10x10cm mit 2K Kleber befestigt
- T** Temperatursensor am Pfahlkopf, kontinuierlich:
 -Typ: PS-PT1000
 -1 Messpunkte auf der Messbrücke

Abb. 4.30: Legende für die Skizzen mit Messeinrichtung MWES I

In den anschließenden Abbildungen sind Fotos des MWES I während des Versuchs zu sehen.



Abb. 4.31: Messbrücke mit aufmontierten Wegaufnehmern - MWES I



Abb. 4.32: Horizontale Wegaufnehmer - MWES I



Abb. 4.33: Vorne: Mechanische Messuhr, Hinten: Vertikaler Wegaufnehmer - MWES I



Abb. 4.34: Kraftmessdose auf hydraulischer Presse - MWES I

4.4.2.3 Messwerterfassungssystem II (MWES II)

Bewehrungssensoren

Die Messung der Längsdehnungen erfolgte mit Dehnungssensoren des *Modell 4911* der Firma *Geokon*, sogenannte „*Sister Bars*“. Wie in **Abb. 4.35** ersichtlich, bestehen diese im Wesentlichen aus einer Messzelle, die in ein Bewehrungsseisen eingeschweißt ist. Die Messzelle mit dem Bewehrungsseisen hat eine Länge von 914 mm.[73]

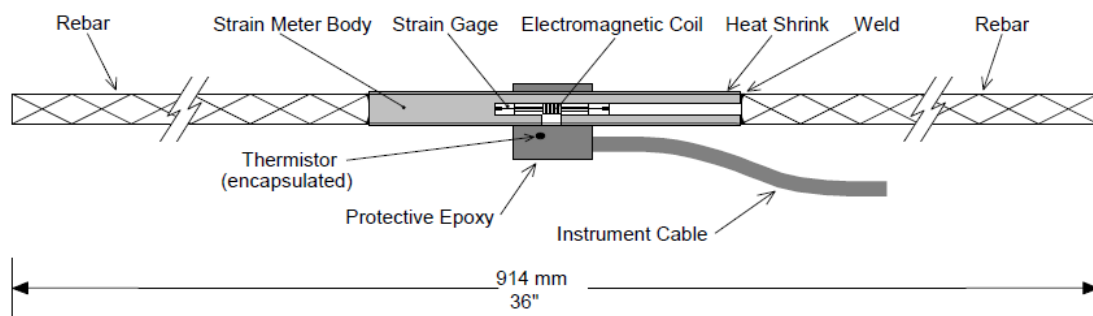


Abb. 4.35: Modell 4911 Rebar Strain Meter (*Sister Bar* - Geokon) [73]

Die Messzelle misst die Dehnungen des Bewehrungsseisens und wird – um die Dehnungen des Betonbauteils zu messen – an dessen Bewehrungskorb befestigt und mit einbetoniert. Eine ausreichende Verankerungslänge im Beton gewährleistet, dass ein fester Verbund zwischen Stahl (Messzelle) und Beton hergestellt ist und die aufgezeichneten Dehnungen in der Messzelle dieselben sind, wie jene im Beton. [18] Die Montage und Kabelführung der *Sister Bars* im Pfahl ist in **Abb. 4.36** gezeigt.

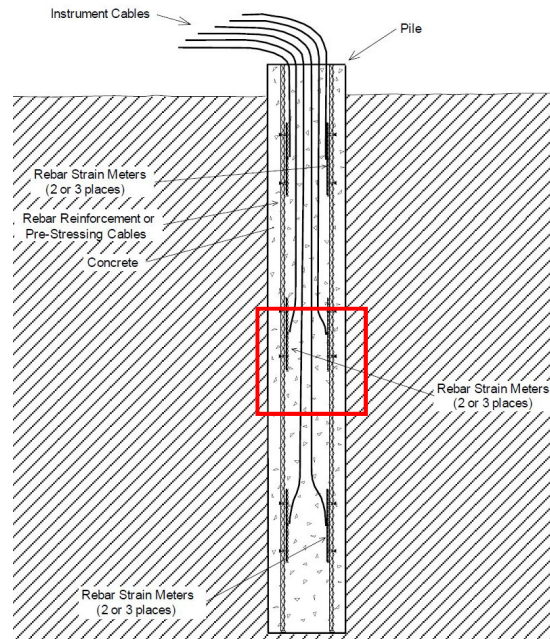


Abb. 4.36: Montage Sister Bar - Geokon [73]

In der Messzelle befindet sich eine Stahl-Saite die, je nachdem ob der Stabstahl gestaucht oder gedehnt wird, sich spannt oder entspannt; dies ist das Messprinzip der „schwingenden Saite“. Beim Auslesen der Messwerte wird die Saite in Schwingung versetzt, welche abhängig von der Spannung der Stahlsaite ist. Mit einem Auslesegerät wird die Frequenz, mit der die Stahl-Saite schwingt, gemessen und in der Einheit Digits ausgegeben. Sämtliche Dehnungsaufnehmer mit dem Messsystem „schwingende Saite“ sind zusätzlich mit einem Thermistor ausgestattet, wobei die Temperatur über den elektrischen Widerstand gemessen wird.



Abb. 4.37: Foto – eingebauter Bewehrungssensor Modell 4911 (Sister Bar) der Fa. Geokon [73]

Die Messwerte der Dehnungsaufnehmer wurden mit dem Datenlogger vom Typ Geokon 8002-16-1 (LC-2x16) aufgezeichnet.

Kettenextensometer

Das Kettenextensometer vom Typ 1300/A9 der Fa. Geokon wurde für die Messung der Längsdehnungen verwendet. Das Kettenextensometer besteht aus Segmenten, die miteinander verbunden sind, sodass nicht nur die Verformung jedes einzelnen Pfahlabschnitts, sondern auch die Gesamtverformung des Pfahls gemessen werden kann. Das Kettenextensometer besteht aus pneumatisch aktivierbaren Ankern, die in beliebiger Tiefe des Pfahls mittels Dornen verankert werden können. Ein Stahlrohr mit 51,2 mm Innendurchmesser wird in der Mitte des Pfahls einbetoniert, worin das Kettenextensometer im Weiteren installiert wird. Zwischen diesen fixen Ankerpunkten messen die

Messgeber die Verformung des Pfahls. Die **Abb. 4.38** zeigt rechts das einzelne Segment und links das gesamte System.

Das Kettenextensometer wurde in sechs Horizonten verankert, womit sich fünf Messabschnitte ergaben. Die Einbauprotokolle der Kettenextensometer sind in **ANHANG B** zu finden.

Die Messdaten wurden gemeinsam mit den Daten der Bewehrungssensoren auf einem Datenlogger vom Typ *Geokon 8002-16-1 (LC-2x16)* aufgezeichnet.

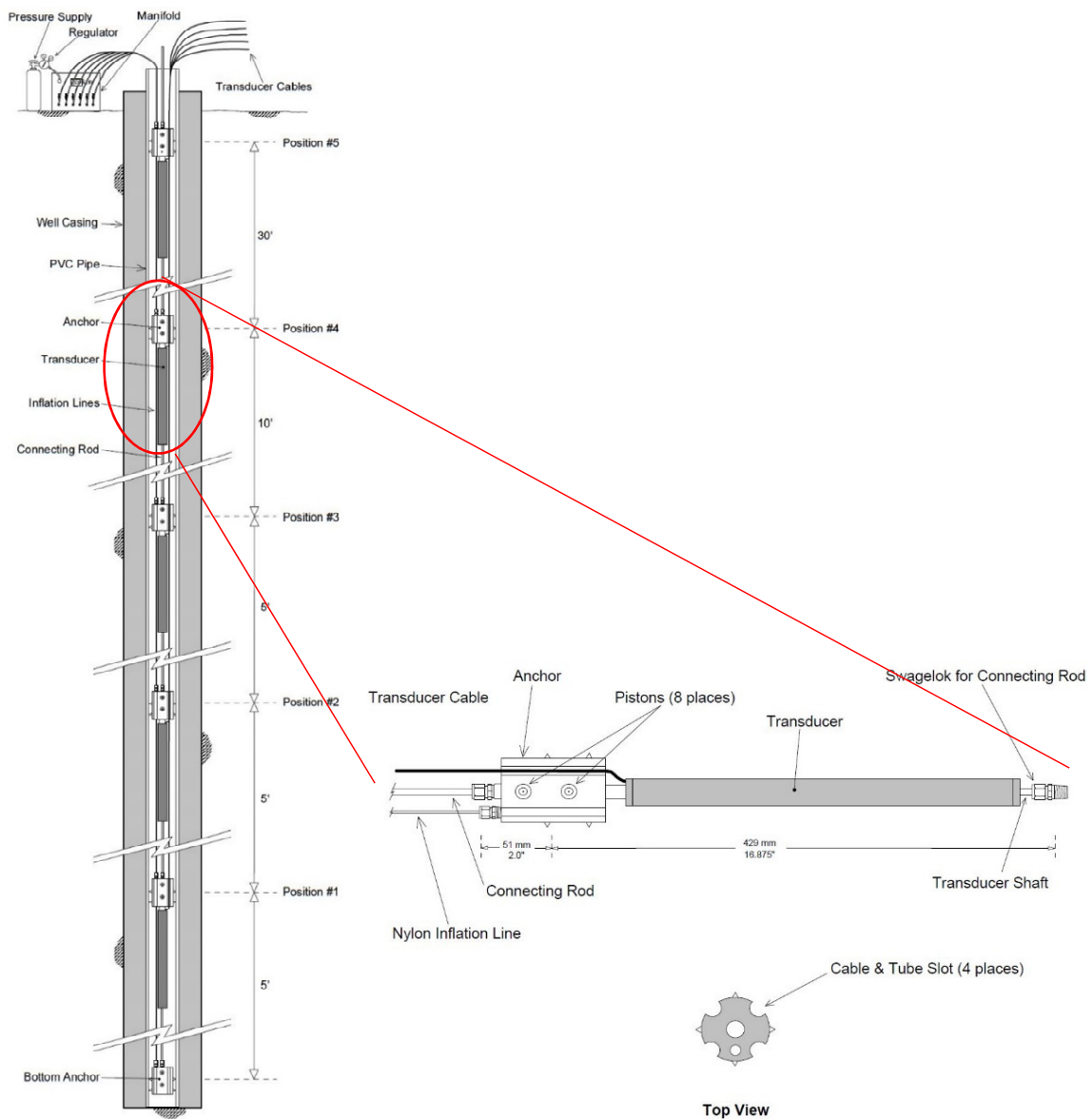


Abb. 4.38: Kettenextensometer - *Modell 1300/A9* Retrievable Extensometer [72]

Dehnungsmessung in Umfangsrichtung

Zur Messung der Dehnungen in Umfangsrichtung wurden Dehnungsaufnehmer verwendet. Es handelt sich dabei um Dehnungsaufnehmer des *Geokon-Modell 4200*, das ebenso mit dem System „schwingende Saite“ misst. Sie werden entweder direkt an einem Bewehrungsstab befestigt oder mit Spannkabeln zwischen den Bewehrungsstab eingespannt und dann mit einbetoniert. In der Messzelle ist zwischen den zwei Enden eine Stahlsaite gespannt.



Abb. 4.39: Installierte Dehnungssensoren im Miozänpfahl B.EM – Fa. Geokon (Modell 4200)



Abb. 4.40: Lage der installierten Dehnungssensoren im Miozänpfahl B.EM – Fa. Geokon (Modell 4200)

Da die Messzelle einen direkten Verbund zum Beton hat, verformt sich die Messzelle mit dem Beton mit und die Saite wird stärker gespannt oder die Spannung lässt nach. Diese Änderung der Vorspannung in der Saite wird gemessen bzw. ergibt sich aus der Frequenz der Saite, wenn diese in Schwingung gebracht wird. Mit Magnetspulen wird die Saite konstant angeregt, sodass die Saite mit ihrer Resonanzfrequenz schwingt.

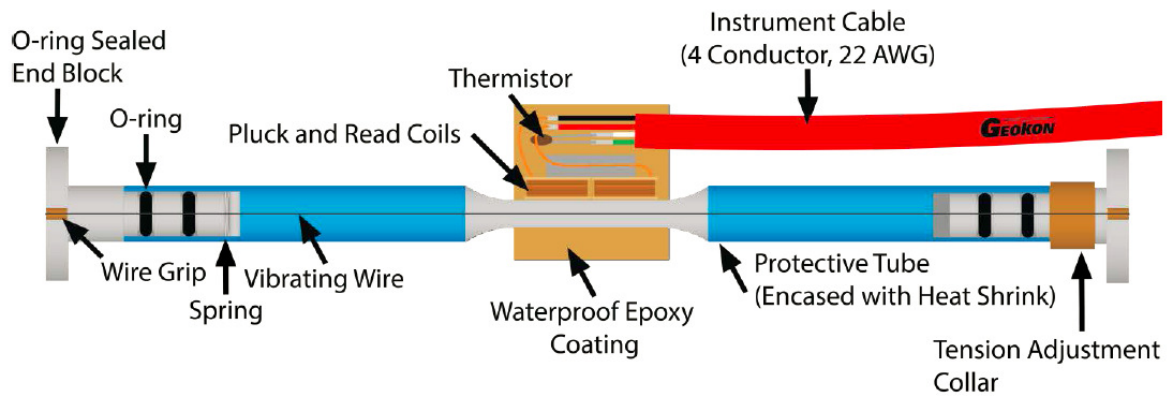


Abb. 4.41: Dehnungssensoren zur Messung der Dehnungen in Umfangsrichtung - Fa. Geokon (Model 4200) [74]

Sämtliche Dehnungsaufnehmer mit dem Messsystem „schwingende Saite“ sind zusätzlich mit einem Thermistor ausgestattet, wobei die Temperatur über den elektrischen Widerstand gemessen wird.

Insgesamt waren für die Aufzeichnung der Daten des MWES II zwei Datenlogger vom Typ *Geokon 8002-16-1 (LC-2x16)* erforderlich. Die Daten konnten auf der Baustelle mithilfe der Software *Geokon Log View* vom Datenlogger ausgelesen und gesichert werden.

In **Tab. 4.12** sind die Komponenten des MWES II zusammengefasst.

Tab. 4.12: Bestandteile des MWES II je Pfahl, Miozänpfahl B.EM und Kiespfahl B.EK

Komponente	Bez.	Typ	Beschreibung	Stk
Dehnungsaufnehmer (Bewehrungssensoren)	BS	<i>Geokon 4911 (Sister Bars)</i>	Messung der Axialdehnungen und Temperatur	5x2
Kettenextensometer	KEX	<i>Geokon 1300-A9</i>	Messung der Axialdehnungen	1
Dehnungsmesse in Umfangsrichtung	DS	<i>Geokon-Modell 4200</i>	Messung der Umfangsdehnungen und Temperatur	4x4
Datenlogger		<i>Geokon 8002-16-1 (LC-2x16)</i>	Aufzeichnung und Zwischenspeicherung der Messdaten	2

4.4.2.4 Messwerterfassungssystem III (MWES III)

Das MWES III beinhaltet das Glasfasermesssystem, das nur beim Miozänpfahl B.EM eingebaut wurde. Dieses wurde zur Messung der Dehnungen und der Temperatur im Pfahl eingebaut.

Die Montage, der Betrieb und die Überwachung dieses Glasfasermesssystems erfolgte durch die ARGE FPUH. Die aufgezeichneten Daten werden jedoch in dieser Diplomarbeit nicht behandelt.

In **Tab. 4.13** sind die Komponenten des MWES III zusammengefasst.

Tab. 4.13: Bestandteile des MWES III im Miozänpfahl B.EM

Komponente	Bez.	Typ	Beschreibung	Stk
Glasfaserkabel für Temperaturmessung		<i>n.a.</i>	Messung der Temperatur entlang des Glasfaserkabels	190 lfm
Glasfaserkabel für Dehnungsmessung		<i>n.a.</i>	Messung der Dehnung entlang des Glasfaserkabels	300 lfm

Abb. 4.42 zeigt die verlegten Glasfaserkabel innerhalb des B.EM.

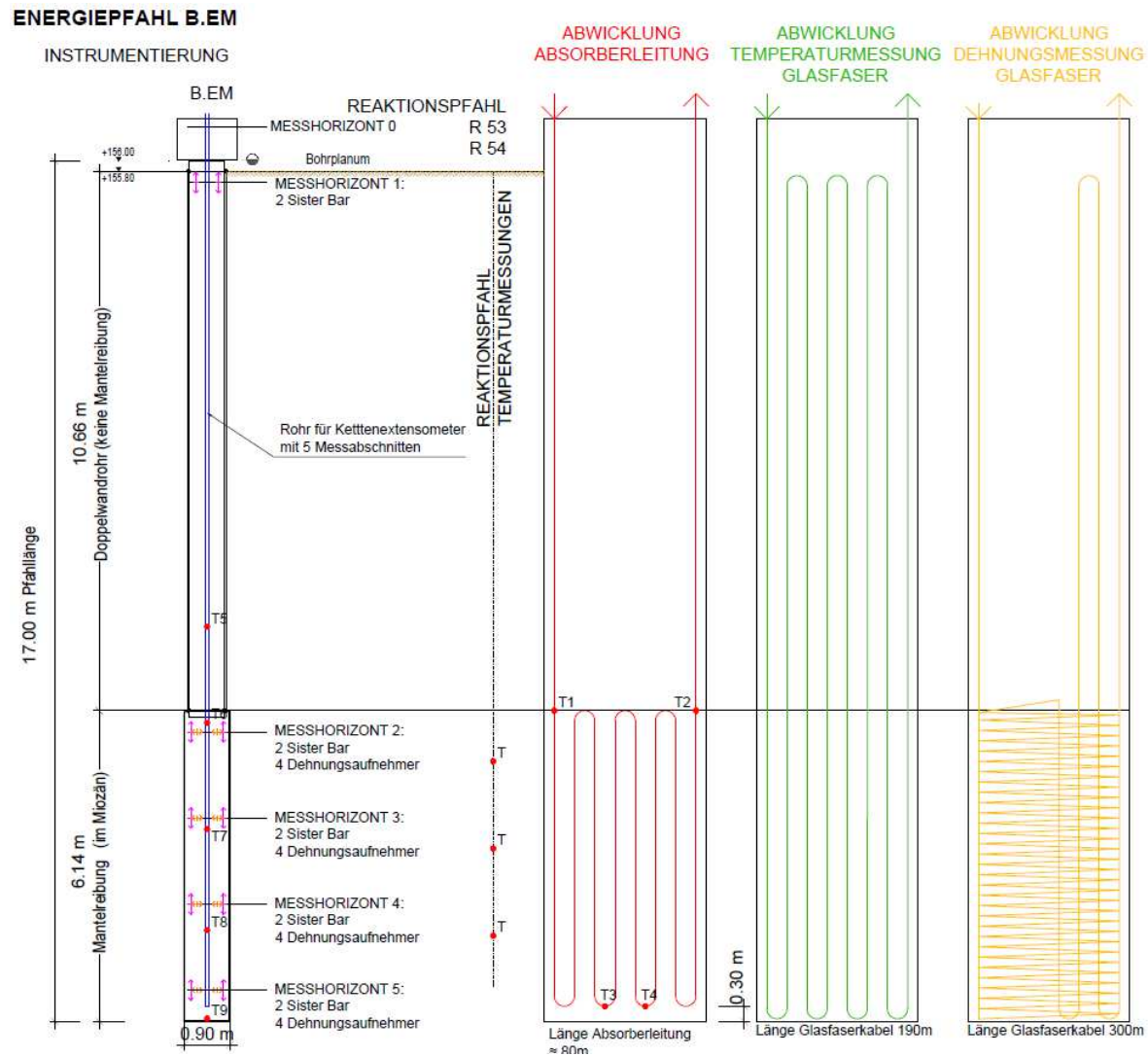


Abb. 4.42: Schematische Darstellung der verlegten Glasfaserkabel im Miozänpfahl B.EM [58]

4.4.2.5 Messwerterfassungssystem IV (MWES IV)

Das MWES IV beinhaltet die Temperatursensoren, die in den Zusatzbohrungen eingebaut wurden. Wie schon zuvor in Kapitel 4.3.4 erwähnt, wurden drei Zusatzbohrungen hergestellt, wobei zwei bis in das Miozän reichten (TS.M1 und TS.M2) und eine nur bis in den Kies (TS.K). Es wurden Temperatursensoren des Typs *Thermal Wire Cable* verwendet. Das Messsystem basierte auf einem Messkabel, bei dem alle 30 cm Temperatursensoren platziert waren.

Die Daten dieser Messkette wurden auf einem *Thermal Acquisition Port* aufgezeichnet und konnten dann ausgelesen werden. [59]

Die Temperaturen wurden in allen drei Zusatzbohrungen gemessen. Die ARGE FPUH war für die Montage, Überwachung und Datensicherung dieses MWES IV zuständig. Die Messwerte wurden als *csv*-Dateien an die TU Wien übermittelt.

In Tab. 4.14 sind die Komponenten des MWES IV zusammengefasst.

Tab. 4.14: Bestandteile des MWES IV je Zusatzbohrung (TS.M1, TS.M2, TS.K

Komponente	Bez.	Typ	Beschreibung	Stk
Thermal Wire Cable	TIP	<i>n.a.</i>	Messung der Temperatur in 30 cm Abständen	3
Thermal Acquisition Port	TAP	<i>n.a.</i>	Datenerfassung und Speicherung je Messkette	3

4.4.2.6 Messwerterfassungssystem V (MWES V)

Das MWES V beinhaltet die Sensoren der *Wien Energie GmbH*. Darin sind nicht nur die Messungen der Energiezentrale und des Absorbersystems enthalten, sondern auch die Temperaturmessungen in den Energie- und Reaktionspfählen.

Die Messsensoren innerhalb der Energiezentrale waren zur Regelung und Steuerung der Absorbertemperatur notwendig. Folgende Daten wurden aufgezeichnet:

- Rücklauf- und Vorlauftemperatur [°C]
- Durchfluss [m³/h]
- Leistung [kW]
- Energie [kWh]
- Durchflussvolumen [m³]
- Pufferspeicher Temperatur oben und unten [°C]
- Außenlufttemperatur [°C]
- Außenluftfeuchtigkeit [%]

Die Lage der Temperatursensoren für den Miozän Pfahl ist in Kapitel 4.3.1.1 für den Kiespfahl in Kapitel 4.3.2.1 und für die Reaktionspfähle in Kapitel 4.3.3 zu finden. In **Tab. 4.15** sind die Temperatursensoren des MWES V zusammengefasst.

Tab. 4.15: Bestandteile des MWES V (ohne Sensoren in der Energiezentrale) für den Miozänpfahl B.EM, Kiespfahl B.EK und den Reaktionspfählen R53, R54 und R63

Komponente	Typ	Beschreibung	Stk
B.EM	<i>Geokon 3800-2-1</i>	Messung der Temperatur in Pfahlmitte	5
B.EM	<i>Geokon 3800-2-1</i>	Messung der Temperatur an den Absorberleitungen	4
B.EK	<i>Geokon 3800-2-1</i>	Messung der Temperatur in Pfahlmitte	4
B.EK	<i>Geokon 3800-2-1</i>	Messung der Temperatur an den Absorberleitungen	3
R53	<i>Geokon 3800-2-1</i>	Messung der Temperatur in Pfahlmitte	3
R54	<i>Geokon 3800-2-1</i>	Messung der Temperatur in Pfahlmitte	5
R63	<i>Geokon 3800-2-1</i>	Messung der Temperatur in Pfahlmitte	2

Die Lieferung und Montage der Temperatursensoren, die in **Tab. 4.15** aufgelistet sind, erfolgte durch die ARGE FPUH. Die Sensoren der Energiezentrale wurden von der *Wien Energie GmbH* geliefert und montiert.

Die Datenerfassung des gesamten MWES V erfolgte durch die *Wien Energie GmbH*. Die Daten wurden als Excel-Dateien der TU Wien in regelmäßigen Abständen per E-Mail übermittelt.

4.4.2.7 Schutz der Mess- und Belastungseinrichtung

Eine Einhausung rund um die Mess- und Belastungseinrichtung wurde zum Schutz der Messinstrumente vor heftigem Niederschlag, niedrigen Temperaturen und starkem Wind errichtet.

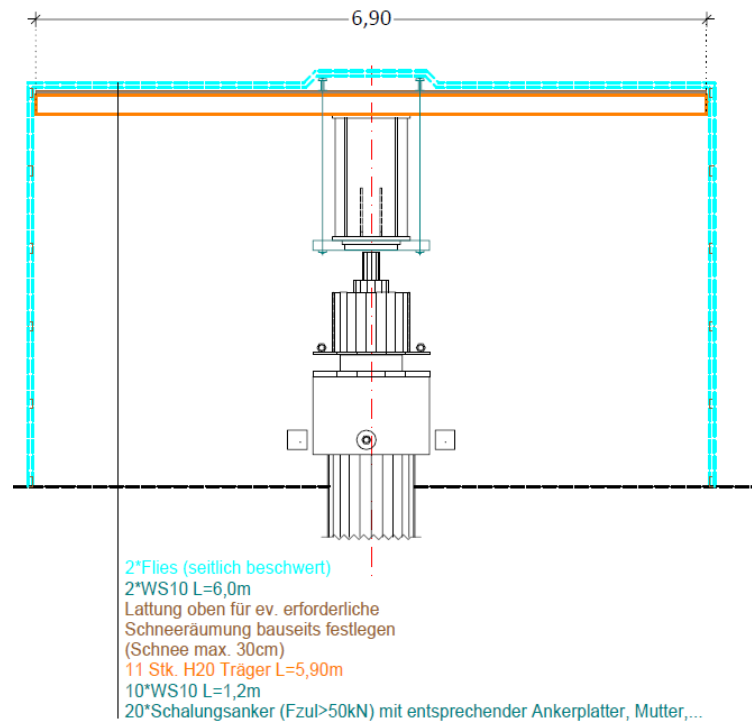


Abb. 4.43: Schematische Darstellung der Einhausung Energiepfahl [64]

Die Einhausung bestand aus einer Lattung, auf der ein Vlies befestigt wurde. Auf der Stahlplattform wurde dieses Vlies ebenfalls gelegt und befestigt. Ein Foto der Einhausung für den Miozänpfahl B.EM ist in **Abb. 4.44** gezeigt.



Abb. 4.44: Einhausung Energiepfahl (B.EM)

4.5 Versuchsablauf

Großmaßstäbliche Untersuchungen an Energiepfählen wurden bislang weltweit nur vereinzelt durchgeführt, sodass kaum Erfahrungswerte vorlagen. Aus diesem Grund wurden versuchsbegleitend einzelne Messwerte ausgewertet und analysiert, um eventuell erforderliche Anpassungen vornehmen zu können. Der Versuchsablauf wurde von der *Geotechnik Adam ZT GmbH* geplant, wobei aufgrund des beschränkten Versuchszeitrahmens der Versuchsablauf angepasst werden musste.

In **Tab. 4.17** ist ein Auszug und im **ANHANG A** sind die Durchführungskonzepte für beide Energiepfähle B.EM und B.EK zu finden. In diesen Durchführungskonzepten sind die tatsächlichen Zeitpunkte und die jeweilige Versuchsdauer angegeben. Die gesamte Versuchsdauer betrug beim Miozänpfahl ca. 78 Tage und beim Kiespfahl ca. 63 Tage.

Nachfolgend wird auf den generellen Versuchsablauf eingegangen, wobei anzumerken ist, dass die Prüfabläufe beim Energie-Miozänpfahl und beim Energie-Kiespfahl prinzipiell identisch sind. Der Versuchsablauf wurde in einzelne Arbeitsschritte geteilt, die im Folgenden chronologisch erklärt werden. Die nachfolgende Erläuterung des Versuchskonzepts basiert auf dem Bericht „*Versuchskonzept Energiepfahlprüfungen*“ von *Geotechnik Adam ZT GmbH* [59].

4.5.1 Versuchsvorbereitung

Nach Abschluss des Versuchsaufbaus mussten vor Versuchsbeginn noch gewisse Vorbereitungen getroffen werden, die in **Tab. 4.16** aufgelistet sind.

Tab. 4.16: Auszug aus Durchführungskonzept – Vorbereitungen, aus [60]

VORBEREITUNGEN		
Versuchs- bezeichnung	Bemerkung	Arbeits- schritt
Vorbereitungen	Herstellung Einhausung	EM V-A
	Herstellung hydraulische Anlage bzw. Energiezentrale	EM V-B
	Testen der hydraulischen Anlage (über separate Testleitung; nicht über Energiepfahl!)	EM V-C
	Einbau Kettenextensometer	EM V-D
	Testen aller Messsysteme	EM V-E
	1. Nullmessung aller Messsensoren	EM V-F

Der Arbeitsschritt EMV-A betrifft die Herstellung der Einhausung wie in Kapitel 4.4.2.7 beschrieben. Die nächsten beiden Arbeitsschritte beinhalteten die Herstellung der thermischen Belastungseinrichtung und deren Testlauf vor Versuchsbeginn. Der Einbau des Kettenextensometers erfolgte nach Herstellung des Pfahls und kurz vor Versuchsstart. An dem Tag des Versuchsstarts mussten nochmals alle Messsysteme auf ihre Funktionstauglichkeit geprüft werden. Anschließend erfolgte die Nullmessung der Messsensoren.

4.5.2 Versuchsdurchführung

Der Versuchsablauf wurde in einzelne Phasen aufgeteilt. Diese sind in **Tab. 4.17** zu sehen.

Phase 0 Simulation der Gebäudeherstellung

Phase 1 Simulation der Gebäudekühlung

Phase 2 Simulation der Gebäudeheizung

Phase 3 Simulation des Wechselbetriebs

Phase 4 Simulation des Wechselbetriebs

Phase 5 Vorbereitung für die Pfahlprobelastung

Phase 6 statische Pfahlprobelastung

Tab. 4.17: Auszug aus Durchführungskonzept – Versuchsdurchführung, aus [60]

Versuchsphase	gewählte Referenzzeitpunkte	Versuchs-stadium	Bemerkung	Arbeits-schritt
PHASE 0	P0-0	Versuchsbeginn	Nullmessung aller Messsensoren	EM 0
		Simulation Gebäudeherstellung	Vorlast	EM 1
			Erstbelastung (1. Lastschleife)	EM 2b
				EM 2c
				EM 3
				EM 4
			Entlastung	EM 5a
				EM 5b
				EM 5c
			Wiederbelastung (2. Lastschleife)	EM 6b
	EM 6c			
	Entlastung (Referenzfälle für Vergleich mit thermischer Belastung)	EM 7		
P0-1000		EM 8a		
P0-800		EM 8b		
	P0-600	EM 8c		
PHASE 1	P1_AH-600 P1_EH-600	Simulation Gebäudekühlung	1 .AUFHEIZPHASE	EM 9
			Zwischenablesung; Vorbereitung Lastvariation	EM 10
			Lastvariation	EM 11
	P1_EH-1000			EM 12a
	P1_EH-800			EM 12b
	P1_EH-600	EM 12c		
PHASE 2	P2_AK-600	Simulation Gebäudeheizung	1. ABKÜHLPHASE	EM 13a
				EM 13b
	P2_EK-600			EM 13c
			Zwischenablesung; Vorbereitung Lastvariation	EM 14
			Lastvariation	EM 15
	P2_EK-1000			EM 16a
	P2_EK-800	EM 16b		
PHASE 3	P3_AH-800 P2_EH-800	Simulation Wechselbetrieb	2. AUFHEIZPHASE	EM 17
	Zwischenablesung		EM 18	
PHASE 4	P4_AK-800		2. ABKÜHLPHASE	EM 19a
	P4_EK-800			EM 19b
		Zwischenablesung	EM 20	
PHASE 5		Vorbereitung für Probelastung	Herstellung der natürlichen Temperaturverhältnisse	EM 21
			Zwischenablesung	EM 22a
	P5-800		Abschaltung Absorberbetrieb	EM 22b
			Entlastung	EM 22c
			P5-0	EM 22d
		Umbau von Totlast auf Presse	EM 23	
PHASE 6	P6-1000 P6-800 P6-600 P6-max	Probelastung	Ermittlung Bruchlast	EM 24
		Versuchsende	Prüfung, ob Absorbersystem weiterhin dicht ist	EM25

Im Folgenden werden die einzelnen Arbeitsschritte genauer erklärt.

Arbeitsschritte EM1-EM8 bzw. EK1-EK8 – Referenzfall

Da Energiepfähle im Allgemeinen nicht nur zur thermischen Energieerzeugung genutzt werden, sondern zur Abtragung von Bauwerkslasten, wurde in diesen Arbeitsschritten die Errichtung eines Gebäudes simuliert.

Die mechanische Belastung basierte immer auf der Gebrauchslast des Pfahls von 800 kN. Der Pfahl wurde in den ersten vier Arbeitsschritten ausgehend von einer Vorlast, bis auf 75%, 100% und 125% der Gebrauchslast belastet. In Anlehnung an die anderen statischen Pfahlprobelastungen, die im Zuge des Forschungsprojekts FPUH ausgeführt worden sind, wurde nach dieser Belastung wieder entlastet. Nach dieser ersten Lastschleife wurde wieder auf 75%, 100% und 125% der Gebrauchslast belastet.

Diese zwei Lastschleifen dienen als Referenzfall für die nachfolgenden Phasen mit thermischer Belastung. Da hier der Pfahl unter keiner thermischen Belastung steht, sondern in seinem natürlichen Temperaturverhältnis ist, kann das Verhalten des Pfahls zufolge einer mechanischen Belastung beurteilt werden.

Arbeitsschritte EM9 bzw. EK9 – Erste Aufheizung des Pfahls

In diesem Arbeitsschritt wurde eine Gebäudekühlung, wie sie im Sommer öfters der Fall ist, simuliert. Dazu wurde der Pfahl von seiner Ausgangstemperatur von ca. 10-15°C auf 35°C aufgeheizt. Die mechanische Belastung des Pfahls war während dieser Phase konstant auf 75% der Gebrauchslast, um die Auswirkung nur aus der thermischen Belastung ermitteln zu können.

Die Dauer dieser Aufheizphase wurde vorerst mit 12 Tagen geplant, jedoch im Laufe des Versuchs angepasst (siehe **ANHANG A**). Die Temperaturdaten wurden versuchsbegleitend ausgewertet. Basierend auf diesen Auswertungen wurde dann entschieden, ob mit der nächste Versuchsphase begonnen werden kann oder noch gewartet werden muss. Die Dauer dieser Phase betrug beim B.EM 20 Tage und beim B.EK 12 Tage.

Die Dauer der Phase wurde aufgrund thermischer Simulationen (durchgeführt von der *Geotechnik Adam ZT GmbH*) im Vorfeld abgeschätzt. Gemäß dieser Simulationen wird die Zieltemperatur im Pfahl nach kurzer Zeit erreicht, jedoch wird der umliegende Boden in einem viel geringeren Ausmaß erwärmt. Mit zunehmendem Abstand vom Pfahl reduziert sich der thermische Einfluss. Die thermischen Simulationen haben auch gezeigt, dass sich nach einem gewissen Zeitraum keine großen Temperaturänderungen im Boden mehr einstellen und die Aufheizphase dann beendet werden kann.

Arbeitsschritte EM10-EM12 bzw. EK10-EK12 – Lastschleife

Nach abgeschlossener Aufheizphase wurde die Temperatur konstant gehalten und der Pfahl wieder mechanisch belastet. Der Pfahl wurde mit einer Belastung von 100% und 125% der Gebrauchslast belastet und schlussendlich wieder auf seine Ausgangsbelastung von 75% der Gebrauchslast gebracht.

Arbeitsschritte EM13 bzw. EK13 – Erste Abkühlung des Pfahls

In diesem Arbeitsschritt wurde eine Gebäudeheizung, wie im Winter üblich, simuliert. Dazu wurde der Pfahl von seiner Ausgangstemperatur (ca. 35°C) auf 2°C abgekühlt. Die mechanische Belastung des Pfahls wurde während dieser Phase konstant auf 75% der Gebrauchslast gehalten, um wiederum die Auswirkung ausschließlich aus der thermischen Belastung ermitteln zu können.

Arbeitsschritte EM14-EM16 bzw. EK14-EK16 – Lastschleife

Nach abgeschlossener Abkühlphase wurde die Temperatur konstant gehalten und der Pfahl wieder mechanisch belastet. Der Pfahl wurde mit einer Belastung von 100% und 125% der Gebrauchslast belastet und daran anschließend wieder mit 100% der Gebrauchslast belastet.

Arbeitsschritte EM17-EM20 bzw. EK17-EK20 – Wechselbetrieb

In diesem Arbeitsschritt wurde ein thermischer Wechselbetrieb, wie er in den Übergangszeiten oft vorkommt, simuliert. Dabei wurde der Pfahl innerhalb kurzer Zeit aufgeheizt und dann wieder abgekühlt. Die Ergebnisse dieser Phase werden auch mit den vorangegangenen Phasen verglichen, um den Einfluss des wiederholten Aufheizens und Abkühlens zu untersuchen.

Der Pfahl wurde in diesen Arbeitsschritten von seiner Ausgangstemperatur von ca. 2°C auf ca. 35°C aufgeheizt. Die mechanische Belastung des Pfahls war während dieser Phase konstant auf 100% der Gebrauchslast. Die Dauer dieser Aufheizphase war mit 15 Tagen geplant, wurde jedoch im Laufe des Versuchs teilweise angepasst (siehe ANHANG A).

Nach Abschluss dieser Phase 3 wurde der Pfahl von ca. 35°C wieder auf ca. 2°C abgekühlt (Phase 4) und wiederum mit konstanter mechanischer Belastung belastet. Diese Phase 4 der Gebäudeabkühlung dauert erneut ca. 15 Tage.

Arbeitsschritte EM21-EM23 bzw. EK21-EK23 – Vorbereitung der Probelastung

Um zu den anderen statischen Pfahlprobelastungen dieses Forschungsprojekts (siehe Diplomarbeit *Christina Marzy* [CM]) (vgl. **Tab. 1.1**) Vergleichswerte zu erhalten, wurde abschließend noch eine Pfahlprobelastung durchgeführt. Dabei wurde der Pfahl mechanisch bis zu seiner Bruchlast belastet. Um vergleichbare Ergebnisse zu erhalten, mussten die natürlichen Temperaturverhältnisse im Pfahl wiederhergestellt werden. In den Arbeitsschritten 21 und 22 wurde der Pfahl zuerst aktiv mit den Absorbern auf eine Temperatur von ca. 15 °C aufgeheizt und im Weiteren dann der Absorberbetrieb abgeschaltet, damit sich der Pfahl an die Umgebungstemperatur anpassen konnte.

Die mechanische Belastungseinrichtung wurde in dieser Phase vom Versuchsaufbau mit Totlast auf den Versuchsaufbau mit hydraulischer Presse umgebaut (vgl. Kapitel 4.4.1).

Arbeitsschritte EM23 bzw. EK23 – Probelastung

Diese Probelastung sowie die Auswertung der Ergebnisse erfolgte analog zu den statischen Probelastungen für Großbohrpfähle des Forschungsprojekts FPUH. Die genaue Beschreibung des Versuchsablaufs und der Auswertung ist in der Diplomarbeit von *Christina Marzy* [CM] (vgl. **Tab. 1.1**) zu finden. Darin sind auch alle Ergebnisse der Großbohrpfahlversuche im Miozän und im Kies gesammelt dargestellt.

Die Ergebnisse der statischen Pfahlprobelastung des Miozänpfahls B.EM werden in Kapitel 5.3.2.2 mit den Ergebnissen des Großbohrpfahls B.M5 verglichen. Dieser ist mit dem gleichen Verfahren (verrohrte Bohrung) hergestellt worden und weist dieselbe Geometrie auf.

Die Ergebnisse der statischen Pfahlprobelastung des Kiespfahls B.EK werden in Kapitel 5.4.2.2 mit den Ergebnissen des Kiespfahls B.K55 verglichen (gleiches Herstellungsverfahren (verrohrte Bohrung) und gleiche Geometrie) und der B.K55 lag zudem in unmittelbarer Nähe des Energiepfahls B.EK (siehe **Abb. 4.2**).



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

KAPITEL 5

Auswertung und Ergebnisse der Energiepfahlversuche (FPUH)

5.1 Allgemeines

Aufbereitung und Auswertung der Versuchsdaten wurden mit dem Programm *Excel* durchgeführt. Für das Forschungsprojekt wurde zunächst ein sogenanntes Basis-Dokument für den vollinstrumentierten Großbohrpfahl B.M5 entwickelt. Der Energiepfahlversuch unterscheidet sich allerdings stark von den anderen Großbohrpfahlversuchen, da dieser z.B. zusätzliche Messwerterfassungssysteme (MWES 4 und 5) enthält. Das Basis-Dokument wurde deshalb nur für die Auswertung der statischen Pfahlprobelastung (Phase 6) verwendet. Für die restliche Auswertung der Versuche wurde das Basis-Dokument abgeändert bzw. teilweise neu erstellt. Genauere Informationen zu diesem Basis-Dokument sind in der Projektarbeit von *Manuel Stadlbauer* [MS] (vgl. **Tab. 1.1**) zu finden. Auf die Versuche an den Großbohrpfählen wird in der Diplomarbeit von *Christina Marzy* [CM] (vgl. **Tab. 1.1**) eingegangen.

Für die folgende Herleitung der Formeln, die zur Auswertung der Daten verwendet wurden und um die Präsentation der Ergebnisse leichter verständlich zu machen, wurde eine Vorzeichenregelung eingeführt. Die in dieser Diplomarbeit verwendete Vorzeichenregelung:

- Druckspannung: negativ (-)
- Zugspannung: positiv (+)
- Positive Dehnung (Ausdehnung): positiv (+)
- Negative Dehnung (Stauchung): negativ (-)
- Mantelreibung bei Druckbeanspruchung: negativ (-)
- Mantelreibung bei Zugbeanspruchung: positiv (+)

5.1.1 Generelle Auswertungsmethodik

5.1.1.1 Aufzeichnung der Versuchsdaten

Da die beiden Versuche (Miozänpfahl B.EM und Kiespfahl B.EK) jeweils über 3 Monate lang andauerten, erfolgte eine Fernüberwachung der Versuche, wobei u.a. ein Warnsystem für einen etwaigen Stromausfall installiert wurde. Damit war, bis auf die Tage mit Lastvariationen, keine örtliche Überwachung der Versuche notwendig.

Während der Versuche wurde ein Feldprotokoll geführt, um zu gewissen Zeitpunkten (z.B. während der Lastvariationen) die Messdaten zu dokumentieren. Diese Feldprotokolle waren letztlich für die

weitere Auswertung und Zuordnung der Daten von Bedeutung. Im Feldprotokoll wurden zudem auch außerordentliche Vorkommnisse (z.B. Ausfall eines Wegaufnehmers und dessen Austausch) dokumentiert.

Alle Messwerterfassungssysteme zeichneten die Daten automatisch während der Versuche auf. Bezüglich der Abtastraten der einzelnen Erfassungssysteme war folgendes zu beachten: einerseits können bei zu kurzen Intervallen die Datenmengen schnell „unhandlich“ werden, sind andererseits die Abtastintervalle zu groß, können essentielle Informationen verloren gehen. Die Abtastraten wurde letztlich von der TU Wien in Abstimmung mit der *Geotechnik Adam ZT GmbH* für die einzelnen Messwerterfassungssysteme folgendermaßen festgelegt (siehe nachfolgende **Tab. 5.1**).

Tab. 5.1: Datenausgaberraten der Messwerterfassungssysteme

Messwerterfassungssystem	Generelle Abtastrate
MWES I	1 x pro 10 Minuten
MWES II	1 x pro 10 Minuten
MWES IV	1 x pro 10 Minuten
MWES V	1 x pro Minute / pro 10 Minuten

Die Abtastrate für das MWES V (Wien Energie) wurde, nach Abschluss des Versuchs am Miozänpfahl, für den Versuch am Kiespfahl auf einen Messwert pro 10 Minuten angepasst. Die Intervalle des MWES I und MWES II wurden an den Lastwechseltagen auf 1 Messwert pro Minute verkürzt, um eine genauere Aufzeichnung zu gewährleisten.

Die Daten des MWES I (Messensoren am Pfahlkopf) wurden automatisch gesichert und von der Fa. *Red Bernard* im *Excel*-Format zur Verfügung gestellt. Die Daten des MWES II (Messensoren im Energiepfahl) wurden auf zwei Datenloggern gespeichert und mussten regelmäßig ausgelesen werden, da der Datenlogger nur eine begrenzte Speicherkapazität hatte. Die Datenaufzeichnung des MWES IV (Zusatzbohrungen) wurde von der ARGE FPUH übernommen und in regelmäßigen Abständen an die TU Wien im *Excel*-Format übermittelt. Das MWES V (Energiezentrale & Temperaturen Energie- und Reaktionspfähle) wurde von der Fa. *Wien Energie GmbH* betreut und die Daten in regelmäßigen Abständen im *Excel*-Format übermittelt.

Die zyklische Datensammlung war essentiell, da während der Versuche die Daten regelmäßig einer Erstausswertung unterzogen wurden. Der jeweilige Versuchsablauf wurde während der Durchführung auf Basis dieser Erstausswertung teilweise angepasst.

5.1.1.2 Rohdatenaufbereitung

Nachdem die Daten gesichert waren, wurden diese von offensichtlichen Fehlerwerten, die vom Aufzeichnungsgerät z.B. als Wert -9999 gekennzeichnet wurden, bereinigt. Dabei ist zu erwähnen, dass mehrere eingebaute Sensoren ausfielen und entweder gar keine Messwerte lieferten oder die Messwerte unplausibel waren. Für die weitere Berechnung wurden derartig unplausible Messwerte nicht verwendet. In **Tab. 5.2** und **Tab. 5.3** ist angeführt, welche Sensoren unplausible Werte lieferten bzw. komplett ausfielen. Falls die Sensoren grundsätzlich plausible Messdaten lieferten aber vereinzelt Aussetzer (vereinzelt stark abweichende Werte) vorhanden waren, so wurden diese Daten teilweise händisch gelöscht.

Tab. 5.2: Sensoren Miozänpfahl B.EM

Sensor	BS 1.1	BS 2.1	BS 3.1	BS 4.1	BS 5.1
	F	NF	TNF	F	TNF
Sensor	BS 1.2	BS 2.2	BS 3.2	BS 4.2	BS 5.2
	TNF	TNF	F	TNF/NF	F
Sensor	DS 1A	DS 1B	DS 1C	DS 1D	
	NF	NF	NF	NF	
Sensor	DS 2A	DS 2B	DS 2C	DS 2D	
	TNF	F	F	TNF	
Sensor	DS 3A	DS 3B	DS 3C	DS 3D	
	F	F	F	F	
Sensor	DS 4A	DS 4B	DS 4C	DS 4D	
	F	F	TNF	F	
Sensor	KEX 1	KEX 2	KEX 3	KEX 4	KEX 5
	TNF	TNF	F	F	TNF
Sensor	TEMP OK-RL	TEMP OK-VL	TEMP UK-2	TEMP UK-3	
	F	F	F	F	
Sensor	TEMP M-1	TEMP M-2	TEMP M-3	TEMP M-4	TEMP M-5
	F	F	F	F	F

F..... Funktionsfähig

NF..... Nicht funktionsfähig (keine plausiblen Daten, in manchen Fällen totaler Ausfall)

TNF ...Teilweise nicht funktionsfähig (über einen gewissen Abschnitt unplausible Daten)

Tab. 5.3: Sensoren Kiespfahl B.EK

Sensor	BS 1.1	BS 2.1	BS 3.1	BS 4.1	BS 5.1
	F	F	F	F	F
Sensor	BS 1.2	BS 2.2	BS 3.2	BS 4.2	BS 5.2
	F	F	F	F	F
Sensor	DS 1A	DS 1B	DS 1C	DS 1D	
	F	F	F	F	
Sensor	DS 2A	DS 2B	DS 2C	DS 2D	
	F	F	F	F	
Sensor	DS 3A	DS 3B	DS 3C	DS 3D	
	F	NF	F	F	
Sensor	DS 4A	DS 4B	DS 4C	DS 4D	
	F	TNF	F	F	
Sensor	KEX 1	KEX 2	KEX 3	KEX 4	KEX 5
	TNF	F	F	F	F
Sensor	TEMP OK-RL	TEMP OK-VL	TEMP UK-2		
	F	F	F		
Sensor	TEMP M-1	TEMP M-2	TEMP M-3	TEMP M-4	
	F	F	F	F	

F..... Funktionsfähig

NF..... Nicht funktionsfähig (keine plausiblen Daten, in manchen Fällen totaler Ausfall)

TNF... Teilweise nicht funktionsfähig (über einen gewissen Abschnitt unplausible Daten)

Die gesamten Messdaten wurden in einem Rohdatenfile zusammengeführt und übersichtlich dokumentiert, damit diese für zukünftige Forschungsarbeiten gesammelt zur Verfügung stehen. Waren die Daten noch nicht im *Excel*-Format vorhanden, so mussten diese zuerst eingelesen und in das richtige Format gebracht werden.

Beim MWES I war noch insbesondere auf folgende drei Punkte zu achten:

- Nullung des Systems
- Auswechseln eines Wegaufnehmers
- Umsetzen der Wegaufnehmer

Das Umsetzen der Wegaufnehmer während des Versuchs kam vor, wenn dieser maximal ausgefahren oder eingefahren war. Bei Ausfall eines Wegaufnehmers oder wenn dieser Störwerte anzeigte,

musste dieser ausgewechselt werden. Diese Vorgänge mussten in der Aufbereitung der Daten berücksichtigt werden.

5.2 Auswertung

In diesem Kapitel werden die Datenaufbereitung und Auswertung der beiden Energiepfahlversuche anhand des Miozänpfahls B.EM erläutert. Die Ergebnisse des Versuchs am Miozänpfahl BEM werden in Kapitel 5.3 und des Kiespfahl B.EK finden sich schließlich in Kapitel 5.4.

Die Auswertung des Energiepfahlversuchs wird grundsätzlich in zwei Abschnitte geteilt:

1. Phasen 0 bis 5
2. Phase 6

Der erste Abschnitt besteht aus den Phasen 0 bis 5 und beinhaltet die Heiz- und Kühlphasen sowie die Lastvariationen zu Beginn des Versuchs und zwischen den Heiz- und Kühlphasen. In **Abb. 5.1** ist ein Auszug des Durchführungskonzepts des Versuchs am Miozänpfahl B.EM zu sehen, in dem u.a. die Phasen gekennzeichnet und zugehörige mechanische und thermische Belastungen zu sehen sind. Die Durchführungskonzepte in detaillierter Form für beide Pfähle (Miozänpfahl B.EM und Kiespfahl B.EK), sind im **ANHANG A** zu finden. Die Auswertung der Daten für diesen ersten Abschnitt wird in den folgenden Kapiteln beschrieben.

Im zweiten Abschnitt handelt es sich um die Phase 6, in der der Pfahl einer statischen Pfahlprobebelastung ohne thermische Belastung unterzogen wurde. Vor Phase 6 wurde das Belastungssystem von Totlast auf Pressenbetrieb umgebaut, damit der Versuchsablauf wie bei den anderen Großbohrpfahlversuchen des Forschungsprojekts durchgeführt werden konnte. Die Daten wurden für diese Phase nach dem gleichen Schema wie bei den Großbohrpfahlversuchen ausgewertet. Ziel war es, die Ergebnisse der Pfahlprobebelastung des Energiepfahlversuchs mit einem repräsentativen Großbohrpfahlversuch zu vergleichen.

Versuchsphase	gewählte Referenzzeitpunkte	Versuchsstadium	Bemerkung	Arbeits-schritt	Typ	mechanische Belastung Durchführung: aushaltende ANGE Überwachung: TU Wien			thermische Belastung Durchführung: Verringerte Überwachung: TU Wien			Dauer Lastwechsel	Beobachtungs-dauer	Zeit (Anfang Arbeitsschritt)	Zeit (Ende Arbeitsschritt)
						geplante Last	vorb. Last Stahl-konstruktion	vorb. Anzahl Betonfertigteile	rech. vorhandene Last	gemessene vorhandene Last (KWD)	Vor- und Rücklauf-temperatur				
PHASE 0	P0-0	Versuchsbeginn	Nullmessung aller Messsensoren Vorlast	EM 1	P = 0,00 - Pk = 0 kN	0 kN	0 Stk.	= 0 kN	0 kN	kein Also-bertrieb	9	16 min	08.05.2018 08:30	08.05.2018 08:55	
				EM 2b	P = 0,05 - Pk = 400 kN	251 kN	8 Stk.	= 251 kN	251 kN	kein Also-bertrieb	25	15 min	08.05.2018 08:55	08.05.2018 09:10	
				EM 2c	P = 0,75 - Pk = 600 kN	251 kN	18 Stk.	= 588 kN	354 kN	kein Also-bertrieb	25	15 min	08.05.2018 09:10	08.05.2018 09:25	
				EM 3	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	823 kN	kein Also-bertrieb	27	15 min	08.05.2018 09:25	08.05.2018 09:40	
				EM 4	P = 1,25 - Pk = 1000 kN	251 kN	42 Stk.	= 953 kN	798 kN	kein Also-bertrieb	18	125 min	08.05.2018 09:40	08.05.2018 10:05	
				EM 5a	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	588 kN	kein Also-bertrieb	30	19 min	08.05.2018 10:05	08.05.2018 10:20	
				EM 5b	P = 0,75 - Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	588 kN	kein Also-bertrieb	27	16 min	08.05.2018 10:20	08.05.2018 10:35	
				EM 5c	P = 0,05 - Pk = 400 kN	251 kN	0 Stk.	= 251 kN	246 kN	kein Also-bertrieb	53	15 min	08.05.2018 10:35	08.05.2018 10:50	
				EM 6b	P = 0,50 - Pk = 400 kN	251 kN	8 Stk.	= 393 kN	350 kN	kein Also-bertrieb	25	15 min	08.05.2018 10:50	08.05.2018 11:05	
				EM 6c	P = 0,75 - Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	800 kN	kein Also-bertrieb	25	15 min	08.05.2018 11:05	08.05.2018 11:20	
PHASE 1	P1-1000 P1-800 P1-600	Simulation Gebäudeherstellung	Erstlastung (Referenzfälle für Vergleich mit thermischer Belastung)	EM 7a	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	1000 kN	kein Also-bertrieb	35	15 min	08.05.2018 11:20	08.05.2018 11:35	
				EM 7b	P = 1,25 - Pk = 1000 kN	251 kN	42 Stk.	= 953 kN	808 kN	kein Also-bertrieb	84	61 min	08.05.2018 11:35	08.05.2018 12:15	
				EM 8b	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	808 kN	kein Also-bertrieb	25	15 min	08.05.2018 12:15	08.05.2018 12:30	
				EM 8c	P = 0,75 - Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	588 kN	kein Also-bertrieb	29	556 min	08.05.2018 12:30	09.05.2018 08:40	
PHASE 2	P2_EK-600 P2_EK-1000 P2_EK-800 P2_EK-600	Simulation Gebäudeherstellung	1. ABKÜHLPHASE Zwischenmessung, Vorbereitung Lastvariation	EM 9	P = 0,75 - Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	572	kein Also-bertrieb (natürliche Erwärmung)	20.927 Tage	179 Tage	09.05.2018 08:40	01.06.2018 08:00	
				EM 10	P = 0,75 - Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	588 kN	kein Also-bertrieb	28	min	30.05.2018 06:55	30.05.2018 07:23	
				EM 11	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	803 kN	kein Also-bertrieb	33	94 min	30.05.2018 07:23	30.05.2018 09:30	
				EM 12a	P = 1,25 - Pk = 1000 kN	251 kN	42 Stk.	= 953 kN	955 kN	kein Also-bertrieb	30	90 min	30.05.2018 09:30	30.05.2018 11:30	
				EM 12b	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	800 kN	kein Also-bertrieb	22	98 min	30.05.2018 11:30	30.05.2018 13:30	
				EM 12c	P = 0,75 - Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	589 kN	kein Also-bertrieb	27	3 min	30.05.2018 13:30	30.05.2018 14:00	
				EM 13a	P = 0,75 - Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	588 kN	kein Also-bertrieb	179	Tage	30.05.2018 14:00	01.06.2018 08:00	
				EM 13b	P = 0,75 - Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	588 kN	kein Also-bertrieb	5,0833	Tage	01.06.2018 08:00	04.06.2018 10:00	
				EM 13c	P = 0,75 - Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	588 kN	kein Also-bertrieb	14,879	Tage	04.06.2018 10:00	19.06.2018 07:06	
				EM 14	P = 0,75 - Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	588 kN	kein Also-bertrieb	8	min	19.06.2018 07:06	19.06.2018 07:14	
PHASE 3	P3_AH-600 P2_EH-800	Simulation Wechselbetrieb	2. AUFHEIZPHASE Zwischenmessung	EM 15	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	799 kN	kein Also-bertrieb	54	202 min	19.06.2018 07:14	19.06.2018 11:30	
				EM 16a	P = 1,25 - Pk = 1000 kN	251 kN	42 Stk.	= 953 kN	988 kN	kein Also-bertrieb	28	216 min	19.06.2018 11:30	19.06.2018 15:34	
				EM 16b	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	752 kN	kein Also-bertrieb	21	65 min	19.06.2018 15:34	19.06.2018 17:00	
				EM 17	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	800 kN	kein Also-bertrieb	13,792	Tage	19.06.2018 17:00	03.07.2018 12:00	
				EM 18	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	800 kN	kein Also-bertrieb	0,1458	Tage	03.07.2018 12:00	03.07.2018 13:30	
				EM 19a	P = 1,00 - Pk = 800 kN	4 kN	31 Stk.	= 553 kN	588 kN	kein Also-bertrieb	1,1047	Tage	03.07.2018 15:30	04.07.2018 18:00	
				EM 19b	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	800 kN	kein Also-bertrieb	13,667	Tage	04.07.2018 18:00	18.07.2018 10:00	
				EM 20	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	800 kN	kein Also-bertrieb	0,0833	Tage	18.07.2018 10:00	18.07.2018 12:00	
				EM 21	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	800 kN	kein Also-bertrieb	4,3333	Tage	18.07.2018 12:00	22.07.2018 20:00	
				EM 22a	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	809 kN	kein Also-bertrieb	0	min	22.07.2018 20:00	22.07.2018 20:00	
PHASE 4	P4_AK-600 P4_EK-600	Simulation Wechselbetrieb	Herstellung der natürlichen Temperaturverhältnisse	EM 22b	P = 1,00 - Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	809 kN	kein Also-bertrieb	729	min	23.07.2018 08:09	23.07.2018 08:09	
				EM 22c	P = 0,50 - Pk = 400 kN	251 kN	8 Stk.	= 393 kN	413 kN	kein Also-bertrieb	86	15 min	23.07.2018 08:09	23.07.2018 09:50	
				EM 22d	P = 0,05 - Pk = 48 kN	0 kN	0 Stk.	= 251 kN	254 kN	kein Also-bertrieb	22	17 min	23.07.2018 09:50	23.07.2018 10:25	
				EM 23	P = 0,00 - Pk = 0 kN	0 kN	0 Stk.	= 0 kN	0 kN	kein Also-bertrieb	1394	min	23.07.2018 10:25	24.07.2018 08:43	
PHASE 5	P5-0 P5-1000 P5-800 P5-600 P5-max	Vorbereitung für Probelastung	Erstlastung	EM 24	P = 0,00 - Pk = 0 kN	0 kN	0 Stk.	= 0 kN	kein Also-bertrieb	965	min	24.07.2018 09:43	25.07.2018 01:48		
				EM 25	P = 0,00 - Pk = 0 kN	0 kN	0 Stk.	= 0 kN	0 kN	kein Also-bertrieb	0	min	25.07.2018 01:48	25.07.2018 01:48	
PHASE 6	P6-0 P6-1000 P6-800 P6-600 P6-max	Probelastung	Ermittlung Bruchlast	EM 26	P = 0,00 - Pk = 0 kN	0 kN	0 Stk.	= 0 kN	kein Also-bertrieb	0	min	25.07.2018 01:48	25.07.2018 01:48		
				EM 27	P = 0,00 - Pk = 0 kN	0 kN	0 Stk.	= 0 kN	0 kN	kein Also-bertrieb	0	min	25.07.2018 01:48	25.07.2018 01:48	
PHASE 7	P7-0 P7-1000 P7-800 P7-600 P7-max	Versuchsende	Prüfung, ob Absorbersystem weiterhin dicht ist	EM 28	P = 0,00 - Pk = 0 kN	0 kN	0 Stk.	= 0 kN	kein Also-bertrieb	0	min	25.07.2018 01:48	25.07.2018 01:48		
				EM 29	P = 0,00 - Pk = 0 kN	0 kN	0 Stk.	= 0 kN	0 kN	kein Also-bertrieb	0	min	25.07.2018 01:48	25.07.2018 01:48	

Abb. 5.1: Auszug aus dem Durchführungskonzept – Miozänpfahl B.EM

5.2.1 Eingabedaten

Die nachfolgende Tabelle gibt eine Übersicht über die Versuchsdaten, die als Eingangsdaten in das Auswertungsdokument eingetragen wurden. Auf die Geometrie der Versuchskörper und die Materialkennwerte wird noch im Weiteren genauer eingegangen.

Tab. 5.4: Zusammenfassung Eingabewerte – Miozänpfahl B.EM

AUSWERTUNG		
der statischen Pfahlprobelastung gemäß EA-Pfähle		
Status: in Bearbeitung		Stand: 21.10.2018
Allgemeine Angaben:		
Prüfkörper:	B.EM	
Prüffeld:	2	
Versuch:	Großbohrpfahl Druck	
Bodenschicht Kräfteinleitungsstrecke:	Miozän	
Pfahlinstrumentierung (MWES II):		
Kettenextensometer:	ja	
Bewehrungssensoren:	ja	
Sohldruckmessdose:	nein	
Versuchsdaten:		
Prüfung Nr.:	93	
Prüfdatum:	08.05.2018 - 25.07.2018	
Versuchsbeginn Uhrzeit:	08:30 Uhr	
Versuchsbeginn Datum:	08.05.2018	
Versuchsende Uhrzeit:	01:48 Uhr	
Versuchsende Datum:	25.07.2018	
Geometrie Prüfkörper:		
Bohrdurchmesser:	900,00 mm	
Querschnittsfläche A_{ges} :	636172,51 mm ²	
OK Pfahlkopf (Messniveau GBP, DSV):	156,8 müA	
Messniveau (Mikropfahl):	0,00 müA	
OK Pfahl bzw. GOK:	155,80 müA	
OK Haftstrecke:	145,00 müA	
UK Pfahl:	139,00 müA	
Länge Freispielstrecke:	11,80 m	
Länge Haftstrecke:	6,00 m	
Pfahllänge:	16,80 m	
Materialkennwerte:		
Betongüte:	C25/30 / BS-TB1	
Zement:	-	
W/B-Wert Zementsuspension:	-	
E-Modul Beton / Zementstein E_c :	33,01	kN/mm ²
Typ, Güte Stabstahl (Mikropfahl):	-	
Nennquerschnitt Stabstahl A_{SS} :	0,00	mm ²
E-Modul Stabstahl E_{SS} :	0,00	kN/mm ²
Güte Bewehrungsstahl:	B 550B	
Gesamtquerschnitt Bewehrung A_{BS} :	variiert	mm ²
E-Modul Bewehrungsstahl E_{BS} :	200,00	kN/mm ²
Güte Baustahl:	S235	
Gesamtquerschnitt Stahl A_S :	13947,46	mm ²
E-Modul Baustahl E_S :	200,00	kN/mm ²

5.2.1.1 Instrumentierung

Die Parameter für die Instrumentierung und deren jeweilige Höhenlage haben Einfluss auf die Auswertung und werden deshalb im Folgenden zusammengefasst.

Bewehrungssensoren

Bei den Bewehrungssensoren sind zwei Informationen von besonderer Bedeutung, einerseits die Lage der Sensoren im Pfahl und andererseits die Gage Factors. Da die Bewehrungssensoren die gemessenen Dehnungen in der Einheit [digits] ausgeben, wird für die Umrechnung der Dehnungen in [m/m] ein Kalibrierungsfaktor (Gage Factors) benötigt. Dieser Gage Factors wird vom Hersteller für jeden einzelnen Sensor bereitgestellt und ist in der nachfolgenden Tabelle mit der Seriennummer des Sensors vermerkt. Die Gage Factors sind in den Kalibrierungsprotokollen des Herstellers (*Geokon*) angegeben (siehe ANHANG C), wobei in dieser Auswertung für die Umrechnung der lineare Gage Factor verwendet wird.

MQ	Sensor	Seriennummer	Gage Factor Linear	Gage Factor Polynomial			Sensor-Höhe
				A	B	C	
	Bewehrungssensoren			[microstrain/digit]			[müA]
1	BS1.1	8-1712039	0,351				155,35
	BS1.2	8-1712038	0,353				155,35
2	BS2.1	19-1712070	0,35				144,5
	BS2.2	19-1712071	0,357				144,5
3	BS3.1	21-1712075	0,357				142,8
	BS3.2	21-1712074	0,353				142,8
4	BS4.1	23-1712079	0,348				141,1
	BS4.2	23-1712080	0,348				141,1
5	BS5.1	24-1712084	0,351				139,4
	BS5.2	24-1712082	0,355				139,4

Abb. 5.2: Eingabewerte Bewehrungssensoren – Miozänpfahl B.EM

Die Temperaturexpansionskoeffizienten α für Beton und Stahl wurden – wie vom Hersteller *Geokon* angegeben – gewählt. Auf diese Koeffizienten wird im Kapitel 5.2.3.3 noch genauer eingegangen.

Kettenextensometer

Die Eingabeparameter für die Kettenextensometer sind in **Abb. 5.3** und **Abb. 5.4** zu sehen. Die Abschnittslängen bzw. Höhenlagen sind im Herstellungsprotokoll in ANHANG B zu finden. Die linearen und polynomialen Gage Factors sind den Kalibrierungsprotokollen des Herstellers (*Geokon*) entnommen.

Eingabewerte Pfahlinstrumentierung aus Kalibrierprotokollen:							
MQ	Sensor	Seriennummer	Gage Factor Linear	Gage Factor Polynomial			Sensor-Höhe
				A	B	C	
				[microstrain/digit]			[müA]
1	KEX1	1639033	0,006155	1E-08	0,006	-17,1	156,67
2	KEX2	1639034	0,00617	2E-08	0,006	-16,18	144,98
3	KEX3	1639035	0,006084	2E-08	0,0059	-15,94	143,52
4	KEX4	1639036	0,006144	2E-08	0,006	-16,52	142,05
5	KEX5	1639037	0,006156	1E-08	0,006	-16,06	140,59
6	Anker						139,12

Abb. 5.3: Eingabewerte Kettenextensometer – Miozänpfahl B.EM

Position aus Protokoll Einbau Kettenextensometer						
Überstand Ex.- Rohr=			m	Messwert [dg]	Einbauwert	Abschnittslängen
Messwert L_{ges} -Rohr=			17,52	nach Einbau	[m]	[m]
○ 1	L1=	0,135	m	6082	0,0200	
○ 2	L2=	11,66	m	5944	0,0202	11,69
○ 3	L3=	1,446	m	5990	0,0201	1,46
○ 4	L4=	1,446	m	6050	0,0203	1,47
○ 5	L5=	1,446	m	5923	0,0201	1,46
X	L6=	1,446	m			1,47
	L7=	0,062	m			

Abb. 5.4: Abschnittslängen sowie Einbauwerte Kettenextensometer – Miozänpfahl B.EM

In der folgenden Abb. 5.5 sind die Faktoren, die für die Umrechnung der gemessenen Dehnungen des Kettenextensometers benötigt werden, angegeben. In Kapitel 5.2.2.2 wird deren Verwendung genauer erläutert.

Multiplier (M):	0,000369	
Constant (B):	0,572	
Def.Meter Length (L):	267	mm
Length transducer:	515	mm
KR Fiberglass	0,000006	per °C

Abb. 5.5: Faktoren Kettenextensometer – Miozänpfahl B.EM

Dehnungssensoren in Umfangsrichtung

Die Dehnungssensoren geben, wie auch die Bewehrungssensoren, die gemessenen Dehnungen in der Einheit [digits] aus. Für die Umrechnung in die Einheit [m/m] wird hier aber nicht nur ein Gage Factor, sondern auch der sogenannte Nominal Batch Factor benötigt. Beide Faktoren sind für alle verwendeten Dehnungssensoren konstant.

Dehnungsaufnehmer Model 4200	
Nominal Batch Factor (B):	0,98
Gage Factor (G):	3,304

Abb. 5.6: Eingabewerte Dehnungssensoren – Miozänpfahl B.EM

5.2.1.2 Pfahlgeometrie und Materialkennwerte

Die allgemeinen Angaben zur Geometrie des Pfahls und dessen absoluter Höhenlage sind in Tab. 5.4 (siehe dazu auch 4.3.1) angegeben. In dieser Abbildung wurden auch schon die verwendeten Materialkennwerte gezeigt. Für die weitere Auswertung werden die Querschnittswerte für die jeweiligen Messquerschnitte benötigt. Der Pfahl wurde dafür in mehrere Querschnitte mit unterschiedlichem Beton- und Stahlanteil (abhängig vom Bewehrungsgrad) aufgeteilt. Die Querschnittsfläche des Bewehrungsstahls wurde aus den Bewehrungsplänen ([50] bzw. [48]) errechnet.

Querschnittswerte / Geometrie										
Nr.	Bezeichnung	Ø [mm]	OK [müA]	UK [müA]	Länge [m]	A _{ges} [mm ²]	A _{BS} [mm ²]	A _S [mm ²]	A _C [mm ²]	ΣA*E [kN]
Standardbereiche										
1	Freispielstrecke	711	155,8	145,0	10,8	397035,3		14440,3		
2	Krafteinleitungsstrecke	900	145,0	139,0	6,0	636172,5		492,9		
ZUSATZBEREICHE										
3	BS1	711	155,4	155,4	0,0	397035,3	12744,0	14440,3	369850,9	5581272,3
4	BS2	900	144,5	144,5	0,0	636172,5	16514,0	492,9	619165,6	3406305,7
5	BS3	900	142,8	142,8	0,0	636172,5	12744,0	492,9	622935,6	2652305,7
6	BS4	900	141,1	141,1	0,0	636172,5	12744,0	492,9	622935,6	2652305,7
7	BS5	900	139,4	139,4	0,0	636172,5	6370,0	492,9	629309,6	1377505,7
8	mittel KEX1	711	156,7	145,0	11,6	397035,3	15169,0	14440,3	367426,0	6066263,7
9	mittel KEX2	900	145,0	143,5	1,4	636172,5	16514,0	492,9	619165,6	3406305,7
10	mittel KEX3	900	143,5	142,1	1,4	636172,5	12744,0	492,9	622935,6	2652305,7
11	mittel KEX4	900	142,1	140,6	1,4	636172,5	11242,2	492,9	624437,4	2351948,3
12	mittel KEX5	900	140,6	139,3	1,4	636172,5	6370,0	492,9	629309,6	1377505,7

Abb. 5.7: Eingabewerte Pfahlgeometrie – Miozänpfahl B.EM

Die einzelnen Querschnittsanteile und Elastizitätsmoduln in **Abb. 5.7** sind folgendermaßen benannt:

- A_{ges} Gesamtquerschnittsfläche ($A_{ges} = D^2 \cdot \pi/4$)
- A_{BS} Querschnittsfläche des Bewehrungsstahls
- A_S Querschnittsfläche des Baustahls (hier: KEX-Rohr)
- A_C Betonquerschnittsfläche ($A_C = A_{ges} - A_{SS} - A_{BS} - A_S$)

5.2.2 Erklärung und Darstellung der Daten der Phase 0 bis 5

Die Daten der Phase 0 bis 5 wurden nach der Rohdatenaufbereitung in die Einheit [mm/m] umgerechnet und, den Angaben in den Handbüchern der einzelnen Messsysteme folgend, aufbereitet. In diesem Kapitel wird die Auswertung Schritt für Schritt erklärt und die verwendeten Formeln gezeigt. Diese Daten wurden dann in Übersichtsdiagrammen über die gesamte Versuchsdauer präsentiert. Datenreihen, die starke Streuungen aufwiesen, wurden geglättet, um die Übersichtlichkeit der Diagramme zu bewahren. Dazu wurden Trendlinien mit einem gleitenden Durchschnitt herangezogen. Es wird im Weiteren angemerkt, in welchen Diagrammen derartige Trendlinien verwendet wurden.

In einem nächsten Schritt wurden dann einzelne Zeitpunkte herausgegriffen und die axialen Längsdehnungen sowie die Temperaturdaten einer genaueren Auswertung unterzogen (siehe 5.2.3).

5.2.2.1 MWES I – Pfahlkopfverformungen und Kraftmessdose

Das MWES I liefert die Verformungen vom Pfahlkopf, die auf den Pfahl aufbrachte Kraft und die Außentemperatur. In **Abb. 5.8** und **Abb. 5.9** sind Auszüge aus der Datenauswertung des MWES I zu sehen. Die aufbereiteten Rohdaten wurden links in die Tabelle eingelezen und im Orange hinterlegten Teil umgerechnet. Die Kraft wird in die Einheit [kN] umgerechnet und aus den drei vertikalen Wegaufnehmern wird der Mittelwert w_{V1-3} berechnet.

Aufbereitete Rohdaten MWES I													Versuchsdauer auf Versuchsstart bezogen [Zahl]
Monat	Tag	Stunde	Minute	Sekunde	Kraft [N]	wv1 [mm]	wv2 [mm]	wv3 [mm]	wh1 [mm]	wh2 [mm]	Temp °C		
5	8	8	30	0	0	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	17,14	8,35417	
5	8	8	35	55	2552,63	0,00	0,00	0,00	-0,01	0,00	17,14	8,35828	
5	8	8	36	55	2539,33	0,00	0,00	0,01	-0,01	0,00	17,15	8,35897	
5	8	8	37	55	103629,42	0,09	0,07	0,09	-0,01	-0,09	17,16	8,35966	
5	8	8	38	55	250662,80	0,24	0,19	0,22	-0,02	-0,18	17,16	8,36036	
5	8	8	39	55	250618,56	0,25	0,19	0,22	-0,01	-0,17	17,18	8,36105	
5	8	8	40	55	250631,59	0,25	0,19	0,22	-0,02	-0,17	17,19	8,36175	

Abb. 5.8: Auszug aus aufbereiteten Rohdaten MWES1 – Miozänpfahl B.EM

Versuchsdauer auf Versuchsstart bezogen [Zahl]	Umrechnungen					
	Prüfkraft [kN]	MW w _{v1-3} [mm]	Median	wv1 [mm]	wv2 [mm]	wv3 [mm]
8,35417	0,00	0,00		0,00	0,00	0,00
8,35828	-2,55	0,00		0,00	0,00	0,00
8,35897	-2,54	0,00		0,00	0,00	-0,01
8,35966	-103,63	-0,08	0,06820	-0,09	-0,07	-0,09
8,36036	-250,66	-0,22	0,18745	-0,24	-0,19	-0,22
8,36105	-250,62	-0,22	0,18995	-0,25	-0,19	-0,22
8,36175	-250,63	-0,22	0,19362	-0,25	-0,19	-0,22

Abb. 5.9: Auszug aus Datenauswertung MWES1 – Miozänpfahl B.EM

Das Diagramm in **Abb. 5.10** zeigt die Kraft auf den Pfahl, und das Diagramm in **Abb. 5.11** zeigt den Mittelwert der vertikalen Pfahlkopfverschiebung, über den gesamten Versuchszeitraum an.

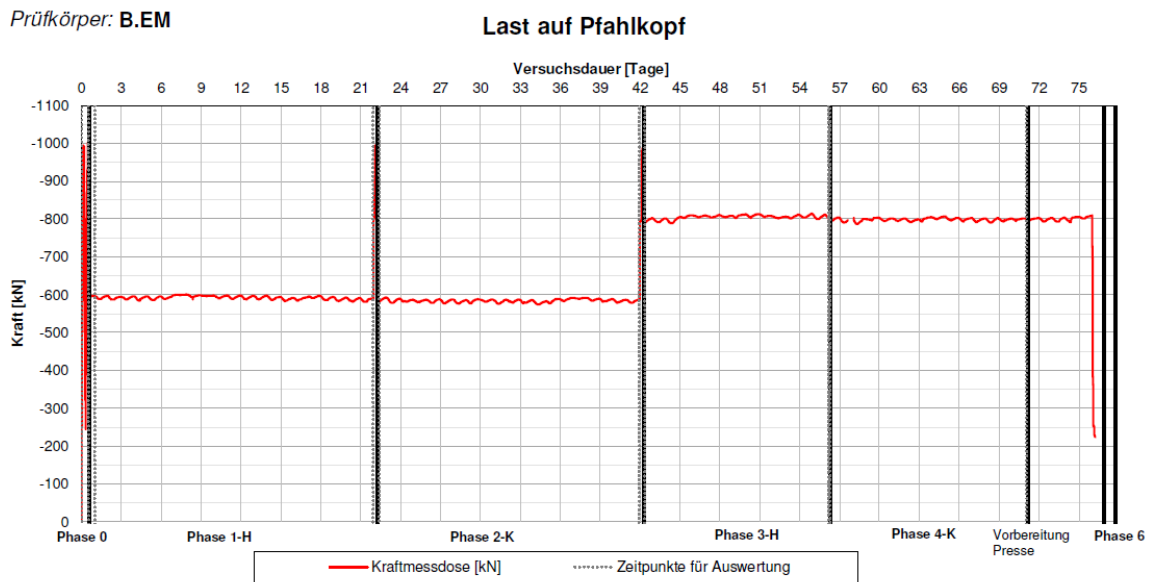


Abb. 5.10: Kraft auf Pfahlkopf über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM

Wie in Kapitel 4.4.2.2 erklärt wurden drei vertikale Wegaufnehmer installiert. Das Diagramm in **Abb. 5.11** zeigt nicht nur die Messdaten der drei vertikale Wegaufnehmer wv1, wv2 und wv3, sondern auch den aus diesen drei Messreihen errechneten Mittelwert wvm.

Prüfkörper: B.EM

Vertikale Pfahlkopfverschiebung

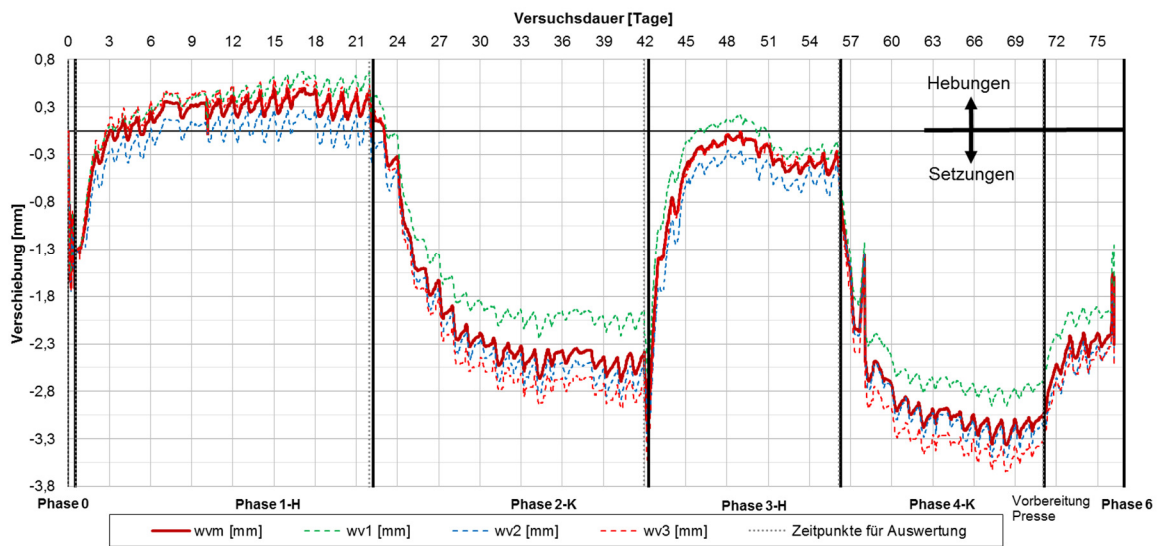


Abb. 5.11: Vertikale Pfahlkopfverschiebung über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM

In den Übersichtsdiagrammen sind die Phasenwechsel mit schwarzen Linien markiert und die Zeitpunkte, die in 5.2.4 für die Auswertung der Längsdehnungen gewählt wurden, sind strichliert in grau markiert. In den Diagrammen ist zu erkennen, dass die Lastvariationen zu Beginn des Versuches lediglich eine Verformung von ca. 1,3 mm hervorgerufen haben. Der Pfahl führt sofort nach Beginn der Heizphase eine Hebung aus, obwohl die Last konstant auf 600 kN gehalten wird. Am Ende der ersten Heizphase liegt der Pfahlkopf ca. 0,3 mm über seiner Ausgangslage, dass eine temperaturbedingte Hebung von 1,6 mm ergibt.

5.2.2.2 MWES II – Dehnungen

Im Messwerterfassungssystem II sind die Messungen der Längsdehnungen mittels Bewehrungssensoren und mittels Kettenextensometer enthalten, sowie die Messung der Umfangsdehnungen mittels Dehnungssensoren.

Längsdehnungen- Bewehrungssensoren

Die Auswertung der Längsdehnungen, gemessen mit den Bewehrungssensoren, wird nachfolgend in Kapitel 5.2.3 genauer betrachtet. Es wurden mehrere Zeitpunkte im Versuchsablauf herausgegriffen und ausführlicher ausgewertet. Eine Übersicht über die Längsdehnungen ε_{obs} und die Längsdehnungen ε_{σ} wird hier in den Diagrammen in **Abb. 5.12** und **Abb. 5.13** über die gesamte Versuchsdauer angegeben. Die gemessenen gesamten Längsdehnungen ε_{obs} beziehen sich auf die Nullmessung zu Beginn des Versuchs. Der spannungsbedingte Anteil der Längsdehnungen wird mit ε_{σ} bezeichnet. Diese beinhalten jene Dehnungen, die sich aus der mechanischen Belastung und den diesbezüglichen Spannungen im Pfahl ergeben. Es ist hierbei anzumerken, dass auch Zwängsspannungen zufolge Temperaturänderung in diesen Teil der Dehnungen enthalten sind. Die Formeln für die Berechnung dieser Längsdehnungen werden im Kapitel 5.2.4 erklärt.

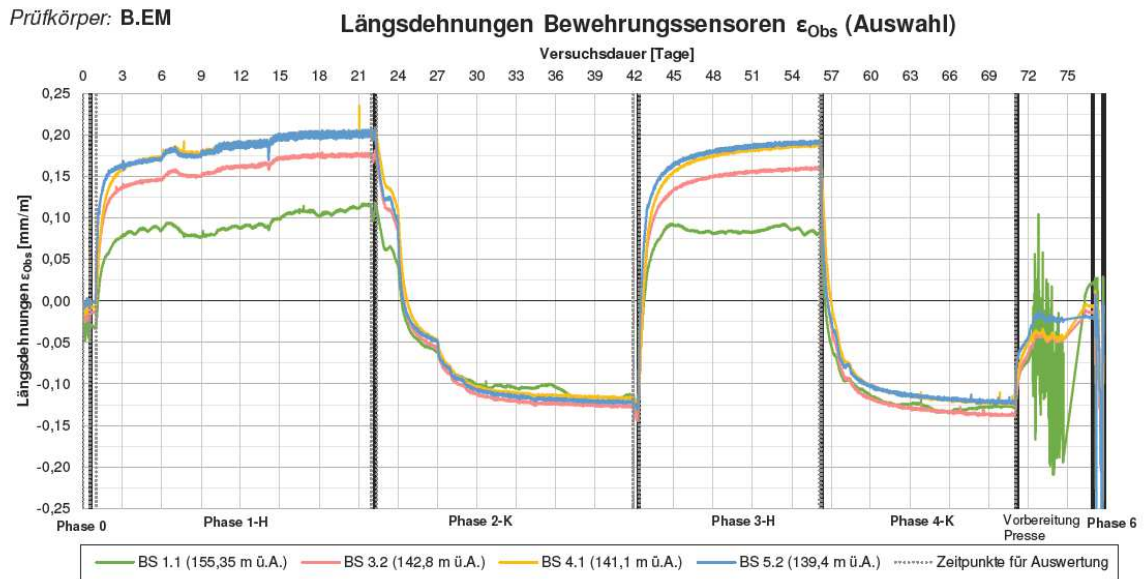


Abb. 5.12: Gemessene gesamte Längsdehnungen ε_{Obs} in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM

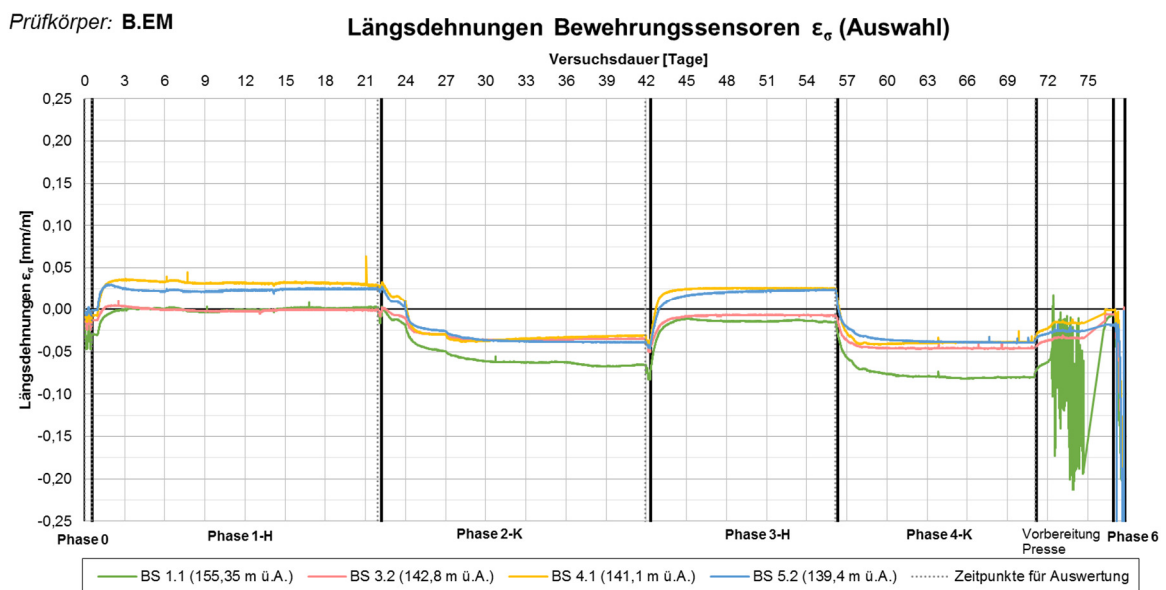


Abb. 5.13: Spannungsbedingte Längsdehnungen ε_{σ} zufolge Spannungen in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM

Längsdehnungen - Kettenextensometer

Die Umrechnung der gemessenen Dehnungen [digits] in Dehnungen der Einheit [mm/m] wurde nach dem Handbuch von *Geokon* für das Kettenextensometer vorgenommen und wird im Folgenden erklärt [72].

Mit dem Auslesegerät wird auf Basis der gemessenen Schwingfrequenz folgender Messwert angegeben:

$$R = \frac{H_z^2}{1000} [Digits] \quad (5.1)$$

R aktueller Messwert („Reading“) [digits]
 H_z Hertz (Einheit für die Frequenz) [H_z]

In der nachfolgenden Umrechnung wird der polynomiale Gage Factor. Im Gegensatz zum linearen Gage Factor besteht dieser aus 3 Werten, die in die Berechnung mit einfließen. In einem ersten Schritt wird die Dehnung $\varepsilon_{\text{Messung}}$ berechnet, welche keinerlei Temperatureinflüsse berücksichtigt und nur zeigen soll wie die polynomiale Gage Factors in die Berechnung einfließen.

$$\varepsilon_{\text{Messung}} = (GFa \cdot R_1^2 + GFb \cdot R_1 + GFc) - (GFa \cdot R_0^2 + GFb \cdot R_0 + GFc) \quad (5.2)$$

GFa Polynomiale Gage Factor a
 GFb Polynomiale Gage Factor b
 GFc Polynomiale Gage Factor c
 $\varepsilon_{\text{Messung}}$ gemessene Dehnung [$\mu\varepsilon$]
 R_1 aktueller Messwert [digits]
 R_0 Nullmessung [digits]

Mit Berücksichtigung einer Temperaturkorrektur sowie einer Korrektur für die Längenänderung der Dehnungsmesszelle sowie des Gestänges ergibt sich:

$$\varepsilon_{\sigma} = (GFa \cdot R_1^2 + GFb \cdot R_1 + GFc) - (GFa \cdot R_0^2 + GFb \cdot R_0 + GFc) + \Delta T \cdot K + L_C + L_R \quad (5.3)$$

ε_{σ} Spannungsbedingte Dehnungen [$\mu\varepsilon$]
 ΔT Temperaturdifferenz [$^{\circ}\text{C}$]
 K berechneter Temperaturexpansionskoeffizient
 L_C Korrektur für die Längenänderung der Dehnungsmesszelle
 L_R Korrektur für die Längenänderung des Gestänges

Der erste Schritt in der Temperaturkorrektur ist die Berechnung des Temperaturkoeffizienten des Messaufnehmers. Für ein besseres Verständnis ist der gesamte Aufbau des Kettenextensometers in **Abb. 4.38** mit der Messzelle (Transducer) zu sehen.

$$K = [(R_1 \cdot M) + B] \cdot GFa \quad (5.4)$$

M Multiplier
 B Constant
 GFa Polynomiale Gage Factor a

Die verwendeten Faktoren M , B sind vom Hersteller *Geokon* vorgegeben und in **Abb. 5.3** zu finden. Die polynomiale Gage Factors sind ebenfalls vom Hersteller gegeben und sind für das Kettenextensometer in **Abb. 5.5** zu finden. In die Korrektur der Längenänderung der Dehnungsmesszelle L_C fließt nicht nur die Temperaturänderung ΔT ein, sondern auch die Länge der Messzelle L [mm]. Die Länge der Messzelle beträgt 267 mm.

$$L_C = 17,3 \cdot 10^{-6} \cdot L \cdot \Delta T \quad (5.5)$$

L_C Korrektur für die Längenänderung der Dehnungsmesszelle
 L Länge der Messzelle [mm]
 ΔT Temperaturdifferenz [$^{\circ}\text{C}$]

Die Stangen, die die einzelnen Segmente des Kettenextensometers verbinden, dehnen und stauchen sich ebenfalls bei Temperaturänderung. Dies wird mit L_R in der Formel berücksichtigt und ist folgendermaßen definiert: [72]

$$L_R = K_R \cdot S \cdot \Delta T \quad (5.6)$$

L_R Korrektur für die Längenänderung des Gestänges

S Die Distanz zwischen den Ankerpunkten ohne die Länge der Messzelle in [mm]

K_R Temperaturexpansionskoeffizient des Gestänges (Fiberglas) = $6,0 \cdot 10^{-6}$ [$\mu\epsilon/^\circ\text{C}$]

Die Formel (5.12) wurde verwendet, um die spannungsbedingten Längsdehnungen aus den Kettenextensometermessungen zu berechnen. Diese beinhalten jene Dehnungen, die sich aus der mechanischen Belastung und den diesbezüglichen Spannungen im Pfahl ergeben. Es ist hierbei anzumerken, dass auch Zwängsspannungen zufolge Temperaturänderung in diesen Teil der Dehnungen enthalten sind. Im Diagramm in **Abb. 5.16** sind die Längsdehnungen über die gesamte Versuchsdauer aufgetragen.

Das Kettenextensometer wurde in sechs Horizonten des Pfahls verankert, womit sich fünf Messabschnitte ergeben, deren Längen in **Abb. 5.4** zu finden sind. In 4.4.2.3 wird auf die Funktionsweise des Kettenextensometers genauer eingegangen. Die fünf Messabschnitte werden mit KEX1-5 bezeichnet und geben die Längsdehnungen des Pfahls in [digits] an. Die Messzelle liefert aber nicht nur die Dehnungen, sondern auch die Temperatur [$^\circ\text{C}$]. In **Abb. 5.14** ist ein Auszug der aufbereiteten Rohdaten zu sehen und in **Abb. 5.15** ein Auszug der Kettenextensometerdehnungen ϵ_σ .

Monat	Tag	Stunde	Minute	Sekunde	KEX1	KEX2	KEX3	KEX4	KEX5	KEX1T	KEX2T	KEX3T	KEX4T	KEX5T
					[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[$^\circ\text{C}$]	[$^\circ\text{C}$]	[$^\circ\text{C}$]	[$^\circ\text{C}$]	[$^\circ\text{C}$]
5	8	8	30	0	6082,90	5945,68	5992,52	6060,40	5932,33	18,00	13,40	13,80	13,70	13,40
5	8	8	31	0	6083,26	5945,94	5992,77	6060,45	5932,50	17,90	13,40	13,80	13,70	13,40
5	8	8	32	0	6082,74	5946,10	5992,69	6060,08	5932,83	18,00	13,30	13,80	13,80	13,40
5	8	8	33	0	6082,92	5945,82	5992,40	6060,43	5932,56	18,00	13,40	13,80	13,70	13,40
5	8	8	34	0	6082,51	5945,96	5992,49	6060,19	5932,80	17,90	13,40	13,80	13,70	13,40

Abb. 5.14: Auszug aus den Rohdaten der Kettenextensometersensoren – Miozänpfahl B.EM

Phase	Monat	Tag	Stunde	Minute	Sekunde	Kettenextensometer													
						KEX1	KEX2	KEX3	KEX4	KEX5	KEX1	KEX2	KEX3	KEX4	KEX5				
						[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]				
0	5	8	8	30	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
0	5	8	8	31	0	-0,0021	-0,0016	-0,0015	-0,0003	-0,0011	-0,0002	-0,0011	-0,0010	-0,0002	-0,0007	-0,0007	-0,0007	-0,0007	-0,0007
0	5	8	8	32	0	0,0010	-0,0025	-0,0010	0,0018	-0,0031	0,0001	-0,0017	-0,0007	0,0012	-0,0021	-0,0021	-0,0021	-0,0021	-0,0021
0	5	8	8	33	0	-0,0001	-0,0009	0,0007	-0,0002	-0,0014	0,0000	-0,0006	0,0005	-0,0001	-0,0010	-0,0010	-0,0010	-0,0010	-0,0010
0	5	8	8	34	0	0,0026	-0,0018	0,0002	0,0013	-0,0029	0,0002	-0,0012	0,0001	0,0009	-0,0020	-0,0020	-0,0020	-0,0020	-0,0020
0	5	8	8	35	0	-0,0006	-0,0013	-0,0001	-0,0008	-0,0016	-0,0001	-0,0009	0,0000	-0,0006	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,0011	-0,0011
0	5	8	8	36	0	0,0033	0,0011	-0,0015	-0,0015	-0,0019	0,0003	0,0007	-0,0010	-0,0010	-0,0013	-0,0013	-0,0013	-0,0013	-0,0013
0	5	8	8	37	0	0,0022	-0,0027	0,0008	-0,0011	-0,0032	0,0002	-0,0019	0,0006	-0,0008	-0,0021	-0,0021	-0,0021	-0,0021	-0,0021
0	5	8	8	38	0	-0,0007	-0,0034	0,0005	0,0005	-0,0031	-0,0001	-0,0023	0,0004	0,0004	-0,0021	-0,0021	-0,0021	-0,0021	-0,0021

Abb. 5.15: Auszug aus der Auswertung der Kettenextensometer – Längsdehnungen – Miozänpfahl B.EM

Eine genauere Betrachtung dieser Dehnungsmessungen mit dem Kettenextensometer würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. In Kapitel 5.2.3 und 5.2.4 wurden die Längsdehnungen gemessen mit den Bewehrungssensoren genauer ausgewertet. Die Auswertung der Kettenextensometerdaten stellt mindestens einen solchen Arbeitsaufwand dar und stellt somit ein Ziel für weitere Forschungsarbeiten dar.

Prüfkörper: B.EM

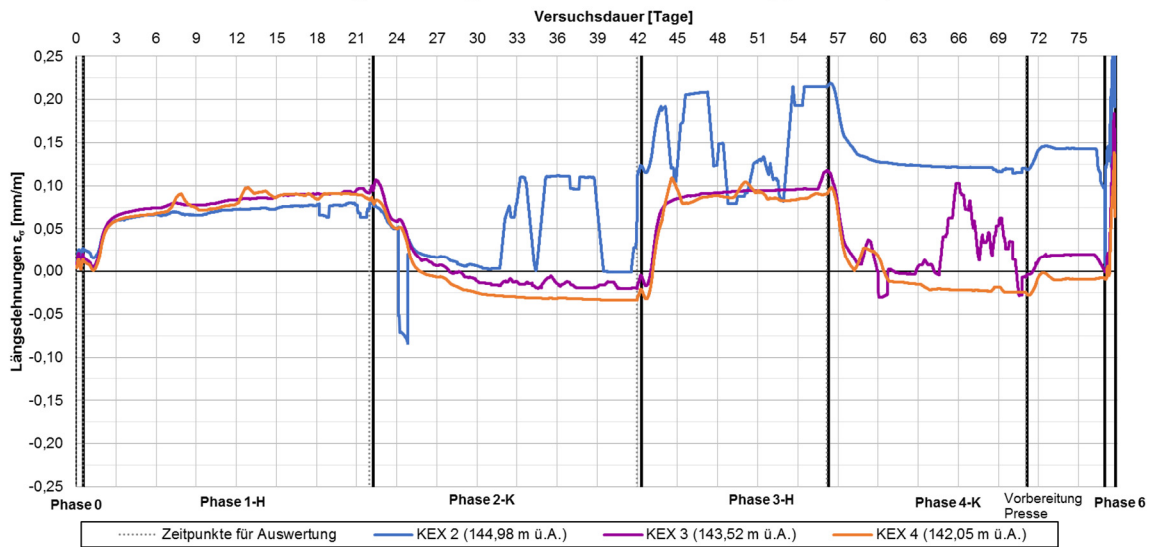
Längsdehnungen Kettenextensometer ε_σ (Auswahl)

Abb. 5.16: Spannungsbedingte Längsdehnungen ε_σ aus Kettenextensometermessungen in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM

Anmerkung: In dem Diagramm in **Abb. 5.16** wurden Trendlinien verwendet, um die Linien zu glätten. Es wurden hierfür Trendlinien mit gleitendem Durchschnitt verwendet.

Umfangsdehnungen

Umfangsdehnungen werden im Allgemeinen als ε_φ bezeichnet. **Abb. 5.17** zeigt ein Kreissegment zur Veranschaulichung der Umfangsdehnung. Das unverzernte Kreisringsegment hat die Eckpunkte A, B, C und D. Die Ausgangsposition der Dehnungssensoren im Pfahl entspricht dabei näherungsweise der Strecke von A nach B. Dehnt sich der Pfahl aufgrund einer thermischen oder mechanischen Belastung aus, ist die verzernte Lage nun A' und B'. Die gesuchten Umfangsdehnungen ergeben sich somit aus der Verlängerung des Bogens $r \cdot d\varphi$, die wiederum durch die Radialverschiebung u_r berechnet werden kann [9].

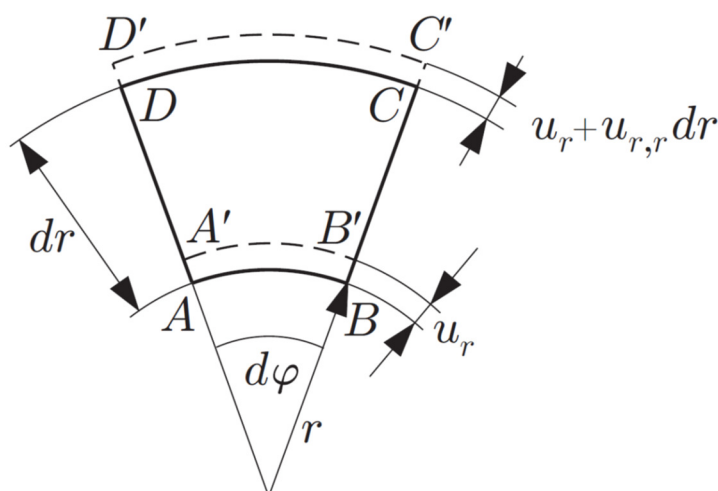


Abb. 5.17: Herleitung der Umfangsdehnungen ε_φ [9]

Die Umrechnung der gemessenen Dehnungen [digits] in Dehnungen der Einheit [mm/m] wurde nach dem Handbuch von *Geokon* für die Dehnungssensoren vorgenommen und wird im Folgenden erklärt [74].

Mit einem Auslesegerät wird die Frequenz, in der die Stahl-Saite schwingt, gemessen und in der Einheit [Digits] ausgegeben:

$$R = \frac{H_z^2}{1000} [\text{Digits}] \quad (5.7)$$

Formel (5.7) entspricht grundsätzlich Formel (5.1). R ist in der oben angeführten Formel der ausgelesene Messwert, der auf Basis der gemessenen Schwingfrequenz [Hz] berechnet wird.

Diese gemessenen Werte [Digits] werden in einem weiteren Schritt mit folgender Formel umgerechnet, um auf die Dehnungen ε [$\mu\varepsilon$] zwischen zwei Zeitpunkten zu kommen:

$$\varepsilon_{\text{Messung}} = (R_1 - R_0) \cdot B \cdot G \quad (5.8)$$

$\varepsilon_{\text{Messung}}$ gemessene Dehnung [$\mu\varepsilon$]
 R_1 aktueller Messwert [digits]
 R_0 Nullmessung [digits]
 B Batch Factor [$\mu\varepsilon/\text{digit}$]
 G linearer Gage Factor

Der Batch Factor B [$\mu\varepsilon/\text{digit}$] wird vom Hersteller für jede einzelne hergestellte Messzelle angegeben und fließt in die Umrechnung als Multiplikator ein. Dieser berücksichtigt die Ungenauigkeiten bei der Herstellung (Einspannen des Drahts in die Messzelle). R_0 [digits] ist die Nullmessung und R_1 [digits] der aktuelle Messwert.

Bei Messsystemen, die auf dem Prinzip der „schwingenden Saite“ beruhen, müssen Temperaturänderungen berücksichtigt werden. Bei einer Temperaturerhöhung dehnt sich der Beton und damit auch die Messzelle mit der Stahl-Saite aus. Aufgrund des höheren Temperatureausdehnungskoeffizienten von Stahl dehnt sich die Stahl-Saite aber mehr aus und ist dadurch weniger gespannt. Dies würde sich in der Messung als Stauchung des Betons zeigen. Aus diesem Grund wird der Formel (5.21) noch ein Term zur Temperaturkorrektur angehängt [74]:

$$\varepsilon_{\sigma} = (R_1 - R_0) \cdot B \cdot G + \Delta T \cdot (\alpha_S - \alpha_C) \quad (5.9)$$

ε_{σ} Spannungsbedingter Anteil der Umfangsdehnung [$\mu\varepsilon$]
 R_1 aktueller Messwert [digits]
 R_0 Nullmessung [digits]
 B Batch Factor [$\mu\varepsilon/\text{digit}$]
 G linearer Gage Factor
 ΔT Temperaturdifferenz [$^{\circ}\text{C}$]
 α_S Temperatureausdehnungskoeffizient Stahl = 12,2 [$\mu\varepsilon/^{\circ}\text{C}$]
 α_C Temperatureausdehnungskoeffizient Beton = 10,0 [$\mu\varepsilon/^{\circ}\text{C}$]

Die Formel (5.9) wurde verwendet, um die Dehnungen, die im Diagramm in **Abb. 5.20** gezeigt werden, zu berechnen.

Die Umfangsdehnungen wurden je Messquerschnitt mit vier Dehnungsaufnehmern aufgezeichnet. In Kapitel 4.3.1.1 ist die genaue Lage der Sensoren beschrieben. Insgesamt sind vier Messquerschnitte über die Länge des Pfahls verteilt. Die generelle Funktionsweise des hier eingesetzten Dehnungssensors (*Model 4200- Geokon*) wurde in Kapitel 4.4.2.3 bereits erläutert. Jeder Dehnungssensor liefert nicht nur die gemessenen Dehnungen in [digits], sondern auch die Temperatur in [$^{\circ}\text{C}$].

In **Abb. 5.18** sind die aufbereiteten Rohdaten am Beispiel des Messquerschnitts 1 zu sehen und in **Abb. 5.19** deren Umrechnung. Dabei ist zu beachten, dass der Sensor DS1-D ausgefallen ist.

Aufbereitete Rohdaten													
Phase	Monat	Tag	Stunde	Minute	Sekunde	DS1A	DS1B	DS1C	DS1D	DS1A-T	DS1B-T	DS1C-T	DS1D-T
						[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
					Nullwerte:	786,11	799,176	885,743		13,6	13,3	12,7	
0	5	8	8	30	0	786,11	799,176	885,743	0	13,6	13,3	12,7	0
0	5	8	8	31	0	787,085	798,93	885,666	0	13,6	13,3	12,6	0
0	5	8	8	32	0	786,626	798,862	886,247	0	13,6	13,3	12,7	0
0	5	8	8	33	0	785,5	799,179	885,985	0	13,6	13,3	12,7	0

Abb. 5.18: Auszug aus den Rohdaten der Dehnungsaufnehmer – Miozänpfahl B.EM

Monat	Tag	Stunde	Minute	Sekunde	Nullwerte:	Umrechnungen der dg-Werte und Nullung mit Ausgangswert			
						DS1A	DS1B	DS1C	DS1D
						[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]
5	8	8	30	0	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	
5	8	8	31	0	0,0032	-0,0008	-0,0005	0,0000	
5	8	8	32	0	0,0017	-0,0010	0,0016	0,0000	
5	8	8	33	0	-0,0020	0,0000	0,0008	0,0000	

Abb. 5.19: Auszug aus der Auswertung der Umfangsdehnungen – Miozänpfahl B.EM

Eine genauere Betrachtung dieser Dehnungsmessungen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. In Kapitel 5.2.3 und 5.2.4 wurden die Längsdehnungen gemessen mit den Bewehrungssensoren genauer ausgewertet. Die Auswertung der Umfangsdehnungen stellt mindestens einen solchen Arbeitsaufwand dar und stellt somit ein Ziel für weitere Forschungsarbeiten dar.

Prüfkörper: B.EM

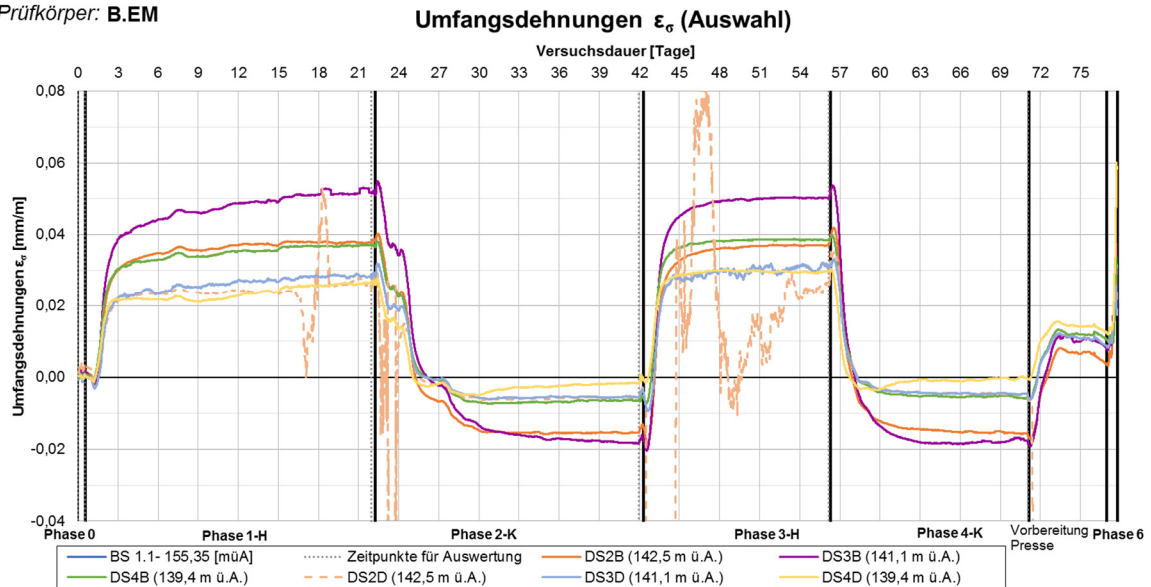


Abb. 5.20: Umfangsdehnungen ϵ_{σ} in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit – Miozänpfahl B.EM

Anmerkung: In dem Diagramm in **Abb. 5.20** wurden Trendlinien verwendet, um die Linien zu glätten. Es wurden hierfür Trendlinien mit gleitendem Durchschnitt verwendet.

5.2.2.3 MWES II, IV und V – Temperatur

Die Temperatur im Pfahl und im umliegenden Boden wurde während der Versuche mit drei verschiedenen Messwerterfassungssystemen aufgezeichnet. Die Ausgabewerte der Temperatursensoren

müssen nicht in eine andere Einheit umgerechnet werden, da diese direkt in [°C] ausgegeben werden. Die gesammelten Daten mussten somit nur selektiert und aufbereitet werden.

Wie schon zuvor erwähnt, messen die Bewehrungssensoren des MWES II nicht nur die Dehnungen, sondern auch die Temperatur. Das Diagramm in **Abb. 5.21** zeigt die Temperatur in unterschiedlichen Tiefen des Pfahls (Messquerschnitte 1-5) über die gesamte Versuchsdauer. Für die ausführlichere Auswertung der Längsdehnungen wurden noch Temperaturverläufe über die Tiefe des Pfahls erstellt. Diese Diagramme werden in Kapitel 5.2.4 gezeigt.

Das MWES V beinhaltet die Sensoren der *Wien Energie GmbH*, und zwar einerseits die Temperaturen im Pfahl, in den Reaktionspfählen und die Temperaturen jenes Pfahls, der gerade nicht geprüft wurde (z.B. Kiespfahl B.EK wenn Miozänpfahl B.EM geprüft wurde) und andererseits die Energieparameter der Energiezentrale.

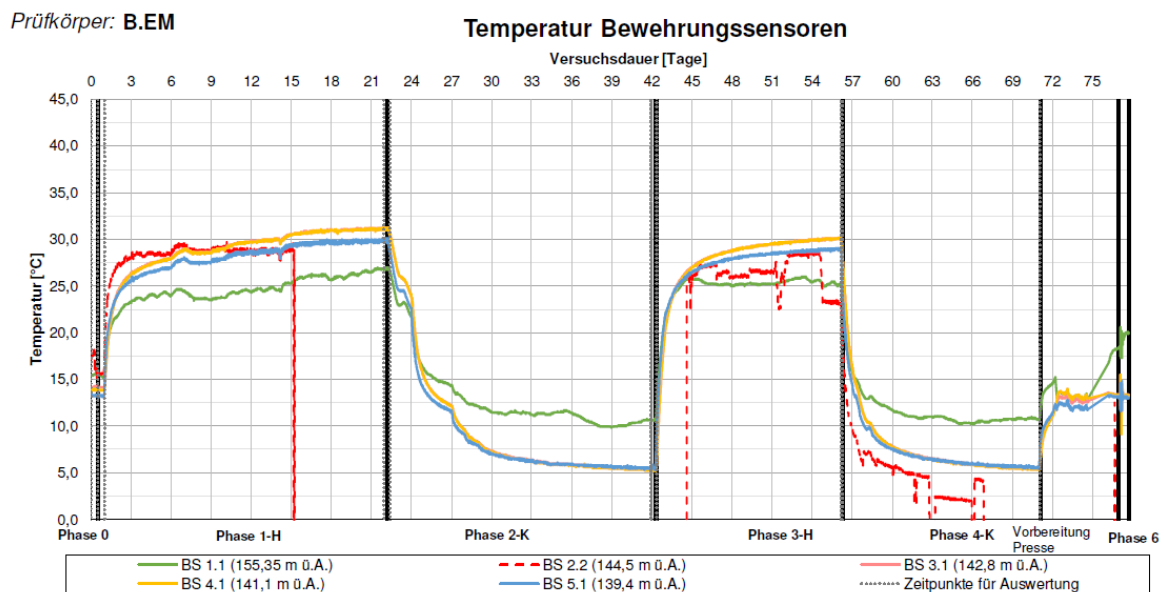


Abb. 5.21: Temperatur Bewehrungssensoren in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM

Das Diagramm in der **Abb. 5.22** zeigt die Vorlauftemperatur des Heiz- und Kühlsystems, die Pfahltemperatur, die Temperatur der Reaktionspfähle und die Außentemperatur über die gesamte Versuchsdauer.

Prüfkörper: **B.EM** Vorlauftemperatur, Außentemperatur, Pfahltemperatur, Reaktionspfahltemperatur

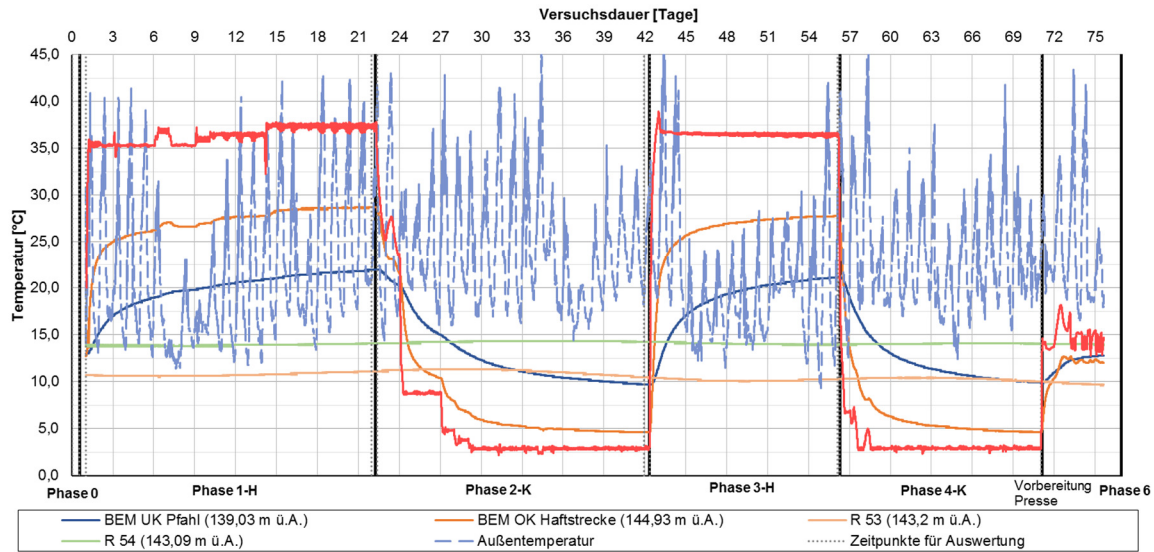


Abb. 5.22: Wien Energie Temperaturdaten in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM

Das MWES IV beinhaltet die Sensoren in den Zusatzbohrungen TS.M1, TS.M2 und TS.K. Die Zusatzbohrung TS.M1 ist 0,75 m von der Pfahlmitte entfernt und TS.M2 1,75 m. Die Ausbreitung der Temperatur im Boden kann mit diesen Zusatzbohrungen beobachtet werden. Die Zusatzbohrung TS.K in der Nähe des Kiespfahls ist zu weit entfernt, um relevante Temperaturänderung anzuzeigen und reicht auch nicht in die Tiefe des Miozäns. Das Diagramm in **Abb. 5.23** zeigt die Temperatur des Pfahls (mittels Bewehrungssensor gemessen) im Vergleich zu den Temperaturen in den Zusatzbohrungen TS.M1 und TS.M2 über die gesamte Versuchsdauer. Temperaturverläufe über die Tiefe in Pfahlmitte, in der Zusatzbohrung TS.M1 und in der Zusatzbohrung TS.M2 werden in zusätzlichen Diagrammen dargestellt. Diese Diagramme wurden für ausgewählte Zeitpunkte des Versuchs erstellt und werden in Kapitel 5.2.4 erläutert.

Prüfkörper: **B.EM** Pfahltemperatur (BS) & Temperatur in den Zusatzbohrungen auf Höhenkote ca. 143,0 m ü.A.

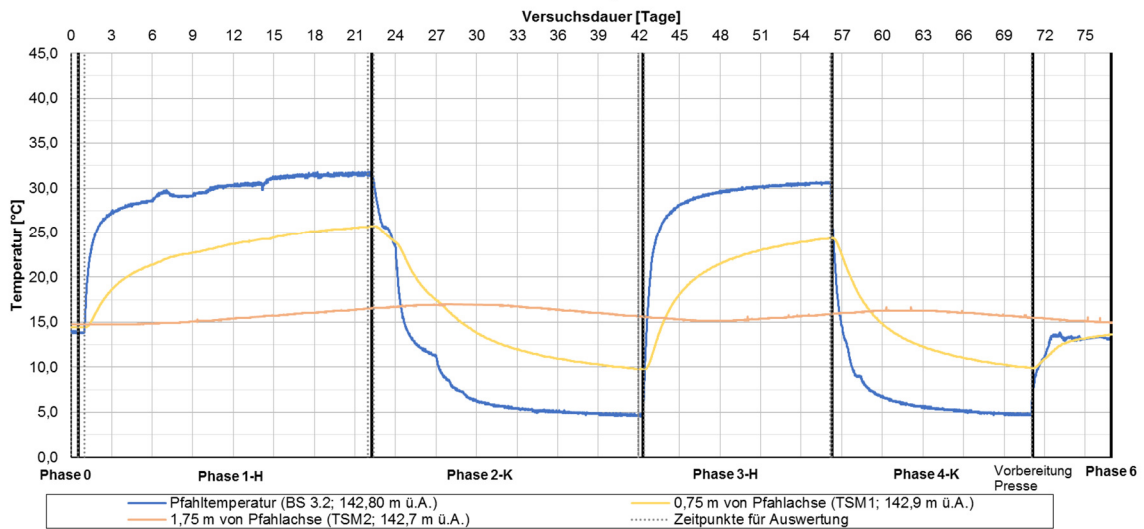


Abb. 5.23: Temperatur Zusatzbohrungen TS.M2 und TS.M1 mit Temperatur Bewehrungssensor auf einer Höhenkote von ca. 143,0 m ü.A. über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM

In diesem Diagramm ist gut ersichtlich, wie die Temperatursausbreitung mit zunehmendem Abstand vom Pfahl abnimmt. Die Zusatzbohrung TS.M2 ist 1,75 m von der Pfahlachse des B.EM entfernt und zeigt nur mehr eine geringfügige Temperaturänderung an, die zeitlich verzögert ist.

5.2.3 Längsdehnungen und prinzipielles Verformungsverhalten eines Energiepfahls

Pfähle, die unter Belastung stehen und zusätzlich noch thermisch belastet (geheizt/gekühlt) werden, weisen ein komplexes Verformungsverhalten auf. Dieses Verhalten wird auch von der Lagerung des Pfahls am Pfahlkopf, an der Pfahlsole und an der Mantelfläche (Kontaktfläche zum anstehenden Boden) beeinflusst.

Die folgende Erläuterung der Auswertung der Längsdehnungen basiert auf einer Zusammenführung der Publikation „*Thermo-mechanical behaviour of energy piles*“ [7], der Publikation „*Thermo-mechanical behavior of thermo-active precast pile*“ [13] und dem *Handbuch des Geokon Messsystems* [73].

Die gemessenen gesamten Dehnungen bestehen aus einem spannungsbedingten Anteil ε_{σ} und einem temperaturbedingten Anteil $\varepsilon_{\Delta T}$. Die spannungsbedingten Dehnungen beinhalten jene Dehnungen, die sich aus der mechanischen Belastung und den diesbezüglichen Spannungen im Pfahl ergeben. Es ist hierbei anzumerken, dass auch Zwängsspannungen zufolge Temperaturänderung in diesen Teil der Dehnungen enthalten sind. Die temperaturbedingten Dehnungen bestehen aus jenen Dehnungen, welche durch eine Änderung der Temperatur im Bauteil hervorgerufen werden. Die gesamten gemessenen Dehnungen können mit folgender Formel dargestellt werden [18]:

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{\Delta T} \quad (5.10)$$

Im Folgenden wird die Auswertung der Längsdehnungsmessungen näher erläutert. Als Erstes wird der Fall A erläutert, bei dem der Pfahl nur thermisch belastet wird. Im Weiteren folgt der Fall B, in dem der Pfahl eine thermo-mechanische Belastung erfährt. [18]

5.2.3.1 Fall A – Ausschließlich Temperaturbeanspruchung

In diesem Fall werden zwei verschiedene Arten der Lagerung des Pfahls betrachtet, wobei der Pfahl mit einer Temperaturerhöhung (Heizen) ΔT beansprucht wird. Im Fall 1 kann sich der Pfahl frei ausdehnen; im Falls 2 ist die Ausdehnung des Pfahls behindert. **Abb. 5.24** veranschaulicht die Lagerungsbedingungen und die Dehnungen des Pfahls.

Ausschließlich Temperaturbeanspruchung

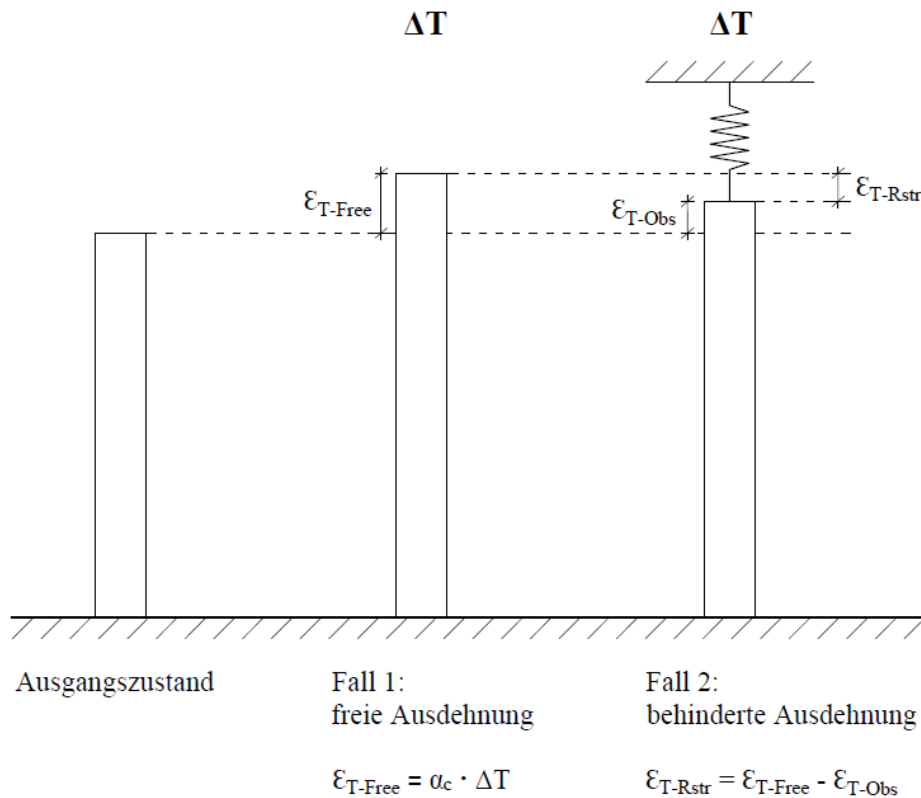


Abb. 5.24: Fall A - Längsdehnungen bei einer Temperaturerhöhung ΔT

Ein unbelasteter Pfahl, der aufgeheizt ($+\Delta T$) wird, dehnt sich aus. Im Fall 1, bei dem sich der Pfahl ungehindert ausdehnen kann, entstehen keine Zwängsspannungen aufgrund der Temperaturbeanspruchung. Die Dehnungen ϵ_{T-Free} , die bei einer freien Ausdehnung des Pfahls auftreten, lassen sich mit folgender Formel ausdrücken:

$$\epsilon_{T-Free} = \alpha_c \cdot \Delta T \quad (5.11)$$

Diese Formel für die freie Längsdehnung des Pfahls unter thermischer Belastung (ϵ_{T-Free}) beruht auf dem thermischen Ausdehnungskoeffizienten für Beton α_c und die Temperaturänderung ΔT .

In der Realität kann sich jedoch ein Pfahl aufgrund der Randbedingungen meist nicht frei ausdehnen. Dies wird mit dem Fall 2 in **Abb. 5.24** modelliert. Die vom Messsystem gemessene Dehnung wird ϵ_{T-Obs} und die verhinderte Dehnung ϵ_{T-Rstr} genannt.

$$\epsilon_{T-Rstr} = \epsilon_{T-Free} - \epsilon_{T-Obs} \quad (5.12)$$

Durch die Behinderung des Dehnungsanteils ϵ_{T-Rstr} entstehen Zwängsspannungen, die zu einer Normalkraft N_T führen. Die Dehnungen werden mit Hilfe des *Hooke'schen Gesetzes* (linear-elastischen Materialverhalten) in Spannungen umgerechnet.

$$\sigma = \frac{N}{A} = E \cdot \epsilon \dots \text{allgemeines Hooke'sches Gesetzes} \quad (5.13)$$

A Querschnittsfläche [cm²]
 N Normalkraft [kN]
 E Elastizitätsmodul [N/mm²]
 ε Dehnungen [mm/m]
 σ Normalspannung [kN/cm²]

Im gegenständlichen Fall errechnet sich damit die Normalkraft N_T zu:

$$N_T = E \cdot A \cdot \varepsilon_{T-Rstr} \quad (5.14)$$

Durch Einsetzen der Formeln (5.11) und (5.12) in (5.14) ergibt sich:

$$N_T = E \cdot A \cdot (\alpha_c \cdot \Delta T - \varepsilon_{T-Obs}) \quad (5.15)$$

Zur besseren Veranschaulichung ist im Folgenden die Erläuterung aus [7] angegeben. Bei einer Temperaturerhöhung dehnt sich der Pfahl im Boden aus, die auftretenden axialen Dehnungen werden jedoch durch den Mantelwiderstand und den Widerstand an beiden Enden des Pfahls behindert.

Die Längsdehnungsprofile für zwei unterschiedlich starke Pfahlmantelwiderstände werden in **Abb. 5.25** präsentiert. Profil A zeigt den Pfahl mit einem hohen Pfahlmantelwiderstand und Profil B mit einem geringen Widerstand. Wie in **Abb. 5.25** ersichtlich ist, verringert sich die gemessene Dehnung ε_{T-Obs} bei einem größeren Mantelwiderstand in Pfahlmitte (Verlauf der Dehnungen ersichtlich in **Abb. 5.25** (a)). Die thermisch induzierte Normalkraft N_T (in **Abb. 5.25** mit P bezeichnet) ist beim Heizen aufgrund der Ausdehnung und dem Mantelwiderstand eine Druckkraft und im Fall des Kühlens eine Zugkraft (Normalkraftverlauf im Pfahl ersichtlich in (b)).

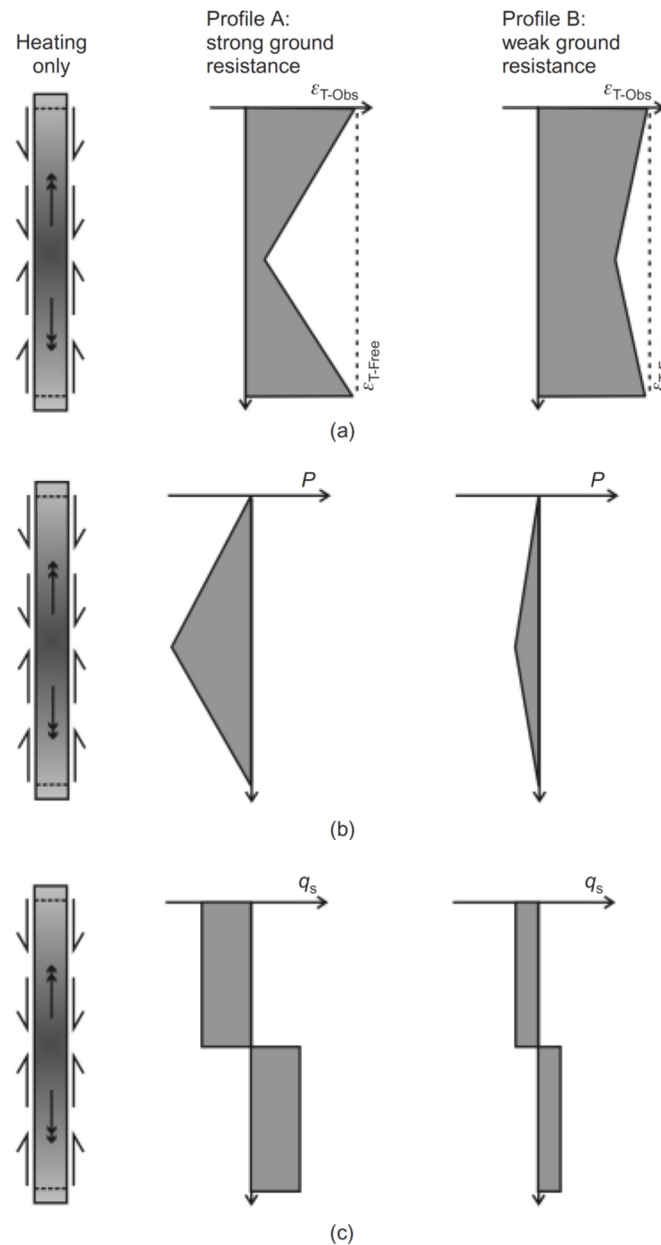


Abb. 5.25: Auswirkungen einer thermischen Belastung auf einen Pfahl mit freier Lagerung an beiden Enden: a) axiale Dehnungen, b) Normalkraft, c) Mantelreibung [7]

Abb. 5.25 (c) zeigt, dass durch die Ausdehnung in der oberen Hälfte des Pfahls eine negative Mantelreibung (Pfahl bewegt sich nach oben) und in der unteren Hälfte eine positive Mantelreibung entsteht. Während des Kühlens ist dieser Effekt genau umgekehrt, da durch das temperaturbedingte Schrumpfen des Pfahls in der oberen Pfahlhälfte eine positive Mantelreibung und in der unteren Hälfte eine negative Mantelreibung erzeugt wird.

Ist bei einer Temperaturerhöhung eine Behinderung an den Pfahlenden vorhanden, entstehen durch den verhinderten Dehnungsanteil zusätzliche Druckspannungen im Pfahl. Die in **Abb. 5.26** gezeigten Lastbilder sind vom Ausmaß der Behinderung an den Enden des Pfahls abhängig, weswegen drei verschiedene Profile mit unterschiedlich steifer Lagerung gezeigt werden.

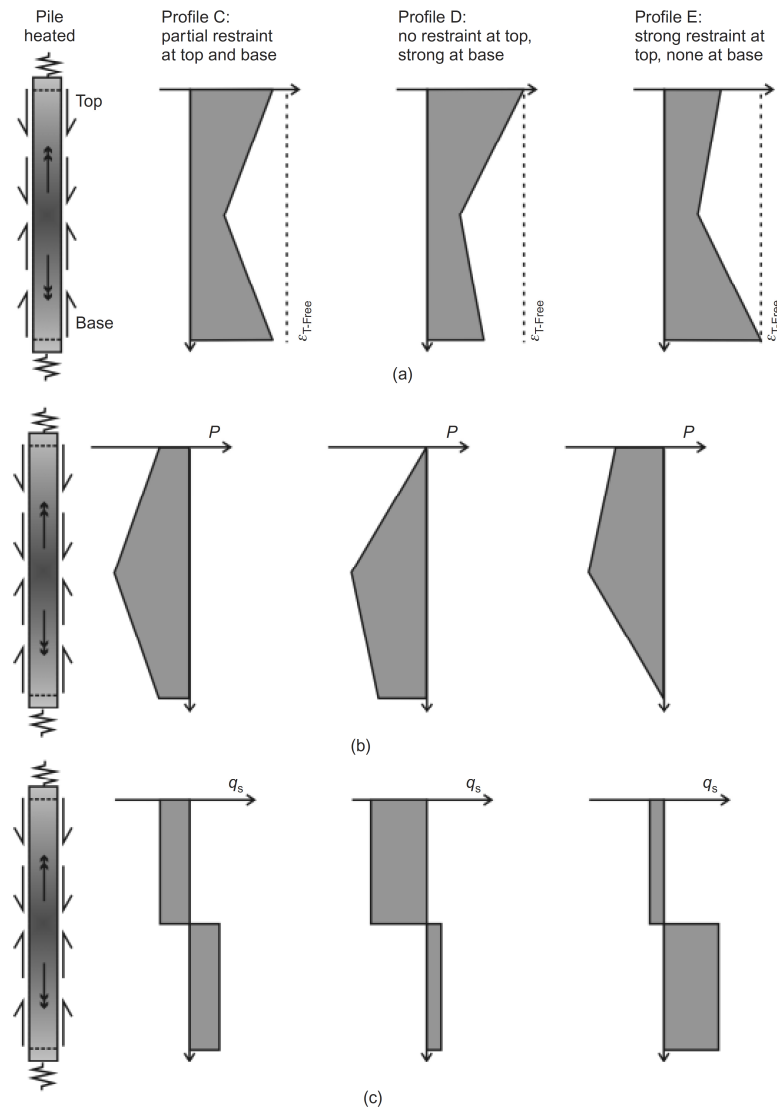


Abb. 5.26: Auswirkungen einer thermischen Belastung auf einen Pfahl, der sich nicht frei bewegen kann: a) axiale Dehnungen, b) Normalkraft, c) Mantelreibung [7]

Beim Profil C ist der Pfahl an beiden Enden teilweise fixiert, beim Profil D ist dieser am oberen Ende frei und am unteren Ende „stark“ gehalten und beim Profil E ist die Fixierung des Pfahls genau umgekehrt wie im Profil D [7].

5.2.3.2 Fall B - Temperaturbeanspruchung und mechanische Beanspruchung

In diesem Fall wird der Pfahl nicht nur mit einer Temperaturerhöhung ΔT , sondern auch mit einer Kraft F belastet. Die gesamten Dehnungen aus Temperatur und Kraft ergeben sich zu einem Anteil aus den Temperaturdehnungen, die in Fall A zuvor erläutert wurden, und zum anderen Teil aus den Dehnungen resultierend aus der mechanischen Belastung. Nachfolgend sind wiederum die Dehnungsanteile für den Fall mit behinderter Ausdehnung schematisch dargestellt.

Temperaturbeanspruchung und mechanische Beanspruchung

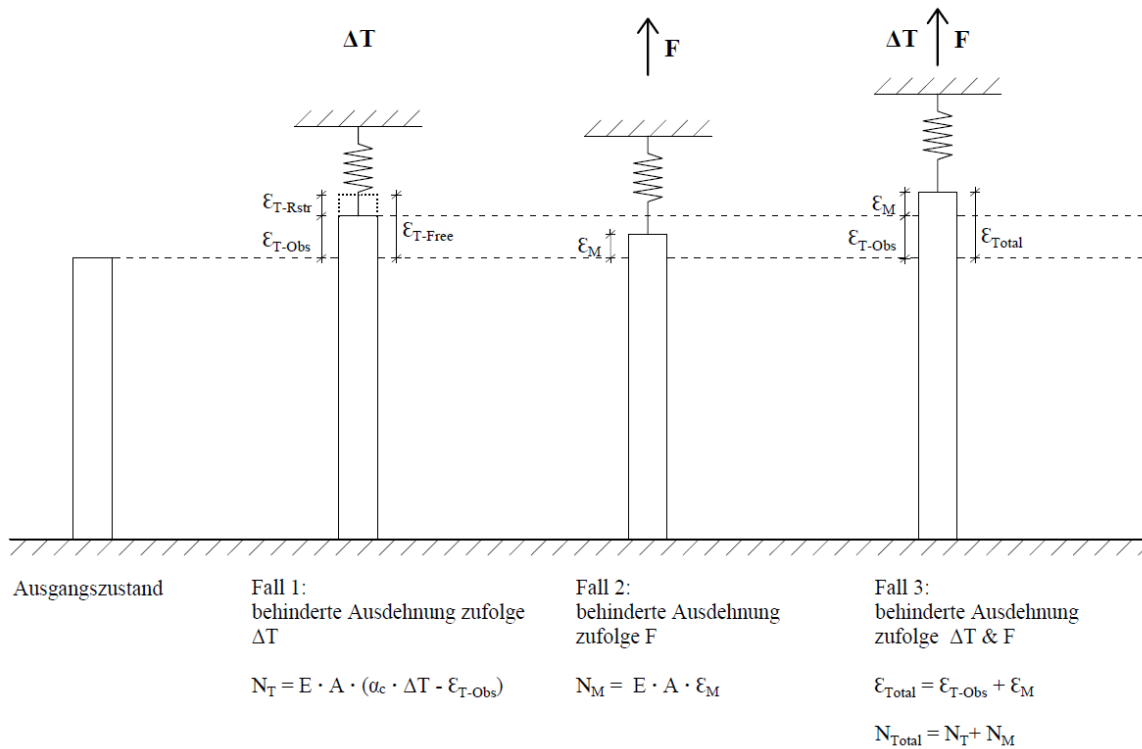


Abb. 5.27: Fall B - Längsdehnungen unter thermischer und mechanischer Beanspruchung ($\Delta T + F$)

Auf Fall 1 in **Abb. 5.27** wird nicht mehr genauer eingegangen, da dieser nur die Temperaturdehnungen darstellt und dies zuvor in Kapitel 5.2.3.1 erklärt wird. Die aus diesen Temperaturdehnungen resultierende Normalkraft N_T im Pfahl wird nochmals in Erinnerung gerufen und in folgender Formel (5.16) dargestellt:

$$N_T = E \cdot A \cdot (\alpha_c \cdot \Delta T - \varepsilon_{T-Obs}) \quad (5.16)$$

Die Formel (5.16) entspricht der Formel (5.15). Fall 2 stellt die behinderte Längsausdehnung ε_M zufolge der mechanischen Kraft F dar. Die Normalkraft N_M resultierend aus diesen Dehnungen und ergibt sich folgendermaßen:

$$N_M = E \cdot A \cdot \varepsilon_M \quad (5.17)$$

Fall 3 kombiniert die Dehnungen aus der behinderten Ausdehnung ε_{T-Obs} zufolge der Temperaturänderung ΔT (Fall 1) und die Dehnungen aus der behinderten Ausdehnung ε_M zufolge der Kraft F (Fall 2). Die gesamten Dehnungen werden als ε_{Total} bezeichnet und sind gleichzeitig die Dehnungen, die gemessen werden. Die folgenden Formeln (5.18) und (5.19) stellen die totalen Dehnungen ε_{Total} und die totale Normalkraft N_T aus dieser kombinierten Belastung dar:

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_{T-Obs} + \varepsilon_M \quad (5.18)$$

$$N_{Total} = N_T + N_M \quad (5.19)$$

Zur Vertiefung und besseren Erläuterung des Pfahlverhaltens unter thermisch-mechanischer Belastung, wird im Folgenden auf die Abbildungen aus [7] genauer eingegangen. Zunächst wird ein diesbezüglicher Pfahl mit der Möglichkeit der freien Ausdehnung am Kopf und am Fuß diskutiert und anschließend mit unterschiedlichen Lagerungsbedingungen an beiden Enden.

In der folgenden **Abb. 5.28** sind die Auswirkungen einer kombinierten thermisch-mechanischen Belastung auf einen Pfahl in mehreren Bildern dargestellt. Der Pfahl ist am Kopf und am Fuß nicht gehalten und kann sich somit ungehindert ausdehnen. Es werden der vereinfachte Normalkraftverlauf im Pfahl (in der Abbildung mit P bezeichnet) und die Mantelreibung q_s bei alleiniger mechanischer Belastung, bei alleiniger thermischer Belastung sowie bei deren Kombinationen gezeigt.

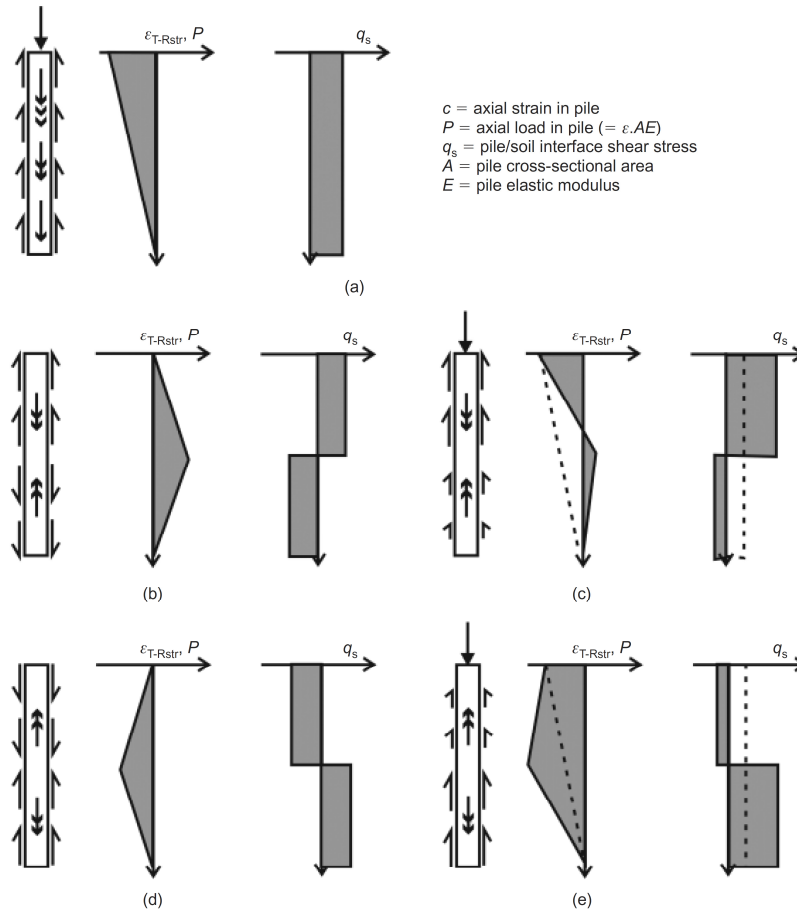


Abb. 5.28: Auswirkungen einer thermisch-mechanischen Belastung auf einen Pfahl, der sich frei verformen kann: a) nur mechanische Belastung, b) nur Kühlen, c) mechanische Last und Kühlen, d) nur Heizen, e) mechanische Kraft und Heizen [7]

Im Fall a) der **Abb. 5.28** wird davon ausgegangen, dass die Kraft nur über die Mantelreibung abgetragen wird. Der Verlauf der Mantelreibung ist daher konstant über die Tiefe. Daraus ergibt sich, dass die Normalkraft konstant mit der Tiefe abnimmt.

In den Fällen b) und d) wirkt auf den Pfahl nur eine thermische Belastung (nur Kühlen bzw. nur Heizen).

In den Fällen c) und e) werden der Normalkraftverlauf und der Verlauf der Mantelreibung bei kombinierter thermisch-mechanischer Belastung angegeben.

In **Abb. 5.29** wird schließlich ein Pfahl mit zwei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen am Kopf und Fuß betrachtet.

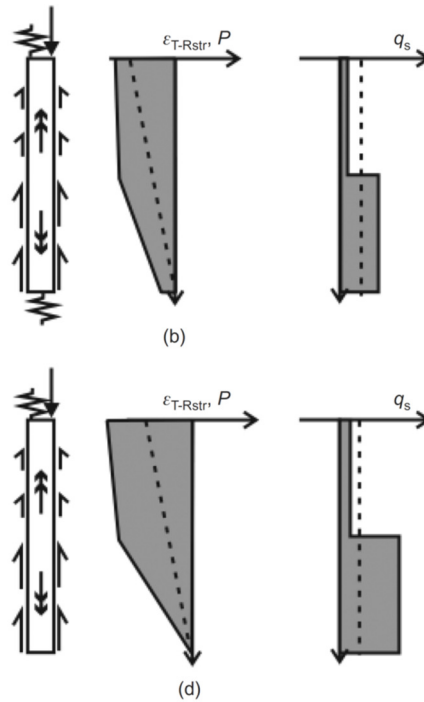


Abb. 5.29: Auswirkungen einer thermisch-mechanischen Belastung auf einen Pfahl bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen: b) am Kopf und am Fuß teilweise gehalten, d) nur am Kopf gehalten [7]

Da sich der Pfahl an jenem Ende, an dem er gehalten wird, nicht frei ausdehnen kann (bei einer Erwärmung), entstehen zusätzliche Normalkräfte. Im Fall b) ist der Pfahl an beiden Enden gehalten und im Fall d) nur am Pfahlkopf. [7]

5.2.3.3 Berücksichtigung von Temperaturänderungen bei der Anwendung von Messsystemen mit schwingender Saite

Die generelle Funktionsweise des eingesetzten Bewehrungssensoren für die Messung der Längsdehnungen (*Model 4911- Geokon*), wurde in 4.4.2.3 bereits im Detail erläutert und wird an dieser Stelle nochmals zusammengefasst:

$$R = \frac{H_z^2}{1000} [\text{Digits}] \quad (5.20)$$

Die Formel (5.21) entspricht der Formel (5.1). R ist in der oben angeführten Formel (5.20) der ausgelesene Messwert und H_z die Schwingfrequenz der schwingenden Saite.

Die Messwerte von zwei unterschiedlichen Zeitpunkten werden in einem weiteren Schritt mit folgender Formel (5.21) umgerechnet, um die Dehnung ϵ [$\mu\epsilon$] zu erhalten.

$$\epsilon_{\text{Messung}} = (R_1 - R_0) \cdot C \quad (5.21)$$

Der Kalibrierungsfaktor C [$\mu\epsilon/\text{digits}$] wird vom Hersteller für jede einzelne hergestellte Messzelle angegeben und fließt in die Umrechnung als Multiplikator mit ein. R_0 [digits] ist die Nullmessung und R_1 [digits] der aktuelle Messwert.

Da der Bewehrungsstab mit der Messzelle fest mit dem Beton verbunden ist, wird davon ausgegangen, dass die Dehnung der Messzelle gleich groß ist wie jene des Betons. Tritt jedoch eine Temperaturänderung auf, dehnt sich der Beton aufgrund der unterschiedlichen Temperaturexpansionskoeffizienten weniger aus, als der Stahl. Dies muss bei der Auswertung berücksichtigt werden.

In der folgenden **Tab. 5.5** sind die von *Geokon* vorgeschlagenen und in dieser Umrechnung verwendeten Temperaturkoeffizienten angegeben. [73]

Tab. 5.5: Temperatureausdehnungskoeffizient [73]

Bauteil	Koeffizient α [$\mu\epsilon/^\circ\text{C}$]
Stahl α_s	12,2
Beton α_c	10,0
Differenz	2,2

Die Berechnung der totalen Längsdehnungen ϵ_{Total} aus den gemessenen Dehnungen unter Berücksichtigung des Einflusses aus der behinderten Dehnung wird im Folgenden erklärt.

Wie schon zuvor erwähnt, setzen sich die totalen Dehnungen ϵ_{Total} aus einem Spannungsanteil ϵ_σ und einem Temperaturanteil $\epsilon_{\Delta T}$ zusammen.

$$\epsilon_{Total} = \epsilon_\sigma + \epsilon_{\Delta T} \quad (5.22)$$

Generell enthalten die spannungsbedingten Dehnungen jene Dehnungen, die von mechanischen Lasten und temperaturbedingten Zwängsspannungen hervorgerufen werden, und die temperaturbedingten Dehnungen, die zufolge von Temperaturänderungen hervorgerufen werden. Aus der Mechanik gilt für einen Einzelstab:

$$\epsilon = \frac{\sigma}{E} + \alpha_T \cdot \Delta T \quad (5.23)$$

N Normalkraft [kN]

E Elastizitätsmodul [N/mm²]

ϵ Dehnungen [mm/m]

σ Normalspannung [kN/cm²]

ΔT Temperaturdifferenz [°C]

α_T Temperatureausdehnungskoeffizient [$\mu\epsilon/^\circ\text{C}$]

Der erste Term ergibt sich aus dem *Hooke'schen Gesetz* bei einer mechanischen Beanspruchung und der zweite Term zieht die temperaturbedingten Dehnungen mit in die Berechnung ein.

Beruhend auf den Erklärungen aus den Kapiteln zuvor wird nun die Messzelle zu drei verschiedenen Zeitpunkten betrachtet:

- Zuerst die Nullmessung zum Zeitpunkt t_0 , bei der die Messzelle ohne jegliche Belastung im Ausgangszustand betrachtet wird;
- im Referenzzeitpunkt t_{Rl} ist der Bauteil mit einer Kraft belastet; und
- im Zeitpunkt t_l ist zusätzlich zur Kraft noch eine thermische Belastung ΔT auf den Bauteil aufgebracht worden.

Messprinzip schwingende Saite

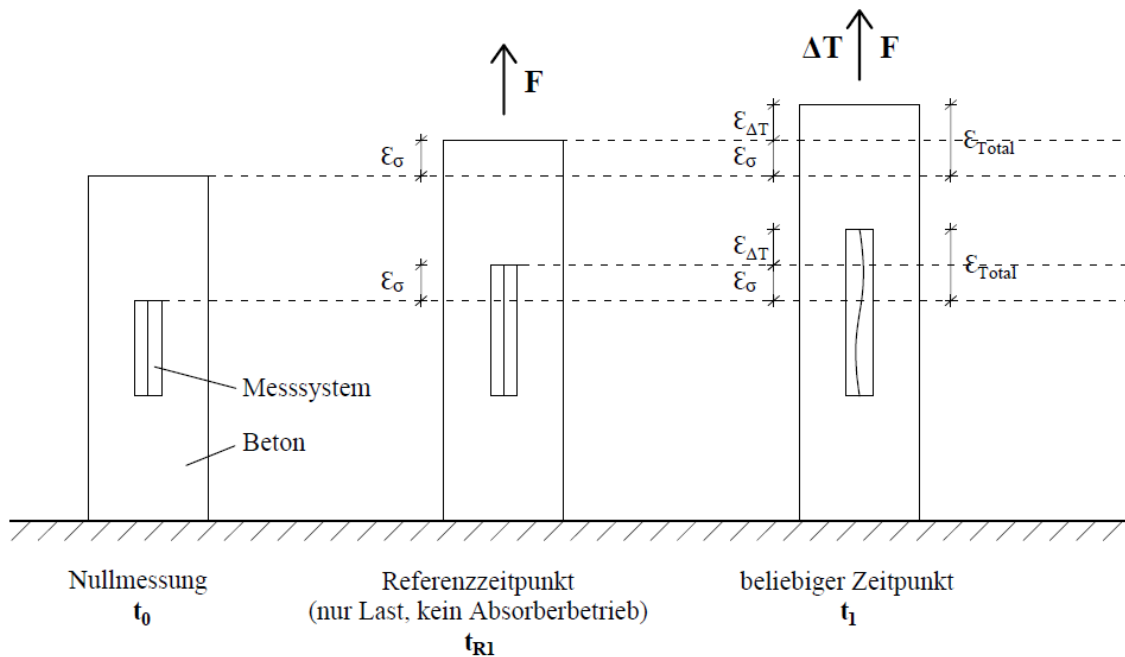


Abb. 5.30: Dehnungsverhalten bei einem Messsystem mit schwingender Saite

Wird der Bauteil nur mit einer Kraft F belastet und bleibt die Temperatur konstant, kann die Dehnungen ohne Temperaturkorrektur berechnet werden:

$$\epsilon_{Messung} = \epsilon_\sigma = (R_1 - R_0) \cdot C \quad (5.24)$$

- $\epsilon_{Messung}$ gemessene Dehnung [$\mu\epsilon$]
- ϵ_σ spannungsbedingte Dehnung [$\mu\epsilon$]
- R_1 aktueller Messwert [digits]
- R_0 Nullmessung [digits]
- C Kalibrierungsfaktor

Wird der Bauteil zusätzlich mit einer Temperaturänderung ΔT belastet, so können die spannungsbedingten Dehnungen ϵ_σ mit der Formel (5.25) berechnet werden. Der erste Term beinhaltet die ausgelesenen Messwerte in [digits] multipliziert mit dem Kalibrierungsfaktor C . Der zweite Term stellt die Temperaturkorrektur dar, mit der das unterschiedliche Wärmeausdehnungsverhalten von Stahl (schwingende Saite) und Beton korrigiert wird. Dabei wird die Temperaturänderung ΔT mit der Differenz der beiden Koeffizienten multipliziert:

$$\epsilon_\sigma = (R_1 - R_0) \cdot C + \Delta T \cdot (\alpha_S - \alpha_C) \quad (5.25)$$

Die Differenz aus den beiden Temperatúrausdehnungskoeffizienten berechnet sich folgendermaßen:

$$(\alpha_S - \alpha_C) = 12,2 - 10,0 = 2,2 \text{ } [\mu\epsilon/^\circ C] \quad (5.26)$$

Die Dehnungen $\epsilon_{\Delta T}$ zufolge einer Temperaturänderung ergeben sich aus dem Ausdehnungskoeffizienten des Betons α_C und ΔT :

$$\epsilon_{\Delta T} = \Delta T \cdot \alpha_C \quad (5.27)$$

Beide Anteile der Dehnungen können nun in die Formel der totalen Dehnungen ϵ_{Total} eingesetzt werden:

$$\varepsilon_{Total} = \varepsilon_{\sigma} + \varepsilon_{\Delta T} \quad (5.28)$$

$$\varepsilon_{Total} = (R_1 - R_0) \cdot C + \Delta T \cdot (\alpha_S - \alpha_C) + \Delta T \cdot \alpha_C$$

ε_{Total} totale Dehnung [$\mu\varepsilon$]
 R_1 aktueller Messwert [digits]
 R_0 Nullmessung [digits]
 C Kalibrierungsfaktor
 ΔT Temperaturdifferenz [$^{\circ}\text{C}$]
 α_S Temperatureausdehnungskoeffizient Stahl = 12,2 [$\mu\varepsilon/^{\circ}\text{C}$]
 α_C Temperatureausdehnungskoeffizient Beton = 10,0 [$\mu\varepsilon/^{\circ}\text{C}$]

Durch Ausmultiplizieren und Kürzen der letzten beiden Terme, ergibt sich folgende Formel für die totalen Dehnungen ε_{Total} :

$$\varepsilon_{Total} = (R_1 - R_0) \cdot C + \Delta T \cdot \alpha_S \quad (5.29)$$

5.2.4 Auswertung der Längsdehnungen am Beispiel Miozänpfahl B.EM

5.2.4.1 Betrachtungszeitpunkte

In diesem Kapitel wird Schritt für Schritt das Auswertungsschema der Längsdehnungen erklärt. In den vorhergehenden Kapiteln 5.2.3.1 bis 5.2.3.3 wurde die Theorie für die Auswertung der Längsdehnungen beschrieben. Ziele der nachfolgenden Auswertung sind die Ermittlung der Spannungen im Pfahl (zufolge mechanischer Last und zufolge der Temperaturänderung) und die Berechnung der Mantelreibung aufgrund der gemessenen Längsdehnungen.

In einem ersten Schritt wurden die für Vergleichszwecke interessanten Zeitpunkte des Versuches definiert. Das Hauptaugenmerk war dabei auf die unterschiedlichen Heiz- und Kühlphasen gerichtet. Die Zeitpunkte wurden so gewählt, dass die mechanische Last in allen Zeitpunkten gleich ist und die Temperatur variiert. Bei den gewählten Zeitpunkten in Phase 1 und Phase 2 wirkt eine mechanische Last von 600 kN. Die nachfolgenden Zeitpunkte in Phase 3 und Phase 4 wurden bei einer Belastung von 800 kN gewählt, die der rechnerischen Gebrauchslast des Pfahls entspricht. Die gewählten Zeitpunkte (in Gelb unterlegt) beim Versuch des Miozän Pfahls werden in folgender **Abb. 5.31** gezeigt.

BEM	Phase	Name	Monat	Tag	Versuchs- Startzeit/Endzeit	Bemerkung	Vergleichszeitpunkte	Monat	Tag	Zeit
		Versuchsbeginn	5	8	08:30	VERSUCHSSTART	P0-0	5	8	8:30
0	0	Phase Beginn	5	8	08:30	Lastspieltag Beginn	P0-800	5	8	21:15
0	0	Phase Ende	5	8	21:44		P0-600	5	9	8:40
1A	1	Beginn Heiz Phase	5	9	08:40	Anfang Heizphase				
1B	1	Beginn Lastspiel Heiz	5	30	06:55	Anfang Lastspiel				
1B	1	Ende Lastspiel Heiz	5	30	13:00	Ende Lastspiel				
1A	1	Ende Heiz Phase	5	30	14:00	Ende Heizphase	P1_EH-600	5	30	6:55
2A	2	Beginn Kühl Phase	6	1	08:00	Anfang Kühlphase	P2_AK-600	5	30	18:00
2B	2	Beginn Lastspiel Kühl	6	19	08:00	Anfang Lastspiel	P2_EK-600	6	19	7:06
2B	2	Ende Lastspiel Kühl	6	19	15:00	Ende Lastspiel				
2A	2	Ende Kühl Phase	6	19	16:00	Ende Kühlphase				
3	3	Phase Beginn	6	19	17:00	Heizphase	P3_AH-800	6	19	17:00
3	3	Phase Ende	7	3	15:30		P3_EH-800	7	3	12:00
4	4	Phase Beginn	7	3	15:30	Kühlphase	P4_AK-800	7	3	15:00
4	4	Phase Ende	7	18	12:00	ab 23.7 kein Absorberbetrieb	P4_EK-800	7	18	10:00
5	5	Phase Beginn	7	24	07:00	Pressenversuch				
5	5	Phase Ende	7	25	03:00	VERSUCHSENDE				

Abb. 5.31: Vergleichszeitpunkte Versuch – Miozänpfahl BEM

Die gewählten Zeitpunkte werden in der folgenden Auflistung kurz erklärt:

- P0-0: Nullmessung (keine Last, kein Absorberbetrieb) → entspricht t_0

- P0-800: Phase 0, Last 800 kN (Entlastung in zweiter Lastschleife), kein Absorberbetrieb → entspricht t_{R1}
- P0-600: Phase 0, Last 600 kN (Entlastung in zweiter Lastschleife), kein Absorberbetrieb → entspricht t_{R2}
- P1_EH-600: Phase 1, Ende Heizphase, Last 600 kN → entspricht t_I (Alle Zeitpunkte nach den Referenzzeitpunkten)
- P2_AK-600: Phase 2, Anfang Kühlphase, Last 600 kN → entspricht t_I
- P2_EK-600: Phase 2, Ende Kühlphase, Last 600 kN → entspricht t_I
- P3_AH-800: Phase 3, Anfang Heizphase, Last 800 kN → entspricht t_I
- P3_EH-800: Phase 3, Ende Heizphase, Last 800 kN → entspricht t_I
- P4_AK-800: Phase 4, Anfang Kühlphase, Last 800 kN → entspricht t_I
- P4_EK-800: Phase 4, Ende Kühlphase, Last 800 kN → entspricht t_I

Die Zeitpunkte t_0 , t_{R1} , t_{R2} und t_I beziehen sich auf die Bezeichnung in **Abb. 5.30**. Alle Zeitpunkte, die nach den Referenzzeitpunkten definiert sind, werden so behandelt wie zum Zeitpunkt t_I da zu diesen Zeitpunkten Temperatur- und Kraftbeanspruchung auf dem Pfahl ist.

5.2.4.2 Allgemeines und Bezeichnungen

Die Längsdehnungen wurden mit zwei Bewehrungssensoren je Messquerschnitt aufgezeichnet. In Kapitel 4.3.1.1 ist die genaue Lage der Sensoren angegeben. Insgesamt sind fünf Messquerschnitte über die Länge des Pfahls verteilt. Jeder Dehnungssensor liefert nicht nur die gemessenen Dehnungen in [digits] sondern auch die Temperatur in [°C]. In **Abb. 5.32** ist ein Ausschnitt der aufbereiteten Rohdaten für die Messquerschnitte 1 und 2 zu sehen.

Monat	Tag	Stunde	Minute	Sekunde	BS1.1	BS1.2	BS2.1	BS2.2	BS1.1T	BS1.2T	BS2.1T	BS2.2T
					[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
5	8	8	30	0	7243,75	7131,77	7393,77	7137,26	15,50	15,80	2,70	17,20
5	8	8	31	0	7244,22	7131,47	7393,95	7137,82	15,50	15,80	2,80	17,20
5	8	8	32	0	7243,87	7131,70	7393,57	7137,30	15,50	15,80	2,80	17,20
5	8	8	33	0	7244,09	7131,82	7393,91	7137,74	15,50	15,80	2,80	17,20

Abb. 5.32: Ausschnitt Rohdaten Bewehrungssensoren- Miozänpfahl BEM

Um die Bezeichnungen, die im Folgenden verwendet werden zu erläutern, werden diese hier erklärt.

- ϵ_{Obs} Gemessene Längsdehnung – Die Formel (5.30) bezieht sich auf die Nullmessung
- ϵ_{σ} Dehnung zufolge jener Spannung, die sich aus der mechanischen Belastung ergibt – bezieht sich auf die Nullmessung
- ϵ_{Total} Totale Dehnung – Summe aus der mechanischen Dehnung (auf Nullmessung bezogen) und der thermischen Dehnung (auf den Referenzzeitpunkt bezogen)
- $\epsilon_{T.Obs}$ Beobachtete („observed“) thermische Dehnung – bezieht sich auf einen Referenzzeitpunkt oder den angegebenen Betrachtungszeitpunkt
- ϵ_{T-Free} Freie thermische Dehnung – theoretischer Wert, der sich bei ungehinderter Verformung aus der Temperaturdifferenz und dem Betonausdehnungskoeffizient ergibt
- ϵ_{T-Rstr} Behinderte („restrained“) thermische Dehnung – Differenz aus der freien Dehnung und der thermischen Dehnung

Anmerkung: Die Dehnungen ϵ_{Obs} und ϵ_{Total} haben augenscheinlich die gleiche Formel ((5.30) und (5.29)) diese beziehen sich aber auf unterschiedliche Zeitpunkte.

5.2.4.3 Übersichtsdiagramm

Die Längsdehnungen, die in den Übersichtsdiagrammen (**Abb. 5.12** und **Abb. 5.13**) dargestellt sind, sollen einen Überblick über das Verhalten des Pfahls geben. Diese Längsdehnungen beziehen sich jeweils auf die Nullmessung.

Formeln		Berechnung der Dehnungen				
BSP.:	$\Delta T_{R1} = T_{R1} - T_0$	ϵ_M BS1.1	ϵ_{T-OBS} BS1.1	ϵ_{OBS} BS1.1	$\Delta T-1.1$	$\epsilon_{T-Free,1-1}$
BSP.:	$\epsilon_{T-Free} = \Delta T \cdot \alpha_C$	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]
Formeln für die gesamte Datenaufbereitung		0,00000		0,00000		
	$\epsilon_M = (R_x - R_0) \cdot C + \Delta T \cdot (\alpha_S - \alpha_C)$	0,00017		0,00017		
	$\epsilon_{OBS} = (R_x - R_0) \cdot C + \Delta T \cdot \alpha_S$	0,00004		0,00004		
		0,00012		0,00012		
		-0,00007		-0,00107		
		-0,00024		-0,00124		

Abb. 5.33: Auszug Daten Längsdehnungen für Übersichtsdiagramm Bewehrungssensoren – Miezänpfahl BEM

Die Dehnungen ϵ_{OBS} stellen die tatsächlich aufgetretenen Dehnungen dar, die auch mit einem einfachen Dehnmessstreifen, der auf dem Beton aufgebracht ist, gemessen werden hätten können. Um den Dehnungsanteil ϵ_σ zu errechnen, muss die Temperaturkorrektur mit der Differenz der beiden Ausdehnungskoeffizienten vorgenommen werden:

$$\epsilon_{OBS(t=t_1)} = (R_{t_1} - R_0) \cdot C + \Delta T \cdot \alpha_S \quad (5.30)$$

$$\epsilon_{\sigma(t=t_1)} = (R_{t_1} - R_0) \cdot C + \Delta T \cdot (\alpha_S - \alpha_C) \quad (5.31)$$

Anmerkung: Diese Formeln (5.30) und (5.31) sind in dieser Form auch im *Geokon Instruction Manual* [73] für die Berechnung zu finden.

Mit diesen beiden Formeln wurden die gesamten Daten ausgewertet (in **Abb. 5.33** grau und rot hinterlegt) und in den Übersichtsdiagrammen (in Kapitel 5.2.2.2) dargestellt.

5.2.4.4 Längsdehnungen zufolge der mechanischen Last

P0-0 ist der Zeitpunkt der Nullmessung (t_0). Das System steht zu diesem Zeitpunkt unter keiner mechanischen oder thermischen Belastung.

Der Zeitpunkt P0-600 entspricht dem Referenzzeitpunkt t_{R1} in **Abb. 5.30**.

Für diesen Referenzzeitpunkt t_{R1} werden die Dehnungen, die durch die mechanische Belastung im Pfahl hervorgerufen werden, berechnet. Formel (5.32) zeigt, dass in der Berechnung der Dehnungen $\epsilon_{M(t=R1)}$ der Temperatureinfluss vollständig kompensiert wird. Es ergeben sich somit nur die spannungsbedingten Dehnungen, die auf die mechanische Last zurückzuführen sind.

$$\epsilon_{M(t=R1)} = \epsilon_\sigma = (R_{R1} - R_0) \cdot C + \Delta T \cdot (\alpha_S - \alpha_C) \quad (5.32)$$

$\epsilon_{M(t=R1)}$ Dehnungen zufolge der mechanischen Last im Referenzzeitpunkt t_{R1} [$\mu\epsilon$]

R_{R1} Messwert zum Referenzzeitpunkt t_{R1} [digits]

R_0 Nullmessung [digits]

C Kalibrierungsfaktor

ΔT Temperaturdifferenz [°C]

α_S Temperatureausdehnungskoeffizient Stahl = 12,2 [$\mu\epsilon/^\circ\text{C}$]

α_C Temperatúrausdehnungskoeffizient Beton = 10,0 [$\mu\epsilon/^\circ\text{C}$]

Da in den folgenden Betrachtungszeitpunkten immer die gleiche Belastung (600 kN bzw. 800 kN) wirkt, werden die Dehnungen $\epsilon_{M(R1)}$ als Basis betrachtet und im Weiteren nur mehr die Dehnungen zufolge Temperaturänderung berechnet. Es wird somit die Annahme getroffen, dass im weiteren Versuchsablauf ($t > t_{R1}$) die Dehnungen und damit auch die Spannungen zufolge der mechanischen Last unverändert bleiben.

$$\epsilon_{M(t>R1)} = \text{const} \text{ (bei mechanischer Last von 600 kN)} \quad (5.33)$$

$$\sigma_{M(t>R1)} = E_P \cdot \epsilon_{M-R1} \quad (5.34)$$

$\epsilon_{M(t>R1)}$ Dehnungen zufolge der mechanischen Last im weiteren Versuchsablauf nach dem Referenzzeitpunkt t_{R1} [$\mu\epsilon$]

$\sigma_{M(t=R1)}$ Spannungen zufolge der mechanischen Last im Referenzfall (P0-600) [kN/cm^2]

$\epsilon_{M(t=R1)}$ Dehnungen zufolge der mechanischen Last im Referenzfall (P0-600) [$\mu\epsilon$]

E_P E-Modul des Pfahls [kN/cm^2]

Der E-Modul des Pfahls E_P setzt sich aus dem Elastizitätsmodul des Stahls E_S und des Betons E_C zusammen. Diese fließen entsprechend ihres Flächenanteils im Pfahl ein und der gewichtete E-Modul wird wie folgt berechnet:

$$E_P = \frac{(E_C \cdot A_C) + (E_S \cdot A_S)}{A_{ges}} \quad (5.35)$$

E_P E-Modul des Pfahls [kN/cm^2]

E_C E-Modul des Betons [kN/cm^2]

E_S E-Modul des Stahls [kN/cm^2]

A_C Querschnittsfläche des Betons [cm^2]

A_S Querschnittsfläche des Stahls [cm^2]

A_{ges} gesamte Querschnittsfläche des Pfahls [cm^2]

Der Flächenanteil des Stahls A_S und der des Betons A_C ergeben zusammen die gesamte Querschnittsfläche A_{ges} . Der E-Modul des Pfahls ist nicht konstant über die Tiefe, da der Stabstahlanteil im Pfahl nicht konstant ist und im oberen Bereich des Pfahls der Betonquerschnitt aufgrund des Doppelwandrohrs verkleinert ist. Aus diesem Grund wird für die einzelnen Messquerschnitte (in unterschiedlichen Tiefen des Pfahls) jeweils ein anderer gewichteter E-Modul E_P zu Berechnung der Spannungen herangezogen.

Der E-Modul des Betons E_C wurde mittels einer Rückrechnung auf Basis der aufgetragenen Last und den gemessenen Dehnungen ermittelt. Dabei werden mit der aufgetragenen Kraft die Spannungen im obersten Messquerschnitt des Pfahls ermittelt und mit den gemessenen Längsdehnungen ϵ_{Obs} im Messquerschnitt 1 (MQ1) in einem Spannungs-Stauchungsdiagramm in **Abb. 5.34** aufgetragen. Es wurde der oberste Messquerschnitt 1 (MQ1) für diese Berechnungen gewählt, da bei diesem davon ausgegangen werden kann, dass die Normalkraft im Pfahl gleich der aufgetragenen Kraft auf dem Pfahlkopf ist.

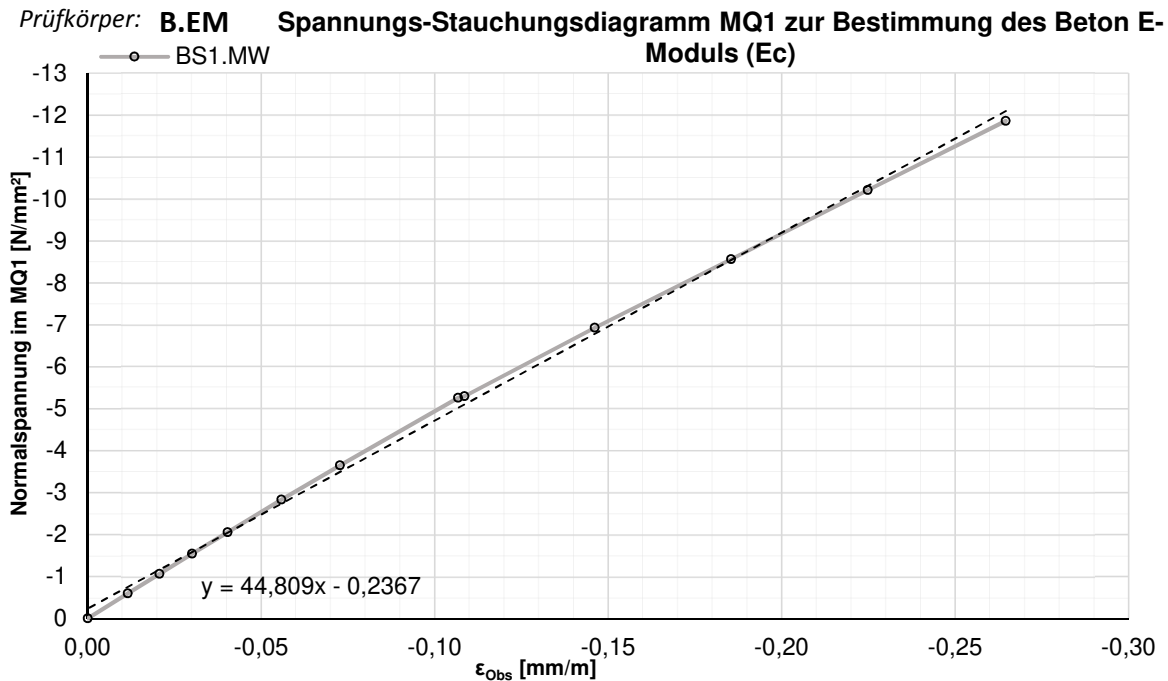


Abb. 5.34: Spannungs-Stauchungsdiagramm zur Ermittlung des E_c (Normalspannungen über gemessene Längsdehnungen ε_{obs}) – Miozänpfahl B.EM

Mithilfe der Ausgleichsgeraden kann die Steigung ermittelt werden. Die Steigung der Geraden entspricht dem E-Modul des Pfahls E_P im obersten Messquerschnitt 1 (MQ1). Mittels der Flächenanteile des Stahls und Betons kann dann der Beton E-Modul E_c mit der Formel (5.35) berechnet werden. In gegenständlichen Fall (Pfahl B.EM) ist der berechnete E-Modul des Betons $E_c = 33 \text{ N/mm}^2$. Der gewichtete E-Modul des Pfahls E_P kann nun für die einzelnen Messquerschnitten mithilfe der Formel (5.35) durch einsetzen des berechneten Beton E-Modul E_c bestimmt werden.

5.2.4.5 Längsdehnungen zufolge der thermischen Last bei konstanter mechanischer Last

Der Zeitpunkt $t=t_1$ aus **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.** gilt für alle nach den Referenzzeitpunkten P0-600 bzw. P0-800 nachfolgenden Betrachtungszeitpunkte. Die mechanische Last ist dieselbe wie in den jeweiligen Referenzzeitpunkten, jedoch ist nun eine zusätzliche Temperaturänderung vorhanden, sodass sich die Gesamtdehnungen folgendermaßen ergeben:

$$\varepsilon_{Total}(t=t_1) = \varepsilon_{M(t=R_1)} + \varepsilon_{T-Obs}(t=t_1) \quad (5.36)$$

$\varepsilon_{Total}(t=t_1)$... Totale Dehnung zum Zeitpunkt t_1 [$\mu\varepsilon$]

$\varepsilon_{M(t=R_1)}$ Dehnung zufolge der mechanischen Last im Referenzfall t_{R_1} [$\mu\varepsilon$]

$\varepsilon_{T-Obs}(t=t_1)$.. Temperaturbedingte Dehnung zum Zeitpunkt t_1 [$\mu\varepsilon$]

Zur Herleitung wird wieder zwischen zwei Fällen unterschieden:

Pfahl mit freier Ausdehnung und Pfahl mit behinderter Ausdehnung.

Fall A: Freie Ausdehnung

Bei einem Pfahl mit freier Ausdehnung sind bei einer Temperaturänderung die aufgezeichneten Dehnungen gleich groß wie die rechnerischen freien Dehnungen:

$$\varepsilon_{T-Obs}(t=t_1) = \varepsilon_{T-Free}(t=t_1) = \alpha_C \cdot \Delta T \quad (5.37)$$

Durch die freie Ausdehnung können keine Zwängsspannungen auftreten:

$$\sigma_{T(t=t_1)} = 0 \quad (5.38)$$

Daraus ergibt sich folgende Spannung im Pfahl:

$$\sigma_{Total(t=t_1)} = \sigma_{M(t=R_1)} + \sigma_{T(t=t_1)} = \sigma_{M(t=R_1)} \quad (5.39)$$

- $\varepsilon_{T-Obs}(t=t_1)$.. Temperaturbedingte Dehnung zum Zeitpunkt t_I [$\mu\varepsilon$]
- $\varepsilon_{T-Free}(t=t_1)$.. Freie Dehnungen zum Zeitpunkt t_I [$\mu\varepsilon$]
- $\varepsilon_{M(t>R_1)}$ Dehnungen zufolge der mechanischen Last im weiteren Versuchsablauf nach dem Referenzzeitpunkt t_{R_1} [$\mu\varepsilon$]
- $\sigma_{M(t=R_1)}$ Spannungen zufolge der mechanischen Last zum Referenzzeitpunkt t_{R_1} [kN/cm^2]
- $\sigma_{T(t=t_1)}$ Spannungen zufolge thermischer Belastung zum Zeitpunkt t_I [kN/cm^2]
- $\sigma_{Total(t=t_1)}$.. Totale Spannungen zum Zeitpunkt t_I [kN/cm^2]
- ΔT Temperaturdifferenz [$^{\circ}\text{C}$]
- α_C Temperaturausdehnungskoeffizient Beton = 10,0 [$\mu\varepsilon/^{\circ}\text{C}$]

Fall B: Behinderte Ausdehnung

Die temperaturbedingten Dehnungen im Pfahl ergeben sich mit Formel (5.29) folgendermaßen:

$$\varepsilon_{T-Obs}(t=t_1) = \varepsilon_{Messung}(t=t_1) - \varepsilon_{Messung}(t=R_1) + \alpha_S \cdot \Delta T$$

$$\varepsilon_{T-Obs}(t=t_1) = [(R_{t_1} - R_{t_0}) \cdot C + \Delta T \cdot (\alpha_S - \alpha_C)] - [(R_{R_1} - R_{t_0}) \cdot C + \Delta T \cdot (\alpha_S - \alpha_C)] + \alpha_S \cdot \Delta T \quad (5.40)$$

$$\varepsilon_{T-Obs}(t=t_1) = (R_{t_1} - R_{R_1}) \cdot C + \alpha_S \cdot \Delta T \quad (5.42)$$

- $\varepsilon_{T-Obs}(t=t_1)$.. Temperaturbedingte Dehnung zum Zeitpunkt t_I [$\mu\varepsilon$]
- $\varepsilon_{M(t=R_1)}$ Dehnung zufolge der mechanischen Last im Referenzfall t_{R_1} [$\mu\varepsilon$]
- $\varepsilon_{M(t=t_1)}$ Dehnungen zufolge der mechanischen Last zum Zeitpunkt t_I [$\mu\varepsilon$]
- R_{t_1} Messwert zum Zeitpunkt t_{t_1} [digits]
- R_{R_1} Messwert zum Referenzzeitpunkt t_{R_1} [digits]
- R_{t_0} Nullmessung [digits]
- C Kalibrierungsfaktor
- ΔT Temperaturdifferenz [$^{\circ}\text{C}$]
- α_S Temperaturausdehnungskoeffizient Stahl = 12,2 [$\mu\varepsilon/^{\circ}\text{C}$]
- α_C Temperaturausdehnungskoeffizient Beton = 10,0 [$\mu\varepsilon/^{\circ}\text{C}$]

Anmerkung: Diese Formel (5.42) ist in dieser Form auch im *Geokon Instruction Manual* [73] für die Berechnung der tatsächlichen Dehnungen zu finden.

Nachdem die mechanische Belastung zwischen den Zeitpunkten $t=t_{R_1}$ und $t=t_I$ konstant ist, entspricht die gemessene Dehnungsdifferenz zwischen diesen beiden Zeitpunkten jenem Dehnungsanteil, der durch die Temperaturänderung hervorgerufen wird. Zusätzlich muss aber berücksichtigt werden, dass sich die Stahlsaite anders als der Beton ausdehnt (zweiter Term in (5.42)).

Da im betrachteten Fall die Ausdehnung behindert sind, führt nur der Dehnungsanteil $\varepsilon_{T-Rstr}(t=t_1)$ zu temperaturbedingten Spannungen:

$$\varepsilon_{T-Rstr}(t=t_1) = \varepsilon_{T-Free}(t=t_1) - \varepsilon_{T-Obs}(t=t_1) \quad (5.43)$$

$$\sigma_{T(t=t_1)} = E_P \cdot \varepsilon_{T-Rstr(t=t_1)} \tag{5.44}$$

Die totale Spannung zufolge mechanischer Last und temperaturbedingter Zwängsspannung zum Zeitpunkt t_1 kann mit folgender Formel (5.45) und mit Formel (5.34) berechnet werden.

$$\sigma_{Total(t=t_1)} = \sigma_{M(t=R_1)} + \sigma_{T(t=t_1)} \tag{5.45}$$

$\sigma_{M(t=R_1)}$ Spannungen zufolge der mechanischen Last zum Referenzzeitpunkt t_{R1} [kN/cm²]

$\sigma_{T(t=t_1)}$ Spannungen zufolge thermischer Belastung zum Zeitpunkt t_1 [kN/cm²]

$\sigma_{Total(t=t_1)}$.. Totale Spannungen zum Zeitpunkt t_1 [kN/cm²]

5.2.4.6 Anwendung der angeführten Formeln für den Miozänpfahlversuch B.EM

In diesem Abschnitt werden folgende ermittelten Dehnungen des Miozänpfahls B.EM in Diagrammen präsentiert:

- Freie Längsdehnungen ε_{T-Free}
- Temperaturbedingte Längsdehnungen ε_{T-Obs}
- Behinderte Längsdehnungen ε_{T-Rstr}

In **Abb. 5.35** sind die berechneten Dehnungen und die Formeln, die dafür verwendet werden, beispielhaft für den Messquerschnitt 1 abgebildet. Die Messdaten für die einzelnen Zeitpunkte werden aus den Rohdaten herausgelesen und daraus die gesuchten Dehnungen berechnet. Für die Referenzzeitpunkte wird $\varepsilon_{M(t=R_1)}$ bzw. R_2) und für alle nachfolgenden Zeitpunkte ε_{T-Obs} berechnet. In einem weiteren Schritt wird die Temperaturdifferenz ΔT ermittelt und daraus die freie Dehnung ε_{T-Free} mit der Formel (5.37) errechnet.

Phase	Versuchsdauer [Zahl]	Formeln		Berechnung der Dehnungen										
		BSP.:	$\Delta T_{R1} = T_{R1} - T_0$	ε_M BS1.1	ε_{T-Obs} BS1.1	ε_{Obs} BS1.1	$\Delta T-1.1$	$\varepsilon_{T-Free,1-1}$	ε_M BS1.2	ε_{T-Obs} BS1.2	ε_{Obs} BS1.2	$\Delta T-1.2$	$\varepsilon_{T-Free,1-2}$	
		BSP.:	$\varepsilon_{T-Free} = \Delta T \cdot \alpha_c$	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	
P0-0	0,000	R0	$\varepsilon_{M-T0} = (R_0 - R_0) \cdot C + \Delta T \cdot (\alpha_s - \alpha_c)$	0,0000		0,0000				0,0000		0,0000		
P0-600	1,007	R1	$\varepsilon_{M-R1} = (R_1 - R_0) \cdot C + \Delta T \cdot (\alpha_s - \alpha_c)$	-0,0282		-0,0302				-0,0337		-0,0357		
P1_EH-600 mit P0-600	21,934	T1	$\varepsilon_{T-Obs} = (R_{T1} - R_{R1}) \cdot C + \Delta T \cdot \alpha_s$		0,1462	0,1160	11,6	0,1160		0,1048	0,0691	8,0	0,0800	
P2_AK-600 mit P0-600	22,979	T2	$\varepsilon_{T-Obs} = (R_{T2} - R_{R1}) \cdot C + \Delta T \cdot \alpha_s$		0,0752	0,0450	6,5	0,0650		0,0762	0,0404	6,1	0,0610	
P2_EK-600 mit P2_AK-600	40,942	T3	$\varepsilon_{T-Obs} = (R_{T3} - R_{T2}) \cdot C + \Delta T \cdot \alpha_s$		-0,1584	-0,1134	-11,1	-0,1110		-0,1049	-0,0645	-7,6	-0,0760	
P2_EK-600 mit P0-600	40,942	T4	$\varepsilon_{T-Obs} = (R_{T4} - R_{R1}) \cdot C + \Delta T \cdot \alpha_s$		-0,0832	-0,1134	-4,6	-0,0460		-0,0287	-0,0645	-1,5	-0,0150	
P0-800	0,531	R2	$\varepsilon_{M-R2} = (R_2 - R_0) \cdot C + \Delta T \cdot (\alpha_s - \alpha_c)$	-0,0394		-0,0384				-0,0460		-0,0450		
P3_AH-800 mit P0-800	41,354	T5	$\varepsilon_{T-Obs} = (R_{T5} - R_{R2}) \cdot C + \Delta T \cdot \alpha_s$		-0,0716	-0,1100	-4,3	-0,0430		-0,0310	-0,0760	-1,6	-0,0160	
P3_EH-800 mit P3_AH-800	55,146	T6	$\varepsilon_{T-Obs} = (R_{T6} - R_{T5}) \cdot C + \Delta T \cdot \alpha_s$		0,1933	0,0833	14,0	0,1400		0,0977	0,0218	7,0	0,0700	
P4_AK-800 mit P0-800	55,274	T7	$\varepsilon_{T-Obs} = (R_{T7} - R_{R2}) \cdot C + \Delta T \cdot \alpha_s$		0,1002	0,0618	8,6	0,0860		0,0672	0,0222	5,4	0,0540	
P4_EK-800 mit P4_AK-800	70,063	T8	$\varepsilon_{T-Obs} = (R_{T8} - R_{T7}) \cdot C + \Delta T \cdot \alpha_s$		-0,1817	-0,1199	-13,2	-0,1320		-0,1057	-0,0835	-7,4	-0,0740	

Abb. 5.35: Ausschnitt aus der Berechnung der Längsdehnungen - Miozänpfahl BEM

Es wurden Diagramme für alle errechneten Dehnungen einzeln erstellt und zu Vergleichszwecken dargestellt. Das Diagramm mit den freien Dehnungen ε_{T-Free} ist in **Abb. 5.36** zu sehen und die dazugehörigen Temperaturdifferenzen in **Abb. 5.42**. Die temperaturbedingten Dehnungen ε_{T-Obs} sind im Diagramm in **Abb. 5.37** gezeigt. Das Diagramm mit den behinderten Dehnungen ε_{T-Rstr} ist in **Abb. 5.38** zu finden.

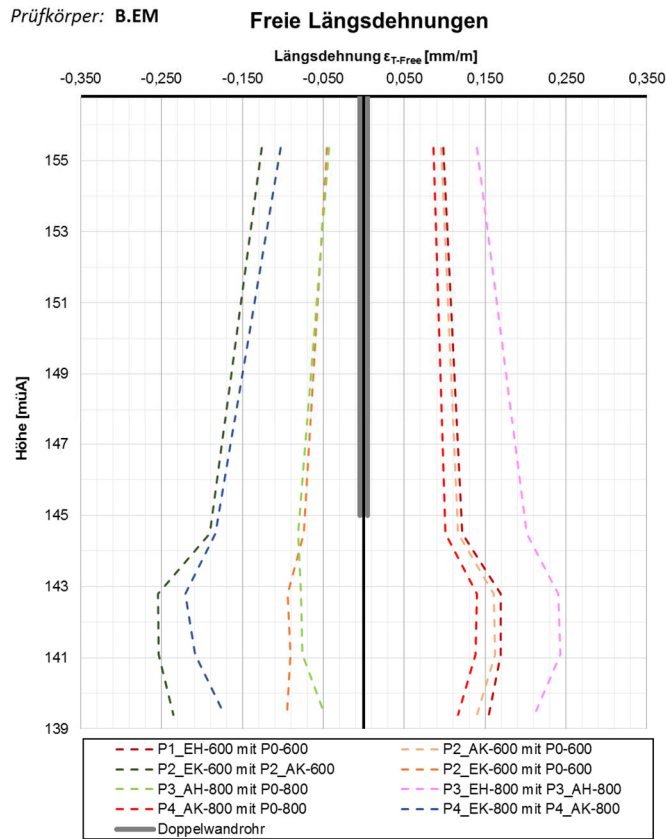


Abb. 5.36: Freie Dehnungen ϵ_{T-Free} - Miozänpfahl BEM

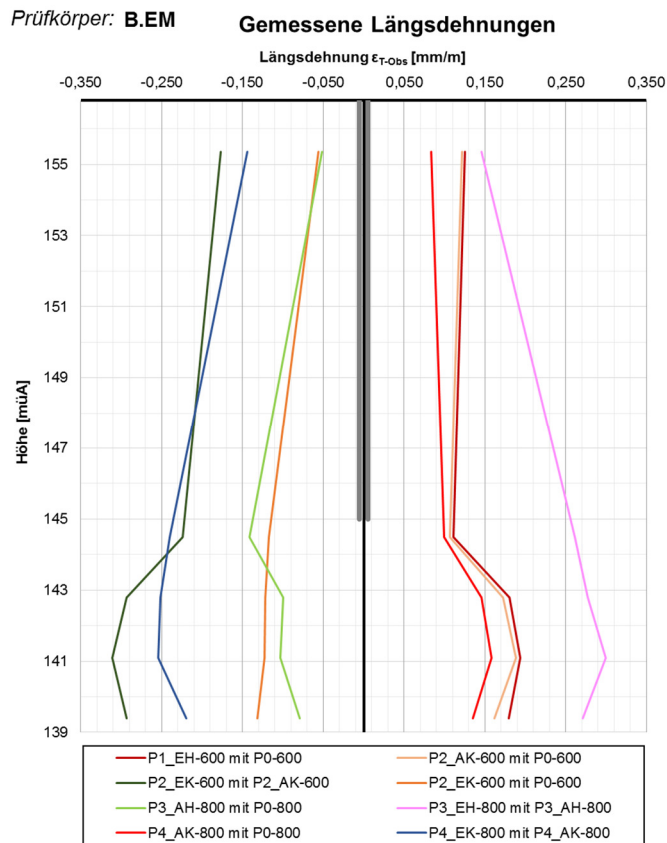


Abb. 5.37: Temperaturbedingte Längsdehnungen ϵ_{T-Obs} - Miozänpfahl BEM

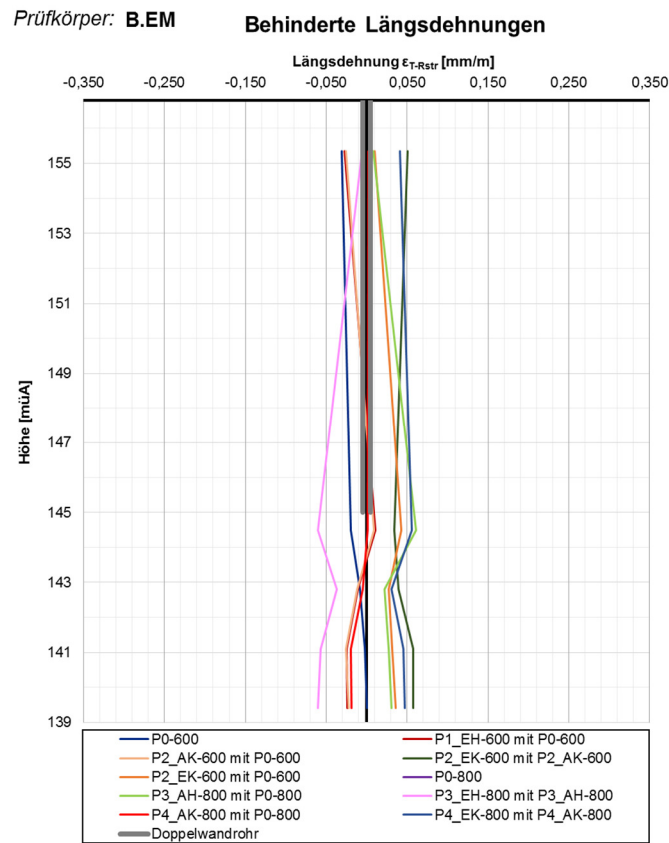


Abb. 5.38: Behinderten Längsdehnungen ϵ_{T-Rstr} - Miozänpfahl BEM

Für Vergleichszwecke wurden die einzelnen Dehnungen auch gemeinsam für jede Laststufe dargestellt. Das Diagramm für die Zeitpunkte mit einer Last von 600 kN ist in **Abb. 5.39** und das Diagramm für eine Last von 800 kN ist in **Abb. 5.40** zu sehen.

Prüfkörper: **B.EM**

Vergleich ϵ_{T-Free} , ϵ_{T-Obs} und ϵ_M - Last 600 kN

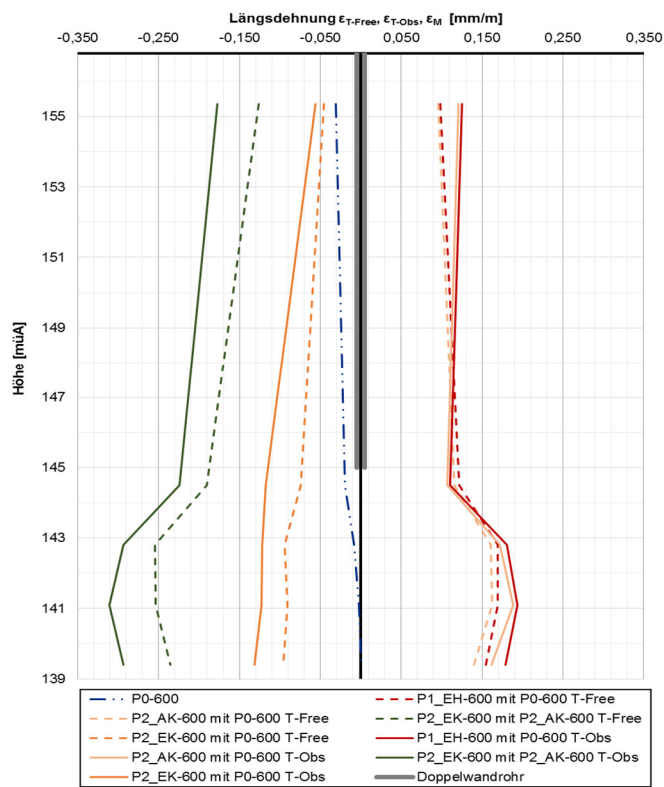


Abb. 5.39: Diagramm – Längsdehnungen Laststufe 600 kN - Miozänpfahl BEM

Prüfkörper: **B.EM**

Vergleich ϵ_{T-Free} , ϵ_{T-Obs} und ϵ_M - Last 800 kN

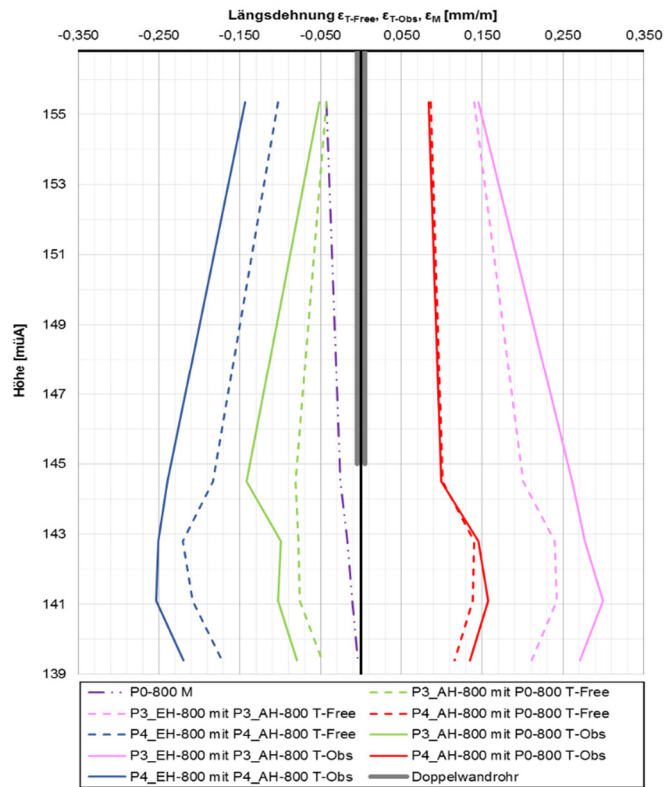


Abb. 5.40: Diagramm – Längsdehnungen Laststufe 800 kN - Miozänpfahl BEM

Die Temperaturdifferenzen ΔT zwischen den Zeitpunkten für alle Messquerschnitte sind in **Abb. 5.41** gegeben. Da zwei Messaufnehmer pro Messquerschnitt vorhanden sind, wird der Mittelwert dieser beiden gebildet und im Diagramm in **Abb. 5.42** über die Tiefe dargestellt.

Temperatur BS- ΔT		ΔT -BS1.1 [°C] Höhe:	ΔT -BS1.2 [°C] Höhe:	ΔT -BS2.1 [°C] Höhe:	ΔT -BS2.2 [°C] Höhe:	ΔT -BS3.1 [°C] Höhe:	ΔT -BS3.2 [°C] Höhe:	ΔT -BS4.1 [°C] Höhe:	ΔT -BS4.2 [°C] Höhe:	ΔT -BS5.1 [°C] Höhe:	ΔT -BS5.2 [°C] Höhe:
Zeitpunkte	Versuchstage	155,35	155,35	144,50	144,50	142,80	142,80	141,10	141,10	139,40	139,40
P0-0	0,00	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P0-600	1,01	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P1_EH-600 mit P0-600	21,93	11,6	8	14,2	10,1	16,8	17,1	17	16,8	15,6	15,4
P2_AK-600 mit P0-600	22,40	11,2	8	13,65	9,55	16,1	16	16,4	16,1	14,3	13,7
P2_EK-600 mit P2_AK-600	40,94	-15,8	-9,5	-20,45	-17,65	-25,1	-25,8	-25,2	-25,5	-23,1	-24
P2_EK-600 mit P0-600	40,94	-4,6	-1,5	-6,8	-8,1	-9	-9,8	-8,8	-9,4	-8,8	-10,3
P0-800	0,53	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
P3_AH-800 mit P0-800	41,35	-4,3	-1,6	-7,4	-8,8	-8	-7,5	-7,9	-7,3	-5,6	-4,1
P3_EH-800 mit P3_AH-800	55,15	14	7	20,2	20	23,9	24,1	24	24,55	21,3	20,9
P4_AK-800 mit P0-800	55,27	8,6	5,4	11,45	8,7	14,3	13,7	14,7	12,95	12,1	11,1
P4_EK-800 mit P4_AK-800	70,06	-13,2	-7,4	-19,25	-17,5	-22,5	-21,7	-22,7	-19	-18,1	-16,3

Abb. 5.41: Ausschnitt aus Auswertung - ΔT der Bewehrungssensoren - Miozänpfahl BEM

Prüfkörper: B.EM Temperaturänderungen (BS) zw. den gewählten Zeitpunkten

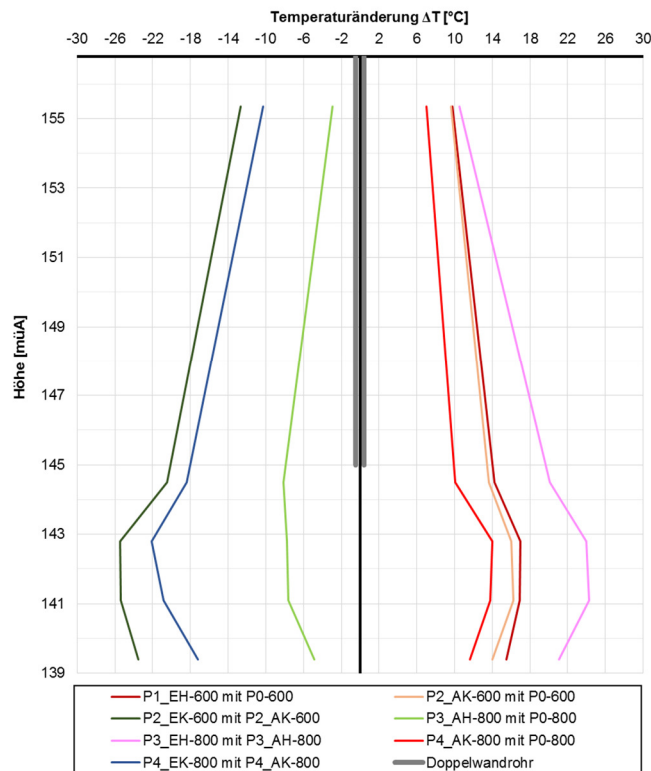


Abb. 5.42: Temperaturdifferenz ΔT der Bewehrungssensoren - Miozänpfahl BEM

Die Temperaturdaten der Bewehrungssensoren sind in **Abb. 5.43** gegeben. Da zwei Messaufnehmer pro Messquerschnitt vorhanden sind, wird der Mittelwert dieser beiden gebildet und im Diagramm in **Abb. 5.44** über die Tiefe dargestellt.

Temperatur BS		BS1.1 [°C]	BS1.2 [°C]	BS2.1 [°C]	BS2.2 [°C]	BS3.1 [°C]	BS3.2 [°C]	BS4.1 [°C]	BS4.2 [°C]	BS5.1 [°C]	BS5.2 [°C]
Versuchstage		Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:
		155,35	155,35	144,50	144,50	142,80	142,80	141,10	141,10	139,40	139,40
P0-0	0,00	15,5	15,8	14,85	17,2	14,2	13,9	13,9	13	13,3	13,1
P0-600	1,01	15,3	15,6	14,85	17,5	14,4	14,5	14,1	13,6	14,3	15,2
P1_EH-600	21,93	26,90	23,6	29,05	27,6	31,2	31,6	31,1	30,4	29,9	30,6
P2_AK-600	22,40	26,50	23,6	28,5	27,05	30,5	30,5	30,5	29,7	28,6	28,9
P2_EK-600	40,94	10,70	14,1	8,05	9,4	5,4	4,7	5,3	4,2	5,5	4,9
P0-800	0,53	15,6	15,9	-99	15,8	14,2	14	13,9	13	13,3	13,1
P3_AH-800	41,35	11,3	14,3	7,5	-99	6,2	6,5	6	5,7	7,7	9
P3_EH-800	55,15	25,3	21,3	-99	23,2	30,1	30,6	30	-99	29	29,9
P4_AK-800	55,27	24,2	21,3	-99	19,3	28,5	27,7	28,6	-99	25,4	24,2
P4_EK-800	70,06	11	13,9	7,1	-99	6	6	5,9	-99	7,3	7,9

Abb. 5.43: Auszug aus Auswertung - Temperatur der Bewehrungssensoren - Miozänpfahl BEM

Prüfkörper: B.EM Temperatur (BS) zu den gewählten Zeitpunkten

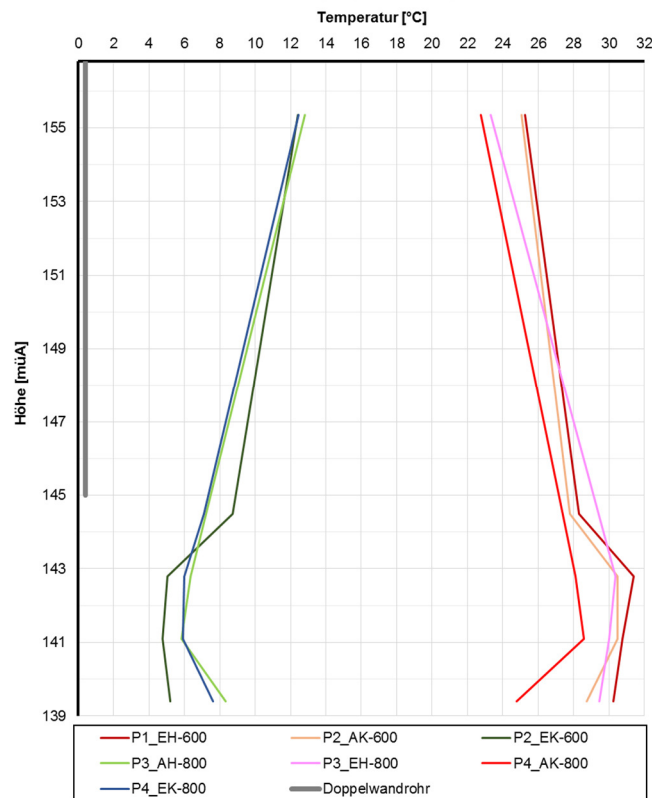


Abb. 5.44: Temperatur der Bewehrungssensoren - Miozänpfahl BEM

Die Temperaturdaten der Zusatzbohrungen sind in **Abb. 5.45** für die Betrachtungszeitpunkte angegeben. Die Temperaturverläufe über die Tiefe in Pfahlmitte, in der Zusatzbohrung TSM1 und in der Zusatzbohrung TSM2 sind für die einzelnen Zeitpunkte, in Diagrammen dargestellt. Es ist je ein Diagramm für den Pfahl, die TS.M1 und die TS.M2 erstellt worden, also drei Diagramme, für jede Phase. Exemplarisch werden hier die drei Diagramme für die Zeitpunkte in der ersten Kühlphase (Phase 2) in **Abb. 5.46** und **Abb. 5.47** dargestellt. Die restlichen Diagramme sind in den gesammelten Ergebnissen im Kapitel 5.3.1 zu finden.

Temperatur Zusatzbohrungen+BS

Versuchstage	TSM1						TSM2						
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]		
	Höhe: [m.ü.A]	Höhe: [m.ü.A]	Höhe: [m.ü.A]	Höhe: [m.ü.A]	Höhe: [m.ü.A]	Höhe: [m.ü.A]	Höhe: [m.ü.A]	Höhe: [m.ü.A]	Höhe: [m.ü.A]	Höhe: [m.ü.A]	Höhe: [m.ü.A]		
P0-0	155,21	144,41	142,91	141,11	139,31	138,71	155,31	144,51	142,71	141,21	139,41	138,81	
P0-0	0,000	15,00	14,25	14,44	14,00	13,38	13,19	16,31	14,69	14,75	14,06	13,56	13,38
P0-600	1,007	14,94	14,25	14,44	14,00	13,38	13,19	16,00	14,69	14,75	14,06	13,56	13,38
P1_EH-600	21,934	18,81	24,56	25,63	25,75	17,00	14,63	18,25	17,38	16,50	15,81	14,69	14,06
P2_AK-600	22,396	18,94	24,63	25,69	25,75	17,06	14,69	18,25	17,44	16,56	15,88	14,75	14,06
P2_EK-600	40,942	15,63	9,88	9,94	9,38	13,13	13,69	18,00	14,75	15,81	15,13	14,44	14,13
P2_EK-600	40,942	15,00	14,25	14,44	14,00	13,38	13,19	16,13	14,63	14,75	14,06	13,56	13,38
P3_AH-800	41,354	15,63	9,81	9,88	9,31	13,06	13,69	18,06	14,69	15,69	15,06	14,38	14,13
P3_EH-800	55,146	18,88	23,13	24,19	24,50	16,38	14,38	17,13	16,19	15,81	15,31	14,50	14,06
P4_AK-800	55,271	18,88	23,13	24,19	24,50	16,38	14,38	17,06	16,25	15,81	15,31	14,50	14,06
P4_EK-800	70,063	16,13	9,94	10,06	9,50	13,25	13,81	18,56	14,69	15,63	15,13	14,50	14,19

Abb. 5.45: Temperatur der Sensoren in den Zusatzbohrungen TSM1 und TSM2 - Miozänpfahl BEM

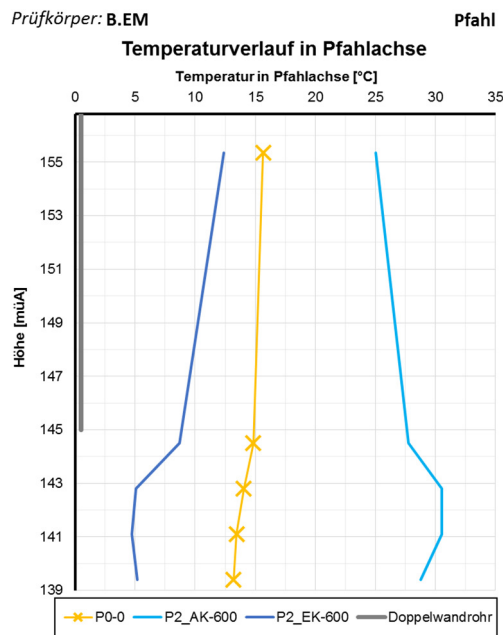


Abb. 5.46: Temperatur in Pfährlachse - Miozänpfahl BEM

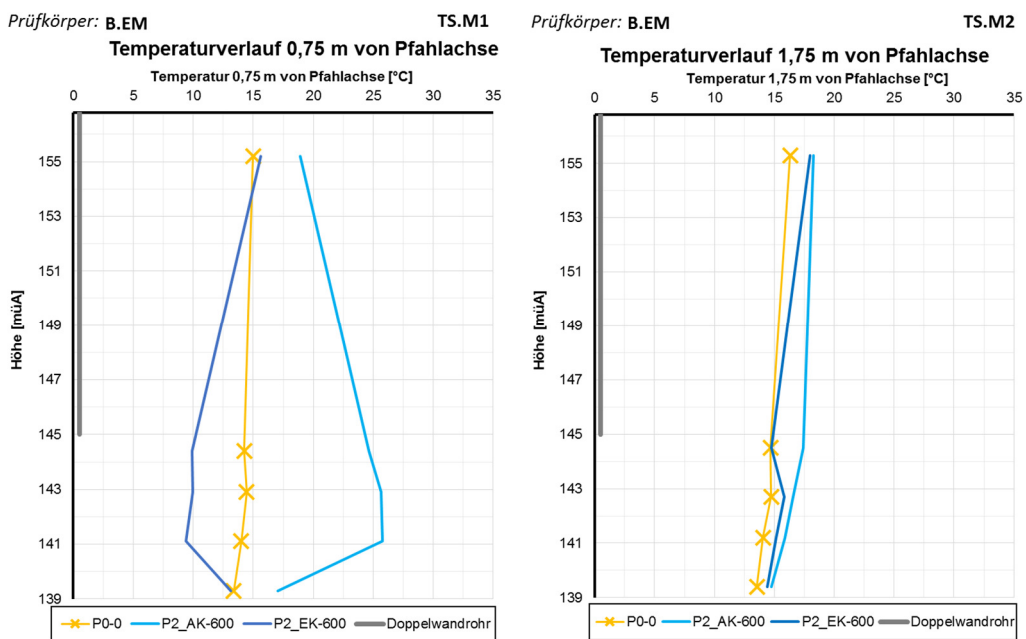


Abb. 5.47: Links: Temperatur TS.M1, Rechts: Temperatur TS.M2 - Miozänpfahl BEM

Wie bei den Temperaturen der Bewehrungssensoren wird auch bei den berechneten Dehnungen der Mittelwert der zwei Sensoren je Messquerschnitt errechnet. Aus den Mittelwerten der Dehnungen $\varepsilon_{M(t=R1 \text{ bzw. } R2)}$ kann dann unter Verwendung der Formel (5.34) die Spannung zufolge der mechanischen Last berechnet werden. Aus den Mittelwerten der Dehnungen ε_{T-Obs} kann mit der Formel (5.44) die temperaturbedingte Spannung berechnet werden. Der E-Modul des Pfahls E_P wird mit der Formel (5.35) für jeden Messquerschnitt berechnet. Ein Auszug aus den Excel-Berechnungen für die temperaturbedingten Spannungen σ_T ist in **Abb. 5.48** zu sehen.

		E-Modul QS3	E-Modul QS4	E-Modul QS5	E-Modul QS6	E-Modul QS7
		[kN/mm ²]	[kN/mm ²]	[kN/mm ²]	[kN/mm ²]	[kN/mm ²]
		44,8	37,5	36,5	36,5	34,8
Spannungen im Pfahl zufolge der Temperatur						
		σ_T -MQ1	σ_T -MQ2	σ_T -MQ3	σ_T -MQ4	σ_T -MQ5
		[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
Versuchstage		3	4	5	6	7
P0-0	0,000					
P0-600	1,007	0	0	0	0	0
P1_EH-600 mit P0-600	21,934	-1232,70	399,51	-406,43	-893,86	-844,18
P2_AK-600 mit P0-600	22,396	-1133,01	352,13	-419,34	-947,06	-765,94
P2_EK-600 mit P2_AK-600	41,942	2275,17	1264,89	1428,68	2109,17	2011,80
P2_EK-600 mit P0-600	41,942	447,65	1617,02	1009,34	1162,11	1245,86
P0-800	0,53	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
P3_AH-800 mit P0-800	42,35	372,67	2271,89	791,83	989,13	1068,91
P3_EH-800 mit P3_AH-800	56,15	-248,46	-2263,65	-1342,01	-2060,68	-2092,59
P4_AK-800 mit P0-800	56,27	103,74	55,45	-192,08	-712,89	-654,73
P4_EK-800 mit P4_AK-800	71,06	1824,06	2109,06	1107,05	1656,57	1656,38

Abb. 5.48: Temperaturinduzierte Spannungen - Miozänpfahl BEM

Die totalen Spannungen σ_{Total} können anschließend durch einfaches Summieren der thermischen und mechanischen Spannungen gemäß Formel (5.45) berechnet werden.

Um schlussendlich die Mantelreibung berechnen zu können, wird zunächst die Normalkraft im Pfahl aus den totalen Spannungen berechnet, diese wird nach dem *Hooke'schen Gesetz* (Formel (5.13)) errechnet. Der Normalkraftverlauf im Pfahl in den einzelnen Betrachtungszeitpunkten wird in zwei Diagramme aufgeteilt.

In **Abb. 5.49** ist ein Auszug aus der Excel-Tabellenberechnung für die Mantelreibung gezeigt. Für die Berechnung der Mantelreibung wird die zuvor berechnete Normalkraft im Messabschnitt (z.B. $\Delta MQ1-2$) durch die Mantelfläche des Messabschnitts dividiert.

		Berechnung der Mantelreibung zwischen den Messquerschnitten							
		$\Delta MQ1-2$	$\Delta MQ2-3$	$\Delta MQ3-4$	$\Delta MQ4-5$	$q_s (MQ1-2)$	$q_s (MQ2-3)$	$q_s (MQ3-4)$	$q_s (MQ4-5)$
		[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]
Höhe m.ü.A.		145,00	144,50	142,80	141,10				
Höhe m.ü.A.		144,50	142,80	141,10	139,40				
P0-0	Versuchstage	0,000							
P0-600		1,007							
P1_EH-600 mit P0-600		21,934							
P2_AK-600 mit P0-600		22,396							
P2_EK-600 mit P2_AK-600		41,942							
P2_EK-600 mit P0-600		41,942							
P0-800		0,53							
P3_AH-800 mit P0-800		42,35							
P3_EH-800 mit P3_AH-800		56,15							
P4_AK-800 mit P0-800		56,27							
P4_EK-800 mit P4_AK-800		71,06							

Abb. 5.49: Berechnung der Mantelreibung - Miozänpfahl BEM

Mit der Berechnung der Mantelreibung ist die Auswertung der Längsdehnungen vorerst abgeschlossen. Es werden die Diagramme der gesamten Auswertung beider Versuche (Miozänpfahl B.EM und Kiespfahl B.EK) gesammelt in den folgenden Abschnitten präsentiert.

5.3 Ergebnisse Miozänpfahlversuch B.EM

5.3.1 Ergebnisse Phasen 0 bis 5

Die Ergebnisse der Auswertung der Phasen 0 bis 5 wurden zuvor im Kapitel 5.2 genau erläutert. Die gesammelte Auswertung des B.EM Pfahls ist im ANHANG E zu finden. In dieser Ergebnissammlung sind nicht nur die zuvor erläuterten Diagramme, sondern exemplarisch auch ausgewählte Daten zusammengestellt.

5.3.2 Ergebnisse Phase 6 Miozänpfahl B.EM im Vergleich mit Großbohrpfahl B.M5

5.3.2.1 Allgemein

Die statische Pfahlprobelastung (Phase 6 beim Versuch B.EM) wurde, wie schon zuvor erwähnt, identisch wie die Versuche an den anderen Großbohrpfählen des Projekts durchgeführt. Informationen dazu, und zu deren Auswertung können in der Diplomarbeit von *Christina Marzy* [CM] (vgl. **Tab. 1.1**) gefunden werden.

Der einzige Unterschied zu den „normalen“ Pfahlprobelastung ist, dass der Energiepfahl schon vorbelastet wurde. Die maximale Last der Lastvariationen während des Energiepfahlversuches betrug zwar nur 125% der Gebrauchslast (also weit unter der Bruchlast), jedoch verformte sich der Miozänpfahl B.EM durch die aufgebrachte Belastung sowie die Heiz- und Kühlzyklen während der Phasen 0 bis 5. Nach Abschluss der Phasen 0 bis 5, somit also zu Beginn der Phase 6 (Pfahlprobelastung) war im Vergleich zur Nullmessung (Phase 0) eine Vorverformung von 1,5 mm bei einer Last von 300 kN (Systemlast Stahlaufbau) vorhanden. Da die Wegaufnehmer zwischen dem Ende der Phase 5 und Beginn der Phase 6 aufgrund des Umbaus ab- und wieder aufgebaut wurden starteten die Messungen der Pfahlkopfverschiebung mit der Phase 6 bei Null. Um die für die Auswertung der Phase 6 zu berücksichtigende Setzung zu ermitteln, wurde die Differenz der Pfahlsetzung bei Laststufe 1 (Last 238 kN) der Pfahlprobelastung und der Vorverformung (Last 300 kN) gebildet und jeweils zum Mittelwert der gemessenen vertikalen Pfahlkopfverformung addiert.

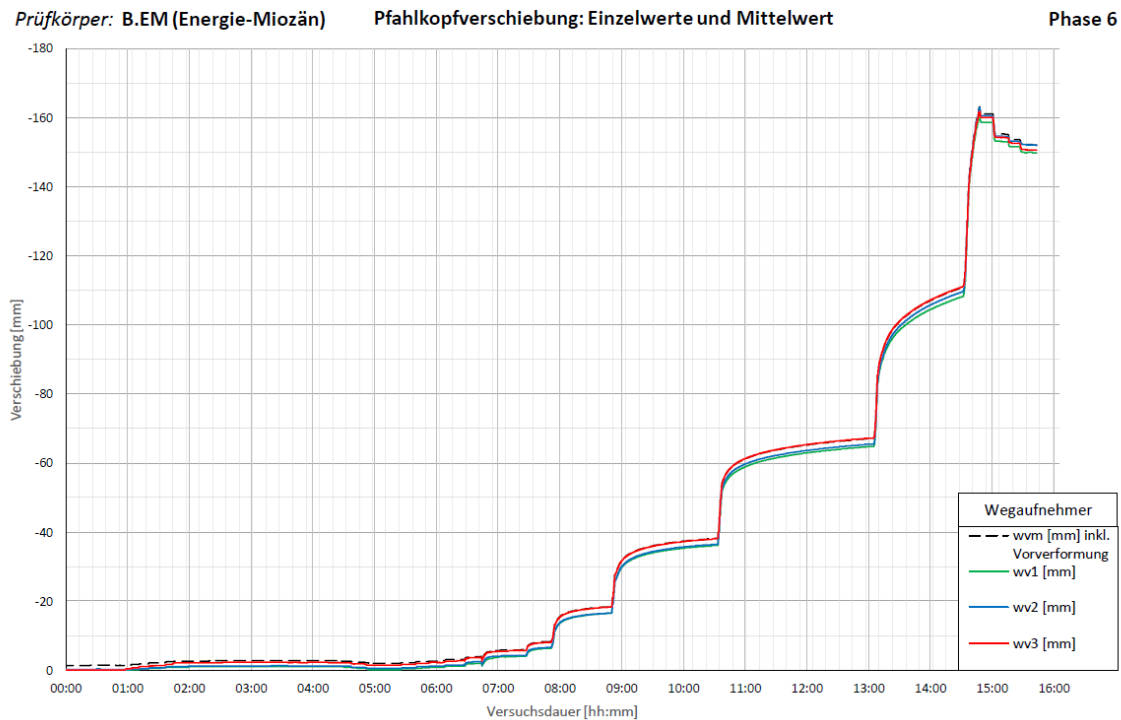


Abb. 5.50: Pfahlkopfverschiebung Phase 6– Miozänpfahl B.EM

Im Diagramm in **Abb. 5.50** geben die drei vertikalen Wegaufnehmer (WV1, WV2 und WV3) die tatsächlich gemessenen vertikalen Pfahlkopfverschiebungen an und der Mittelwert der vertikalen Wegaufnehmer die mit der Vorverformung korrigierte Pfahlkopfverformung an. In **Abb. 5.51** sind die Kraft und die Pfahlkopfverschiebung in den ersten fünf Stunden des Versuchs am Miozänpfahl B.EM dargestellt. Hier ist deutlich zu sehen das die Pfahlkopfverschiebung nicht bei Null beginnt, sondern mit einer Vorverformung von 1,5 mm. Diese fließt auch in die Widerstand-Setzungslinie ein, die in Kapitel 5.3.2.2 erläutert wird.

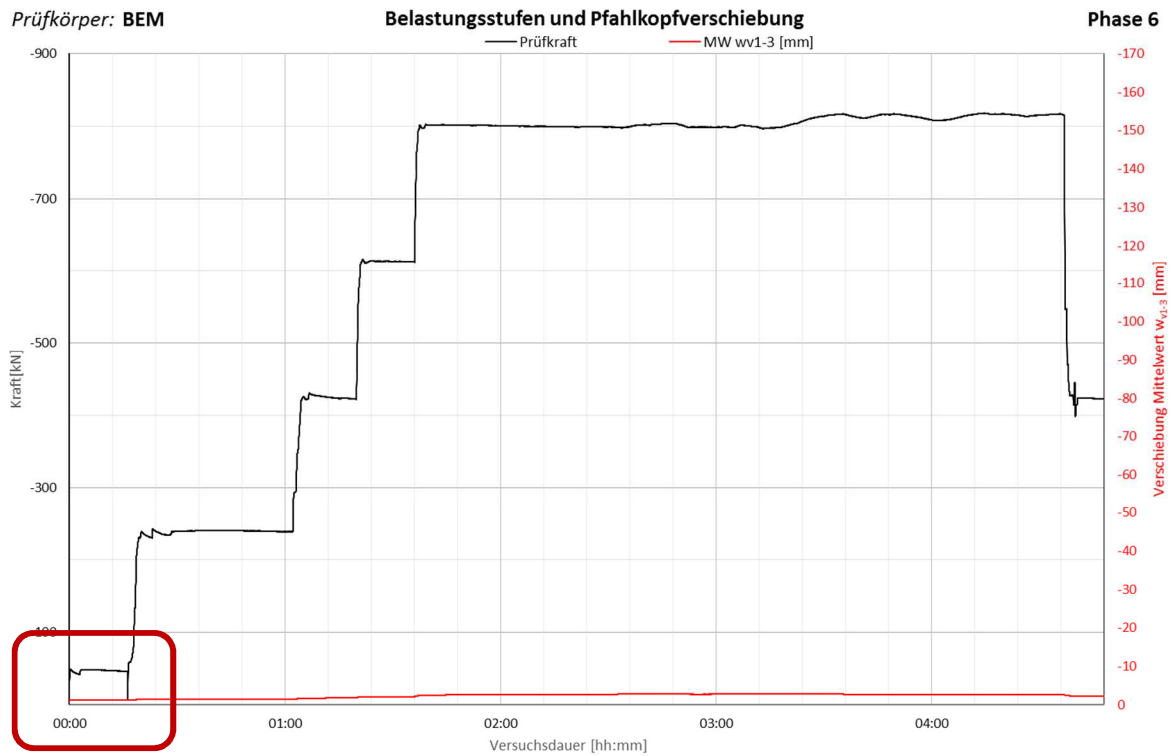


Abb. 5.51: Diagramm Ausschnitt – Kraft über Pfahlkopfverschiebung - Miozänpfahl B.EM

5.3.2.2 Vergleich B.EM mit B.M5

Die Ergebnisse der statischen Pfahlprobebelastung werden gesammelt im ANHANG E gezeigt. Im Folgenden werden die zwei Pfahlprobebelastungen, die am B.EM Pfahl und am B.M5 Pfahl durchgeführt wurden, verglichen. Dazu wird die Widerstand Setzungslinie herangezogen, da diese das Verhalten des Pfahls wiedergibt. Das Diagramm zeigt nicht nur den Pfahlwiderstand R , sondern auch die berechnete Pfahlmantelreibung R_s und den rückgerechneten Pfahlfußwiderstand R_b . In **Abb. 5.52** ist die Widerstands-Setzungslinie des Miozänpfahl B.EM und in **Abb. 5.53** jene des B.M5 Pfahl gezeigt.

Beim Betrachten beider Diagramme wird ersichtlich, dass der maximale Pfahlwiderstand, der bei der Versuchsdurchführung erreicht werden konnte, stark unterschiedlich ist. Beim Energiepfahl (B.EM) konnte eine maximale Kraft von 5400 kN erreicht werden. Die Kraft die beim Versuch am Großbohrpfahl B.M5 erreicht werden konnte, liegt bei 4100 kN also 1300 kN unter jener des Energiepfahls. Die höhere Tragfähigkeit des Energiepfahls kann mehrere Gründe haben. Es sollte jedoch bedacht werden, dass der Energiepfahl schon über eine längere Zeit vorbelastet wurde, wobei die Last allerdings meist unter der Gebrauchslast lag.

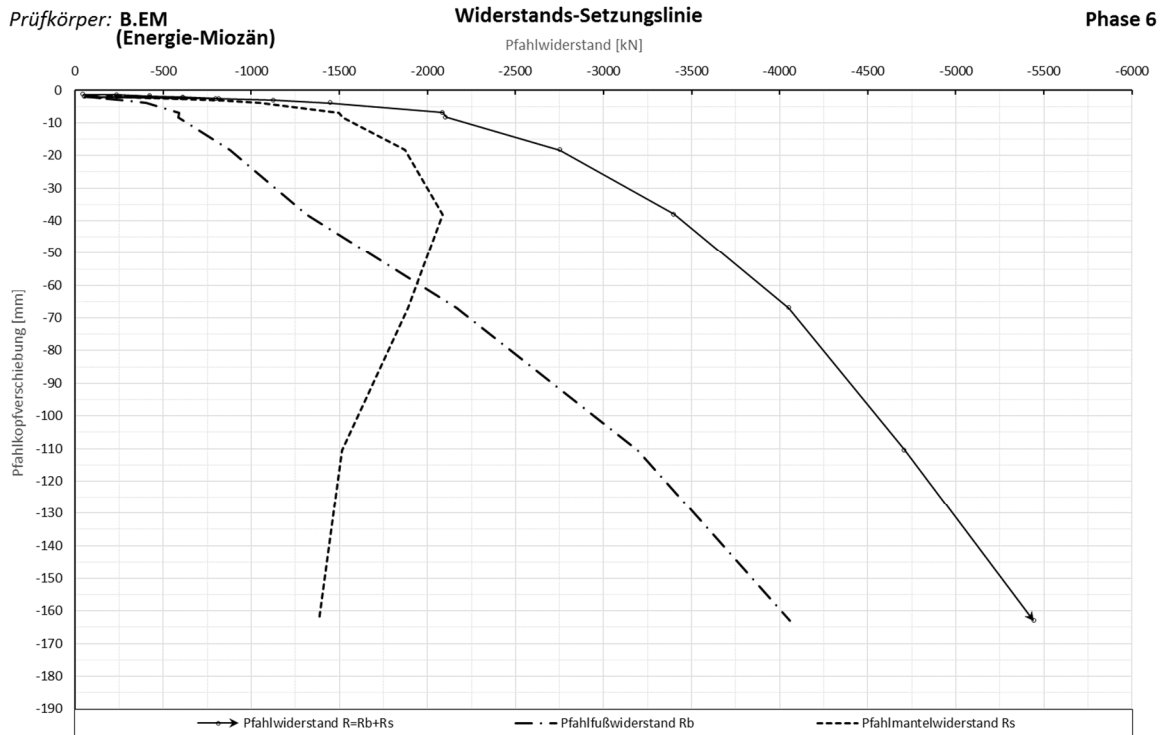


Abb. 5.52: Widerstand-Setzungslinie – Miozänpfahl B.EM

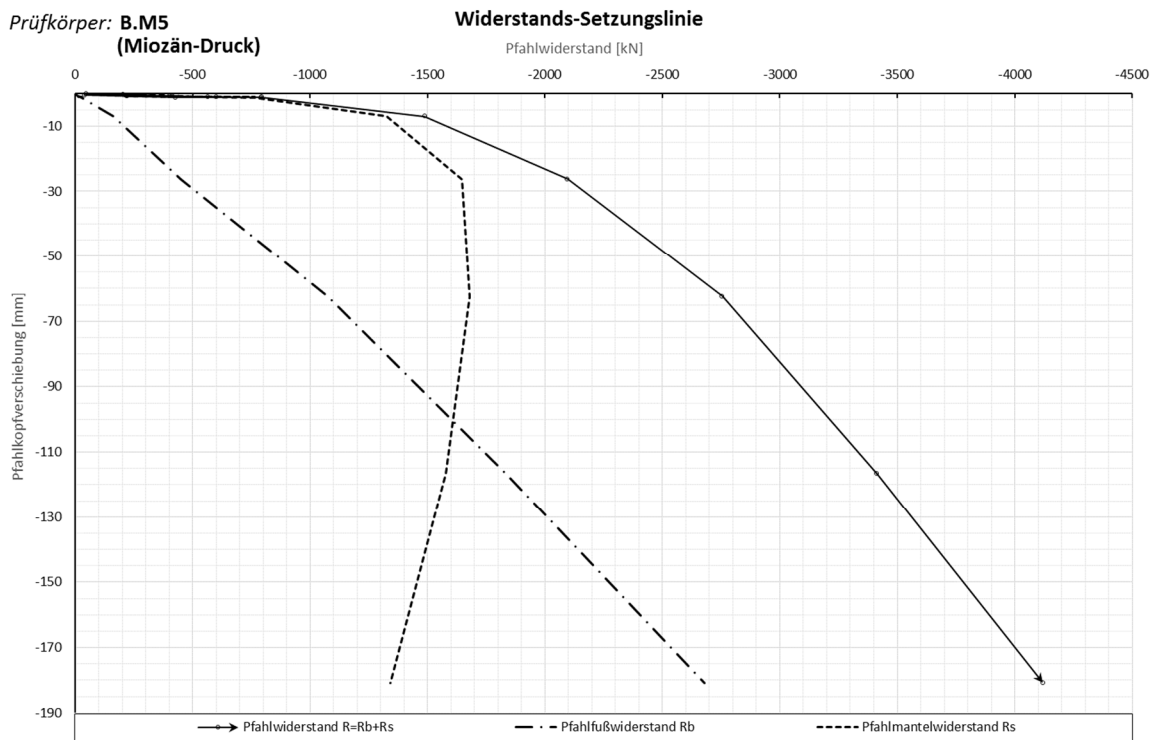


Abb. 5.53: Widerstand-Setzungslinie – Großbohrpfahl B.M5

Die **Tab. 5.6** zeigt eine Zusammenfassung der wichtigsten Faktoren der statischen Pfahlprobelastung des B.EM und B.M5 Pfahls.

Tab. 5.6: Gegenüberstellung der geprüften Miozän Pfähle

	B.EM	B.M5
Durchmesser:	90 cm	90 cm
Länge:	16,8 m	17,0 m
Krafteinleitungsstrecke:	6 m	6,14 m
Lastabtragung im:	Miozän	Miozän
Herstellung:	verrohrt	verrohrt
Doppelmantelrohr:	ja	ja
Maximale Kraft F_{max} :	5440 kN	4120 kN
Setzung aus Belastung vor Versuchsbeginn Phase 6:	1,5 mm	-
Setzung bei F_{max} :	163,1 mm	180,7 mm
Restsetzung auf Vorlast nach Entlastung (Ende Phase 6):	153,6 mm	178,9 mm

5.4 Ergebnisse Kiespfahlversuch B.EK

5.4.1 Ergebnisse Phasen 0 bis 5

Die Auswertung der Phasen 0 bis 5 erfolgt nach dem gleichen Schema, das zuvor anhand des Miozänpfahls B.EM erläutert wurde. Im Weiteren werden die Übersichtsdiagramme des Kiespfahlversuchs präsentiert, um einen Einblick in den Versuch zu bekommen. Die gesamte Auswertung der Phasen 0 bis 5 ist im ANHANG F zu finden.

5.4.1.1 MWES I – Pfahlkopfverformungen und Kraftmessdose

Das Messwerterfassungssystem I liefert die Verformungen vom Pfahlkopf, die auf den Pfahl aufgebraute Kraft und die Außentemperatur. In **Abb. 5.54** und **Abb. 5.55** ist ein Auszug aus der Datenauswertung des MWES I zu sehen. Die aufbereiteten Rohdaten wurden in die Tabelle eingelesen und im orange hinterlegten Teil umgerechnet. Die Kraft wird in die Einheit [kN] umgerechnet und aus den drei vertikalen Wegaufnehmern wird der Mittelwert w_{VI-3} berechnet.

Aufbereitete Rohdaten MWES I											
Monat	Tag	Stunde	Minute	Sekunde	Kraft [N]	wv1 [mm]	wv2 [mm]	wv3 [mm]	wh1 [mm]	wh2 [mm]	Temp °C
7	31	9	13	33	275316,00	0,52	0,31	0,13	0,73	-0,09	26,75
7	31	9	14	33	274301,81	0,49	0,31	0,17	0,76	-0,06	26,77
7	31	9	15	33	274287,63	0,47	0,31	0,20	0,77	-0,03	26,78
7	31	9	16	33	274924,66	0,46	0,31	0,21	0,77	-0,02	26,80
7	31	9	17	33	276100,38	0,46	0,31	0,22	0,78	-0,01	26,78

Abb. 5.54: Auszug aus aufbereiteten Rohdaten MWES1 – Kiespfahl B.EK

Versuchsdauer auf Versuchsstart bezogen [Zahl]	Umrechnungen					
	Prüfkraft [kN]	MW w_{v1-3} [mm]	Median	wv1 [mm]	wv2 [mm]	wv3 [mm]
0,02	-275,32	-0,32	0,31045	-0,52	-0,31	-0,13
0,03	-274,30	-0,32	0,31045	-0,49	-0,31	-0,17
0,03	-274,29	-0,33	0,31045	-0,47	-0,31	-0,20
0,03	-274,92	-0,33	0,30885	-0,46	-0,31	-0,21
0,03	-276,10	-0,33	0,30704	-0,46	-0,31	-0,22
0,03	-276,00	-0,33	0,30681	-0,46	-0,31	-0,22

Abb. 5.55: Auszug aus Datenauswertung MWES1 – Kiespfahl B.EK

Das Diagramm in **Abb. 5.56** zeigt die Kraft auf den Pfahl und das Diagramm in **Abb. 5.57** die vertikale Pfahlkopfverschiebung über den gesamten Versuchszeitraum.

Prüfkörper: B.EK

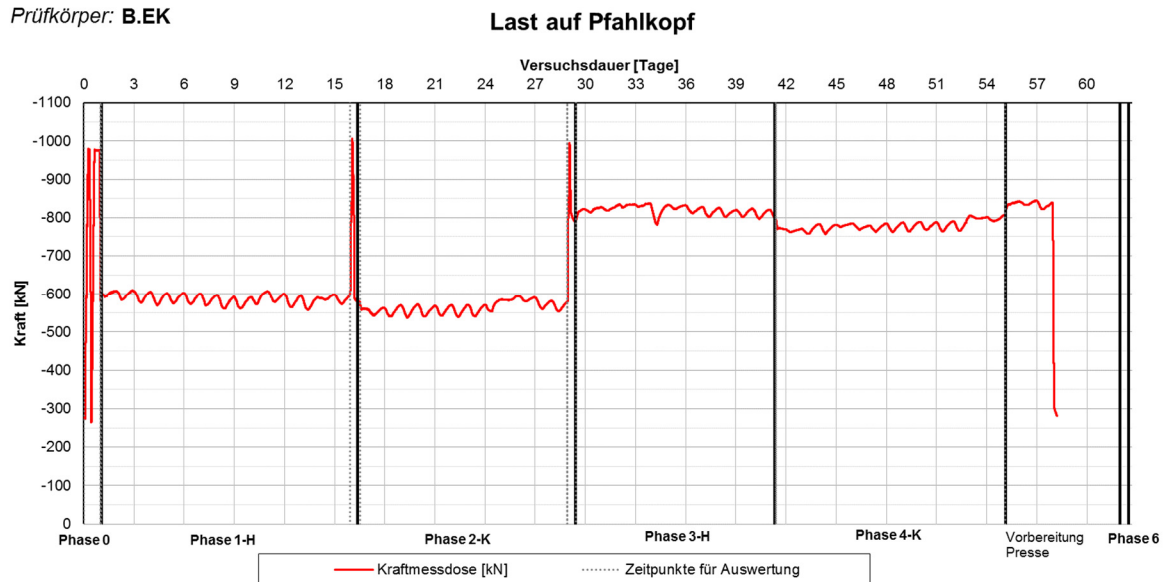
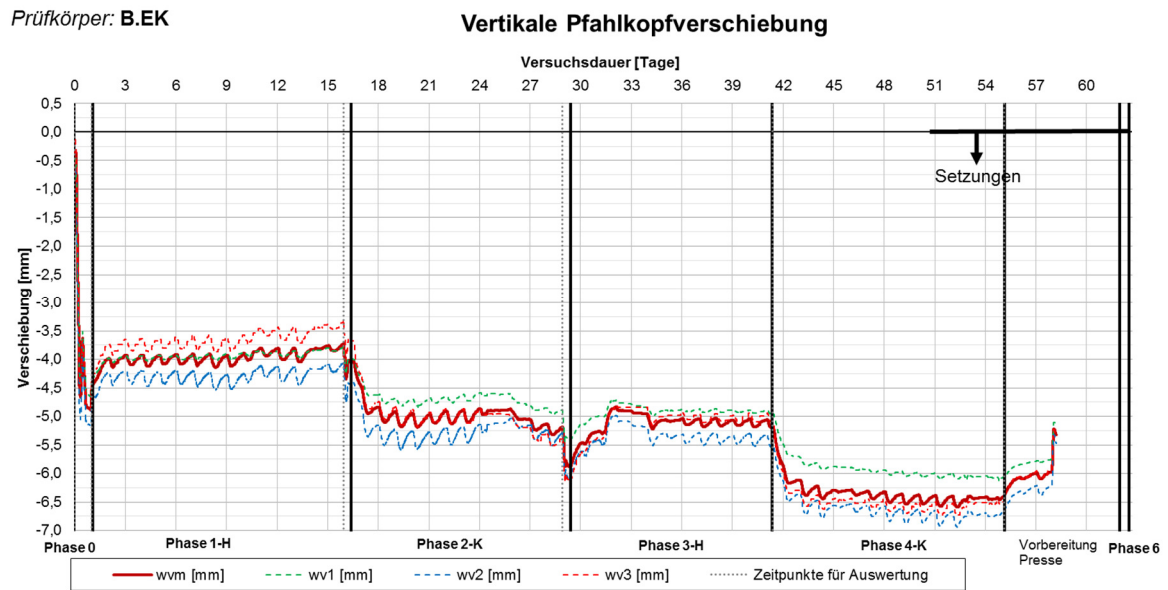


Abb. 5.56: Kraft auf Pfahlkopf über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK



In den Übersichtsdiagrammen sind die Phasenwechsel mit schwarzen Linien markiert. Es ist zu erkennen, dass die Lastvariation zu Beginn des Versuchs im Vergleich zum Miozänpfahl B.EM eine wesentlich größere Verformung hervorgerufen hat. Die vertikale Pfahlkopfverformung ist am Ende von Phase 0 bei ca. -5 mm.

Sofort nach Beginn der Heizphase beginnt sich der Pfahl zu heben, obwohl die Last konstant auf 600 kN gehalten wird. Am Ende der ersten Heizphase liegt der Pfahlkopf ca. -3,75 mm unter seiner Ausgangslage, was eine temperaturbedingte Hebung von 1,25 mm ergibt.

Bemerkenswert bei der vertikalen Pfahlkopfverschiebung ist auch, dass sich der Kiespfahl im Laufe des Versuchs stufenweise setzt. Bei den Phasenübergängen von Phase 1 auf 2 und Phase 2 auf 3 sind immer geringfügige Lastvariationen durchgeführt worden, welche für diese Verschiebung verantwortlich sein könnten. Weiters kann auch eine starke Reaktion des Pfahls auf die Heiz- und Kühlphasen beobachtet werden. Beim Übergang der Phase 3 (Heizen) auf die Phase 4 (Kühlen) wurde keine Lastvariation durchgeführt, weshalb sich ergibt, dass sich der Pfahl um ca. 1,5 mm nur durch die Abkühlung gesetzt hat.

5.4.1.2 MWES II – Dehnungen

Im Messwerterfassungssystem II sind die Messungen der Längsdehnungen mittels Bewehrungssensoren und mittels Kettenextensometer enthalten, sowie die Messungen der Umfangsdehnungen mittels Dehnungssensoren.

Längsdehnungen- Bewehrungssensoren

Es wurden identisch zum Versuch am Miozänpfahl mehrere Zeitpunkte im Versuchsablauf herausgegriffen und ausgewertet. Eine Übersicht über die gemessenen gesamte Längsdehnungen ε_{Obs} und die spannungsbedingten Längsdehnungen ε_{σ} wird in **Abb. 5.59** und **Abb. 5.60** über die gesamte Versuchsdauer gegeben.

In **Abb. 5.58** ist ein Auszug der errechneten Längsdehnungen ε_{σ} und ε_{Obs} des Bewehrungssensors 1.1 zu sehen. Die Formeln für die Berechnung dieser Längsdehnungen wurden bereits im Kapitel 5.2.4 erklärt.

Formeln		Umrechnungen der dg-Werte				
BSP.:	$\Delta T_{R1} = T_{R1} - T_0$	ϵ_M BS1.1	ϵ_{T-OBS} BS1.1	ϵ_{OBS} BS1.1	$\Delta T_{-1.1}$	$\epsilon_{T-Free,1-1}$
BSP.:	$\epsilon_{T-Free} = \Delta T \cdot \alpha_C$	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]
Formeln für die gesamte		0,00000		0,00000		
	$\epsilon_M = (R_x - R_0) \cdot C + \Delta T \cdot (\alpha_s - \alpha_c)$	-0,00016		-0,00116		
	$\epsilon_{Obs} = (R_x - R_0) \cdot C + \Delta T \cdot \alpha_s$	0,00002		0,00002		
		0,00006		0,00006		
		-0,00005		-0,00105		
		-0,00009		-0,00109		

Abb. 5.58: Datenauszug zur Berechnung der Längsdehnungen für das Übersichtsdiagramm Bewehrungssensoren – Kiespfahl B.EK

Prüfkörper: B.EK

Längsdehnungen Bewehrungssensoren ϵ_{Obs} (Auswahl)

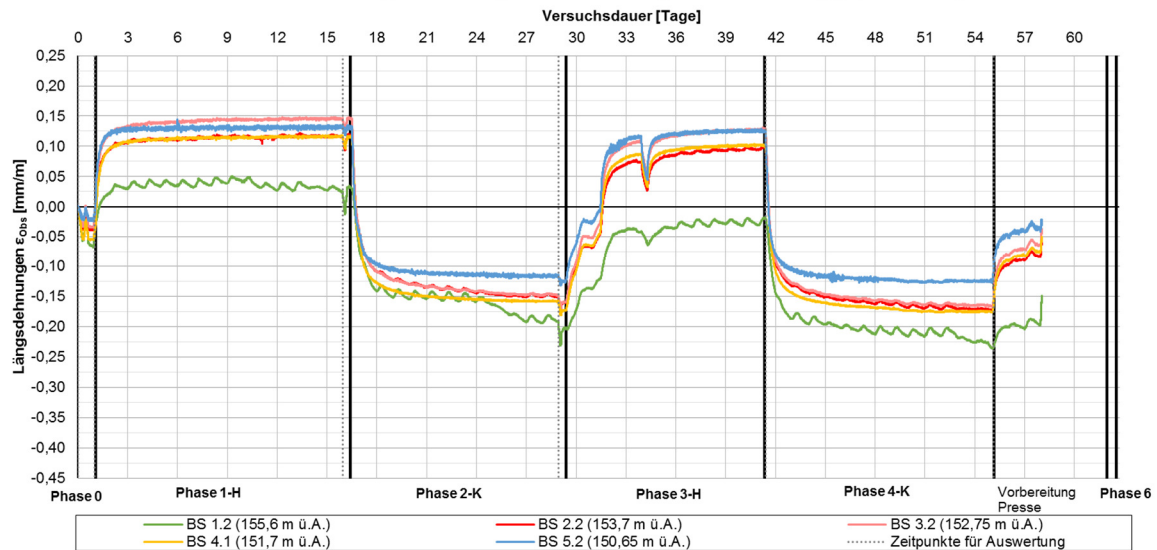


Abb. 5.59: Gemessene gesamte Längsdehnungen ϵ_{Obs} in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK

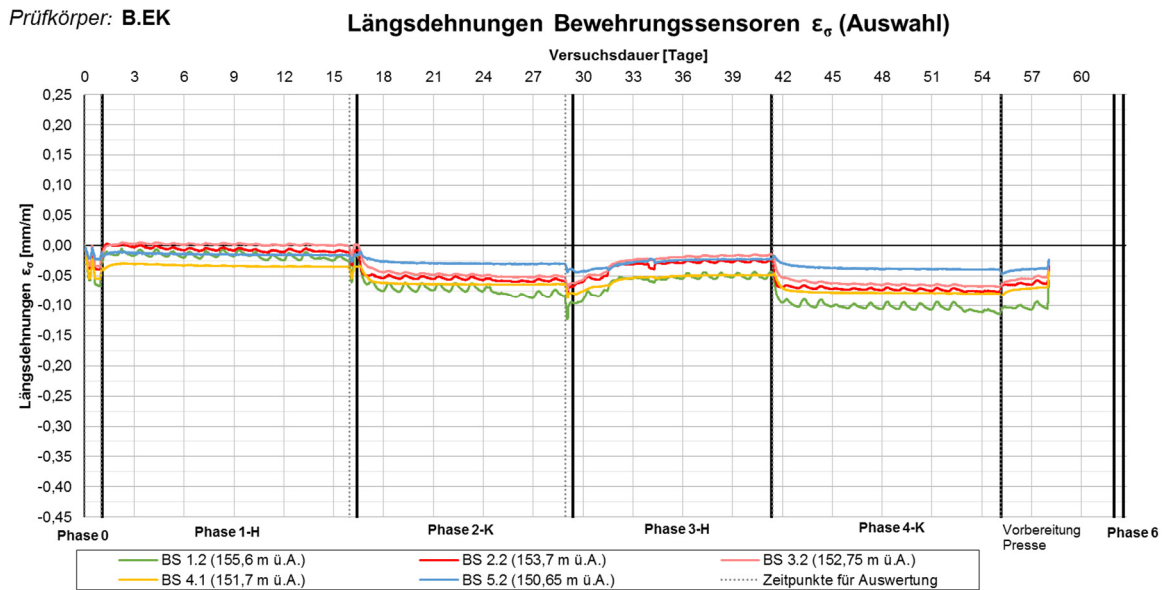


Abb. 5.60: Spannungsbedingte Längsdehnungen ϵ_σ zufolge Spannungen in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK

Die genauere Auswertung der Längsdehnungen erfolgte wie beim Miozänpfahl und ist im ANHANG F zu finden. Dort ist die gesamte Auswertung des Kiespfahl B.EK präsentiert.

Längsdehnungen- Kettenextensometer

In Abb. 5.63 sind die spannungsbedingte Längsdehnungen ϵ_σ über die gesamte Versuchsdauer aufgetragen.

Das Kettenextensometer wurde in sechs Horizonten des Pfahls verankert, womit sich fünf Messabschnitte ergeben. In Kapitel 4.4.2.3 wird auf die Funktionsweise des Kettenextensometers genauer eingegangen. Die fünf Messabschnitte werden mit KEX 1-5 bezeichnet und geben die Längsdehnungen des Pfahls in [digits] an. Die Messzelle liefert aber nicht nur die Dehnungen, sondern auch die Temperatur [°C]. In Abb. 5.61 ist ein Auszug der aufbereiteten Rohdaten zu sehen und in Abb. 5.62 ein Auszug der Kettenextensometerdehnungen ϵ_σ .

Monat	Tag	Stunde	Minute	Sekunde	KEX1	KEX2	KEX3	KEX4	KEX5	KEX1T	KEX2T	KEX3T	KEX4T	KEX5T
					[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
7	31	8	38	0	6081,57	6016,09	6051,29	6106,33	6038,67	26,70	17,40	16,00	15,20	14,60
7	31	8	39	0	6081,73	6016,18	6051,45	6106,40	6038,66	26,80	17,40	16,00	15,10	14,60
7	31	8	40	0	6082,07	6016,30	6051,00	6106,44	6038,58	26,80	17,40	16,00	15,20	14,60
7	31	8	41	0	6081,68	6016,09	6050,88	6106,24	6038,39	26,70	17,40	16,00	15,20	14,60
7	31	8	42	0	6082,01	6016,04	6050,95	6106,83	6038,54	26,80	17,40	16,00	15,20	14,60

Abb. 5.61: Auszug aus den Rohdaten der Kettenextensometersensoren – Kiespfahl B.EK

						Kettenextensometer									
Monat	Tag	Stunde	Minute	Sekunde		KEX1	KEX2	KEX3	KEX4	KEX5	KEX1	KEX2	KEX3	KEX4	KEX5
						[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]
7	31	8	38	0		0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000	0,0000
7	31	8	39	0		-0,0011	-0,0005	-0,0010	-0,0002	0,0001	-0,0004	-0,0005	-0,0009	-0,0002	0,0001
7	31	8	40	0		-0,0032	-0,0013	0,0018	-0,0007	0,0005	-0,0013	-0,0013	0,0018	-0,0007	0,0005
7	31	8	41	0		-0,0007	0,0000	0,0026	0,0006	0,0018	-0,0003	0,0000	0,0025	0,0005	0,0017
7	31	8	42	0		-0,0029	0,0003	0,0021	-0,0031	0,0008	-0,0011	0,0003	0,0021	-0,0030	0,0008
7	31	8	43	0		0,0005	0,0007	0,0019	-0,0032	0,0010	0,0002	0,0007	0,0019	-0,0032	0,0010

Abb. 5.62: Auszug aus der Auswertung der Kettenextensometer- Längsdehnungen – Kiespfahl B.EK

Eine genauere Betrachtung dieser Dehnungsmessungen würde den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Die genaue Auswertung und Interpretation stellt somit ein Ziel für weitere Forschungsarbeiten dar.

Prüfkörper: B.EK

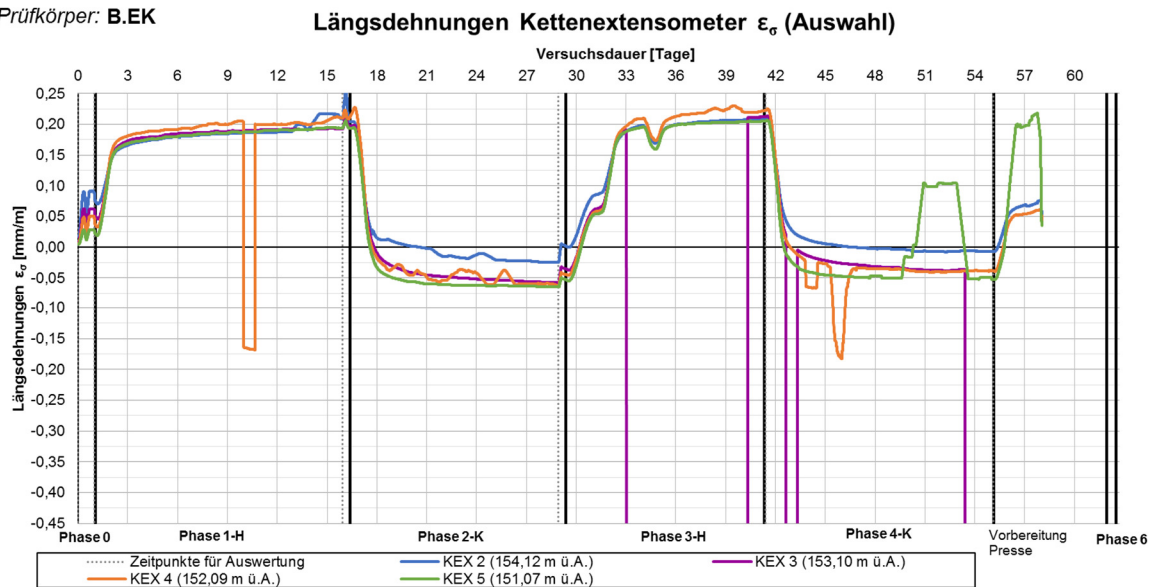


Abb. 5.63: Spannungsbedingte Längsdehnungen ε_σ aus Kettenextensometermessungen in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK

Anmerkung: In dem Diagramm in Abb. 5.63 wurden Trendlinien verwendet, um die Linien zu glätten. Es wurden hierfür Trendlinien mit gleitendem Durchschnitt verwendet.

Umfangsdehnungen

Die Umfangsdehnungen wurden je Messquerschnitt mit vier Dehnungssensoren aufgezeichnet. Insgesamt sind vier Messquerschnitte über die Länge des Pfahls verteilt. Jeder Dehnungssensor liefert nicht nur die gemessenen Dehnungen in [digits] sondern auch die Temperatur in [°C]. In Abb. 5.66 sind die spannungsbedingte Längsdehnungen ε_σ über die gesamte Versuchsdauer aufgetragen. In Abb. 5.64 sind die aufbereiteten Rohdaten am Beispiel des Messquerschnitts 1 zu sehen und in Abb. 5.65 deren Umrechnung.

Aufbereitete Rohdaten								
Monat	Tag	Stunde	Minute	Sekunde	DS1A	DS1B	DS1C	DS1D
					[dg]	[dg]	[dg]	[dg]
				Nullwerte:	794,03	789,26	833,86	836,07
7	31	8	38	0	794,07	789,18	833,94	836,11
7	31	8	39	0	794,01	789,06	833,90	836,04
7	31	8	40	0	793,96	789,24	833,80	836,09
7	31	8	41	0	794,10	789,14	833,81	836,12

Abb. 5.64: Auszug aus den Rohdaten der Dehnungssensoren – Kiespfahl B.EK

					Umrechnungen der dg-Werte			
Monat	Tag	Stunde	Minute	Sekunde	DS1A	DS1B	DS1C	DS1D
					[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]
7	31	8	38	0	0,0001	-0,0005	0,0003	0,0001
7	31	8	39	0	-0,0001	-0,0006	0,0001	-0,0001
7	31	8	40	0	-0,0002	-0,0001	-0,0002	0,0000
7	31	8	41	0	0,0002	-0,0004	-0,0002	0,0001
7	31	8	42	0	0,0001	-0,0002	-0,0005	0,0000

Abb. 5.65: Auszug aus der Auswertung der Umfangsdehnungen – Kiespfahl B.EK

Eine genauere Betrachtung dieser Dehnungsmessungen würde ebenso den Rahmen dieser Arbeit sprengen. Die genauere Auswertung und Interpretation der Umfangsdehnungen stellt somit ein Ziel für weitere Forschungsarbeiten dar.

Prüfkörper: B.EK

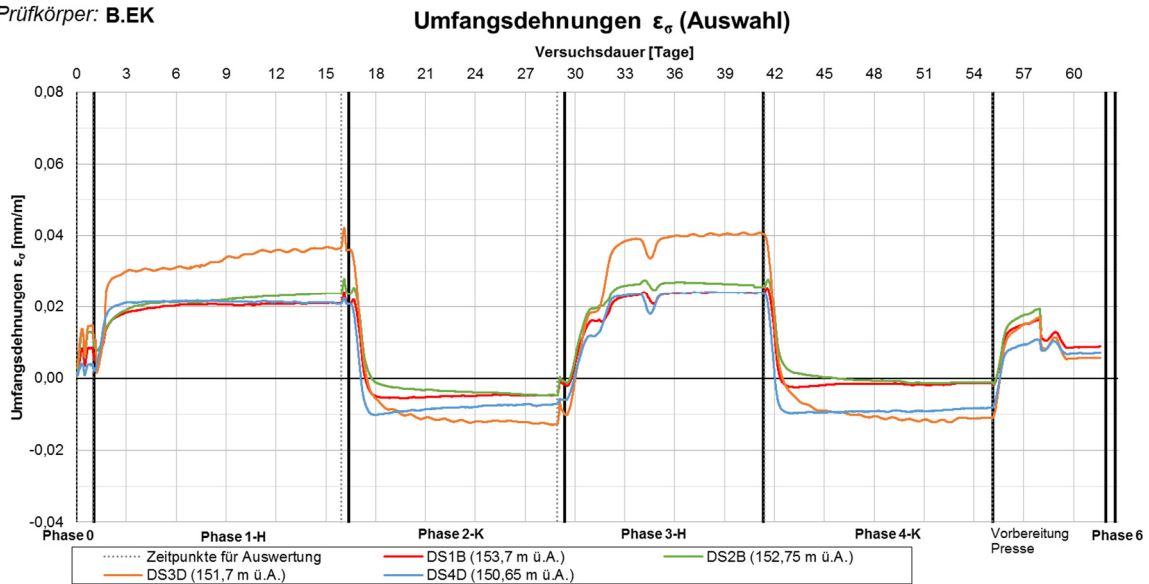


Abb. 5.66: Umfangsdehnungen ϵ_{σ} in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit – Kiespfahl B.EK

Anmerkung: In dem Diagramm in Abb. 5.66 wurden Trendlinien verwendet, um die Linien zu glätten. Es wurden hierfür Trendlinien mit gleitendem Durchschnitt verwendet.

5.4.1.3 MWES II, IV und V – Temperatur

Die Temperaturen im Pfahl und im umliegenden Boden wurden während des Versuches mit drei verschiedenen Messwerterfassungssystemen aufgezeichnet. Die Ausgabewerte der Temperatursensoren mussten nicht in eine andere Einheit umgerechnet werden, da diese bereits in [°C] vorlagen.

Abb. 5.67 zeigt die Temperatur in unterschiedlichen Tiefen des Pfahls (Messquerschnitte 1-5) über die gesamte Versuchsdauer. Für die Interpretation der Längsdehnungen wurden auch Temperaturverläufe über die Tiefe des Pfahls erstellt. Diese sind im **ANHANG F** zu finden.

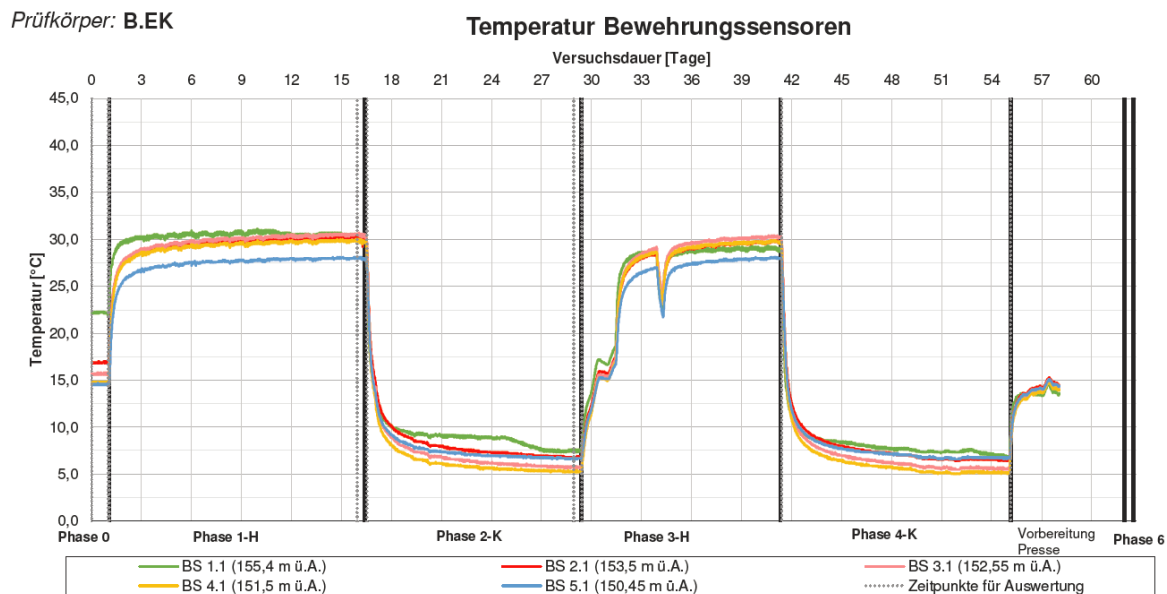


Abb. 5.67: Temperatur Bewehrungssensoren in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK

Das MWES V beinhaltet die Sensoren der *Wien Energie GmbH*, und zwar zum einen Teil die Temperaturen im Pfahl und in den Reaktionspfählen. Zum anderen wurden mit dem MWES V auch die Energieparameter der Energiezentrale erfasst. **Abb. 5.68** zeigt die Vorlauftemperatur des Heiz- und Kühlsystems, die Pfahltemperatur, die Temperatur der Reaktionspfähle und die Außentemperatur über die gesamte Versuchsdauer.

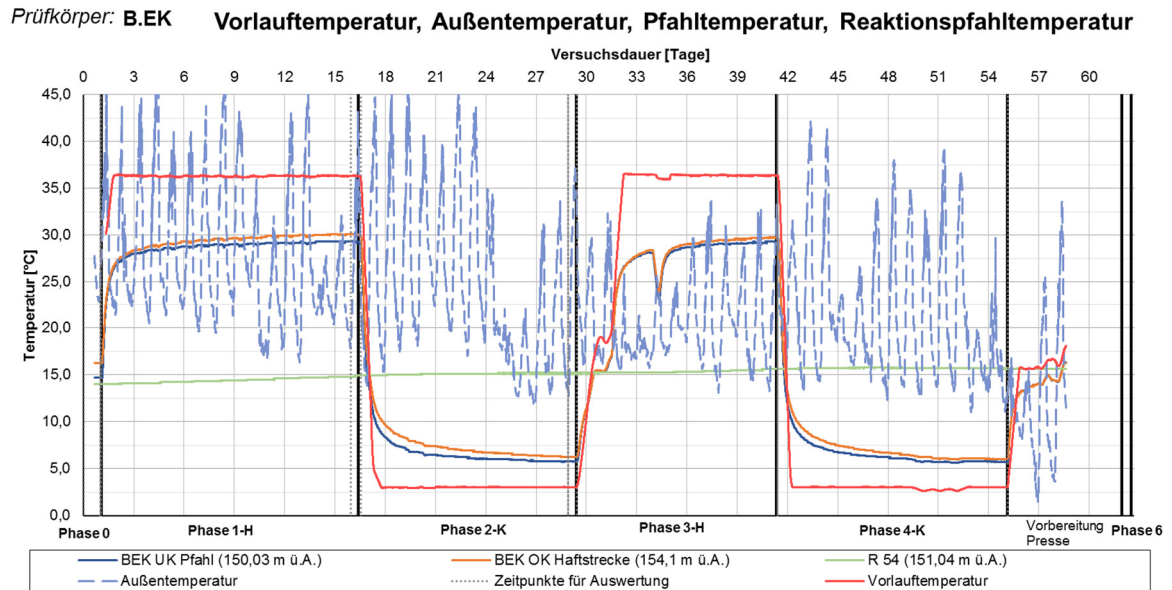


Abb. 5.68: Wien Energie Temperaturdaten in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK

Das MWES IV beinhaltet die Sensoren in den Zusatzbohrungen TS.M1, TS.M2 und TS.K. Die Zusatzbohrung TS.K ist 0,81 m, TS.M2 1,7 m und TS.M1 3,4 m von der Pfahlmitte entfernt. Die Zusatzbohrungen TS.M1 ist zu weit entfernt, dass sie eine relevante Temperaturänderung anzeigt. In **Abb. 5.69** sind die Temperaturen des Pfahls (mittels Bewehrungssensor gemessen) und jene in den Zusatzbohrungen einander gegenübergestellt. Temperaturverläufe über die Tiefe in Pfahlmitte, in der Zusatzbohrung TS.K und in der Zusatzbohrung TS.M2 werden in zusätzlichen Diagrammen dargestellt. Diese Diagramme wurden für ausgewählte Zeitpunkte des Versuchs erstellt und sind im **ANHANG F** gezeigt.

Prüfkörper: B.EK **Pfahltemperatur (BS) & Temperatur in den Zusatzbohrungen auf Höhenkote ca. 152,6 m ü.A.**

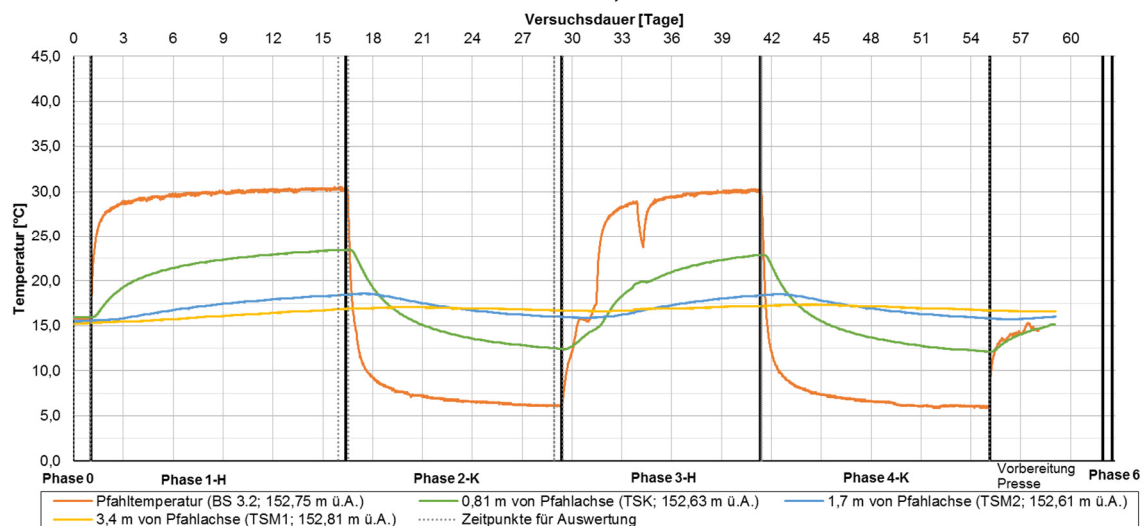


Abb. 5.69: Temperatur Zusatzbohrungen TS.K und TS.M2 mit Temperatur auf einer Höhenkote von ca. 152,7 m ü.A. über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK

In diesem Diagramm ist gut ersichtlich, wie die Temperaturausbreitung mit zunehmendem Abstand vom Pfahl abnimmt. Die Zusatzbohrung TS.M2 ist 1,7 m von der Pfahlachse des Kiespfahls B.EK

entfernt und zeigt nur mehr eine leichte Temperaturänderung an, die zeitlich verzögert ist. Die Bohrung TS.K hingegen zeigt eine deutliche Temperaturänderung des Bodens zufolge der jeweiligen Heiz- und Kühlzyklen an.

5.4.1.4 Grundwassertemperatur

In Ergänzung zur Auswertung des Miozänpfahls wurde für den Kiespfahl noch eine Auswertung hinzugefügt. Die Kiesschicht, in die der Kiespfahl B.EK einbindet, ist eine grundwasserführende Schicht, weswegen bei diesem Versuch auch Pegelmessdaten betrachtet wurden. Wie schon zuvor erwähnt, wurden in der Grundwassermessstelle 1 (GWMS1) der Wasserstand und die Temperatur des Grundwassers während der Versuchsdurchführung des Kiespfahls B.EK gemessen, um verifizieren zu können, ob die Heiz- und Kühlzyklen die Temperatur des Grundwassers beeinflusst hat. Die genaue Lage dieser GWMS 1 ist in **Abb. 4.1** zu finden. Die Temperatur des Grundwassers wurde in einem Übersichtsdiagramm (siehe **Abb. 5.70**) über die Versuchsdauer dargestellt. Zum Vergleich wurden die Messdaten des Vorjahres 2017 im selben Zeitraum auch dargestellt.

Prüfkörper: B.EK Temperatur der Grundwassermessstelle 1 während der Versuchsdurchführung (2018) und im Jahr zuvor (2017)

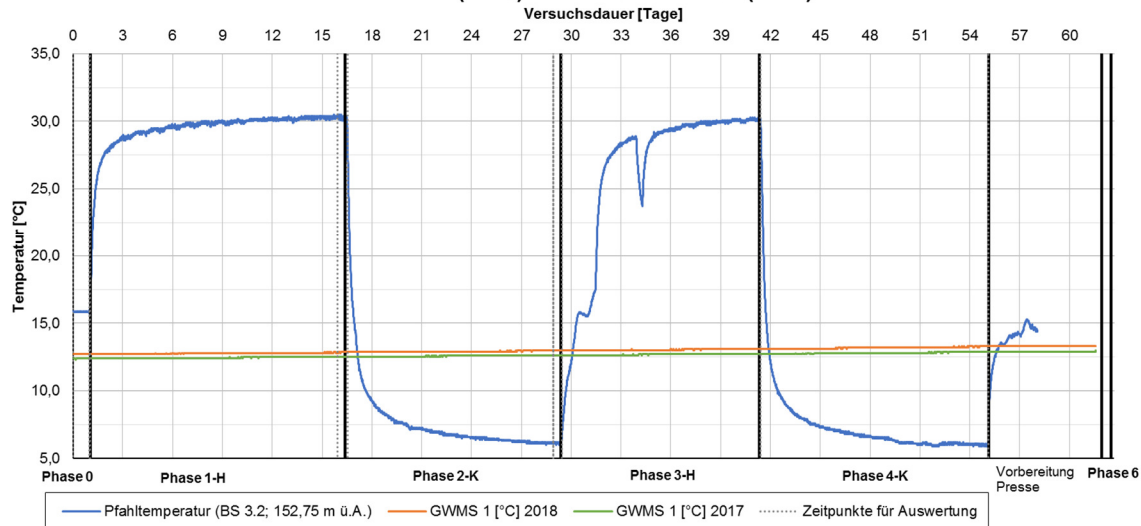


Abb. 5.70: Grundwassertemperatur in GWMS1 – Kiespfahl B.EK

Es zeigt sich, dass die Temperatur des Grundwassers im Vorjahr generell um ca. 0,4 °C kühler war, was auf den überdurchschnittlich warmen Sommer in diesem Jahr (2018) zurückzuführen ist. Während des Versuchszeitraums erwärmte sich in beiden Jahren das Grundwasser um 0,6 °C, was normal aufgrund der sommerlich warmen Außentemperaturen ist. Es ist somit kein Einfluss des Grundwassers durch die Versuchsdurchführung zu erkennen.

5.4.2 Ergebnisse Phase 6 Kiespfahl B.EK im Vergleich mit Großbohrpfahl B.K5

5.4.2.1 Allgemein

Die statische Pfahlprobelastung (Phase 6 beim Kiespfahlversuch B.EK) wurde, wie schon zuvor erwähnt, identisch wie die Versuche an den anderen Großbohrpfählen des Projekts durchgeführt. Informationen dazu, und zu deren Auswertung können in der Diplomarbeit von *Christina Marzy* [CM] (vgl. **Tab. 1.1**) gefunden werden.

Der einzige Unterschied zu den konventionellen Pfahlprobelastung ist, dass der Energiepfahl schon vorbelastet wurde. Die maximale Last der Lastvariationen während des Energiepfahlversuches betrug zwar nur 125% der Gebrauchslast (also weit unter der Bruchlast), jedoch verformte sich der

Kiespfahl B.EK durch die aufgebrachte Belastung sowie die Heiz- und Kühlzyklen während der Phasen 0 bis 5. Nach Abschluss der Phasen 0 bis 5, somit also zu Beginn der Phase 6 (Pfahlprobebelastung) war im Vergleich zur Nullmessung (Phase 0) eine Vorverformung von 5,3 mm bei einer Last von 300 kN (Systemlast Stahlaufbau) vorhanden. Da die Wegaufnehmer zwischen dem Ende der Phase 5 und Beginn der Phase 6 aufgrund des Umbaus ab- und wieder aufgebaut wurden starteten die Messungen der Pfahlkopfverschiebung mit der Phase 6 bei Null. Um die für die Auswertung der Phase 6 zu berücksichtigende Setzung zu ermitteln, wurde die Differenz der Pfahlsetzung bei der Laststufe 1 (Last 238 kN) der Pfahlprobebelastung und der Vorverformung (Last 300 kN) gebildet und jeweils zum Mittelwert der gemessenen vertikalen Pfahlkopfverformung addiert.

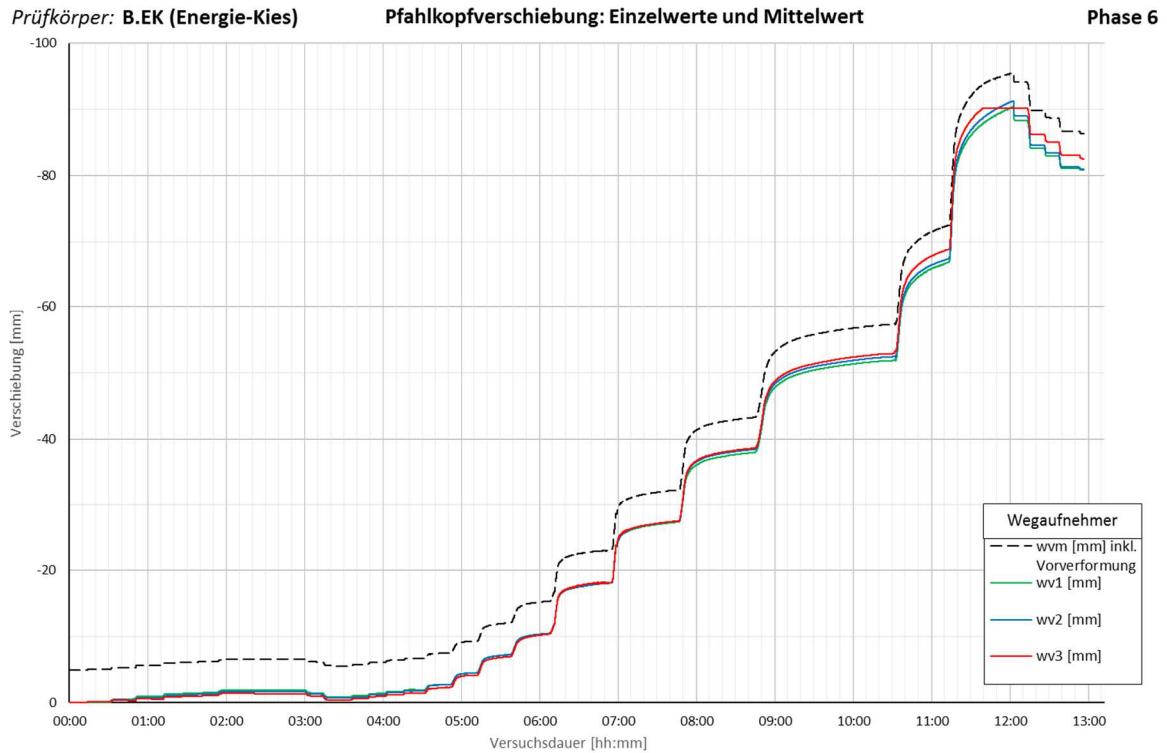


Abb. 5.71: Pfahlkopfverschiebung mit korrigiertem Mittelwert wvm über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK

Im Diagramm (**Abb. 5.71**) geben die drei vertikalen Wegaufnehmer (WV1, WV2 und WV3) die tatsächlich gemessenen vertikalen Pfahlkopfverschiebungen an und der Mittelwert der vertikalen Wegaufnehmer die mit der Vorverformung korrigierte Pfahlkopfverformung an. In **Abb. 5.72** sind die Kraft und die Pfahlkopfverschiebung in den ersten fünf Stunden des Versuchs am Kiespfahl B.EK dargestellt. Hier ist deutlich zu sehen das die Pfahlkopfverschiebung nicht bei Null beginnt, sondern mit einer Vorverformung von 5,3 mm. Diese fließt auch in die Widerstand-Setzungslinie ein, die in Kapitel 5.4.2.2 erläutert wird.

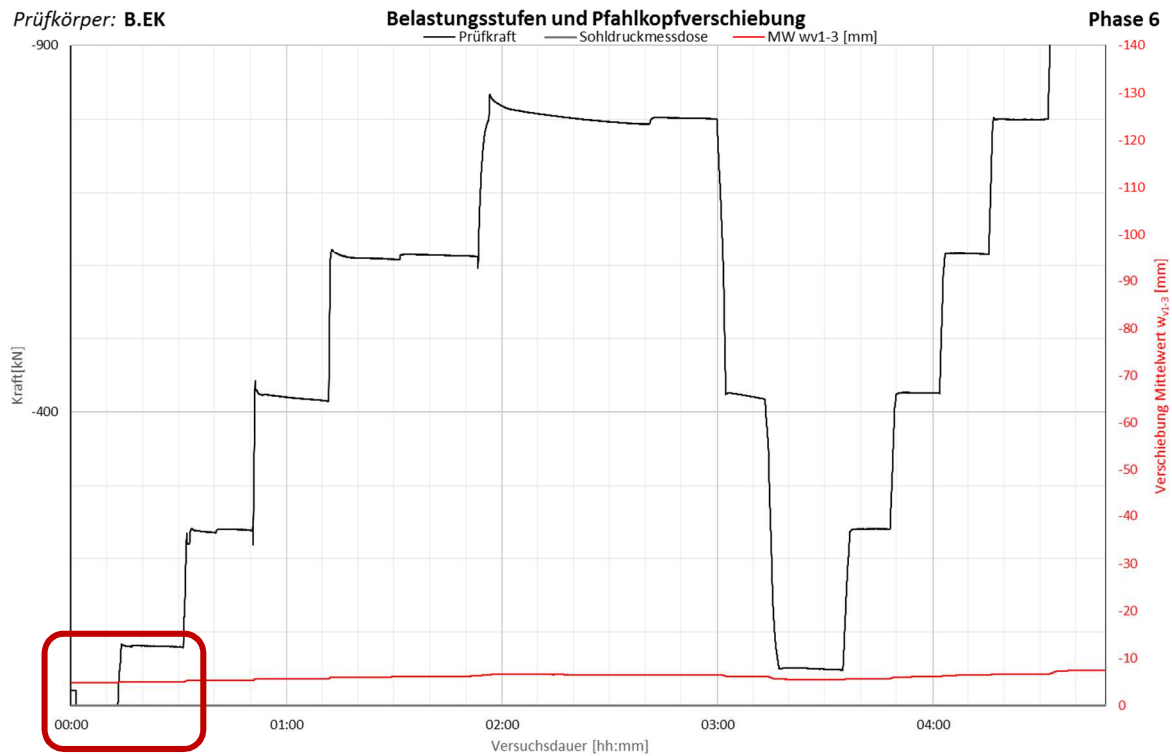


Abb. 5.72: Diagramm Ausschnitt – Kraft zu Pfahlkopfverschiebung – Kiespfahl B.EK

5.4.2.2 Vergleich Kiespfahl B.EK mit Großbohrpfahl B.K55

Die Ergebnisse der statischen Pfahlprobelastung werden gesammelt im ANHANG F gezeigt. Im Folgenden werden die zwei Pfahlprobelastungen, die am Kiespfahl B.EK (Phase 6) und am Großbohrpfahl B.K55 Pfahl durchgerührt wurden, verglichen. Dazu wird die Widerstand-Setzungslinie herangezogen, da diese das Verhalten des Pfahls wiedergibt. Das Diagramm zeigt nicht nur den Pfahlwiderstand R , sondern auch die berechnete Pfahlmantelreibung R_s und den rückgerechneten Pfahlfußwiderstand R_b . In Abb. 5.73 ist die Widerstands-Setzungslinie des Kiespfahls B.EK und in der Abb. 5.74 jene des B.K55 Pfahl gezeigt.

Es ist ersichtlich, dass der maximale Pfahlwiderstand des Kiespfahls B.EK höher ist als beim Großbohrpfahl B.K55. Die erreichbare Kraft lag beim Kiespfahl B.EK bei 6000 kN mit einer Setzung von rund 9,4 cm. Die maximale Kraft des Großbohrpfahls B.K55 ist nicht viel geringer als jene des Kiespfahls B.EK und liegt bei 5860 kN, jedoch wurde diese bei einer Setzung von 17,5 cm erreicht, was deutlich über der Setzung des Kiespfahls B.EK liegt. Die Vorverformung durch die Vorbelastung am Kiespfahl B.EK wurde berücksichtigt, wie in Abb. 5.73 ersichtlich ist. Die Vorverformung von rund 5 mm ist rot markiert. Die beiden Pfähle B.EK und B.K55 liegen direkt nebeneinander, weshalb von gleichen Bodenverhältnissen ausgegangen werden kann.

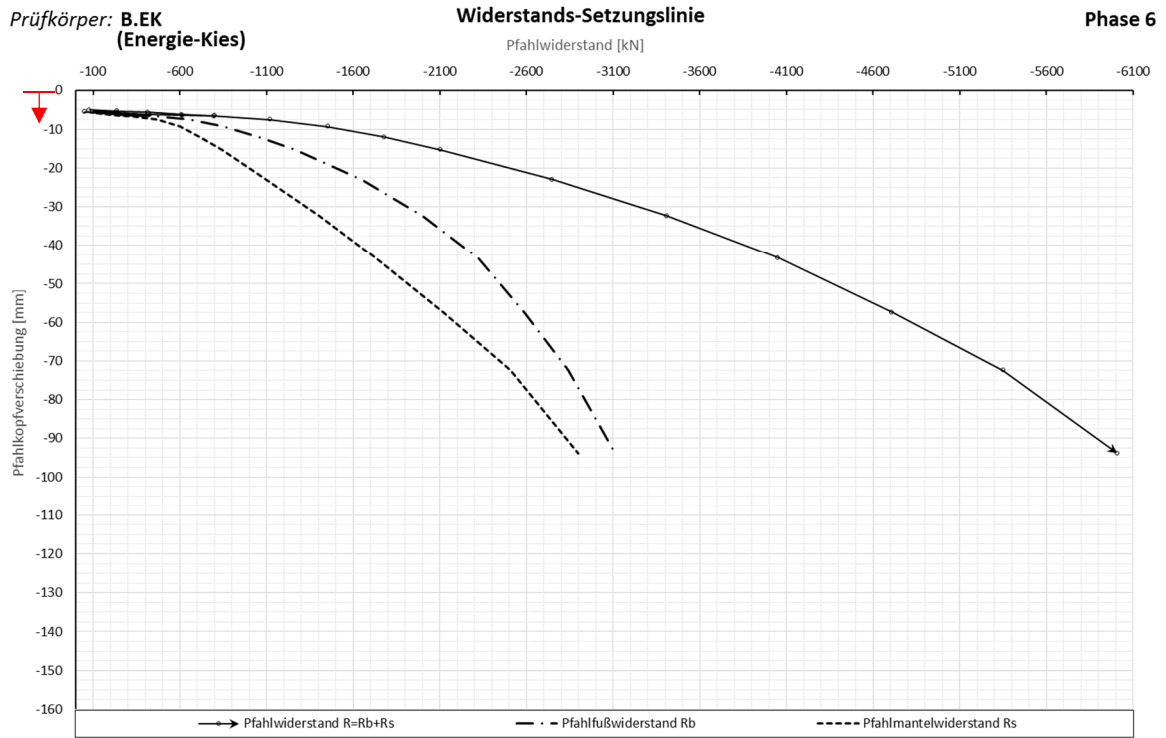


Abb. 5.73: Widerstand-Setzungslinie – Kiespfahl B.EK

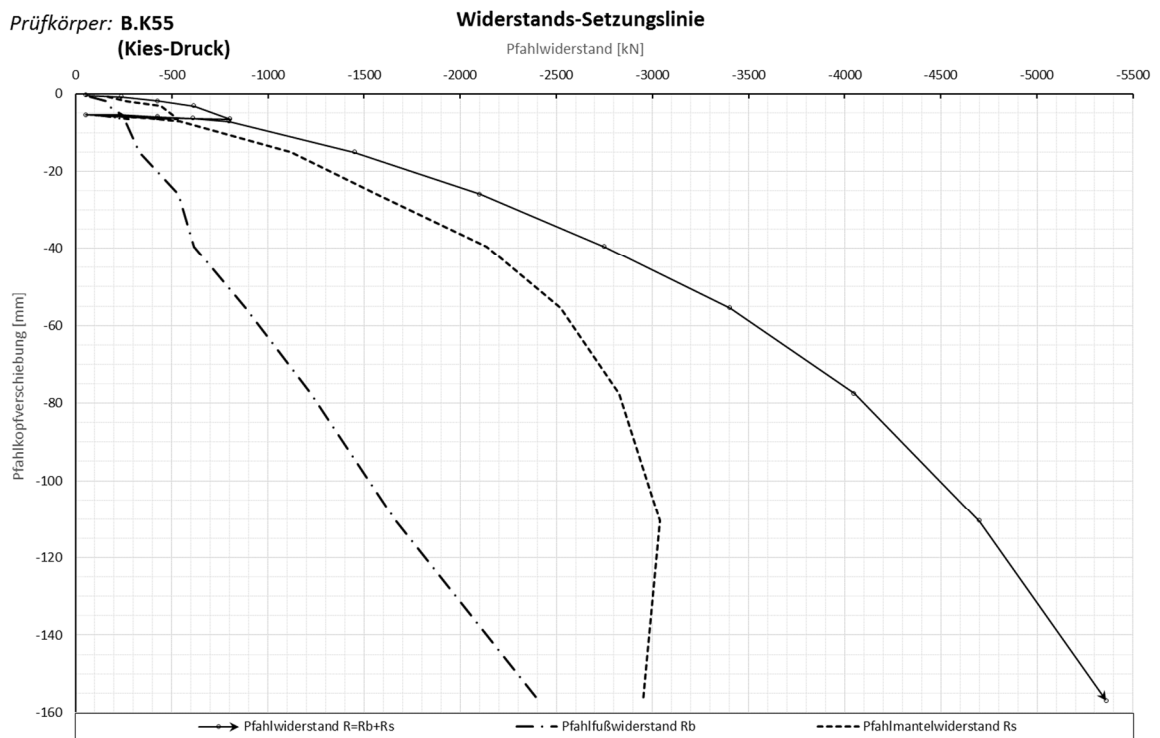


Abb. 5.74: Widerstand-Setzungslinie – Großbohrpfahl B.K55

Eine Zusammenfassung der Messwerte sowie Angaben zur Pfahlgeometrie sind in **Tab. 5.7** angegeben.

Tab. 5.7: Gegenüberstellung der geprüften Kies-Pfähle

	B.EK	B.K55
Durchmesser:	60 cm	60 cm
Länge:	6,0 m	6,0 m
Krafteinleitungsstrecke:	4,14 m	4,14 m
Lastabtragung im:	Kies	Kies
Herstellung:	verrohrt	verrohrt
Doppelmantelrohr:	ja	ja
Maximale Kraft F_{max} :	6000 kN	5860
Setzung aus Belastung vor Versuchsbeginn Phase 6:	5,3 mm	-
Setzung bei F_{max} :	93,8 mm	175,3 mm
Restsetzung auf Vorlast nach Entlastung (Ende Phase 6):	86,3 mm	166,4 mm

KAPITEL 6

Zusammenfassung und Ausblick

6.1 Zusammenfassung der Energiepfahlversuche

Die Stadt Wien ermöglichte im Zuge des Forschungsprojekts „Unteres Hausfeld“ die Versuche an Energiepfählen. Es wurden zwei Pfähle mit unterschiedlichen Längen hergestellt, da das Lastabtragungsverhalten in zwei verschiedenen Bodenschichten untersucht werden sollte. Damit die Mantelreibung wirklich nur in den zu untersuchenden Bodenschichten aktiviert wurde, wurden jeweils Doppelwandrohre in jenen Tiefenbereichen eingebaut, in denen keine Mantelreibung auftreten sollte. Der Miozän-Pfahl (B.EM) wurde mit ca. 19 m Länge bis in das Miozän abgeteuft. Der Kies-Pfahl (B.EK) reichte nur bis in die Donauschotter und hatte somit eine Länge von ca. 6 m. Die Pfähle wurden als verrohrte Ortbeton-Pfähle hergestellt und mit Absorberleitungen bestückt. Mittels dieser Absorberleitungen, die wie bei der Herstellung von Energiepfählen üblich auf dem Bewehrungskorb befestigt wurden, erfolgte die thermische Belastung der Versuchspfähle.

Die mechanische Belastung wurde mithilfe einer Totlastvorrichtung aufgebracht. Dafür wurde eine Stahlkonstruktion auf dem Pfahl montiert und die Last mithilfe von Betonblöcken variiert. Der Versuchsaufbau bestand aus zwei Heiz- und zwei Kühlzyklen, die abwechselnd aufgebracht wurden. Die Vorlauftemperatur des Absorbersystems lag beim Kühlen bei ca. 2°C und beim Heizen bei ca. 30°C. Die Last wurde während des ersten Heiz- und Kühlzyklus konstant auf 600 kN (75 % der Gebrauchslast) und während des zweiten Heiz- und Kühlzyklus konstant auf 800 kN (100 % der Gebrauchslast) gehalten. Zu Beginn des Versuchs wurden zwei (mechanische) Lastschleifen und zwischen den ersten Heiz- und Kühlphasen geringe Lastvariationen durchgeführt. Am Ende der beiden Energiepfahlversuche wurden die Pfähle jeweils einer statischen Pfahlprobelastung unterzogen. Dafür wurde der gesamte Versuchsaufbau auf eine Belastungseinrichtung mit hydraulischer Presse umgebaut und der Pfahl auf seine natürliche Temperatur gebracht. Die statischen Pfahlprobelastungen wurden analog zu den anderen Pfahlversuchen durchgeführt, um einen Vergleich zu den übrigen Großbohrpfahlversuchen des Forschungsprojekts „Unteres Hausfeld“ herzustellen.

Die beiden Energiepfähle wurden jeweils umfangreich instrumentiert, damit das Verhalten des Pfahls während der thermo-mechanischen Belastung gemessen werden konnte. Während der Versuche wurden zusammenfassend folgende Daten aufgezeichnet:

- Last auf den Pfahl
- Pfahlkopfverschiebung (vertikal und horizontal)
- Längsdehnungen des Pfahls (mit zwei Messsystemen gemessen)
- Umfangsdehnungen
- Temperatur im Pfahl
- Temperatur im Absorbersystem
- Temperatur in den Zusatzbohrungen im Umfeld des Pfahls

- Daten der Energiezentrale (thermische Belastungseinrichtung)
- Pegeldaten

Da diese Langzeitversuche so ausgelegt waren, dass keine ständige Überwachung vor Ort nötig war, wurde der Versuch aus der Ferne überwacht und in regelmäßigen Abständen vor Ort begutachtet und überprüft. Die Lastvariationen zu Beginn des Versuchs sowie die Lastschleifen zwischen den einzelnen Heiz- und Kühlphasen mussten jedoch gänzlich vor Ort betreut werden.

Während der Versuchsdurchführung erfolgte im Rahmen dieser Diplomarbeit die Betreuung und Überwachung des Versuchs. Dies umfasste hauptsächlich folgenden Punkte:

- Kontrolle der Messsysteme sowie der Versuchsaufbauten
- Erläuterung der Durchführung des jeweiligen Versuchsabschnittes für alle Beteiligten vor Ort und Überwachung der Durchführung
- Kontrolle der Beobachtungszeiten und des Kriechmaßes der einzelnen Laststufen sowie Treffen von Entscheidungen (z.B. Verlängerungen der Beobachtungszeit)

Die Dauer der Versuche war beim B.EM und beim B.EK Pfahl unterschiedlich. Der Versuch am B.EM Pfahl dauerte 78 Tage und am B.EK 63 Tage.

Nach Versuchsdurchführung wurden im Rahmen dieser Diplomarbeit die folgenden Aspekte betrachtet:

- Entwicklung der Auswertung der Daten (in Zusammenarbeit mit dem Büro *Geotechnik Adam ZT GmbH*)
- Auswerten der Messergebnisse

Auswertung und Dokumentation

Die Auswertung der Energiepfahlversuche wurde in Zusammenarbeit mit dem Büro *Geotechnik Adam ZT GmbH* durchgeführt, wobei im Rahmen dieser Diplomarbeit nur die Längsdehnungen, gemessen mit den Bewehrungssensoren („schwingende Saite Messsystem“), im Detail ausgewertet wurden. Nach Beendigung des Versuchs am Miozänpfahl B.EM wurde das Auswerteschema festgelegt und in einem *Excel*-Dokument umgesetzt.

Da noch nicht alle Daten dieses Versuchs einer genaueren Auswertung unterzogen wurden, ist die Auswertung mit dieser Diplomarbeit noch nicht abgeschlossen. Es wurde jedoch darauf geachtet, dass die Dokumentation des Versuchs ausführlich ist, um die weitere Bearbeitung zu vereinfachen. Die gesammelten Rohdaten wurden in einem *Excel*-Dokument dokumentiert und jede Datenreihe ausführlich beschriftet.

Ergebnisse

Bei den Ergebnissen der Phasen 0 bis 5 war zu beobachten, dass beim Miozänpfahl B.EM Pfahl die thermische Belastung einen größeren Einfluss auf die vertikale Pfahlkopfverformung hatte als die mechanische Belastung. Beim Kiespfahl B.EK war hingegen zu beobachten, dass sich dieser mit jedem Phasenwechsel weiter setzte. Die Auswertung der Längsdehnungen und die Betrachtung der Messdaten der vertikalen Wegaufnehmer zeigten auch, dass die Pfähle stark auf die Temperaturbelastung reagierten. Die Pfähle hoben sich in einem Heizzyklus und setzten sich bei einem Kühlzyklus. Bei beiden Pfählen war zu beobachten, dass sie sich zu Beginn einer neuen Heiz- bzw. Kühlphase unmittelbar hoben oder setzten. Das Verformungsverhalten der Pfähle entsprach somit in etwa dem eines frei verformbaren Pfahles.

Beim Vergleich der Ergebnisse der statischen Pfahlprobelastung am Ende der Energiepfahlversuche (Phase 6) mit den anderen Großbohrpfahlversuchen, war eine generelle Tendenz zu erkennen. Bei beiden Versuchen war zu beobachten, dass sich die Energiepfähle während der statischen

Pfahlprobebelastung tendenziell „günstiger“ verhielten als die übrigen im Rahmen des Forschungsprojektes geprüften Großbohrpfähle. Anhand **Tab. 6.1** ist zu erkennen, dass die maximal erreichbare Kraft jeweils höher ist. Zudem traten bei den normalen Großbohrpfählen wesentlich höhere Setzungen auf, obwohl die Setzung der Energiepfähle, die aus der thermischen und mechanischen Vorbelastung resultierten, auch berücksichtigt wurden.

Eine weiterführende Interpretation ist durch die *Geotechnik Adam ZT GmbH* geplant.

Tab. 6.1: Gegenüberstellung der geprüften Energiepfähle mit konventionellen Großbohrpfählen

	B.EM	B.M5	B.EK	B.K55
Durchmesser:	90 cm	90 cm	60 cm	60 cm
Länge:	16,8 m	17,0 m	6,0 m	6,0 m
Krafteinleitungsstrecke:	6 m	6,14 m	4,14 m	4,14 m
Lastabtragung im:	Miozän	Miozän	Kies	Kies
Herstellung:	verrohrt	verrohrt	verrohrt	verrohrt
Doppelmantelrohr:	ja	ja	ja	ja
Maximale Kraft F_{max} :	5440 kN	4120 kN	6000 kN	5860
Setzung aus Belastung vor Versuchsbeginn:	1,5 mm	-	5,3 mm	-
Setzung bei F_{max} :	163,1 mm	180,7 mm	93,8 mm	175,3 mm
Restsetzung auf Vorlast nach Entlastung:	153,6 mm	178,9 mm	86,3 mm	166,4 mm

6.2 Kritische Beurteilung der Energiepfahlversuche

Die Versuchsplanung und Durchführung verlief aufgrund der Erfahrung der Projektbeteiligten relativ reibungslos. Der einzige kritische Punkt, der erwähnenswert ist, waren die Störungen in der Funktion der Sensoren. Wie schon zuvor in Kapitel 5 (**Tab. 5.2** und **Tab. 5.3**) aufgezeigt fielen die eingebauten Messsensoren oft komplett aus bzw. setzten teilweise aus und lieferten falsche Werte, weswegen in den Diagrammen nicht immer alle Daten gezeigt werden konnten. Da die Pfähle umfangreich instrumentiert waren und z.B. für die Längsdehnungen zwei Messwerterfassungssysteme (Kettenextensometer und Bewehrungssensoren) vorhanden waren, konnten diese kompensiert werden. Diese „Störwerte“ und „Aussetzer“ machten das Arbeiten mit diesen Datenmengen jedoch schwer handhabbar. Bemerkenswert hierbei ist, dass deutlich mehr Sensoren des Kiespfahls B.EK funktionierten als beim Miozänpfahl B.EM. Der Versuch am Miozänpfahl B.EM dauerte länger als der Versuch am Kiespfahl B.EK, jedoch fielen die Sensoren beim Miozänpfahl B.EM teilweise schon kurz nach Versuchsbeginn aus.

Abschließend wird darauf hingewiesen, dass bei einem Langzeitversuch wie diesem die Gefahr von Stromausfällen hoch ist. Bei einem Stromausfall wird nicht nur der Versuchsablauf unterbrochen, wenn z.B. das Heizsystem nicht mehr funktioniert, sondern es können auch Messdaten verloren gehen. Da keine dauernde Überwachung vor Ort anwesend war, wurde ein Warnsystem eingeführt. Es fanden nur zwei kürzere Stromausfälle über einen halben Tag statt.

Mögliche weitere Untersuchungen

Es wurde im Laufe dieser Diplomarbeit schon auf weitere mögliche Forschungsarbeit hingewiesen, da nicht alle Daten bis jetzt einer ausführlichen Auswertung unterzogen werden konnten. Darunter fallen unter anderem die Auswertung der gemessenen Längsdehnungen mittels Kettenextensometer und die gemessenen Umfangsdehnungen. Auf die Messdaten des Glasfaserkabelmesssystem konnte in dieser Diplomarbeit nicht eingegangen werden, da die Daten der TU Wien noch nicht zur Verfügung gestellt wurden.



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

QUELLENVERZEICHNIS

Literatur

- [1] ADAM, D., MARKIEWICZ, R. (2010): Nutzung der Geothermie mittels Erdwärmeabsorber und Grundwasserbrunnen. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft. Springer Verlag. Ausgabe 62. Seite 77-85
- [2] ADAM, D. (2016): Grundbau und Bodenmechanik: Studienunterlagen zur Vorlesung. Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik. Institut für Geotechnik. Technische Universität Wien
- [3] ADAM, D., MARKIEWICZ, R. (2002): Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke – Teil 1: Theoretische Grundlagen. In: ÖIAZ, 147 Jg., Heft 4
- [4] ADAM, D., MARKIEWICZ, R. (2002): Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke – Teil 2: Experimentelle Untersuchungen und Computersimulationen. In: ÖIAZ, 147 Jg., Heft 5
- [5] ADAM, D., MARKIEWICZ, R. (2003): Nutzung der geothermischen Energie mittels erdberührter Bauwerke – Teil 3: Ausführungsbeispiele und Neuentwicklungen. In: ÖIAZ, 148 Jg., Heft 1
- [6] ADAM, D., MARKIEWICZ, R., HOFINGER, H. (2014): BAST-Bericht B96. Geothermische Anlagen bei Grund- und Tunnelbauwerken. Bundesanstalt für Straßenwesen – Brücken – und Ingenieurbau
- [7] AMATYA, B. L., SOGA, K., BOURNE-WEBB, P. J., AMIS, T., LALOUI, L. (2012): Thermo-mechanical behavior of energy piles. In: Geotechnique 62. No. 6. S. 503-519
- [8] AMIS, T., BOURNE-WEBB, P., DAVIDSON, C., AMATAYA, B., SOGA, K. (2008): An investigation into the effects of heating and cooling energy piles whilst under working load at Lambeth College, Clapham Common, UK. Proc. 33rd Ann. and 11th Int. Conf. of the Deep Foundations Institute
- [9] BALKE, H. (2010): Einführung in die Technische Mechanik. Festigkeitslehre. 2 überarbeitete Auflage. Springer Verlag
- [10] BOLEY, C. ZIMBELMANN, J. (2012): Pfahlgründungen. In: Boley, C. (Hrsg.): Handbuch Geotechnik: Grundlagen, Anwendungen, Praxiserfahrungen. 1. Auflage. Wiesbaden: Vieweg & Teubner
- [11] BOURNE-WEBB, P.J., AMATYA, B. L., SOGA, K., AMIS, T., DAVIDSON, C., PAYNE, P. (2009): Energy pile test at Lambeth College, London: geotechnical and thermodynamic aspects of pile response to heat cycles. In: Geotechnique 59. No. 3. S. 237-248
- [12] BRANDL, H. (2006): Energy foundations and other thermo-active ground structures. In: Geotechnique 59. No. 2. S. 81-122

- [13] DE SANTIAGO, C., PARDO DE SANTAYANA, F., DE GROOT, M., URCHUEGUIA, J., BADENES, B., MAGRANER, T., ARCOS, J.L., FRANCISCO MARTIN (2016): Thermo-mechanical behavior of a thermo active precast pile. In: Bulgarian chemical communications. Volume 48. Special Issue E (pp. 41-54)
- [14] DEUTSCHE GESELLSCHAFT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN E. V. (2015): Empfehlungen Oberflächennahe Geothermie – Planung, Bau, Betrieb und Überwachung- EA Geothermie. 1 Auflage. Ernst & Sohn GmbH & Co KG
- [15] GEORGI, S. (2017): Experimentelle Untersuchungen zur Verformungsakkumulation und Tragfähigkeitsreduktion von zyklisch belasteten Pfählen [Dissertation]. Fakultät VI, Planen Bauen Umwelt. Technische Universität Berlin
- [16] KEMPFERT, H.-G. (2009): Kapitel 3.2: Pfahlgründungen. In: Witt, K.-J. (Hrsg.): Grundbau-Taschenbuch. Teil 3. 7. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn. S. 73-277
- [17] LALOUI, L., NUTH, M., VULLIET, L. (2006): Experimental and numerical investigations of the behavior of heat exchanger pile. International Journal of Numerical and Analytical Methods in Geomechanics. No.8. S. 763-781
- [18] MARKIEWICZ, R (2005): Numerische und experimentelle Untersuchungen zur Nutzung von geothermischer Energie mittels erdberührter Bauteile und Neuentwicklungen für den Tunnelbau. Dissertation. Institut für Geotechnik. Technische Universität Wien
- [19] MÖLLER, G. (2012): Geotechnik: Grundbau. 2. Auflage. Berlin: Ernst & Sohn
- [20] MÜLLER, R. K. (1971): Handbuch der Modellstatik. Springer Verlag

Broschüren und Webseiten von Firmen

- [21] BETON BLOXX: <https://betonbloxx.com/betonbloxx-bloecke-breit.html>. Zugriff am 5.10.2018
- [22] REHAU- Unlimited Polymer Solutions: Rohrsysteme für Versorgungsnetze. Für die Sanierung und Neuverlegung. PDF-Broschüre

Normen und Richtlinien

- [23] AWPT T1 (2007): Wärmepumpenheizungsanlagen mit Erdwärmesonden. Technisches Merkblatt der Arbeitsgemeinschaft Wärmepumpen
- [24] EA-Geothermie (2015): Empfehlung Oberflächennahe Geothermie- Planung, Bau, Betrieb und Überwachung. Hrsg. Deutsche Gesellschaft für Geowissenschaften e. V. (DGG) und der Deutschen Gesellschaft für Geotechnik e.V. (DGGT). Verlag Ernst & Sohn. Berlin
- [25] EA-Pfähle (2012): Empfehlungen des Arbeitskreises „Pfähle“. Deutsche Gesellschaft für Geotechnik e. V. (Hrsg.). 2. Auflage. Verlag Ernst & Sohn. Berlin
- [26] LB-VI: Standardisierte Leistungsbeschreibung Verkehr und Infrastruktur. Forschungsgesellschaft Straße – Schiene – Verkehr. Derzeit noch in Bearbeitung

- [27] ÖBV Richtlinie BP (2013): Bohrpfähle. Österreichische Bautechnik Vereinigung. Ausgabe November 2013
- [28] ÖBV Richtlinie (2018): Erdwärmennutzung mit Massivabsorbern. ÖBV-Österreichischer Bautechnik Vereinigung. Gründruck vom August 2018
- [29] ÖNORM EN 15450 2008: Heizungsanlagen in Gebäuden – Planung von Heizungsanlagen mit Wärmepumpen. Österreichisches Normungsinstitut. 1020 Wien
- [30] ÖNORM EN 378 (Teil 1 bis 4) 2017: Kälteanlagen und Wärmepumpen – Sicherheitstechnische und umweltrelevante Anforderungen. Österreichisches Normungsinstitut. 1020 Wien
- [31] ÖNORM B 1997-1-1 2013 09 01: Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln – Nationale Festlegungen zu ÖNORM EN 1997-1 und nationale Ergänzungen. Österreichisches Normungsinstitut. 1020 Wien
- [32] ÖNORM B 1997-1-3 2015 08 01: Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik – Teil 1-3: Pfahlgründungen. Österreichisches Normungsinstitut. 1020 Wien
- [33] ÖNORM B 4440 2001 09 01: Erd- und Grundbau: Großbohrpfähle, Tragfähigkeit. Österreichisches Normungsinstitut. 1020 Wien
- [34] ÖNORM EN 1536 2015 12 01: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Bohrpfähle. Österreichisches Normungsinstitut. 1020 Wien
- [35] ÖNORM EN 1537 2015 10 15: Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau – Verpressanker. Österreichisches Normungsinstitut. 1020 Wien
- [36] ÖNORM EN 1997-1 2014 11 15: Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln. Österreichisches Normungsinstitut. 1020 Wien
- [37] ÖNORM EN 1997-2 2017 01 01: Eurocode 7 – Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 2: Erkundung und Untersuchung des Baugrunds. Österreichisches Normungsinstitut. 1020 Wien
- [38] ÖNORM EN ISO 22477-5 2016 11 01 (Normenentwurf): Geotechnische Erkundung und Untersuchung – Prüfung von geotechnischen Bauwerken und Bauwerksteilen. Teil 5: Prüfung von Verpressanker. Österreichisches Normungsinstitut. 1020 Wien
- [39] ÖWAV – Regelblatt 207 (2009): Thermische Nutzung des Grundwassers und des Untergrunds – Heizen und Kühlen. Österreichischer Wasser- und Abfallwirtschaftsverband, 2. Auflage. Wien
- [40] SIA 384/6 (2007): Erdwärmesonden. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten- Verein. Zürich
- [41] SIA D 0136 (1996): Grundlagen zur Nutzung der untiefen Erdwärme für Heizsysteme. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten- Verein. Zürich
- [42] SIA D 0190 (2005): Nutzung der Erdwärme mit Fundationspfählen und anderen erdberührten Betonbauteilen – Leitfaden zu Planung, Bau und Betrieb. Schweizerischer Ingenieur- und Architekten- Verein. Zürich
- [43] VBI-LEITFADEN (2010): Shallow Geothermal Energy – VBI Guidelines for Projects in Germany. Verband Beratender Ingenieure (VBI). 3.Auflage. Berlin
- [44] VBI-LEITFADEN (2012): Oberflächennahe Geothermie. Verband Beratender Ingenieure (VBI). 3.Auflage. Berlin

- [45] VDI 46440 BLATT 1 – 44: Thermische Nutzung des Untergrunds. Verein Deutscher Ingenieure e.V. (VDI). Düsseldorf

Projektunterlagen

- [46] Absteckung und Übersicht. Prüffeld 1+2. Ausführungsprojekt. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. AKPSA Mayer/Ö+P/LIS. Plan-Nr.: S2203-00-16-MA-A-4-0401-G. 15.02.2017
- [47] Bohrpfahlprofil KB-Z3. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. MA 29 Brückenbau und Grundbau, Günther Eder Ges.m.b.H.. 14.08.2018-17.08.2018
- [48] d60 Bohrpfahl – Energie Kies (verrohrt). Bewehrung. Prüffeld². Ausführungsprojekt. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. AKPSA Mayer/Ö+P/LIS. Plan-Nr: S2203-00-16-MA-A-6-0663-A. 27.03.2017
- [49] d60 Bohrpfahl – Energie Kies (verrohrt). Schalung. Prüffeld². Ausführungsprojekt. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. AKPSA Mayer/Ö+P/LIS. Plan-Nr: S2203-00-16-MA-A-5-0563-A. 31.03.2017
- [50] d90 Bohrpfahl – Energie Miozän (verrohrt). Bewehrung. Prüffeld². Ausführungsprojekt. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. AKPSA Mayer/Ö+P/LIS. Plan-Nr: S2203-00-16-MA-A-6-0653-A. 27.03.2017
- [51] d90 Bohrpfahl – Energie Miozän (verrohrt). Schalung. Prüffeld². Ausführungsprojekt. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. AKPSA Mayer/Ö+P/LIS. Plan-Nr: S2203-00-16-MA-A-6-0553-A. 31.03.2017
- [52] d90 Bohrpfähle – Reaktionspfähle (SOB). Bewehrung. Prüffeld 2. Ausführungsprojekt. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“ AKPSA Mayer/Ö+P/LIS Plan-Nr.: S2203-00-16-MA-A-6-0652-A. 09.03.2017
- [53] d90 Bohrpfähle – Reaktionspfähle (SOB). Schalung. Prüffeld 2. Ausführungsprojekt. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. AKPSA Mayer/Ö+P/LIS. Plan-Nr.: S2203-00-16-MA-A-5-0552-A. 09.03.2017
- [54] d90 Bohrpfähle – Reaktionspfähle (verrohrt). Bewehrung. Prüffeld 2. Ausführungsprojekt. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. AKPSA Mayer/Ö+P/LIS. Plan-Nr.: S2203-00-16-MA-A-6-0651-A. 13.03.2017
- [55] d90 Bohrpfähle – Reaktionspfähle (verrohrt). Schalung. Prüffeld 2. Ausführungsprojekt. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. AKPSA Mayer/Ö+P/LIS. Plan-Nr.: S2203-00-16-MA-A-5-551-A. 09.03.2017
- [56] Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. Ausführungsprojekt. Stahlgerüst für Pfahlprüfung Energiepfahl-Teil 2. Plannr.: S2203-00-16-AU-A-7-0728-0: AKPSA MAYER/Ö+P/LIS. 1130 Wien. 15.05.2017
- [57] Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. Ausführungsprojekt. Stahlgerüst für Pfahlprüfung Energiepfahl-Teil 1. Plannr.: S2203-00-16-AU-A-7-0727-0: AKPSA MAYER/Ö+P/LIS. 1130 Wien. 15.05.2017
- [58] Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. Skizze Instrumentierung und Belegung Energiepfähle. TU Wien. Wien 28.09.2017

- [59] Geotechnik Adam ZT GmbH. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. Versuchskonzept Energiepfahlgründungen. Dezember 2017
- [60] Geotechnik Adam ZT GmbH. FPUH Durchführungskonzept Energiepfahl Miozän. Bearbeitungsstand 22.12.2017
- [61] Geotechnisches Gutachten für das Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“ in 1220 Wien – Version 1. MA 29 Brückenbau und Grundbau. Fachbereich Grundbau. Nr.: MA 29-GBER-208460/2016. 01.09.2016
- [62] Prüfkonzept – Geotechnische Begleitung. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“, Institut für Geotechnik. Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik. Technische Universität Wien. Rev.03. 07.10.2016
- [63] Prüfkonzept Horizontalverschiebeversuche – Geotechnische Begleitung. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. Institut für Geotechnik. Forschungsbereich Grundbau. Boden- und Felsmechanik. Technische Universität Wien. Rev.02. 01.02.2018
- [64] Skizze Einhausung für Horizontalverschiebeversuche und Energiepfahlversuche. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. ZT Mayer GmbH. 10.01.2018
- [65] Skizze Instrumentierung Pfahlkopf. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“, Institut für Geotechnik, Forschungsbereich Grundbau, Boden- und Felsmechanik, Technische Universität Wien. Stand: 02.05.2017
- [66] Statische Nachweisführung Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. ZT Mayer GmbH. GZ: 1207. 15.02.2017
- [67] Technischer Ausführungsbericht – Bohrpfähle (SOB). Ausführungsprojekt. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. ARGE FPUH. Plan-Nr.: S2203-00-16-MA-A-8-0842-A. 13.01.2017
- [68] Technischer Ausführungsbericht – Bohrpfähle (verrohrt). Ausführungsprojekt. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. ARGE FPUH. Plan-Nr.: S2203-00-16-MA-A-8-0841-A. 13.01.2017
- [69] Technischer Bericht. Ausführungsprojekt. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. AKPSA Mayer/Ö+P/LIS. Plan-Nr.: S2203-00-16-MA-E-2-0005-0. 15.09.2016
- [70] Übersichts- und Systemplan – Teil 2: Stahlgerüst für Pfahlprüfung Energiepfahl. Ausführungsprojekt. Forschungsprojekt „Unteres Hausfeld“. Plan-Nr.: S2203-00-16-AU-A-7-0728-0. 15.05.2017
- [71] Versuchsskizze „Horizontalpfähle“. ZT Mayer GmbH. 25.10.2017

Produktdatenblätter

- [72] Geokon Model 1300 (Model A9) – Retrievable Extensometer. Instruction Manual. Geokon Inc., Lebanon, USA. Doc. Rev. H. 11/10/16
- [73] Geokon Models 4911A/4911 – VW Rebar Strain Meters. Instruction Manual. Geokon Inc., Lebanon USA. Doc. Rev. O 6/13
- [74] Geokon Model 4200 Series – Vibrating Wire Strain Gages. Instruction Manual. Doc. Rev. AA. 06/05/2018



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

TABELLENVERZEICHNIS

Tab. 1.1: Wissenschaftliche Arbeiten im Rahmen der Probelastungen (PB) des FPUH.....	16
Tab. 2.1: Modellfaktoren gemäß Anhang A der ÖNORM B 1997-1-3 aus [32] (adaptiert).....	19
Tab. 2.2: Charakteristische Wichte und Scherparameter aus [46] (adaptiert).....	25
Tab. 2.3: Anzahl hergestellter Bohrpfähle im Prüffeld 1 aus [46]	27
Tab. 2.4: Anzahl hergestellter Bohrpfähle im Prüffeld 2 aus [46]	27
Tab. 2.5: Prüfvariationen Mikropfähle nach [62].....	29
Tab. 2.6: Probepfahltypen der Horizontalverschiebeversuche	38
Tab. 2.7: Messwerterfassungssysteme (MWES) für die Horizontalverschiebeversuche	39
Tab. 3.1: Instrumentierung am Pfahlkopf und auf der Messbrücke nach EA-Pfähle [23]	64
Tab. 3.2: Modellfaktoren gemäß Anhang A der ÖNORM B 1997-1-3 aus [32] (adaptiert).....	75
Tab. 3.3: Teilsicherheitsbeiwerte gemäß ÖNORM B 1997-1-1 [31]	76
Tab. 3.4: Modellfaktoren gemäß Anhang A der ÖNORM B 1997-1-3 aus [32] (adaptiert).....	79
Tab. 3.5: Streuungsfaktoren gemäß ÖNORM B 1997-1-1 [31]	80
Tab. 4.1: Geotechnische Rechenwerte- Spannung und Verformung aus [61].....	86
Tab. 4.2: Wesentliche Herstellungsparameter der Energiepfählen [59].....	88
Tab. 4.3: Projektunterlagen im Quellenverzeichnis	89
Tab. 4.4: Höhenlage Miozänpfahl B.EM	90
Tab. 4.5: Sensoren und deren Höhenlage im Miozänpfahl B.EM.....	93
Tab. 4.6: Höhenlage Kiespfahl B.EK	94
Tab. 4.7: Sensoren und deren Höhenlage im Kiespfahl B.EK	96
Tab. 4.8: Höhenlage Reaktionspfähle R53, R54 und R63.....	97
Tab. 4.9: Sensoren und deren Höhenlage in den Reaktionspfählen R53, R54 und R63	98
Tab. 4.10: Messwerterfassungssysteme (MWES I) - Übersicht.....	105
Tab. 4.11: Bestandteile des MWES I je Pfahl, Miozänpfahl B.EM und Kiespfahl B.EK.....	107
Tab. 4.12: Bestandteile des MWES II je Pfahl, Miozänpfahl B.EM und Kiespfahl B.EK	115
Tab. 4.13: Bestandteile des MWES III im Miozänpfahl B.EM.....	115
Tab. 4.14: Bestandteile des MWES IV je Zusatzbohrung (TS.M1, TS.M2, TS.K.....	117
Tab. 4.15: Bestandteile des MWES V (ohne Sensoren in der Energiezentrale) für den Miozänpfahl B.EM, Kiespfahl B.EK und den Reaktionspfählen R53, R54 und R63	117
Tab. 4.16: Auszug aus Durchführungskonzept – Vorbereitungen, aus [60].....	120
Tab. 4.17: Auszug aus Durchführungskonzept – Versuchsdurchführung, aus [60].....	121
Tab. 5.1: Datenausgabegeräten der Messwerterfassungssysteme	126
Tab. 5.2: Sensoren Miozänpfahl B.EM	127
Tab. 5.3: Sensoren Kiespfahl B.EK.....	128

Tab. 5.4: Zusammenfassung Eingabewerte – Miozänpfahl B.EM	131
Tab. 5.5: Temperatureausdehnungskoeffizient [73].....	153
Tab. 5.6: Gegenüberstellung der geprüften Miozän Pfähle	173
Tab. 5.7: Gegenüberstellung der geprüften Kies-Pfähle.....	186
Tab. 6.1: Gegenüberstellung der geprüften Energiepfähle mit konventionellen Großbohrpfählen.....	189

ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abb. 2.1: Lage der Aufschlusstellen im Gebiet des Forschungsprojektes aus [46] (adaptiert)	21
Abb. 2.2: Kernbohrung KB-37 aus [46]	22
Abb. 2.3: Kernbohrung KB-13 aus [46]	23
Abb. 2.4: Korngrößenverteilungen des Donauschotters aus der weiteren Projektumgebung aus [46]	24
Abb. 2.5: Korngrößenverteilungen miozäner Wechsellagerungen aus der weiteren Projektumgebung aus [46].....	24
Abb. 2.6: Lageplan von Prüffeld 1 und 2 des Forschungsprojektes „Unteres Hausfeld“ aus [46] (adaptiert)	26
Abb. 2.7: Widerstands-Setzungslinien Diagramm aus [23].....	28
Abb. 2.8: Belastungsstufen aus [23]	28
Abb. 2.9: Belastungsstufen aus [23]	30
Abb. 2.10: Definition von Verankerungen nach ÖNORM B 1997-1-1 aus [31].....	32
Abb. 2.11: Variation der Pfahlkopfausbildungen aus [69]	34
Abb. 2.12: Querschnitt Pfahl B.EM mit Absorberleitungen aus [28].....	35
Abb. 2.13: Probelastung mit Totlast [28].....	36
Abb. 2.14: Lage der Probepfähle der Horizontalverschiebeversuche (HVV), Planausschnitt aus [46]	37
Abb. 2.15: Lage der Probepfähle und zugehöriger Reaktionspfähle, Planausschnitt aus [46]	37
Abb. 2.16: Baugrundsituation & Prinzip der Versuchsanordnung, Planausschnitt aus [71]	38
Abb. 3.1: Schematische Darstellung einer geothermischen Anlage (Primärkreislauf, Wärmepumpenkreislauf, Sekundärkreislauf) [18]	42
Abb. 3.2: Prinzipschema der direkten thermischen Grundwassernutzung, links für Heizzwecke und rechts für Kühlzwecke [1]	43
Abb. 3.3: Typisches Leitungsschema bei einem Hochbau mit Energiepfählen [28].....	45
Abb. 3.4: Schematische Übersicht des Wärmetransportes einer Energiepfahlanlage im Heizfall [1]	46
Abb. 3.5: a) Herstellung Bohrloch, b) Einbau Bewehrungskorb, c) Eingebauter Bewehrungskorb [28]	47
Abb. 3.6: Absorberleitung <i>Rehau PE-Xa</i> [22].....	47
Abb. 3.7: Bewehrungskorb mit befestigten Absorberleitungen [28].....	48
Abb. 3.8: a) Betonieren des Bohrpfahls b) Anschluss Pfahlkopf c) Verbindung der Absorberleitungen zu den Anbindeleitungen [28]	49
Abb. 3.9: Stehender Pfahl (a) und schwimmender Pfahl (b) nach [2].....	52
Abb. 3.10: Widerstand-Setzungslinien je nach Anteil Fuß- und Mantelwiderstand aus [10]: a) dimensionslose WSL, b) Mantelwiderstandspfahl, c) Fußwiderstandspfahl	53

Abb. 3.11: „Falltüreffekt“ aus [19].....	54
Abb. 3.12: Tragmodell bei einem Druckpfahl aus [19].....	54
Abb. 3.13: Tiefenabhängigkeit des Pfahlfußwiderstands q_b aus [10] (adaptiert).....	55
Abb. 3.14: Negative Mantelreibung zufolge nachträglicher Schüttungen aus [2] (adaptiert)	56
Abb. 3.15: a) Charakteristische Widerstands-Setzungs-Linie für Bohrpfähle, b) Definition des maßgebenden Pfahldurchmessers D ohne und mit Pfahlfußaufweitung, nach EA-Pfähle [23] aus [2] (adaptiert).....	58
Abb. 3.16: a) Definition des Kriechmaßes α_y , b) Definition des Kriechwiderstands R_y teils nach EA-Pfähle teils nach ÖNORM B 1997-1-3 [32].....	61
Abb. 3.17: Mögliche Belastungseinrichtungen und geometrische Vorgaben nach EA-Pfähle aus [19]	62
Abb. 3.18: Belastungseinrichtung Druck- und Zugbelastungen [19]	63
Abb. 3.19: Aufbau und Belastungsablauf beim a) Single-Level Test und b) Multi-Level Test aus [19]	63
Abb. 3.20: Anordnung der Messbrücke und Pfahlkopfinstrumentierung aus [23]	64
Abb. 3.21: Druckmesskissen im Pfahlfußbereich aus [23].....	65
Abb. 3.22: Möglichkeiten zur Erfassung des Pfahlfußwiderstands aus [23]	66
Abb. 3.23: Möglichkeiten zur Erfassung des Pfahlfußwiderstands nach [23] aus [19].....	67
Abb. 4.1: Lageplan der Prüffelder mit Situierung der beiden Energiepfähle, der nächstgelegenen Kernbohrungen sowie von zwei Grundwassermessstellen. [46]	81
Abb. 4.2: Grundriss des Prüffeld 2 mit Lage der Energiepfähle, Reaktionspfähle und Zusatzbohrungen, Planausschnitt aus [46]	82
Abb. 4.3: Vermessung Zusatzbohrung [Vermessung FPUH Porr/MA41]	82
Abb. 4.4: Schnitt A (links) mit dem B.EM (blau), den Reaktionspfählen R53 und R54 (grün) und den Zusatzbohrungen (TS.Mx) sowie Schnitt C (rechts) mit dem B.EK (blau) und der Zusatzbohrung TS.K [46].....	83
Abb. 4.5: Materialparameter für Beton und Stahl aus [66].....	85
Abb. 4.6: Annahme Bodenkennwerte aus [66]	85
Abb. 4.7: Auszug aus dem Statischen Bericht [66]- Äußerer Widerstand für den B.EM.....	86
Abb. 4.8: Auszug aus dem Statischen Bericht [66]- Äußerer Widerstand für den B.EK	86
Abb. 4.9: Doppelwandrohr Detail [51]	87
Abb. 4.10: Herstellung mit Kelly-Drehbohrverfahren.....	89
Abb. 4.11: Absorber befestigt auf Bewehrungskorb des Miozänpfahl B.EM	90
Abb. 4.12: Schnitt Miozänpfahl B.EM mit Absorberleitungen und Instrumentierung [58]	91
Abb. 4.13: Querschnitt des Miozänpfahls B.EM mit Instrumentierung [58].....	92
Abb. 4.14: Absorber befestigt am Bewehrungskorb des Kiespfahl B.EK.....	94
Abb. 4.15: Absorber befestigt am Bewehrungskorb des Kiespfahl B.EK	95
Abb. 4.16: Schnitt Kiespfahl- mit Absorberleitungen und Instrumentierung [58]	95
Abb. 4.17: Querschnitt mit Instrumentierung des Kiespfahls [58]	96

Abb. 4.18: Räumliche Darstellung des Prüfaufbaus mit Totlast [56].....	99
Abb. 4.19: Ansicht Prüfaufbau mit Totlast [57]	100
Abb. 4.20: Verbindung Stahlträger- Reaktionspfahl	101
Abb. 4.21: Beton-Bloxx - Totlast [21].....	101
Abb. 4.22: Betonbloxx auf der Baustelle.....	102
Abb. 4.23: Belastung mittels Kran (Miozänpfahl B.EM).....	102
Abb. 4.24: Pressen links und rechts - mittig der Pfahlkopf (Miozänpfahl B.EM).....	103
Abb. 4.25: Prüfbalken mit Presse (Kiespfahl B.EK)	104
Abb. 4.26: Hydraulikpresse mit Kraftmessdose (Kiespfahl B.EK)	104
Abb. 4.27: Skizze des Versuchsaufbaus mit Messeinrichtung MWES I- Grundriss	107
Abb. 4.28: Skizze des Versuchsaufbaus mit Messeinrichtung MWES I - Ansicht	108
Abb. 4.29: Skizze des Versuchsaufbaus mit Messeinrichtung MWES I - Schnitt A-A	108
Abb. 4.30: Legende für die Skizzen mit Messeinrichtung MWES I	109
Abb. 4.31: Messbrücke mit aufmontierten Wegaufnehmern - MWES I	109
Abb. 4.32: Horizontale Wegaufnehmer - MWES I	110
Abb. 4.33: Vorne: Mechanische Messuhr, Hinten: Vertikaler Wegaufnehmer - MWES I	110
Abb. 4.34: Kraftmessdose auf hydraulischer Presse - MWES I	111
Abb. 4.35: <i>Modell 4911</i> Rebar Strain Meter (<i>Sister Bar - Geokon</i>) [73]	111
Abb. 4.36: Montage <i>Sister Bar - Geokon</i> [73].....	112
Abb. 4.37: Foto – eingebauter Bewehrungssensor <i>Modell 4911 (Sister Bar)</i> der <i>Fa. Geokon</i> [73]	112
Abb. 4.38: Kettenextensometer - <i>Modell 1300/A9</i> Retrievable Extensometer [72]	113
Abb. 4.39: Installierte Dehnungssensoren im Miozänpfahl B.EM – <i>Fa. Geokon (Modell 4200)</i> .	114
Abb. 4.40: Lage der installierten Dehnungssensoren im Miozänpfahl B.EM – <i>Fa. Geokon (Modell 4200)</i>	114
Abb. 4.41: Dehnungssensoren zur Messung der Dehnungen in Umfangsrichtung - <i>Fa. Geokon (Modell 4200)</i> [74]	115
Abb. 4.42: Schematische Darstellung der verlegten Glasfaserkabel im Miozänpfahl B.EM [58]	116
Abb. 4.43: Schematische Darstellung der Einhausung Energiepfahl [64].....	118
Abb. 4.44: Einhausung Energiepfahl (B.EM).....	119
Abb. 5.1: Auszug aus dem Durchführungskonzept – Miozänpfahl B.EM	130
Abb. 5.2: Eingabewerte Bewehrungssensoren – Miozänpfahl B.EM.....	132
Abb. 5.3: Eingabewerte Kettenextensometer – Miozänpfahl B.EM.....	132
Abb. 5.4: Abschnittslängen sowie Einbauwerte Kettenextensometer – Miozänpfahl B.EM	133
Abb. 5.5: Faktoren Kettenextensometer – Miozänpfahl B.EM	133
Abb. 5.6: Eingabewerte Dehnungssensoren – Miozänpfahl B.EM	133
Abb. 5.7: Eingabewerte Pfahlgeometrie – Miozänpfahl B.EM	134

Abb. 5.8: Auszug aus aufbereiteten Rohdaten MWES1 – Miozänpfahl B.EM.....	135
Abb. 5.9: Auszug aus Datenauswertung MWES1 – Miozänpfahl B.EM.....	135
Abb. 5.10: Kraft auf Pfahlkopf über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM.....	135
Abb. 5.11: Vertikale Pfahlkopfverschiebung über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM.....	136
Abb. 5.12: Gemessene gesamte Längsdehnungen ε_{obs} in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM.....	137
Abb. 5.13: Spannungsbedingte Längsdehnungen ε_{σ} zufolge Spannungen in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM.....	137
Abb. 5.14: Auszug aus den Rohdaten der Kettenextensometersensoren – Miozänpfahl B.EM....	139
Abb. 5.15: Auszug aus der Auswertung der Kettenextensometer – Längsdehnungen – Miozänpfahl B.EM.....	139
Abb. 5.16: Spannungsbedingte Längsdehnungen ε_{σ} aus Kettenextensometermessungen in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM.....	140
Abb. 5.17: Herleitung der Umfangsdehnungen ε_{ϕ} [9].....	140
Abb. 5.18: Auszug aus den Rohdaten der Dehnungsaufnehmer – Miozänpfahl B.EM.....	142
Abb. 5.19: Auszug aus der Auswertung der Umfangsdehnungen – Miozänpfahl B.EM.....	142
Abb. 5.20: Umfangsdehnungen ε_{σ} in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit – Miozänpfahl B.EM.....	142
Abb. 5.21: Temperatur Bewehrungssensoren in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM.....	143
Abb. 5.22: Wien Energie Temperaturdaten in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM.....	144
Abb. 5.23: Temperatur Zusatzbohrungen TS.M2 und TS.M1 mit Temperatur Bewehrungssensor auf einer Höhenkote von ca. 143,0 m ü.A. über die Zeit aufgetragen – Miozänpfahl B.EM.....	144
Abb. 5.24: Fall A - Längsdehnungen bei einer Temperaturerhöhung ΔT	146
Abb. 5.25: Auswirkungen einer thermischen Belastung auf einen Pfahl mit freier Lagerung an beiden Enden: a) axiale Dehnungen, b) Normalkraft, c) Mantelreibung [7].....	148
Abb. 5.26: Auswirkungen einer thermischen Belastung auf einen Pfahl, der sich nicht frei bewegen kann: a) axiale Dehnungen, b) Normalkraft, c) Mantelreibung [7].....	149
Abb. 5.27: Fall B - Längsdehnungen unter thermischer und mechanischer Beanspruchung ($\Delta T+F$).....	150
Abb. 5.28: Auswirkungen einer thermisch-mechanischen Belastung auf einen Pfahl, der sich frei verformen kann: a) nur mechanische Belastung, b) nur Kühlen, c) mechanische Last und Kühlen, d) nur Heizen, e) mechanische Kraft und Heizen [7].....	151
Abb. 5.29: Auswirkungen einer thermisch-mechanischen Belastung auf einen Pfahl bei unterschiedlichen Lagerungsbedingungen: b) am Kopf und am Fuß teilweise gehalten, d) nur am Kopf gehalten [7].....	152
Abb. 5.30: Dehnungsverhalten bei einem Messsystem mit schwingender Saite.....	154
Abb. 5.31: Vergleichszeitpunkte Versuch – Miozänpfahl BEM.....	155
Abb. 5.32: Ausschnitt Rohdaten Bewehrungssensoren- Miozänpfahl BEM.....	156

Abb. 5.33: Auszug Daten Längsdehnungen für Übersichtsdiagramm Bewehrungssensoren – Miozänpfahl BEM.....	157
Abb. 5.34: Spannungs-Stauchungsdiagramm zur Ermittlung des E_c (Normalspannungen über gemessene Längsdehnungen ε_{Obs}) – Miozänpfahl B.EM	159
Abb. 5.35: Ausschnitt aus der Berechnung der Längsdehnungen - Miozänpfahl BEM	161
Abb. 5.36: Freie Dehnungen ε_{T-Free} - Miozänpfahl BEM.....	162
Abb. 5.37: Temperaturbedingte Längsdehnungen ε_{T-Obs} - Miozänpfahl BEM.....	162
Abb. 5.38: Behinderten Längsdehnungen ε_{T-Rstr} - Miozänpfahl BEM	163
Abb. 5.39: Diagramm – Längsdehnungen Laststufe 600 kN - Miozänpfahl BEM	164
Abb. 5.40: Diagramm – Längsdehnungen Laststufe 800 kN - Miozänpfahl BEM	164
Abb. 5.41: Ausschnitt aus Auswertung - ΔT der Bewehrungssensoren - Miozänpfahl BEM.....	165
Abb. 5.42: Temperaturdifferenz ΔT der Bewehrungssensoren - Miozänpfahl BEM	165
Abb. 5.43: Auszug aus Auswertung - Temperatur der Bewehrungssensoren - Miozänpfahl BEM	166
Abb. 5.44: Temperatur der Bewehrungssensoren - Miozänpfahl BEM	166
Abb. 5.45: Temperatur der Sensoren in den Zusatzbohrungen TSM1 und TSM2 - Miozänpfahl BEM	167
Abb. 5.46: Temperatur in Pfahlachse - Miozänpfahl BEM.....	167
Abb. 5.47: Links: Temperatur TS.M1, Rechts: Temperatur TS.M2 - Miozänpfahl BEM	167
Abb. 5.48: Temperaturinduzierte Spannungen - Miozänpfahl BEM.....	168
Abb. 5.49: Berechnung der Mantelreibung - Miozänpfahl BEM	169
Abb. 5.50: Pfahlkopfverschiebung Phase 6– Miozänpfahl B.EM.....	170
Abb. 5.51: Diagramm Ausschnitt – Kraft über Pfahlkopfverschiebung - Miozänpfahl B.EM	171
Abb. 5.52: Widerstand-Setzungslinie – Miozänpfahl B.EM	172
Abb. 5.53: Widerstand-Setzungslinie – Großbohrpfahl B.M5	172
Abb. 5.54: Auszug aus aufbereiteten Rohdaten MWES1 – Kiespfahl B.EK	173
Abb. 5.55: Auszug aus Datenauswertung MWES1 – Kiespfahl B.EK.....	174
Abb. 5.56: Kraft auf Pfahlkopf über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK.....	174
Abb. 5.57: Vertikale Pfahlkopfverschiebung über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK.....	175
Abb. 5.58: Datenauszug zur Berechnung der Längsdehnungen für das Übersichtsdiagramm Bewehrungssensoren – Kiespfahl B.EK	176
Abb. 5.59: Gemessene gesamte Längsdehnungen ε_{Obs} in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK	176
Abb. 5.60: Spannungsbedingte Längsdehnungen ε_{σ} zufolge Spannungen in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK.....	177
Abb. 5.61: Auszug aus den Rohdaten der Kettenextensometersensoren – Kiespfahl B.EK	177
Abb. 5.62: Auszug aus der Auswertung der Kettenextensometer- Längsdehnungen – Kiespfahl B.EK	178

Abb. 5.63: Spannungsbedingte Längsdehnungen ε_σ aus Kettenextensometermessungen in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK	178
Abb. 5.64: Auszug aus den Rohdaten der Dehnungssensoren – Kiespfahl B.EK.....	179
Abb. 5.65: Auszug aus der Auswertung der Umfangsdehnungen – Kiespfahl B.EK	179
Abb. 5.66: Umfangsdehnungen ε_σ in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit – Kiespfahl B.EK	179
Abb. 5.67: Temperatur Bewehrungssensoren in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK.....	180
Abb. 5.68: Wien Energie Temperaturdaten in verschiedenen Tiefenstufen über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK	181
Abb. 5.69: Temperatur Zusatzbohrungen TS.K und TS.M2 mit Temperatur auf einer Höhenkote von ca. 152,7 m ü.A. über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK.....	181
Abb. 5.70: Grundwassertemperatur in GWMS1 – Kiespfahl B.EK	182
Abb. 5.71: Pfahlkopfverschiebung mit korrigiertem Mittelwert wvm über die Zeit aufgetragen – Kiespfahl B.EK	183
Abb. 5.72: Diagramm Ausschnitt – Kraft zu Pfahlkopfverschiebung – Kiespfahl B.EK.....	184
Abb. 5.73: Widerstand-Setzungslinie – Kiespfahl B.EK.....	185
Abb. 5.74: Widerstand-Setzungslinie – Großbohrpfahl B.K55	185

LISTE HÄUFIG VERWENDETER SYMBOLE

Abkürzungen

B.EK	Großbohrpfahl Energie Kies (Lastabtragung im Kies)
B.EM	Großbohrpfahl Energie Miozän (Lastabtragung im Kies und Miozän)
BS	Bewehrungssensoren (auch Sensorhorizonte werden so bezeichnet)
TS.M1	Zusatzbohrung bis in die Schicht des Miozän 1
TS.M2	Zusatzbohrung bis in die Schicht des Miozän 2
TS.K	Zusatzbohrung bis in die Schicht des Kies
R53	Reaktionspfahl
R54	Reaktionspfahl
R63	Reaktionspfahl
FPUH	Forschungsprojekt Unteres Hausfeld
GEWI	Gewindestabstahl
GK	Geotechnische Kategorie
GOK	Geländeoberkante
GZG	Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit
GZT	Grenzzustand der Tragfähigkeit
HVV	Horizontalverschiebeversuche (HV-Phase = Horizontalverschiebungsphase)
KEX	Kettenextensometer (auch KEX-Abschnitte werden so bezeichnet)
KMD	Kraftmessdose
LS	Laststufe
MA 29	Magistratsabteilung 29 – Brückenbau und Grundbau (Stadt Wien)
MQ	Messquerschnitt
MWES	Messwerterfassungssystem
NS	Nullstellung
OK	Oberkante
SOB	Schnecken(endlos)-Ortbeton-Bohrpfahl
UK	Unterkante
W_{mech}	mechanische Messuhr
W_{V}	Wegaufnehmer Vertikal
W_{H}	Wegaufnehmer Horizontal
WSL	Widerstands-Setzungs-Linie

Griechische Buchstaben

α_S	Temperaturausdehnungskoeffizient Stahl
α_C	Temperaturausdehnungskoeffizient Beton
α_y	Kriechmaß
γ_b	Teilsicherheitsbeiwert für den Pfahlfußwiderstand
γ_E	Teilsicherheitsbeiwert für eine Beanspruchung
γ_R	Teilsicherheitsbeiwert für einen Widerstand
$\gamma_{R:e}$	Teilsicherheitsbeiwert für den Erdwiderstand bzw. für den Querwiderstand
γ_s	Teilsicherheitsbeiwert für den Pfahlmantelwiderstand
$\gamma_{s;t}$	Teilsicherheitsbeiwert für den Zugwiderstand eines Pfahls
γ_t	Teilsicherheitsbeiwert für den Gesamtwiderstand eines Pfahls
γ	Wichte
γ'	Wichte unter Auftrieb
ε	Dehnung
$\eta_{P;c}$	Modellfaktor für druckbeanspruchte Pfähle
$\eta_{P;t}$	Modellfaktor für zugbeanspruchte Pfähle
λ	Schlankheit
ξ_1, ξ_2	Streuungsfaktoren bei der Auswertung von statischen Pfahlprobelastungen
ξ_3, ξ_4	Streuungsfaktoren bei der Ableitung der Pfahltragfähigkeit aus Baugrunduntersuchungen
ξ_5, ξ_6	Streuungsfaktoren bei der Auswertung von dynamischen Pfahlprobelastungen
σ_{Total}	Totale Spannungen
σ_M	Spannungen zufolge mechanischer Last
σ_T	Spannungen zufolge thermischer Last
τ_n	negative Mantelreibung
φ	Winkel der inneren Reibung (auch: φ')
ω	Steifigkeitsverhältnis (auch Kreisfrequenz)
ε_{Obs}	gemessene Dehnung (bezogen auf die Nullmessung)
ε_σ	Dehnung aus Spannung (Dehnung aus der Belastung)
ε_{Total}	Totale Dehnungen
$\varepsilon_{T.Obs}$	Thermische Dehnungen
ε_{T-Free}	Freie Thermische Dehnungen
ε_{T-Rstr}	Behinderte Thermische Dehnungen
ΔT	Temperatur Differenz

Lateinische Buchstaben

A_b	Pfahlfußfläche, Pfahlsohlfläche
$A_{s,i}$	Pfahlmantelfläche in der Schicht i
b_k	Einflussbreite
B	Pfahlbreite
d	Pfahleinbindetiefe (oder auch: Seitenlänge eines quadratischen Pfahls)
D	Pfahldurchmesser
D_b	Pfahlfußdurchmesser
D_s	Pfahlschaftdurchmesser
EI	Pfahlbiegesteifigkeit
E_P	E-Modul des Pfahls
e_0	Erdruchedruck
e_{ah}	Horizontalkomponente des aktiven Erddrucks
e_{ph}	Horizontalkomponente des passiven Erddrucks
E_h	Horizontalkomponente der Erddruckkraft
E_{ah}	Horizontalkomponente der aktiven Erddruckkraft
E_{ph}	Horizontalkomponente der passiven Erddruckkraft
E_s	Steifemodul
f_N	Akkumulationsfunktion
$F_{c,k}$	charakteristische Pfahlbeanspruchung (Gebrauchslast)
F	<i>Kraft</i>
H	Horizontalkraft
k, k_s	Bettung, Bettungsmodul
k_h, k_{sh}	horizontaler Bettungsmodul (auch: k_{tr})
k_1	Bettungsmodul im 1. Zyklus
k_N	Bettungsmodul im N-ten Zyklus
k_R	Einheitsbettungsmodul
K_0	Beiwert für Erdruchedruck
K_{ah}	Beiwert für den horizontalen, aktiven Erddruck
K_{ph}	Beiwert für den horizontalen, passiven Erddruck
l, L	Pfahllänge (auch: charakteristische Länge)
l_0	elastische Pfahllänge
M	Biegemoment
M_{cr}	Rissmoment
n	Anzahl von Pfählen bzw. Versuchen
N	Zyklen(an)zahl

N_T	Normalkraft im Pfahl zufolge Temperatur
p	Bodenreaktionskraft
q_b	Pfahlfußwiderstand (auch: Pfahlsohlwiderstand, früher: Spitzendruck)
q_s	Pfahlmantelwiderstand (auch/früher: Mantelreibung)
R	Pfahlgesamtwiderstand
R_c	Druckwiderstand des Bodens gegen einen Pfahl im GZT
$R_{c;m}$	Versuchswert von R_c aus einer oder mehreren Probelastungen
R_t	Herauszieh-Widerstand eines Pfahls
$R_{t;m}$	Versuchswert von R_t aus einer oder mehreren Probelastungen
R_{tr}	Pfahlwiderstand gegen Querbelastung
R_b	Pfahlfußwiderstand
R_s	Pfahlmantelwiderstand
w_v	Vertikalverschiebung
w_h	Horizontalverschiebung
z	Tiefe

Durchführungskonzept B.EK- Teil 1

VERSUCHSDURCHFÜHRUNG: Energiefahri KIES (EK)												
Versuchsphase	gewählte Referenzzeitpunkte	Versuchsstadium	Bemerkung	Arbeits-schritt	mechanische Belastung Durchführung: ausführende ARGE Überwachung: TU Wien			thermische Belastung Durchführung: Wienerergie Überwachung: TU Wien				
					Typ	geplante Last	vorh. Last/Strahl-konstruktion	vorh. Anzahl Betonfertigteile	rechn. vorhandene Last	gemessene vorhandene Last (KMD)	Vorlauf-temperatur	AT zwischen Vor- und Rücklauf
PHASE 0	PO-0	Versuchsbeginn	Nullmessung aller Messsensoren	EK 0	P = 0,00 · Pk = 0 kN	0 kN	0 Stk.	= 0 kN	0 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
			Vorlast	EK 1	P = 0,06 · Pk = 48 kN	251 kN	0 Stk.	= 251 kN	275 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
			Erstbelastung (1. Lastschleife)	EK 2b	P = 0,50 · Pk = 600 kN	251 kN	8 Stk.	= 393 kN	404 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
				EK 2c	P = 0,75 · Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	596 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
				EK 3	P = 1,00 · Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	782 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
				EK 4	P = 1,25 · Pk = 1000 kN	251 kN	42 Stk.	= 995 kN	981 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
				EK 5a	P = 1,00 · Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	808 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
				EK 5b	P = 0,75 · Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	606 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
				EK 5c	P = 0,06 · Pk = 48 kN	251 kN	0 Stk.	= 251 kN	265 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
				EK 6b	P = 0,50 · Pk = 600 kN	251 kN	8 Stk.	= 393 kN	389 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
PHASE 1			Wiederbelastung (2. Lastschleife)	EK 6c	P = 0,75 · Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	582 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
			Entlastung	EK 7	P = 1,00 · Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	782 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
			Entlastung (Referenzfälle für Vergleich mit thermischer Belastung)	EK 8a	P = 1,25 · Pk = 1000 kN	251 kN	42 Stk.	= 995 kN	979 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
				EK 8b	P = 1,00 · Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	802 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
				EK 8c	P = 0,75 · Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	587 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
				EK 9	P = 0,75 · Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	592 kN	35 °C	≤ 2 °C	
				EK 10	P = 0,75 · Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	592 kN	35 °C	≤ 2 °C	
				EK 11	P = 1,00 · Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	791 kN	35 °C	≤ 2 °C	
PHASE 2			Lastvariation	EK 12a	P = 1,25 · Pk = 1000 kN	251 kN	42 Stk.	= 995 kN	1010 kN	35 °C	≤ 2 °C	
				EK 12b	P = 1,00 · Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	809 kN	35 °C	≤ 2 °C	
				EK 12c	P = 0,75 · Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	588 kN	35 °C	≤ 2 °C	
				EK 13a	P = 0,75 · Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	588 kN	8 °C	≤ 2 °C	
				EK 13b	P = 0,75 · Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	588 kN	2 °C	≤ 2 °C	
				EK 14	P = 0,75 · Pk = 600 kN	251 kN	19 Stk.	= 588 kN	579 kN	2 °C	≤ 2 °C	
				EK 15	P = 1,00 · Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	804 kN	2 °C	≤ 2 °C	
				EK 16a	P = 1,25 · Pk = 1000 kN	251 kN	42 Stk.	= 995 kN	994 kN	2 °C	≤ 2 °C	
PHASE 3			Lastvariation	EK 16b	P = 1,00 · Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	814 kN	2 °C	≤ 2 °C	
				EK 17a	P = 1,00 · Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	800 kN	kein Absorberbetrieb (natürliche Erwärmung)	kein Absorberbetrieb	
				EK 17b+18	P = 1,00 · Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	800 kN	35 °C	≤ 2 °C	
				EK 19	P = 1,00 · Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	800 kN	2 °C	≤ 2 °C	
				EK 20	P = 1,00 · Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	800 kN	2 °C	≤ 2 °C	
				EK 21	P = 1,00 · Pk = 800 kN	251 kN	31 Stk.	= 800 kN	839 kN	14 °C	≤ 2 °C	
				EK 22a	P = 0,50 · Pk = 400 kN	251 kN	8 Stk.	= 393 kN	418 kN	14 °C	≤ 2 °C	
				EK 22b	P = 0,06 · Pk = 48 kN	251 kN	0 Stk.	= 251 kN	300 kN	14 °C	≤ 2 °C	
PHASE 4			Entlastung und Abschaltung Absorberbetrieb	EK 22c	P = 0,06 · Pk = 48 kN	251 kN	0 Stk.	= 251 kN	300 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
				EK 22d	P = 0,00 · Pk = 0 kN	0 kN	0 Stk.	= 0 kN	0 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
				EK 23	P = 0,00 · Pk = 0 kN	0 kN	0 Stk.	= 0 kN	0 kN	kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb	
				EK 24	P = → Bruch	gemäß Prüfablauf TU Wien					kein Absorberbetrieb	kein Absorberbetrieb
				EK 25		keine mechanische Belastung					Druckkontrolle Absorbersystem	
						keine mechanische Belastung						
						keine mechanische Belastung						
						keine mechanische Belastung						

Durchführungskonzept B.EK- Teil 2

VERSUCHSDURCHFÜHRUNG: Energiefahrl KIES (EK)															
Versuchsphase	gewählte Referenzzeitpunkte	Versuchsstadium	Bemerkung	Arbeits-schritt	Dauer Lastwechsel	Beobachtungsdauer	Zeit (Anfang Arbeitsschritt)	Zeit (Lastaufbringung abgeschlossen)	Zeit (Ende Arbeitsschritt)	Dauer					
PHASE 0	PO-0	Versuchsbeginn	Nullmessung aller Messsensoren	EK 1	9	16 min	31.07.2018 08:38	31.07.2018 09:12	31.07.2018 08:38	1,05 Tage					
				EK 2b	28	15 min	31.07.2018 10:26	31.07.2018 10:54	31.07.2018 10:26						
				EK 2c	41	40 min	31.07.2018 11:09	31.07.2018 11:50	31.07.2018 11:09						
				EK 3	55	32 min	31.07.2018 12:30	31.07.2018 13:25	31.07.2018 12:30						
				EK 4	53	120 min	31.07.2018 13:57	31.07.2018 14:50	31.07.2018 13:57						
				EK 5a	50	15 min	31.07.2018 16:50	31.07.2018 17:40	31.07.2018 16:50						
				EK 5b	32	15 min	31.07.2018 17:55	31.07.2018 18:27	31.07.2018 17:55						
				EK 5c	43	15 min	31.07.2018 18:42	31.07.2018 19:25	31.07.2018 18:42						
				EK 6b	38	15 min	31.07.2018 19:40	31.07.2018 20:18	31.07.2018 19:40						
				EK 6c	52	15 min	31.07.2018 20:33	31.07.2018 21:25	31.07.2018 20:33						
PHASE 1	PO-1000 PO-800 PO-600 P1_AH-600 P1_EH-600	Simulation Gebäudeherstellung	Entlastung Wiederbelastung (2. Lastschleife) Entlastung (Referenzfälle für Vergleich mit thermischer Belastung)	EK 7	60	449 min	31.07.2018 21:40	31.07.2018 22:40	01.08.2018 07:24	15,25 Tage					
				EK 8a	60	449 min	31.07.2018 22:55	31.07.2018 23:55	01.08.2018 07:24						
				EK 8b	35	16 min	01.08.2018 07:24	01.08.2018 07:59	01.08.2018 07:24						
				EK 8c	37	60 min	01.08.2018 08:15	01.08.2018 08:52	01.08.2018 08:15						
				EK 9	14,828	Tage	01.08.2018 11:10	16.08.2018 07:02	16.08.2018 11:10						
				EK 10	9	9 min	16.08.2018 07:02	16.08.2018 07:11	16.08.2018 07:11						
				EK 11	59	60 min	16.08.2018 07:11	16.08.2018 08:10	16.08.2018 07:11						
				EK 12a	50	60 min	16.08.2018 09:10	16.08.2018 10:00	16.08.2018 09:10						
				EK 12b	45	60 min	16.08.2018 11:00	16.08.2018 11:45	16.08.2018 11:00						
				EK 12c	45	137 min	16.08.2018 12:45	16.08.2018 13:30	16.08.2018 12:45						
PHASE 2	P2_AK-600 P2_EK-600	Simulation Gebäudeheizung	1. ABKÜHLPHASE Zwischenablesung; Vorbereitung Lastvariation Lastvariation 1. ABKÜHLPHASE	EK 13a	0,5625	Tage	16.08.2018 21:30	17.08.2018 11:00	17.08.2018 11:00	12,83 Tage					
				EK 13b	11,832	Tage	17.08.2018 11:00	29.08.2018 06:58	29.08.2018 11:00						
				EK 14	12	12 min	29.08.2018 06:58	29.08.2018 07:10	29.08.2018 06:58						
				EK 15	52	58 min	29.08.2018 07:10	29.08.2018 08:02	29.08.2018 07:10						
				EK 16a	41	62 min	29.08.2018 09:00	29.08.2018 09:41	29.08.2018 09:00						
				EK 16b	41	16 min	29.08.2018 10:43	29.08.2018 11:24	29.08.2018 10:43						
				EK 17a	2,0694	Tage	29.08.2018 19:00	31.08.2018 20:40	31.08.2018 19:00						
				EK 17b+18	9,8958	Tage	31.08.2018 20:40	10.09.2018 18:10	10.09.2018 18:10						
				EK 19	13,236	Tage	10.09.2018 18:10	23.09.2018 23:50	23.09.2018 18:10						
				EK 20	0,5	Tage	23.09.2018 23:50	24.09.2018 11:50	24.09.2018 11:50						
PHASE 3	P3_AH-800 P3_EH-800	Simulation Wechselbetrieb	2. AUFHEIZPHASE 2. ABKÜHLPHASE Zwischenablesung; Herstellung der natürlichen Temperaturverhältnisse	EK 21	2,8267	Tage	24.09.2018 11:50	27.09.2018 09:00	27.09.2018 11:50	26,01 Tage					
				EK 22a	80	18 min	27.09.2018 07:40	27.09.2018 09:18	27.09.2018 07:40						
				EK 22b	27	15 min	27.09.2018 09:18	27.09.2018 09:45	27.09.2018 09:18						
				EK 22c	0,0417	Tage	27.09.2018 10:00	27.09.2018 11:00	27.09.2018 10:00						
				EK 22d	0,125	Tage	27.09.2018 11:00	27.09.2018 14:00	27.09.2018 11:00						
				EK 23	3,7431	Tage	27.09.2018 14:00	01.10.2018 07:50	01.10.2018 14:00						
				EK 24	775	min	01.10.2018 07:50	01.10.2018 20:45	01.10.2018 07:50						
				EK 25	0	min	01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45						
				PHASE 4	P5-0 P6-1000 P6-800 P6-600 P6-max	Vorbereitung für Probebelastung	Entlastung und Abschaltung Absorberbetrieb Umbau von Totlast auf Presse Ermittlung Bruchlast Prüfung, ob Absorbersystem weiterhin dicht ist	EK 25	0		min	01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45	0,00 Tage
								EK 26	0		min	01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45	
EK 27	0	min	01.10.2018 20:45					01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45						
EK 28	0	min	01.10.2018 20:45					01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45						
EK 29	0	min	01.10.2018 20:45					01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45						
EK 30	0	min	01.10.2018 20:45					01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45						
EK 31	0	min	01.10.2018 20:45					01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45						
EK 32	0	min	01.10.2018 20:45					01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45						
EK 33	0	min	01.10.2018 20:45					01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45						
EK 34	0	min	01.10.2018 20:45					01.10.2018 20:45	01.10.2018 20:45						

ANHANG B

Herstellungsprotokoll Kettenextensometer B.EM



Protokoll: Einbau Kettenextensometer

Bezeichnungen		Sensor Typ Extensometer: Geokon A9	
Prüfkörper:	B.EM		
Prüfung Nr.:	93		
Prüfdatum:			

Extensometerrohr		Zuordnung		Messwerte	
Position	Messhorizonte	Pos.-nr.	Seriennummer Sensor	Kalibrierwert bei 20mm	Zeitpunkt 1 nach Einbau
OK-Rohr = 156,86 müA			Datum: 02.05.2018		
1	L ₁ = 0,135 m	1	1639033	6080	6082
2	L ₂ = 11,660 m	2	1639034	5918	5944
3	L ₃ = 1,446 m	3	1639035	5977	5990
4	L ₄ = 1,446 m	4	1639036	6007	6050
5	L ₅ = 1,446 m	5	1639037	5904	5935/5923
X	L ₆ = 1,446 m	6	ANKER		
	L ₇ = 0,062 m				
L _{ges} -Rohr = 17,52 m		→ Rohre OK = OK FEHLERLOS → Messwerte: Mischband			
UK-Rohr = müA					

Anmerkungen	
$118,58 + 1,047 - 0,765 = 156,86$	

Eingebaut durch:	Datum:	Fertigung:
S. H. H.	03.05.18	

Herstellungsprotokoll Kettenextensometer B.EK



Protokoll: Einbau Kettenextensometer

Bezeichnungen		Sensor Typ Extensometer: Geokon A9	
Prüfkörper:	B EK		
Prüfung Nr.:			
Prüfdatum:	25.07.18		

Extensometerrohr		Zuordnung		Messwerte	
Position	Messhorizonte	Pos.-nr.	Seriennummer Sensor	Kalibrierwert bei 20mm	Zeitpunkt 1 nach Einbau
OK-Rohr =		müA	Datum:		
0 1	L ₁ =	m 1	1639033	6080	6092
0 2	L ₂ =	m 2	1639034	5918	5965
0 3	L ₃ =	m 3	1639035	5977	5976
0 4	L ₄ =	m 4	1639036	6007	6038
0 5	L ₅ =	m 5	1639037	5904	5976
X	L ₆ =	m 6	ANKER		
	L ₇ =	m	Ö 70 nach OK 5 PPMKOPF OK 5 M,0 cm		
L _{ges} -Rohr=		m			
UK-Rohr =		müA			

Anmerkungen			
(Empty space for notes)			
Eingebaut durch:		Datum:	25.07.18
		Fertigung:	

ANHANG C

Protokolle Instrumentierung B.EM

Protokoll: Zuordnung und Überprüfungen der Instrumentierung

lfd.Nr.: 16

Bezeichnung Prüfkörper:
B.EM_Sister

Bauverfahren:	verrohrt	Typ Instrumentierung:	4911
Herstellungsart u. ϕ	D90	Pfahllänge:	
Geologie Sohle:		Prüffeld:	

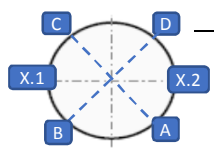
Skizze Messhorizonte	Zuordnung		Überprüfung der Messwerte			
	Pos.-nr.	Seriennummer Sensor	Zeitpunkt 1 vor Installation	Zeitpunkt 2 vor Einbau	Zeitpunkt 3 vor Betonage	Zeitpunkt 4 nach Betonage
OK Bewehrungskorb= OK Längseisen (NICHT die Haken!!)						
156,73 müA						
		Datum:	03.04.2017	11.04.2017 07:30	11.04.2017 12:00	12.04.2017 13:00
	Bewehrungssensoren		Typ: Sister Bar 4911			
	1.1	8,25 - 1712039	7289,3 - 14,5	7279,4 - 9,4	2699,7 - 15,5	7271,0 - 29,4
	1.2	8,25 - 1712038	7153,4 - 15,6	7163,8 - 9,5	7174,0 - 14,3	7156,3 - 29,0
	2.1	19,1 - 1712070	7350,4 - 18,2	7346,4 - 9,8	2710,3 - 13,3	7379,8 - 27,6
	2.2	19,1 - 1712071	7066,7 - 18	7072,1 - 9,6	7070,0 - 13,0	7115,3 - 26,6
	3.1	20,8 - 1712075	6750,1 - 19,1	7151,7 - 9,4	7151,0 - 12,9	7103,4 - 30,2
	3.2	20,8 - 1712074	7143,3 - 19,5	6745,2 - 9,9	2704,5 - 13,2	6723,5 - 30,4
	4.1	22,5 - 1712079	7317,9 - 19,8	7300,0 - 9,7	2598,3 - 13,2	7261,9 - 30,9
	4.2	22,5 - 1712080	6884,0 - 19,5	6903,8 - 9,4	6906,4 - 12,8	6871,1 - 29,1
	5.1	24,2 - 1712084	7069,2 - 16,4	6999,7 - 9,5	6995,2 - 12,8	7002,2 - 22,7
	5.2	24,2 - 1712082	6987,3 - 17,2	7075,3 - 9,5	2660,8 - 12,9	7136,6 - 24,8
Lage Bewehrungssensoren [°]:	Pfahlsohlendruckmessdose		Typ: \emptyset :			
	DMD					
	Freigabe für Einbau am			Endabnahme am		
			ARGE	ÖBA (AG)	ARGE	ÖBA (AG)

Protokoll: Zuordnung und Überprüfungen der Instrumentierung

Ifd.Nr.: 17

Bezeichnung Prüfkörper:	<i>Bauverfahren:</i> verrohrt	<i>Typ Instrumentierung:</i> 4200	
B.EM_DEHN	<i>Herstellungsart u. Ø</i> D90	<i>Pfahllänge:</i>	
	<i>Geologie Sohle:</i>	<i>Prüffeld:</i>	

Skizze Messhorizonte	Zuordnung		Überprüfung der Messwerte		Zeitpunkt 3	Zeitpunkt 4
OK Bewehrungskorb= OK Längseisen (NICHT die Haken!!)	Pos.-nr.	Seriennummer Sensor	Zeitpunkt 1 vor Installation	Zeitpunkt 2 vor Einbau	vor Betonage	nach Betonage
156,73 müA	Datum:		B - 5.4.17	 	11.04.2017 12:00	12.04.2017 13:00
Bewegungssensoren			<i>Typ: Dehnungsaufnehmer 4200</i>			
1.1 O 1.2 L1= 12,05 m	1.1	19,1 A	2677,3 - 10,4	 	895,1 - 13,0	795,3 - 27,5
2.1 O 2.2 L2= 13,75 m	1.2	19,1 B	2640,8 - 10,2	 	799,7 - 12,6	806,0 - 27,6
	1.3	19,1 - C	2800,5 - 10,9	 	840,7 - 12,1	895,7 - 26,6
3.1 O 3.2 L3= 15,45 m	1.4	19,1 - D	2334,5 - 11,1	 	845,5 - 13,1	XXX,X - 27,4
	2.1	20,8 - A	2667,0 - 10,4	 	897,9 - 13,0	812,9 - 30,6
4.1 O 4.2 L4= 17,15 m	2.2	20,8 - B	2755,8 - 10,7	 	912,2 - 13,1	884,2 - 31,5
	2.3	20,8 - C	2648,8 - 10,3	 	892,4 - 13,0	795,8 - 31,1
5.1 O 5.2 L5= 0,00 m	2.4	20,8 - D	2775,7 - 10,2	 	917,5 - 12,9	846,6 - 30,5
O DMD	3.1	22,5 - A	2738,4 - 11,2	 	826,6 - 13,0	809,0 - 31,1
Lage Dehnungssensoren [°]:	3.2	22,5 - B	2852,4 - 11,3	 	860,6 - 13,0	844,5 - 31,9
	3.3	22,5 - C	2889,5 - 10,7	 	869,5 - 12,9	857,8 - 30,6
	3.4	22,5 - D	2873,9 - 10,3	 	863,9 - 12,7	849,3 - 29,7
	4.1	24,2 - A	2996,5 - 20,2	 	881,3 - 12,7	864,7 - 24,6
	4.2	24,2 - B	3101,4 - 21,6	 	922,0 - 12,9	885,5 - 24,5
	4.3	24,2 - C	2896,1 - 20,5	 	858,7 - 13	894,3 - 24,3
	4.4	24,2 - D	2963,9 - 19,4	 	974,6 - 12,4	905,3 - 22,2
	<i>Freigabe für Einbau am</i>			<i>Endabnahme am</i>		
			ARGE	ÖBA (AG)	ARGE	ÖBA (AG)



Protokoll: Zuordnung und Überprüfungen der Instrumentierung

lfd.Nr.: 18

Bezeichnung Prüfkörper: B.EM_TEMP	Bauverfahren:	verrohrt	Typ Instrumentierung:	3800-2-1
	Herstellungsart u. Ø	D90	Pfahllänge:	
	Geologie Sohle:		Prüffeld:	

Skizze Messhorizonte	Zuordnung		Überprüfung der Messwerte				
	Pos.-nr.	Seriennummer Sensor	Zeitpunkt 1 vor Installation	Zeitpunkt 2 vor Einbau	Zeitpunkt 3 vor Betonage	Zeitpunkt 4 nach Betonage	Zeitpunkt nach Betonage
OK Bewehrungskorb= OK Längsseisen (NICHT die Haken!!)							
156,73 müA							
1.1 O 1.2 L1= 11,70 m							
2.1 O 2.2 L2= 17,50 m							
3.1 O 3.2 L3= 0,00 m							
4.1 O 4.2 L4= 0,00 m							
5.1 O 5.2 L5= 0,00 m							
Bewehrungssensoren			<i>Typ: Temp.fühler 3800-2-1</i>				
	Datum:		03.04.2017	11.04.2017 07:30	11.04.2017 12:00	11.04.2017 13:00	12.04.2017 13:30
1.1 O	19,1 A		12,5	8,6	12,0	18,6	26,6
2.1 O	19,1 B		12,2	9,2	12,6	18,9	26,0
3.1 O	24,2 A		12,5	9,5	12,5	13,2	16,3
3.2 O	24,2 B		12,5	9,3	12,5	13,6	17,6
4.1 O							
4.2 O							
5.1 O							
5.2 O							
Pfahlsohl Druckmessdose	<i>Typ: Ø:</i>						
DMD							
Lage Bewehrungssensoren [°]:			<i>Freigabe für Einbau am</i>		<i>Endabnahme am</i>		
			ARGE	ÖBA (AG)	ARGE	ÖBA (AG)	

Protokolle Instrumentierung B.EK

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

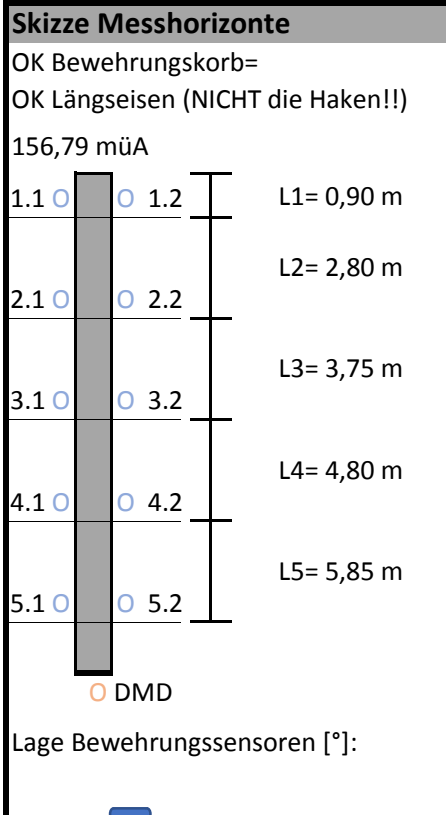


Protokoll: Zuordnung und Überprüfungen der Instrumentierung

lfd.Nr.: 19

Bezeichnung Prüfkörper:
B.EK_Sister

Bauverfahren:	verrohrt	Typ Instrumentierung:	4911
Herstellungsart u. \emptyset	D60	Pfahllänge:	
Geologie Sohle:		Prüffeld:	



Zuordnung		Überprüfung der Messwerte			
Pos.-nr.	Seriennummer Sensor	Zeitpunkt 1 vor Installation	Zeitpunkt 2 vor Einbau	Zeitpunkt 3 vor Betonage	Zeitpunkt 4 nach Betonage
Datum:		03.04.2017	10.04.2017 13:30	10.04.17 14:45-15:05	12.04.17 13:30-13:45
Bewehrungssensoren		<i>Typ: Sister Bar 4911</i>			
1.1	8,25 - 1712037	7282,5 - 14,6			7286,2 - 20,2
1.2	8,25 - 1712040	6932,7 - 16,3			6891,1 - 19,9
2.1	10,0 - 1712046	7023,5 - 18,3			7077,1 - 17,9
2.2	10,0 - 1712045	7390,2 - 18,0			7436,5 - 17,7
3.1	11,05 - 1712059	6930,2 - 19,2			6977,6 - 17,7
3.2	11,05 - 1712049	6988,4 - 17,0			6920,4 - 17,7
4.1	12,1 - 1712065	7200,2 - 17,6			7260,1 - 17,3
4.2	12,1 - 1712064	6936,3 - 17,7			6997,1 - 17,3
5.1	13,15 - 1712068	7096,5 - 18,0			7175,9 - 17,1
5.2	13,15 - 1712067	7256,5 - 19,2			7350,3 - 17,1
Pfahlsohlendruckmessdose		<i>Typ: \emptyset:</i>			
DMD					

Freigabe für Einbau am		Endabnahme am	
ARGE	ÖBA (AG)	ARGE	ÖBA (AG)

Protokoll: Zuordnung und Überprüfungen der Instrumentierung

Ifd.Nr.: 20

Bezeichnung Prüfkörper:	<i>Bauverfahren:</i> verrohrt	<i>Typ Instrumentierung:</i> 4200
B.EK_DEHN	<i>Herstellungsart u. Ø</i> D60	<i>Pfahllänge:</i>
	<i>Geologie Sohle:</i>	<i>Prüffeld:</i>

Skizze Messhorizonte	Zuordnung		Überprüfung der Messwerte			
OK Bewehrungskorb= OK Längseisen (NICHT die Haken!!) 156,79 müA 	Pos.-nr.	Seriennummer Sensor	Zeitpunkt 1 vor Installation	Zeitpunkt 2 vor Einbau	Zeitpunkt 3 vor Betonage	Zeitpunkt 4 nach Betonage
		Datum:		B	10.04.2017 13:30	10.04.17 14:45-15:05
	Bewegungssensoren		<i>Typ: Dehnungsaufnehmer 4200</i>			
	1.1	10,0 A -	2638,9 - 9,3	913,1 - 25,4	895,1 - 16,5	827,5 - 17,5
	2.1	10,0 B -	2678,9 - 10,1	901,9 - 22,8	905,2 - 18,0	809,9 - 17,5
	3.1	10,0 C -	2704,6 - 9,1	923,9 - 21,1	918,3 - 16,0	901,0 - 16,8
	4.1	10,0 D -	2760,6 - 10,0	921,1 - 23,4	915,6 - 16,5	855,7 - 17,0
	5.1	11,05 A -	2700,1 - 9,9	912,1 - 27,6	904,8 - 18,0	831,1 - 17,6
	2.2	11,05 B -	2671,0 - 10,3	904,7 - 23,5	899,5 - 15,2	821,1 - 18,0
	3.2	11,05 C -	2670,6 - 9,7	910,1 - 22,2	904,5 - 16,7	837,0 - 17,6
	4.2	11,05 D -	2737,2 - 8,1	922,7 - 22,7	918,6 - 16,3	856,4 - 15,7
	3.3	12,1 A -	2545,2 - 8,9	863,7 - 23,8	863,3 - 22,6	762,2 - 17,7
	4.3	12,1 B -	2537,3 - 9,3	1116,5 - 23,5	1116,8 - 23,6	1253,4 - 18,0
	5.2	12,1 C -	2605,6 - 9,0	888,8 - 21,4	889,0 - 22,1	793,5 - 17,6
	1.2	12,1 D -	2633,7 - 9,7	895,5 - 23,1	895,1 - 23,1	804,7 - 17,9
	2.2	13,15 A -	2702,3 - 8,9	916,1 - 23,8	907,7 - 16,6	850,7 - 16,9
	3.2	13,15 B -	2747,4 - 9	925,5 - 22,7	920,1 - 16,6	855,7 - 17,0
	4.2	13,15 C -	2698,4 - 8,8	912,4 - 23,6	904,7 - 16,8	836,7 - 17,1
	5.2	13,15 D -	2655,6 - 9,2	908,2 - 24,2	909,9 - 16,7	832,1 - 17,0
	<i>Freigabe für Einbau am</i>			<i>Endabnahme am</i>		
	ARGE			ÖBA (AG)		
	ARGE			ÖBA (AG)		

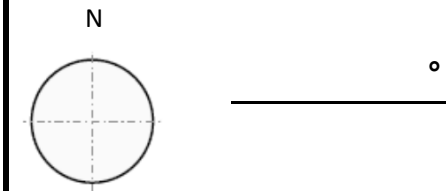
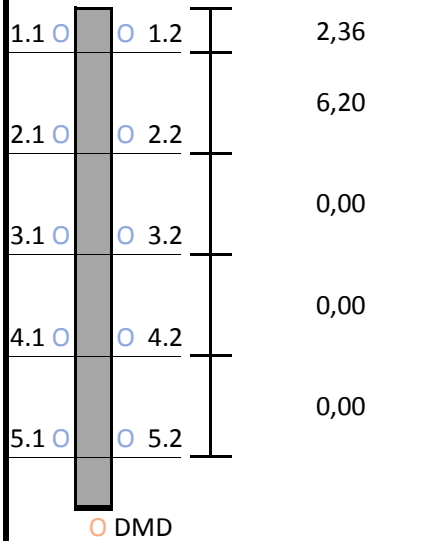
Protokoll: Zuordnung und Überprüfungen der Instrumentierung

lfd.Nr.: 24

Bezeichnung Prüfkörper:
B.EK_TEMP mitte

Bauverfahren:	verrohrt	Typ Instrumentierung:	3800-2-1
Herstellungsart u. \emptyset	D60	Pfahllänge:	
Geologie Sohle:		Prüffeld:	

Skizze Messhorizonte	Zuordnung		Überprüfung der Messwerte			
	Pos.-nr.	Seriennummer Sensor	Zeitpunkt 1 vor Installation	Zeitpunkt 2 vor Einbau	Zeitpunkt 3 vor Betonage	Zeitpunkt 4 nach Betonage
OK Bewehrungskorb= OK Längseisen (NICHT die Haken!!)						
156,79 müA						
1.1 ○ 1.2						
2.1 ○ 2.2						
3.1 ○ 3.2						
4.1 ○ 4.2						
5.1 ○ 5.2						
		Datum:	42828,00	42835,56	10.04.17 14:45-15:05	42837,57
	Bewehrungssensoren		Typ: Temp.fühler 3800-2-1			
	1.1	24,2 H	12,70	23,30	25,40	19,20
	1.2	24,2 I	13,10	23,00	22,10	17,80
	2.1	24,2 J	11,90	25,50	17,00	17,50
	2.2	24,2K	12,50	26,30	16,60	17,40
	3.1	24,2 L	12,60	24,20	17,00	16,20
	3.2					
	4.1					
	4.2					
	5.1					
	5.2					
Lage Bewehrungssensoren [°]:	Pfahlsohlendruckmessdose		Typ: \emptyset :			
	DMD					
	Freigabe für Einbau am			Endabnahme am		
	ARGE			ÖBA (AG)		



ANHANG D

Kernbohrung Z3 – Bohrprofil

Ausschluss: KB-Z3		Adresse: 1220 Wien Contiweg							
Projekt: 24/67c Forschungsprojekt Unteres Hausfeld KB2018		Auftraggeber: <small>GEODE V 7.8.3.0 © MA29 (2008-2018)</small> MA 29 Brückenbau und Grundbau Besteller: MA29							
		Ausführende Firma: Günther Eder Ges.m.b.H.							
		Geräteführer: Orth Vladimir							
M 1:100	GOK [mWN]: 0.27	Koord. Y: 10583.01	Neig. zu Lot: 0°						
	GOK [müA]: 156.95	Koord. X: 343811.34	geot.B.: AZr. von: 14.08.2018						
			Plan Nr.: KB-Z3						
			AZr. bis: 17.08.2018						
Ausschluss	Wasserbeobachtung Zeit Datum	TIEFE relativ absolut [m WN]	Boden- signatur	L V	K Z	TIEFE relativ zu GOK 0.00	TIEFE absolut [m WN] 0.27	SCHICHTBESCHREIBUNG Bodenarten, Formen, Eigenschaften, Gefügemerkmale, Farben	Proben Versuche
Rammkernbohrung D219/160mm			A			2.00	-1.73	Anschüttung, Kies, sandig, steinig, Ziegelbruch 1%, grau, locker,	
			A					Kies; sandig, steinig; Quarzkies; graubraun; rund; locker;	
	14.08. 1▽	3.50 -3.23				3.40	-3.13	Kies; sandig; Quarzkies; braun; rund; locker;	4.00-4.60
Rammkernbohrung mit Liner						10.00	-9.73	Kies; grobsandig; Quarzkies; rotbraun; rund; locker, nass;	5.70-6.20
						10.60	-10.33	Grobsand; mittelmäßig, steinig; graubraun; nass;	7.00-7.80
						12.70	-12.43	Feinsand; gering schluffig; oliv; locker - mitteldicht, nass;	12.00-12.70
						13.00	-12.73	Schluff; gering feinsandig; rotbraun; weich;	
						13.10	-12.83	Feinsand; schluffig; oliv, rotbraun; locker;	13.50-13.90
						15.10	-14.83	Schluff; tonig, gering feinsandig; oliv; steif;	14.10-14.40
	10.08. 2▽	16.00 -15.73				16.00	-15.73	Feinsand; gering schluffig; oliv; locker;	15.10-15.70
						16.50	-16.23	Feinsand; schluffig; Verhärtungen, Oxidation - schwarz; oliv, rostbraun;	16.40-16.70
						17.50	-17.23	Feinsand; mittelsandig, gering schluffig; braun, oliv; locker;	17.00-17.50
						18.60	-18.33	Mittelsand; feinsandig, gering schluffig; olivbraun; locker;	18.00-18.60
						21.70	-21.43	Feinsand; mittelsandig, schluffig; olivbraun; locker;	19.40-20.00
						22.70	-22.43	Mittelsand; feinsandig, Hellglimmer, rotbraun, oliv,	22.10-22.50
						23.40	-23.13		

Kernbohrung 13 - Bohrprofil [60]

EDV-Nr.: 26555048		BGK/BI-Nr.: P555/KB-13		Adresse: 1220 Wien KG Aspern, Grst.Nr.: 563/5					
Projekt:				Auftraggeber:		Ausführende Firma:			
				Besteller:		Geräteführer:			
M 1:100		GOK [mWN]: 2.11		Koord. Y: 10615.11	Neig. zu Lot: 0°	AZr. von: 21.08.2012	Plan Nr.:		
		GOK [müA]: 158.79		Koord. X: 343819.19	geot.B.:	AZr. bis: 24.08.2012			
Aufschluss	Wasserbeobachtung Zeit Datum	TIEFE relativ absolut [m WN]	Boden- signatur	L V	K Z	TIEFE relativ zu GOK 0.00 2.11	TIEFE absolut [m WN]	SCHICHTBESCHREIBUNG Bodenarten, Formen, Eigenschaften, Gefügemerkmale, Farben	Proben Versuche
Schacht 0.80x2.00m								Mittelkies; grobkiesig, sandig; hellbraun, hellgrau;	1.00-1.50 [B] ⓧ
2.50						2.00	0.11	Mittelkies; grobkiesig, sehr fein-mittelsandig; hellbraun, dunkelbraun;	
	22.08.	1▽ 3.85 -1.74				3.50	-1.39	Fein-Mittelkies, Mittel-Grobsand; grobkiesig, steinig > 70, steinig>80; hellbraun;	4.00-4.50 [AI] ○
Rammkernbohrung mit Liner						6.00	-3.89	Fein-Mittelkies, Grobsand; gering grobkiesig; hellgrau, hellbraun;	6.00 WPM
						10.40	-8.29		8.00-8.50 [B] ⓧ
						10.60	-8.49	Fein-Mittelsand; feinkiesig, steinig > 70; hellbraun;	0.00-10.00 MC
						10.80	-8.69	Feinsand; gering schluffig, steinig > 50; hellbraun;	
						11.00	-8.89	Fein-Mittelkies; sehr mittel-grobsandig; hellbraun;	
						11.40	-9.29	Mittel-Grobsand; fein-mittelkiesig; hellbraun;	11.00-11.50 [B] ⓧ
						11.60	-9.49	Fein-Mittelkies, Mittel-Grobsand; braun;	
						12.00	-9.89	Fein-Mittelkies; mäßig mittelsandig; braun;	
						12.30	-10.19	Mittel-Grobsand; feinkiesig; hellgrau;	
						13.00	-10.89	Fein-Mittelkies; gering grobkiesig, sehr mittel-grobsandig, steinig>60; rostfarben, hellbraun;	
						13.10	-10.99	Schluff; sandig, mit Konkretionen; dunkelbraun, rostfarben; Schluff; feinsandig; hellbraun, rostfarben;	
						13.70	-11.59	Feinsand; gering schluffig; hellbraun;	
						14.10	-11.99	Feinsand; schluffig; Sandsteinverfestigt; hellbraun, grüngrau;	14.30-14.70 [BI] KP
						14.30	-12.19	Feinsand; schluffig; grüngrau;	15.00-15.40 [BI] KP
						16.15	-14.04		
						16.20	-14.09	Schluff; Grobkalk; grüngrau; Schluff; gering feinsandig; Grobkalkführend; grüngrau;	16.40-16.80 [BI] KP
						17.20	-15.09	Feinsand; gering schluffig; hellgrau, grüngrau;	
						17.90	-15.79	Feinsand; gering schluffig; rostfarben;	
						18.20	-16.09	Feinsand; gering schluffig; hellbraun, rostfarben;	18.00-18.50 [B] ⓧ
						20.00	-17.89		

ANHANG E

Ergebnisse Phase 0-5 B.EM

Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

A U S W E R T U N G

der statischen Pfahlprobelastung gemäß EA-Pfähle

Status: in Bearbeitung Stand: 23.10.2018

Allgemeine Angaben:

Prüfkörper:	B.EM
Prüffeld:	2
Versuch:	Großbohrpfahl Druck
Bodenschicht Krafteinleitungsstrecke:	Miozän

Pfahlinstrumentierung (MWES II):

Kettenextensometer:	ja
Bewehrungssensoren:	ja
Sohldruckmessdose:	nein

Versuchsdaten:

Prüfung Nr.:	93
Prüfdatum:	08.05.2018 - 25.07.2018
Versuchsbeginn Uhrzeit:	08:30 Uhr
Versuchsbeginn Datum:	08.05.2018
Versuchsende Uhrzeit:	01:48 Uhr
Versuchsende Datum:	25.07.2018

Geometrie Prüfkörper:

Bohrdurchmesser:	900,00 mm
Querschnittsfläche $A_{ges} =$	636172,51 mm ²
OK Pfahlkopf (Messniveau GBP, DSV):	156,8 müA
Messniveau (Mikropfahl):	0,00 müA
OK Pfahl bzw. GOK:	155,80 müA
OK Haftstrecke:	145,00 müA
UK Pfahl:	139,00 müA
Länge Freispielstrecke:	11,80 m
Länge Haftstrecke:	6,00 m
Pfahllänge:	16,80 m

Materialkennwerte:

Betongüte:	C25/30 / BS-TB1	
Zement:	-	
W/B-Wert Zementsuspension:	-	
E-Modul Beton / Zementstein $E_C =$	33,01	kN/mm ²
Typ, Güte Stabstahl (Mikropfahl):	-	
Nennquerschnitt Stabstahl $A_{SS} =$	0,00	mm ²
E-Modul Stabstahl $E_{SS} =$	0,00	kN/mm ²
Güte Bewehrungsstahl:	B 550B	
Gesamtquerschnitt Bewehrung $A_{BS} =$	variiert	mm ²
E-Modul Bewehrungsstahl $E_{BS} =$	200,00	kN/mm ²
Güte Baustahl:	S235	
Gesamtquerschnitt Stahl $A_S =$	13947,46	mm ²
E-Modul Baustahl $E_S =$	200,00	kN/mm ²

Rohdaten															
	BS1.1	BS1.2	BS2.1	BS2.2	BS3.1	BS3.2	BS4.1	BS4.2	BS5.1	BS5.2	KEX1	KEX2	KEX3	KEX4	KEX5
	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]
P0-0	7243,7	7131,8	7393,8	7137,3	6826,8	7077,5	7261,8	6895,8	7168,4	7071,0	6082,9	5945,7	5992,5	6060,4	5932,3
P0-600	7164,7	7037,5	7355,7	7080,9	6810,1	7042,9	7253,3	6884,8	7162,9	7068,1	6023,2	5941,7	5991,6	6060,3	5933,0
P1_EH-600 mit P0-600	7178,1	7057,9	50220,3	7046,2	11612,1	6963,6	7236,0	6829,6	7141,5	7033,7	6184,8	5922,3	5966,6	6036,9	5907,4
P2_AK-600 mit P0-600	7173,1	7052,8	23621,8	7053,1	7492,5	6977,2	7239,8	6841,9	7143,9	7037,3	6186,8	5924,2	5964,8	6037,0	5912,7
P2_EK-600 mit P2_AK-600	7087,5	7007,9	51417,5	7028,1	12267,2	7037,0	7226,8	6843,2	7134,4	7013,1	5953,4	5947,9	5999,7	6070,9	5941,7
P2_EK-600 mit P0-600	7087,5	7007,9	51417,5	7028,1	12267,2	7037,0	7226,8	6843,2	7134,4	7013,1	5953,4	5947,9	5999,7	6070,9	5941,7
P0-800	7130,9	7000,9	7342,5	7073,4	6784,0	7023,9	7229,1	6868,7	7159,3	7060,4	6003,8	5939,7	5988,9	6057,2	5931,5
P3_AH-800 mit P0-800	7076,3	6968,3	40692,5	6977,5	7899,7	7002,1	7219,2	6819,4	7118,8	6987,6	5928,6	5948,7	6001,1	6071,7	5943,4
P3_EH-800 mit P3_AH-800	7140,5	7003,3	47587,2	7026,2	9625,3	6953,3	7233,2	6823,0	7149,3	7034,5	6154,8	5922,0	5965,6	6037,0	5913,1
P4_AK-800 mit P0-800	7117,4	7004,6	16815,1	7054,2	9192,5	6962,0	7209,8	6825,9	7151,2	7030,5	6157,8	5919,6	5960,5	6032,5	5912,3
P4_EK-800 mit P4_AK-800	7058,5	6961,0	7319,1	6979,9	7440,8	6999,9	7219,6	6818,9	7126,0	7000,6	5936,0	5946,2	5999,0	6071,0	6009,9

	BS1.1T	BS1.2T	BS2.1T	BS2.2T	BS3.1T	BS3.2T	BS4.1T	BS4.2T	BS5.1T	BS5.2T	KEX1T	KEX2T	KEX3T	KEX4T	KEX5T
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
P0-0	15,5	15,8	14,9	17,2	14,2	13,9	13,9	13,0	13,3	13,1	18,0	13,4	13,8	13,7	13,4
P0-600	15,3	15,6	14,9	17,5	14,4	14,5	14,1	13,6	14,3	15,2	17,3	13,3	13,8	13,1	13,4
P1_EH-600 mit P0-600	26,9	23,6	29,1	27,6	31,2	31,6	31,1	30,4	29,9	30,6	22,9	28,5	31,8	28,9	31,1
P2_AK-600 mit P0-600	26,5	23,6	28,5	27,1	30,5	30,5	30,5	29,7	28,6	28,9	22,6	28,2	19,5	30,1	30,3
P2_EK-600 mit P2_AK-600	10,7	14,1	8,1	9,4	5,4	4,7	5,3	4,2	5,5	4,9	20,6		4,3	4,4	
P2_EK-600 mit P0-600	10,7	14,1	8,1	9,4	5,4	4,7	5,3	4,2	5,5	4,9	20,6		4,3	4,4	
P0-800	15,6	15,9	14,9	15,8	14,2	14,0	13,9	13,0	13,3	13,1	17,9	13,3	13,8	13,6	13,4
P3_AH-800 mit P0-800	11,3	14,3	7,5	7,0	6,2	6,5	6,0	5,7	7,7	9,0	20,4		4,4	4,4	
P3_EH-800 mit P3_AH-800	25,3	21,3	27,7	27,0	30,1	30,6	30,0	30,3	29,0	29,9	18,2			21,8	
P4_AK-800 mit P0-800	24,2	21,3	26,4	24,5	28,5	27,7	28,6	26,0	25,4	24,2	18,1		29,8	21,8	
P4_EK-800 mit P4_AK-800	11,0	13,9	7,1	7,0	6,0	6,0	5,9	7,0	7,3	7,9	19,5		4,4	4,3	

Formeln		Umrechnungen der dg-Werte														
BSP.:	$\Delta TR1= TR1-T0$	ϵM BS1.1	$\epsilon T-OBS$ BS1.1	ϵOBS BS1.1	$\Delta T-1.1$	$\epsilon T-Free,1-1$	ϵM BS1.2	$\epsilon T-OBS$ BS1.2	ϵOBS BS1.2	$\Delta T-1.2$	$\epsilon T-Free,1-2$	ϵM BS2.1	$\epsilon T-OBS$ BS2.1	ϵOBS BS2.1	$\Delta T-2.1$	$\epsilon T-Free,2-1$
BSP.:	$\epsilon T-Free=\Delta T*\alpha C$	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]
R0	$\epsilon M-T0=(R0-R0)*C+\Delta T*(\alpha S-\alpha C)$	0,0000		0,0000			0,0000		0,0000			0,0000		0,0000		
R1	$\epsilon M-R1=(RR1-R0)*C+\Delta T*(\alpha S-\alpha C)$	-0,0282		-0,0302			-0,0337		-0,0357			-0,0133		-0,0133		
T1	$\epsilon T-Obs=(RT1-RR1)*C+\Delta T*\alpha S$		0,1462	0,1160	11,6000	0,1160		0,1048	0,0691	8,0000	0,0800		15,1758	15,1625	14,2000	0,1420
T2	$\epsilon T-Obs=(RT2-RR1)*C+\Delta T*\alpha S$		0,1396	0,1094	11,2000	0,1120		0,1030	0,0673	8,0000	0,0800		5,8597	5,8464	13,6500	0,1365
T3	$\epsilon T-Obs=(RT3-RT2)*C+\Delta T*\alpha S$		-0,2228	-0,1134	-15,8000	-0,1580		-0,1318	-0,0645	-9,5000	-0,0950		9,4790	15,3254	-20,4500	-0,2045
T4	$\epsilon T-Obs=(RT4-RR1)*C+\Delta T*\alpha S$		-0,0832	-0,1134	-4,6000	-0,0460		-0,0287	-0,0645	-1,5000	-0,0150		15,3387	15,3254	-6,8000	-0,0680
R2	$\epsilon M-R2=(RR2-R0)*C+\Delta T*(\alpha S-\alpha C)$	-0,0394		-0,0384			-0,0460		-0,0450			-0,0178		-0,0173		
T5	$\epsilon T-Obs=(RT5-RR2)*C+\Delta T*\alpha S$		-0,0716	-0,1100	-4,3000	-0,0430		-0,0310	-0,0760	-1,6000	-0,0160		11,5822	11,5649	-7,4000	-0,0740
T6	$\epsilon T-Obs=(RT6-RT5)*C+\Delta T*\alpha S$		0,1933	0,0833	14,0000	0,1400		0,0977	0,0218	7,0000	0,0700		2,6596	14,2245	20,2000	0,2020
T7	$\epsilon T-Obs=(RT7-RR2)*C+\Delta T*\alpha S$		0,1002	0,0618	8,6000	0,0860		0,0672	0,0222	5,4000	0,0540		3,4551	3,4378	11,4500	0,1145
T8	$\epsilon T-Obs=(RT8-RT7)*C+\Delta T*\alpha S$		-0,1817	-0,1199	-13,2000	-0,1320		-0,1057	-0,0835	-7,4000	-0,0740		-3,5584	-0,1207	-19,2500	-0,1925

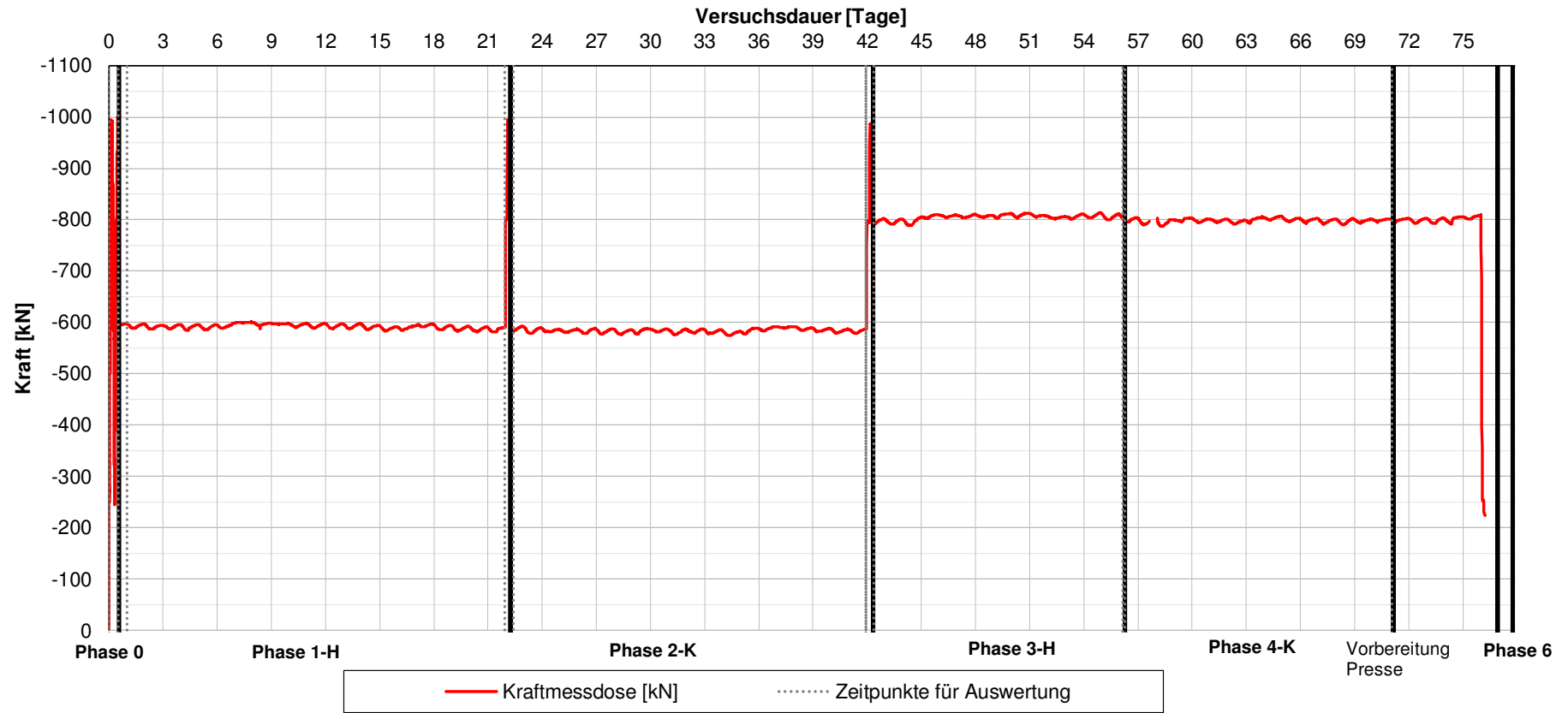
Formeln		Umrechnungen der dg-Werte														
BSP.:	$\Delta TR1= TR1-T0$	ϵM BS2.2	$\epsilon T-OBS$ BS2.2	ϵOBS BS2.2	$\Delta T-2.2$	$\epsilon T-Free,2-2$	ϵM BS3.1	$\epsilon T-OBS$ BS3.1	ϵOBS BS3.1	$\Delta T-3.1$	$\epsilon T-Free,3-1$	ϵM BS3.2	$\epsilon T-OBS$ BS3.2	ϵOBS BS3.2	$\Delta T-3.2$	$\epsilon T-Free,3-2$
BSP.:	$\epsilon T-Free=\Delta T*\alpha C$	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]
R0	$\epsilon M-T0=(R0-R0)*C+\Delta T*(\alpha S-\alpha C)$	0,0000		0,0000			0,0000		0,0000			0,0000		0,0000		
R1	$\epsilon M-R1=(RR1-R0)*C+\Delta T*(\alpha S-\alpha C)$	-0,0195		-0,0165			-0,0055		-0,0035			-0,0109		-0,0049		
T1	$\epsilon T-Obs=(RT1-RR1)*C+\Delta T*\alpha S$		0,1108	0,0944	10,1000	0,1010		1,9193	1,9158	16,8000	0,1680		0,1806	0,1758	17,1000	0,1710
T2	$\epsilon T-Obs=(RT2-RR1)*C+\Delta T*\alpha S$		0,1066	0,0901	9,5500	0,0955		0,4400	0,4365	16,1000	0,1610		0,1720	0,1671	16,0000	0,1600
T3	$\epsilon T-Obs=(RT3-RT2)*C+\Delta T*\alpha S$		-0,2242	-0,1341	-17,6500	-0,1765		1,3984	1,8349	-25,1000	-0,2510		-0,2937	-0,1265	-25,8000	-0,2580
T4	$\epsilon T-Obs=(RT4-RR1)*C+\Delta T*\alpha S$		-0,1176	-0,1341	-8,1000	-0,0810		1,8384	1,8349	-9,0000	-0,0900		-0,1217	-0,1265	-9,8000	-0,0980
R2	$\epsilon M-R2=(RR2-R0)*C+\Delta T*(\alpha S-\alpha C)$	-0,0259		-0,0399			-0,0153		-0,0153			-0,0187		-0,0177		
T5	$\epsilon T-Obs=(RT5-RR2)*C+\Delta T*\alpha S$		-0,1416	-0,1815	-8,8000	-0,0880		0,3007	0,2854	-8,0000	-0,0800		-0,0992	-0,1169	-7,5000	-0,0750
T6	$\epsilon T-Obs=(RT6-RT5)*C+\Delta T*\alpha S$		0,2614	0,0799	20,0000	0,2000		0,9076	1,1930	23,9000	0,2390		0,2768	0,1599	24,1000	0,2410
T7	$\epsilon T-Obs=(RT7-RR2)*C+\Delta T*\alpha S$		0,0993	0,0594	8,7000	0,0870		1,0343	1,0190	14,3000	0,1430		0,1453	0,1276	13,7000	0,1370
T8	$\epsilon T-Obs=(RT8-RT7)*C+\Delta T*\alpha S$		-0,2400	-0,1806	-17,5000	-0,1750		-0,8999	0,1191	-22,5000	-0,2250		-0,2513	-0,1238	-21,7000	-0,2170

Formeln		Umrechnungen der dg-Werte									
BSP.:	$\Delta TR1 = TR1 - T0$	ϵM BS4.1	$\epsilon T-OBS$ BS4.1	ϵOBS BS4.1	$\Delta T-4.1$	$\epsilon T-Free, 4-1$	ϵM BS4.2	$\epsilon T-OBS$ BS4.2	ϵOBS BS4.2	$\Delta T-4.2$	$\epsilon T-Free, 4-2$
BSP.:	$\epsilon T-Free = \Delta T * \alpha C$	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]
R0	$\epsilon M - T0 = (R0 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	0,0000		0,0000			0,0000		0,0000		
R1	$\epsilon M - R1 = (RR1 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	-0,0025		-0,0005			-0,0025		0,0035		
T1	$\epsilon T - Obs = (RT1 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		0,2014	0,2009	17,0000	0,1700		0,1856	0,1892	16,8000	0,1680
T2	$\epsilon T - Obs = (RT2 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1954	0,1949	16,4000	0,1640		0,1815	0,1850	16,1000	0,1610
T3	$\epsilon T - Obs = (RT3 - RT2) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,3119	-0,1171	-25,2000	-0,2520		-0,3106	-0,1257	-25,5000	-0,2550
T4	$\epsilon T - Obs = (RT4 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,1166	-0,1171	-8,8000	-0,0880		-0,1291	-0,1257	-9,4000	-0,0940
R2	$\epsilon M - R2 = (RR2 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	-0,0114		-0,0114			-0,0094		-0,0094		
T5	$\epsilon T - Obs = (RT5 - RR2) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,0998	-0,1112	-7,9000	-0,0790		-0,1064	-0,1156	-7,3000	-0,0730
T6	$\epsilon T - Obs = (RT6 - RT5) * C + \Delta T * \alpha S$		0,2977	0,1865	24,0000	0,2400		0,3008	0,1851	24,5500	0,2455
T7	$\epsilon T - Obs = (RT7 - RR2) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1726	0,1612	14,7000	0,1470		0,1430	0,1336	12,9500	0,1295
T8	$\epsilon T - Obs = (RT8 - RT7) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,2735	-0,1123	-22,7000	-0,2270		-0,2342	-0,1006	-19,0000	-0,1900

Formeln		Umrechnungen der dg-Werte									
BSP.:	$\Delta TR1 = TR1 - T0$	ϵM BS5.1	$\epsilon T-OBS$ BS5.1	ϵOBS BS5.1	$\Delta T-5.1$	$\epsilon T-Free, 5-1$	ϵM BS5.2	$\epsilon T-OBS$ BS5.2	ϵOBS BS5.2	$\Delta T-5.2$	$\epsilon T-Free, 5-2$
BSP.:	$\epsilon T-Free = \Delta T * \alpha C$	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]
R0	$\epsilon M - T0 = (R0 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	0,0000		0,00000			0,0000		0,00000		
R1	$\epsilon M - R1 = (RR1 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	0,0002		0,01024			0,0036		0,02460		
T1	$\epsilon T - Obs = (RT1 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1828	0,19308	15,6	0,1560		0,1757	0,20025	15,4	0,1540
T2	$\epsilon T - Obs = (RT2 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1678	0,17804	14,3	0,1430		0,1562	0,18079	13,7	0,1370
T3	$\epsilon T - Obs = (RT3 - RT2) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,2852	-0,10711	-23,1	-0,2310		-0,3014	-0,12062	-24,0	-0,2400
T4	$\epsilon T - Obs = (RT4 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,1174	-0,10711	-8,8	-0,0880		-0,1452	-0,12062	-10,3	-0,1030
R2	$\epsilon M - R2 = (RR2 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	-0,0032		-0,00321			-0,0038		-0,00377		
T5	$\epsilon T - Obs = (RT5 - RR2) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,0825	-0,08575	-5,6	-0,0560		-0,0759	-0,07963	-4,1	-0,0410
T6	$\epsilon T - Obs = (RT6 - RT5) * C + \Delta T * \alpha S$		0,2706	0,18483	21,3	0,2130		0,2716	0,19198	20,9	0,2090
T7	$\epsilon T - Obs = (RT7 - RR2) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1448	0,14158	12,1	0,1210		0,1248	0,12105	11,1	0,1110
T8	$\epsilon T - Obs = (RT8 - RT7) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,2297	-0,08808	-18,1	-0,1810		-0,2095	-0,08844	-16,3	-0,1630

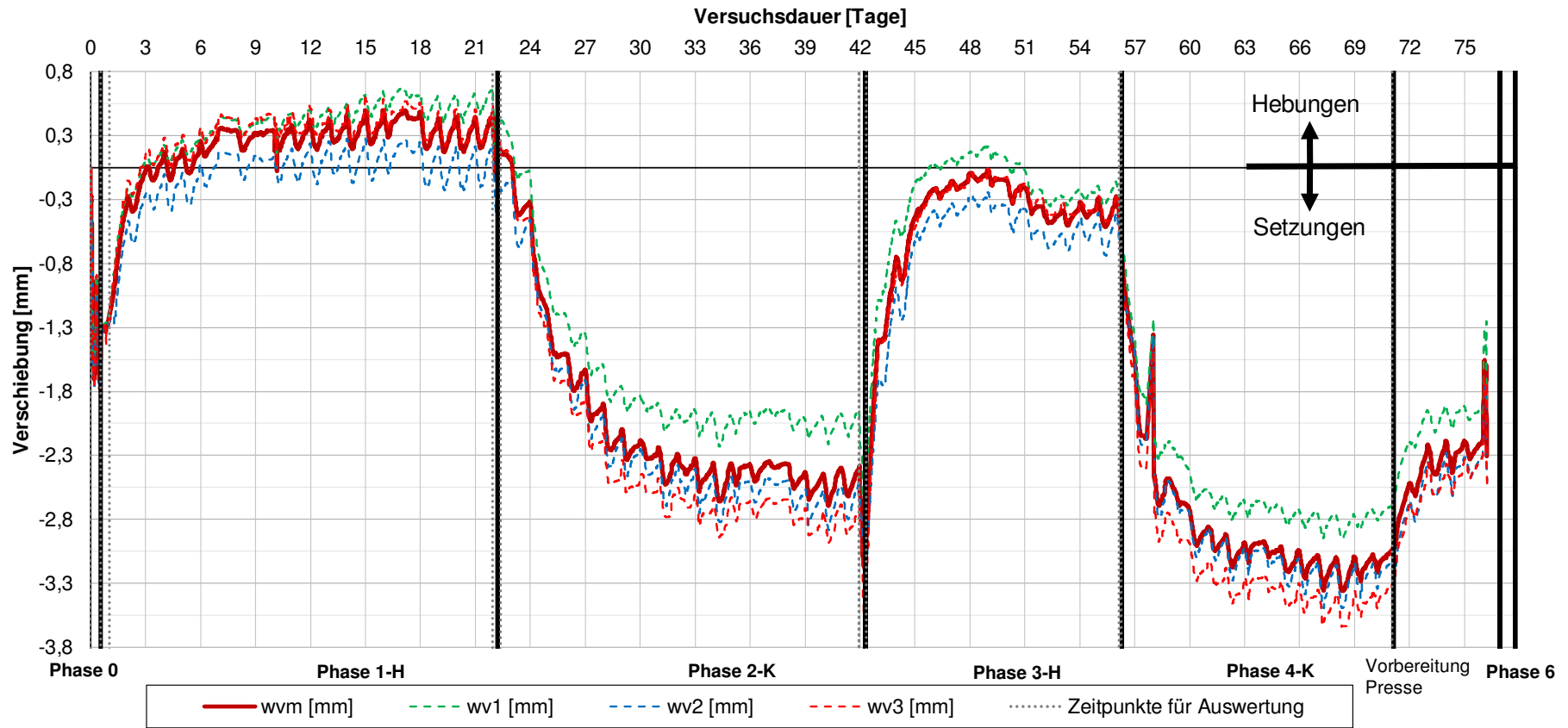
Prüfkörper: B.EM

Last auf Pfahlkopf

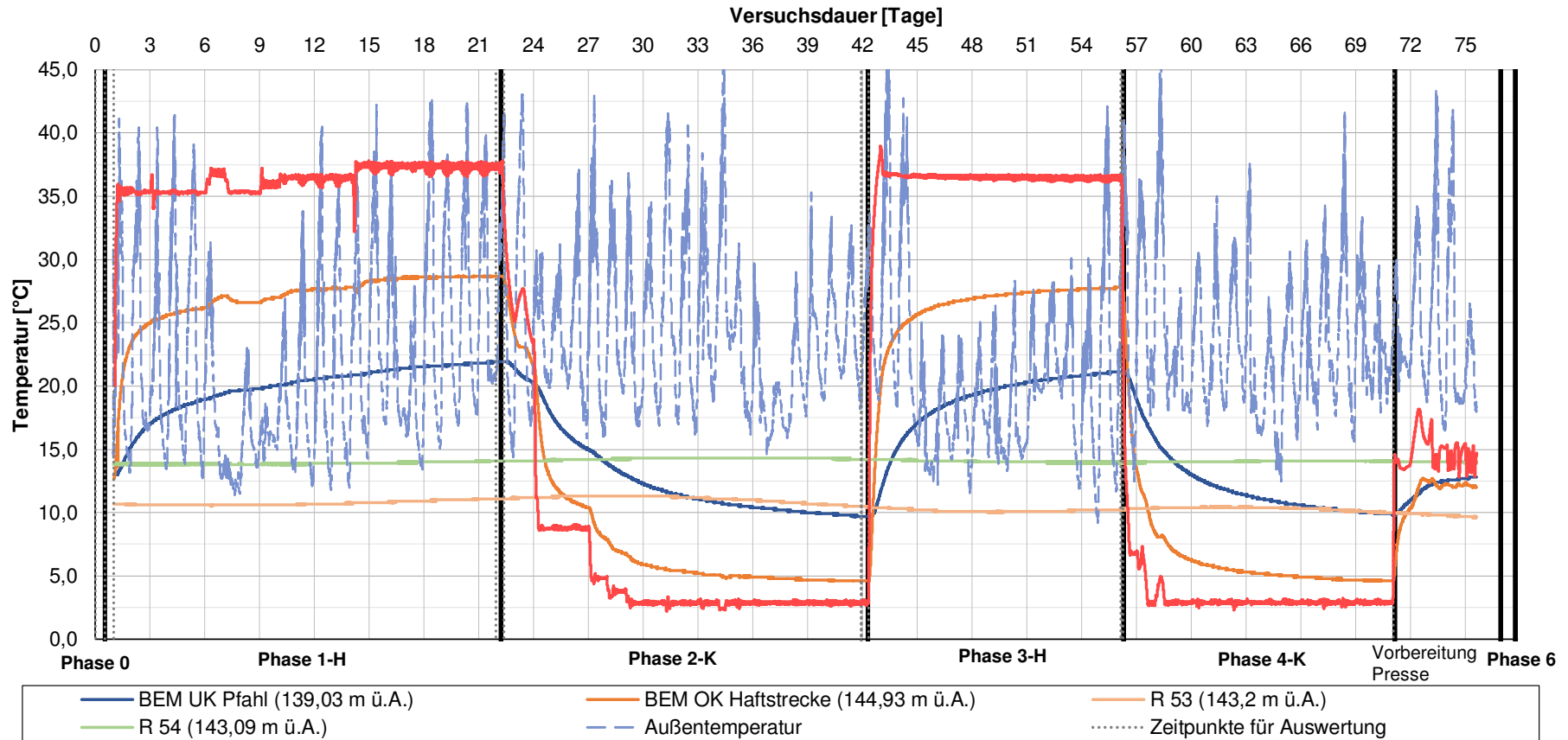


Prüfkörper: B.EM

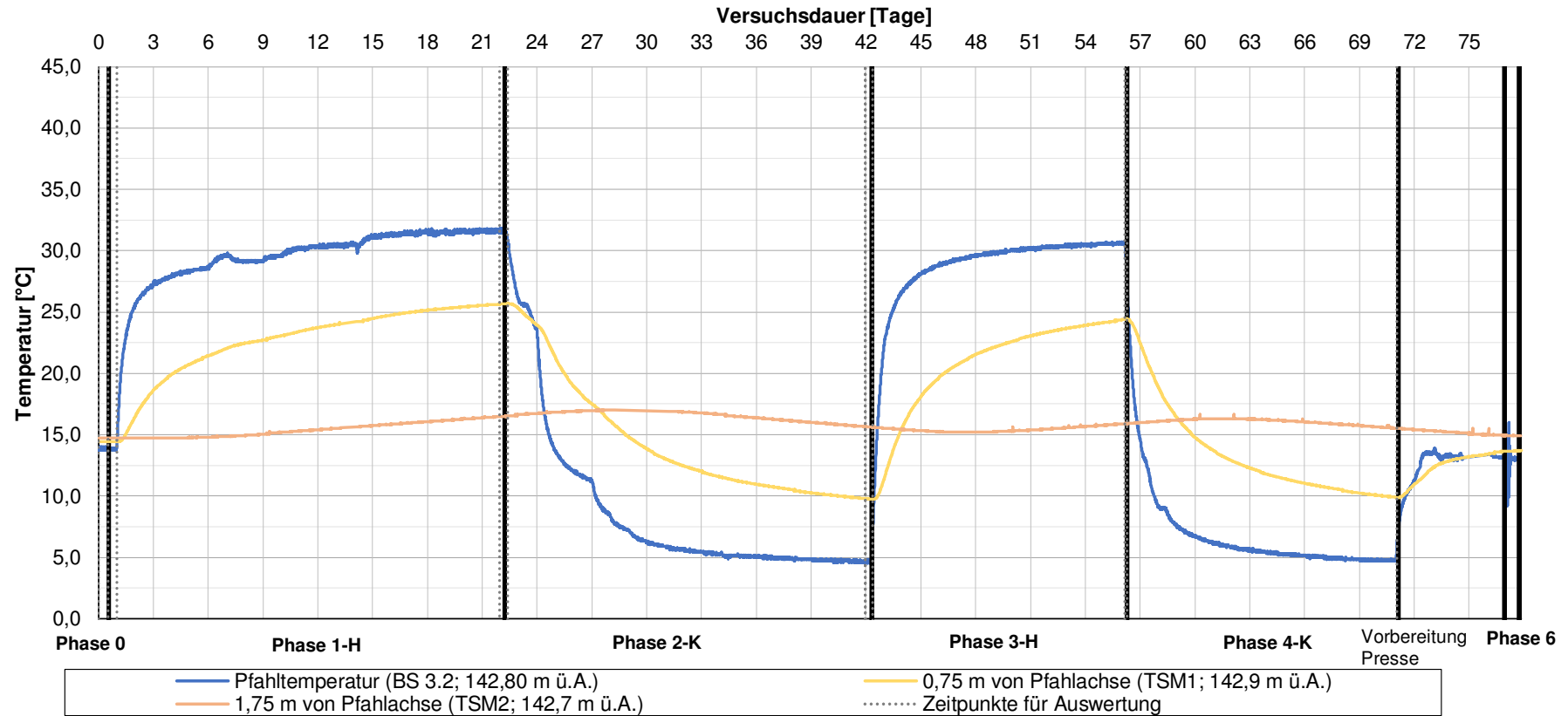
Vertikale Pfahlkopfverschiebung



Prüfkörper: B.EM Vorlauftemperatur, Außentemperatur, Pfahltemperatur, Reaktionspfahltemperatur

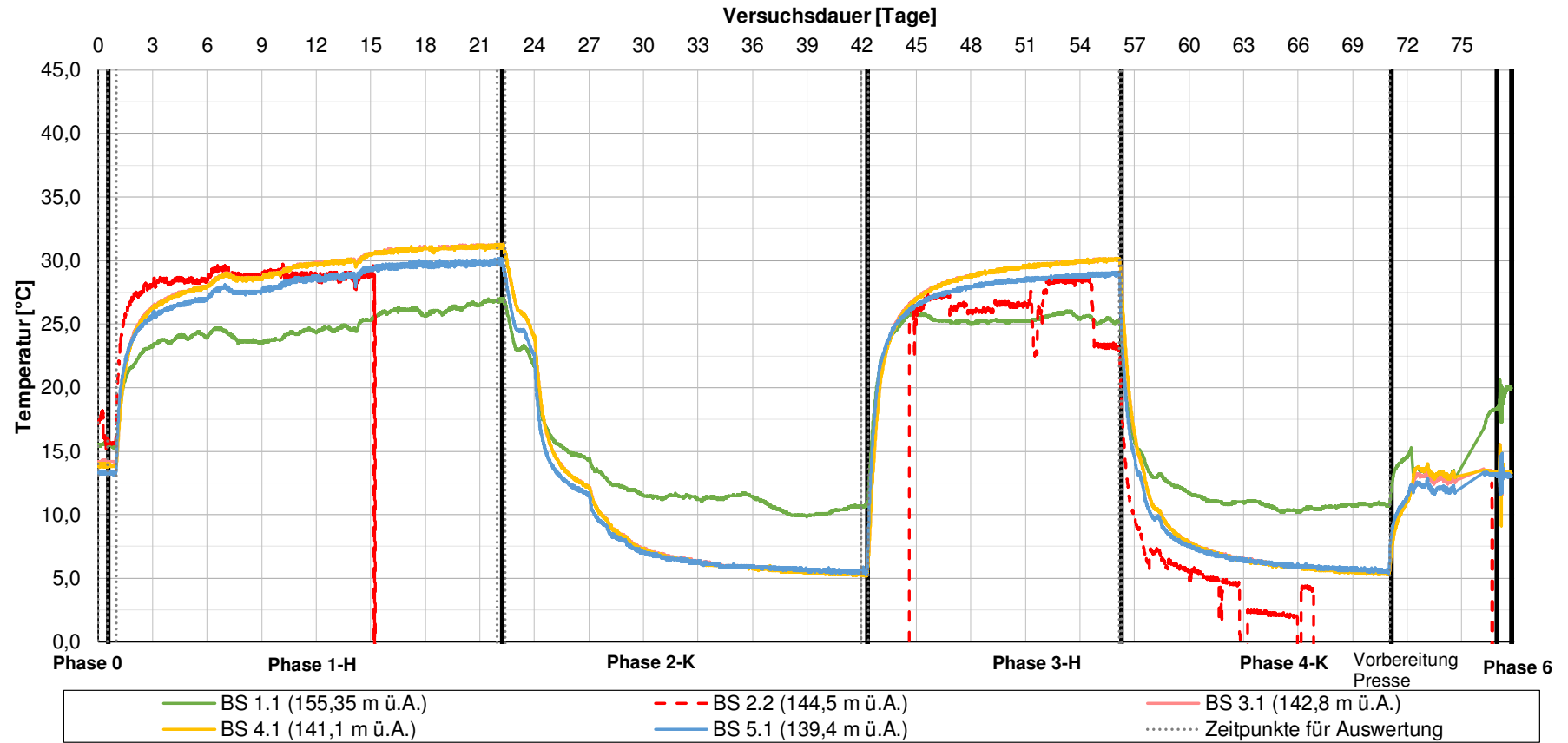


Prüfkörper: B.EM Pfahltemperatur (BS) & Temperatur in den Zusatzbohrungen auf Höhenkote ca. 143,0 m ü.A.



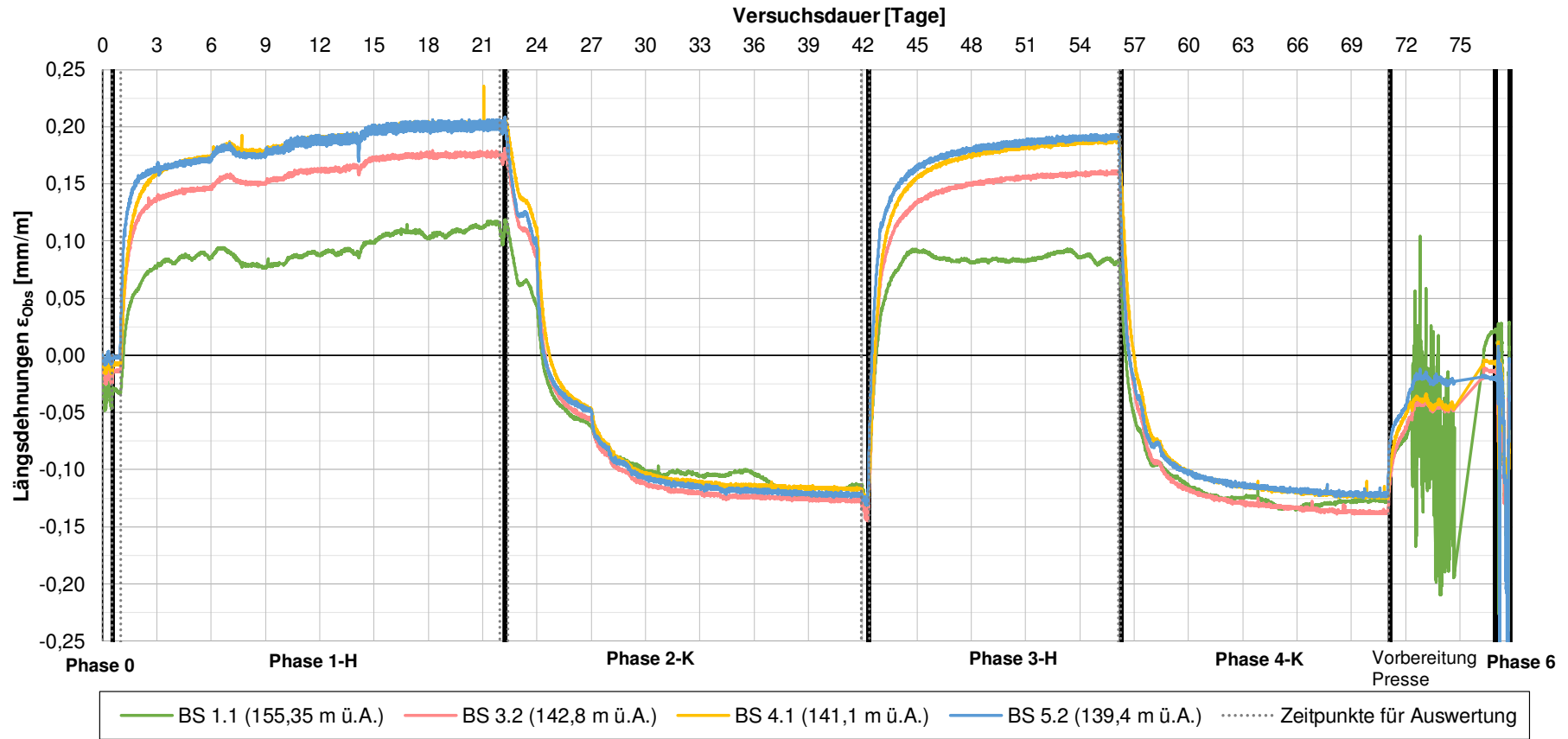
Prüfkörper: **B.EM**

Temperatur Bewehrungssensoren



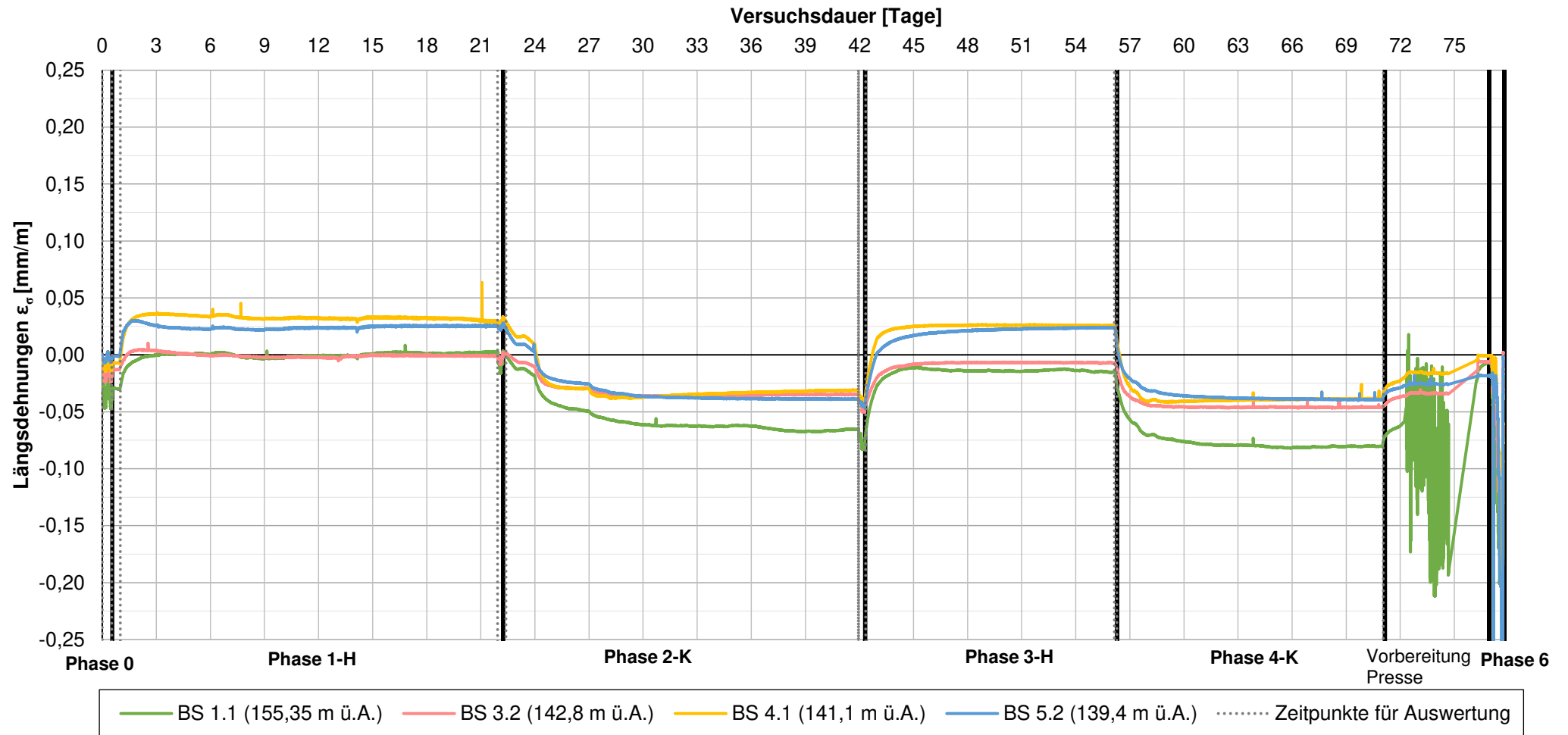
Prüfkörper: B.EM

Längsdehnungen Bewehrungssensoren ϵ_{Obs} (Auswahl)



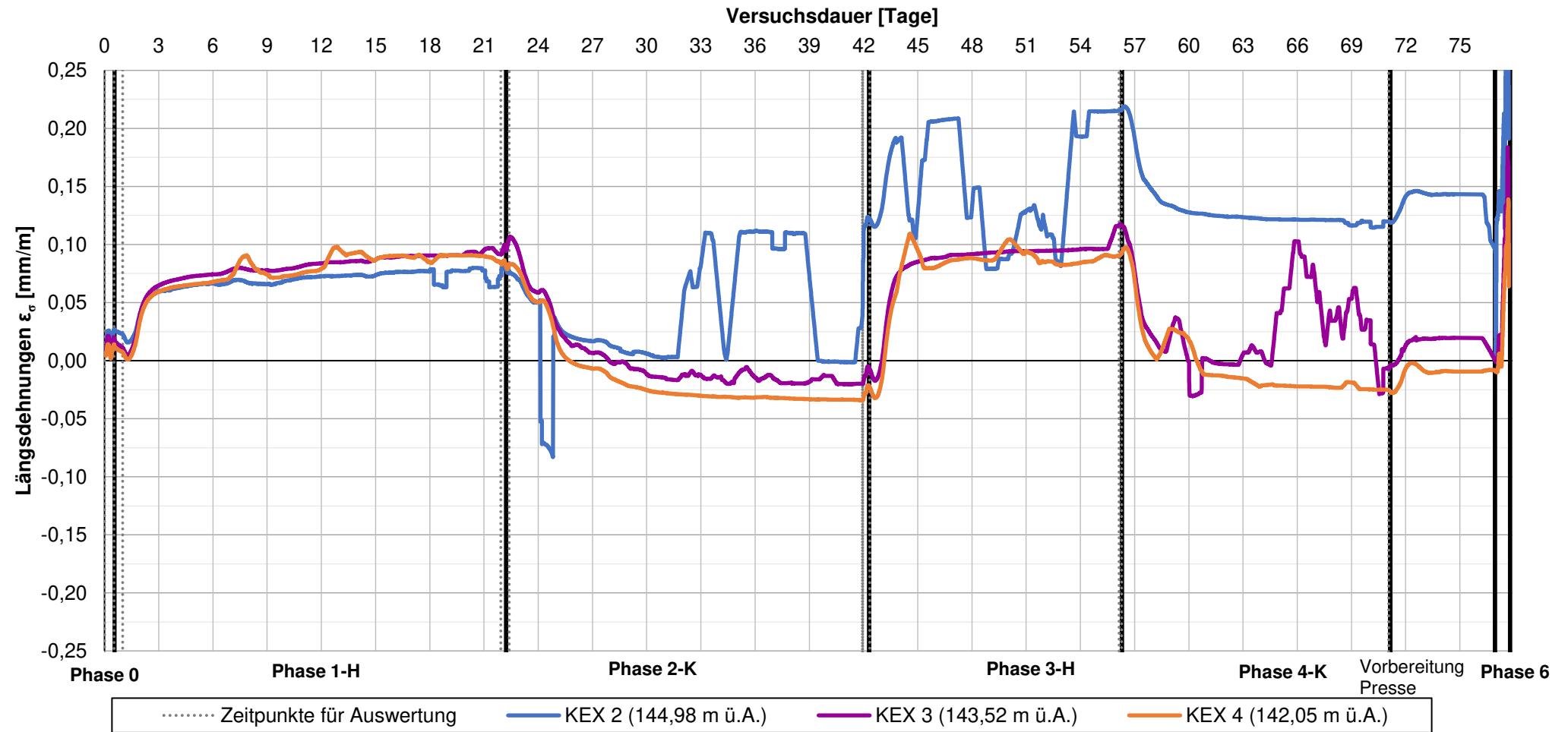
Prüfkörper: B.EM

Längsdehnungen Bewehrungssensoren ϵ_s (Auswahl)



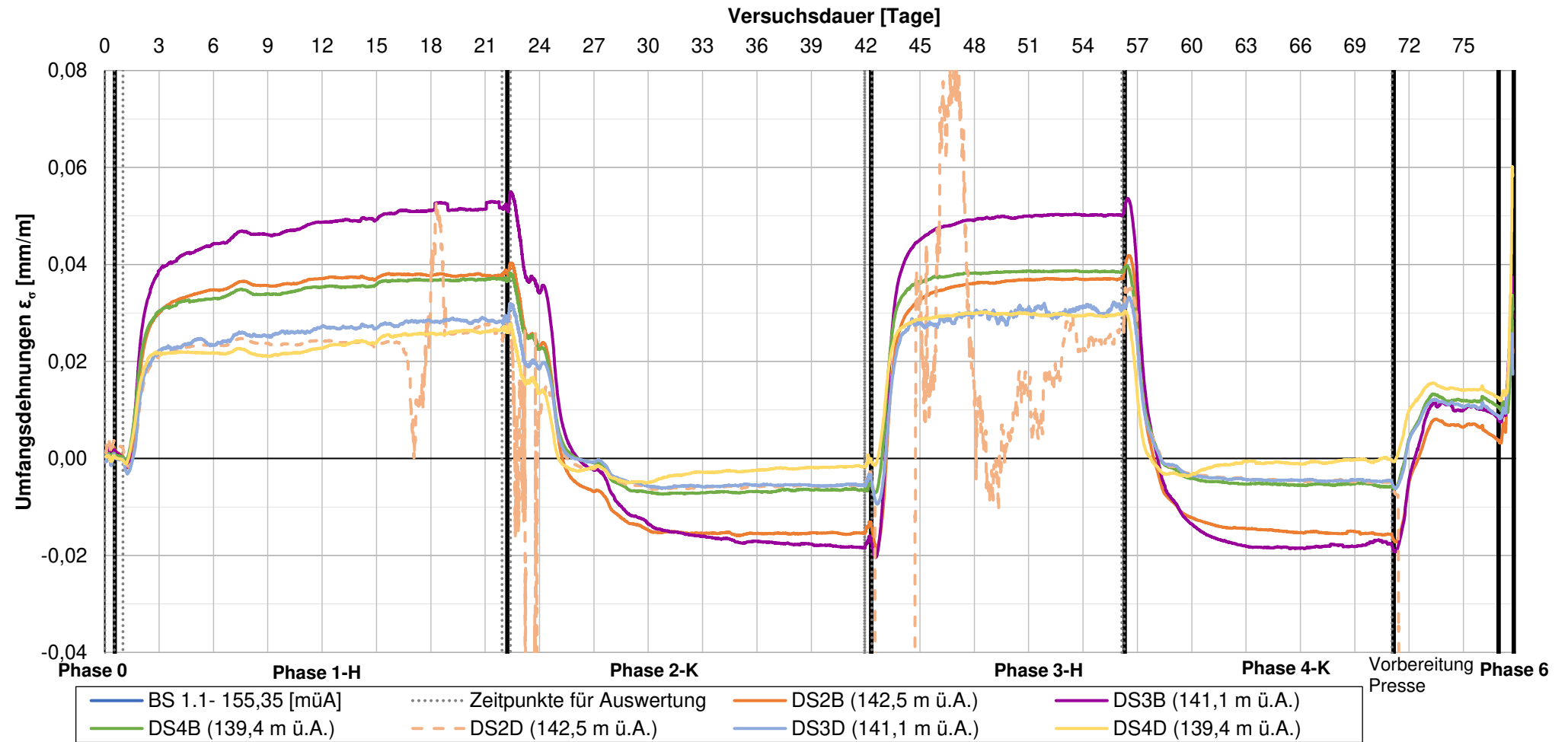
Prüfkörper: B.EM

Längsdehnungen Kettenextensometer ϵ_σ (Auswahl)



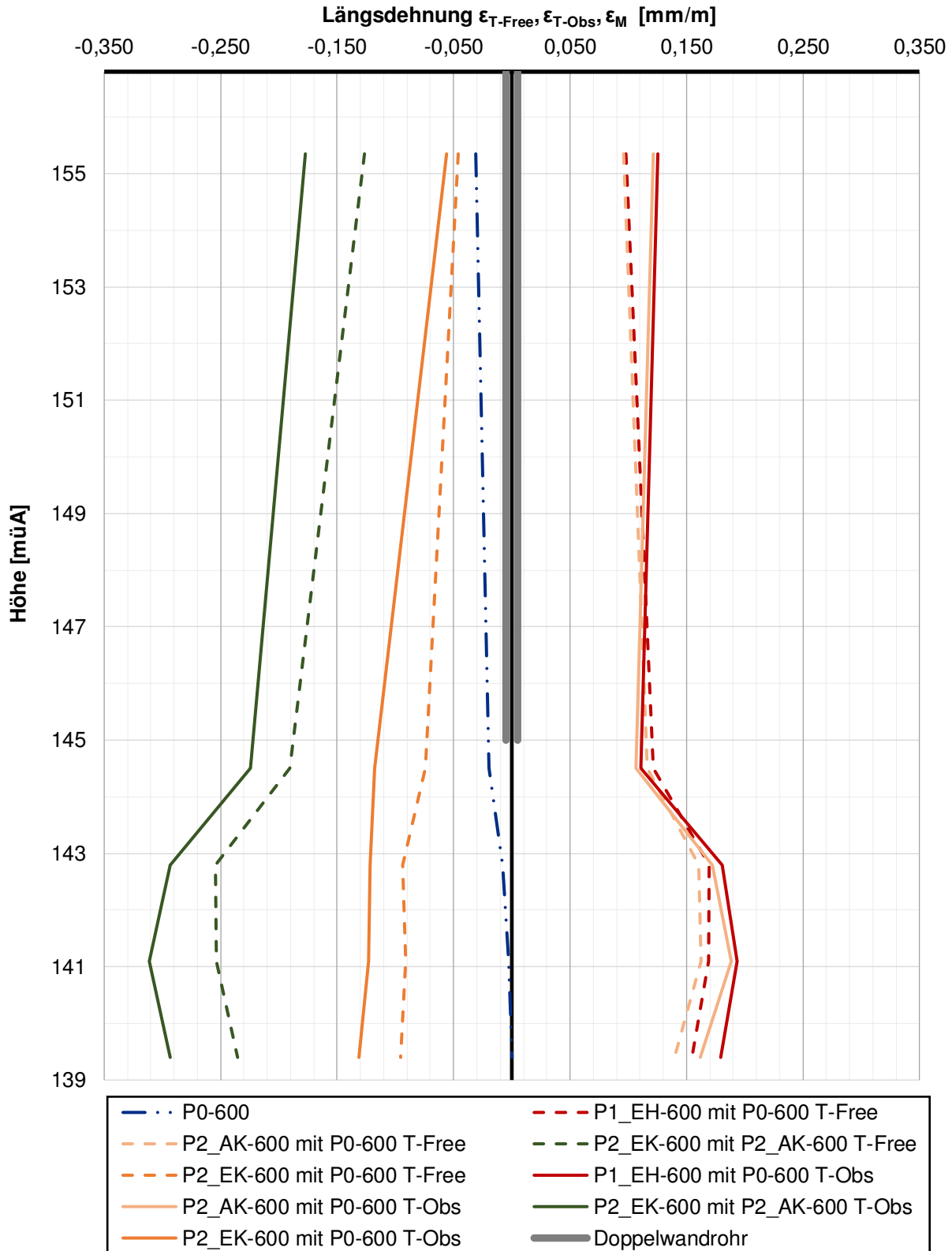
Prüfkörper: **B.EM**

Umfangsdehnungen ϵ_σ (Auswahl)



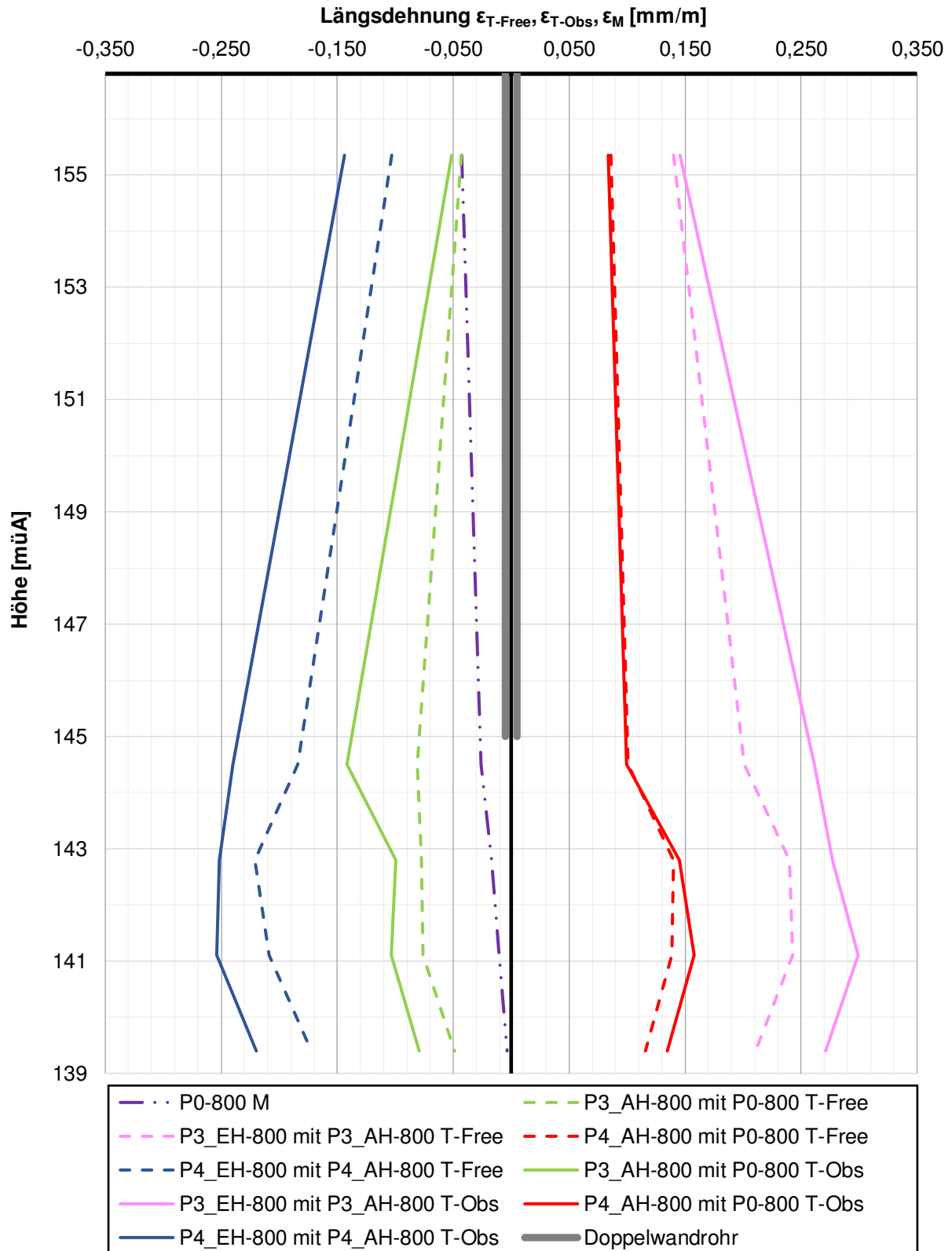
Prüfkörper: **B.EM**

Vergleich ϵ_{T-Free} , ϵ_{T-Obs} und ϵ_M - Last 600 kN



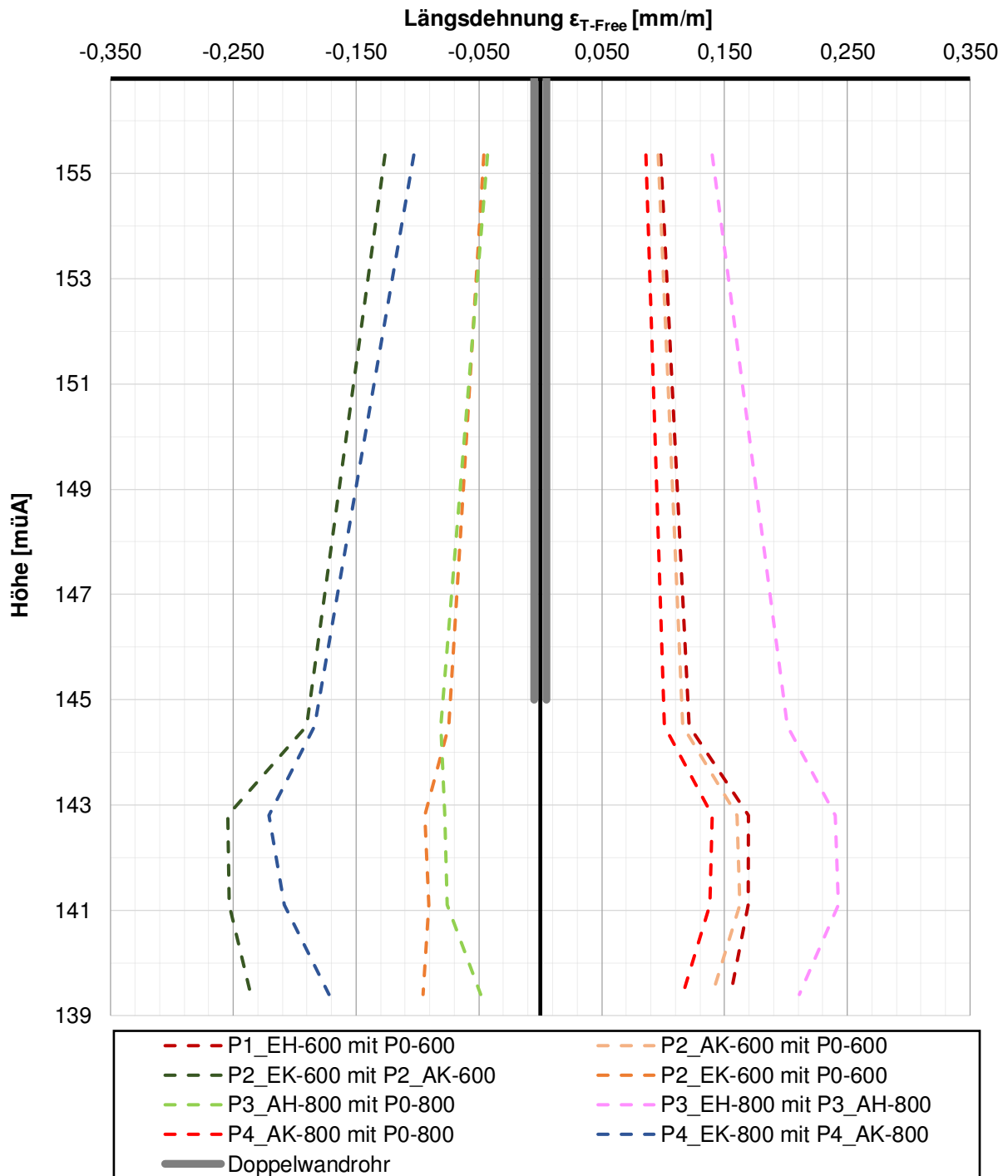
Prüfkörper: **B.EM**

Vergleich ϵ_{T-Free} , ϵ_{T-Obs} und ϵ_M - Last 800 kN



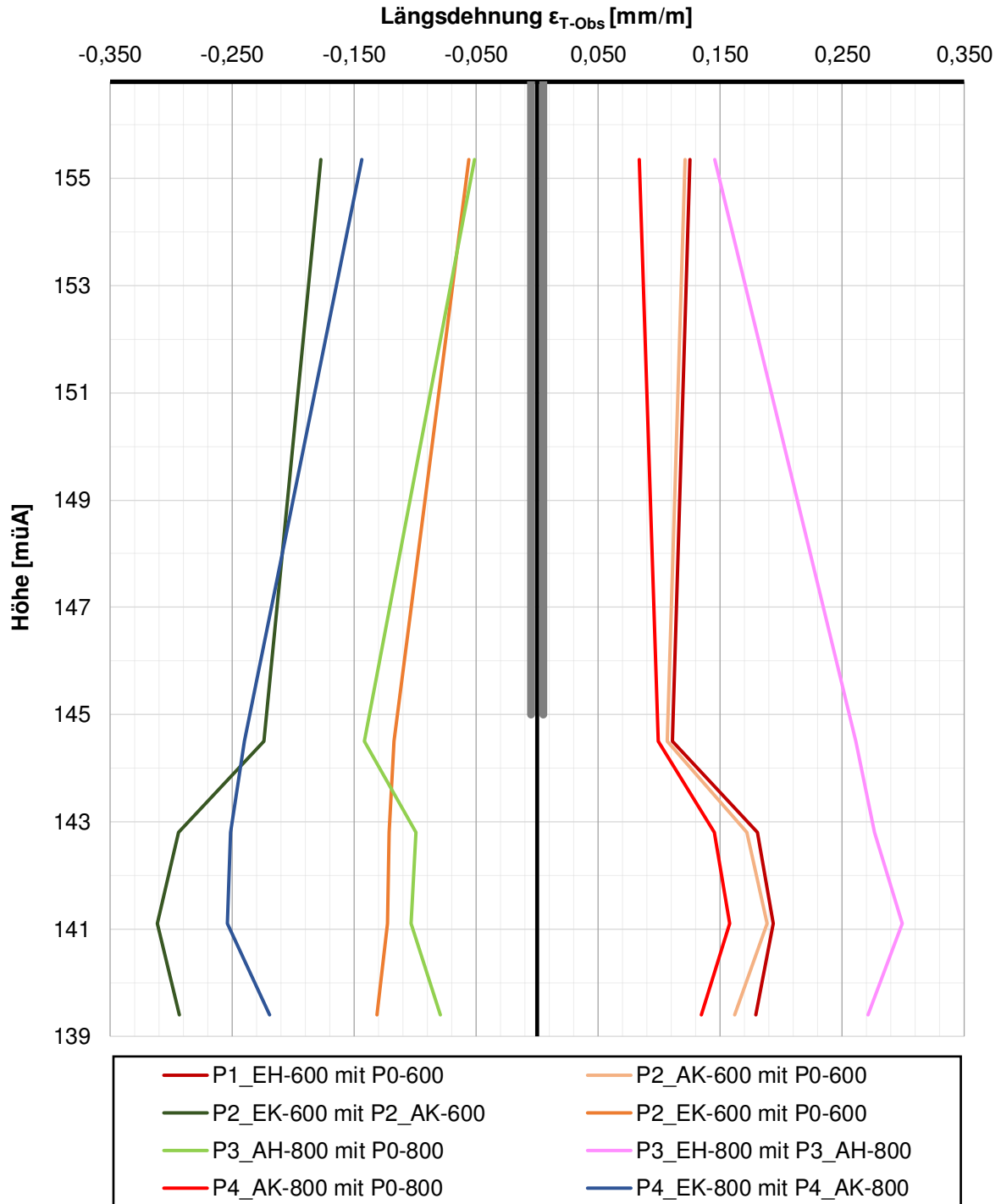
Prüfkörper: **B.EM**

Freie Längsdehnungen

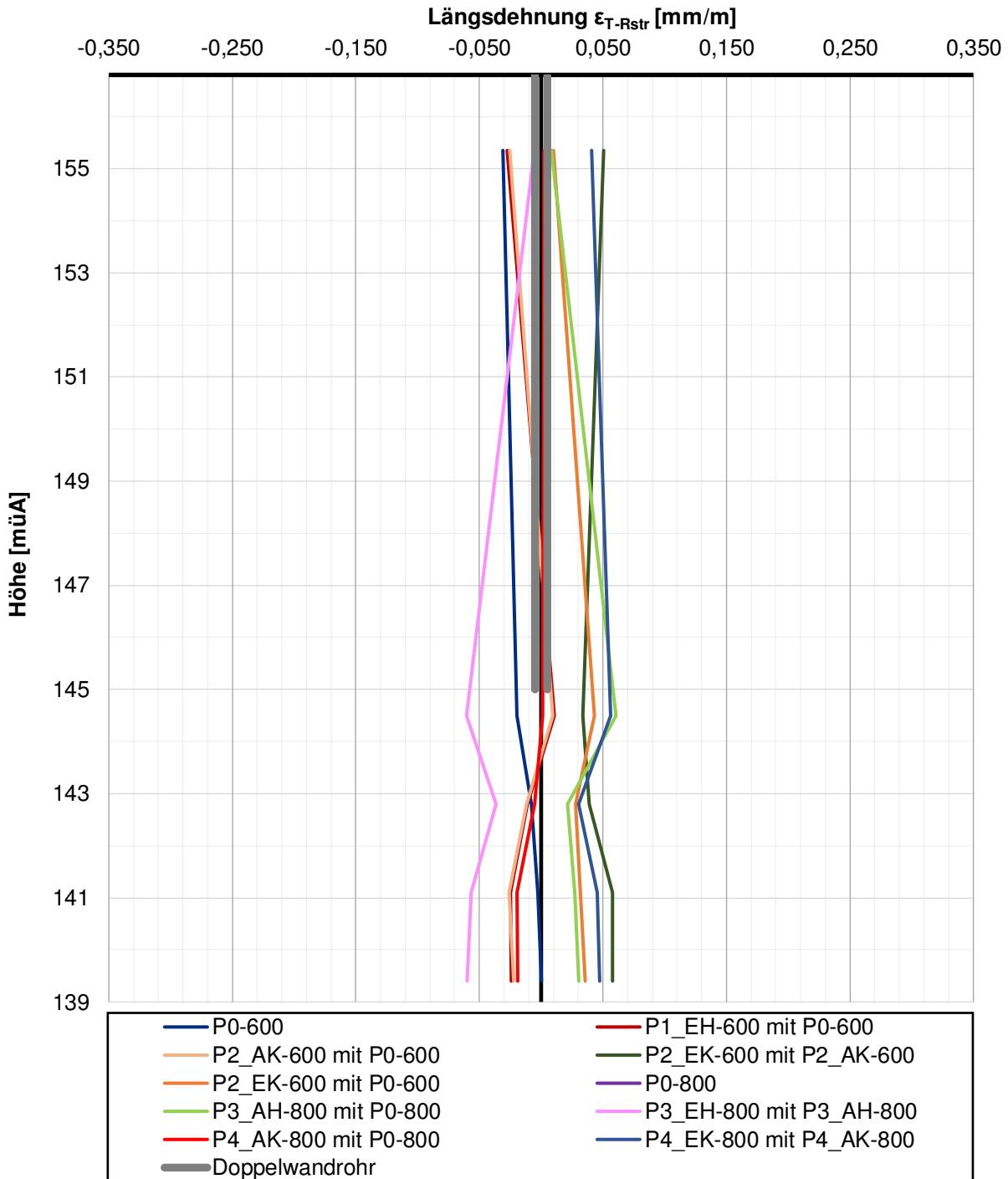


Prüfkörper: **B.EM**

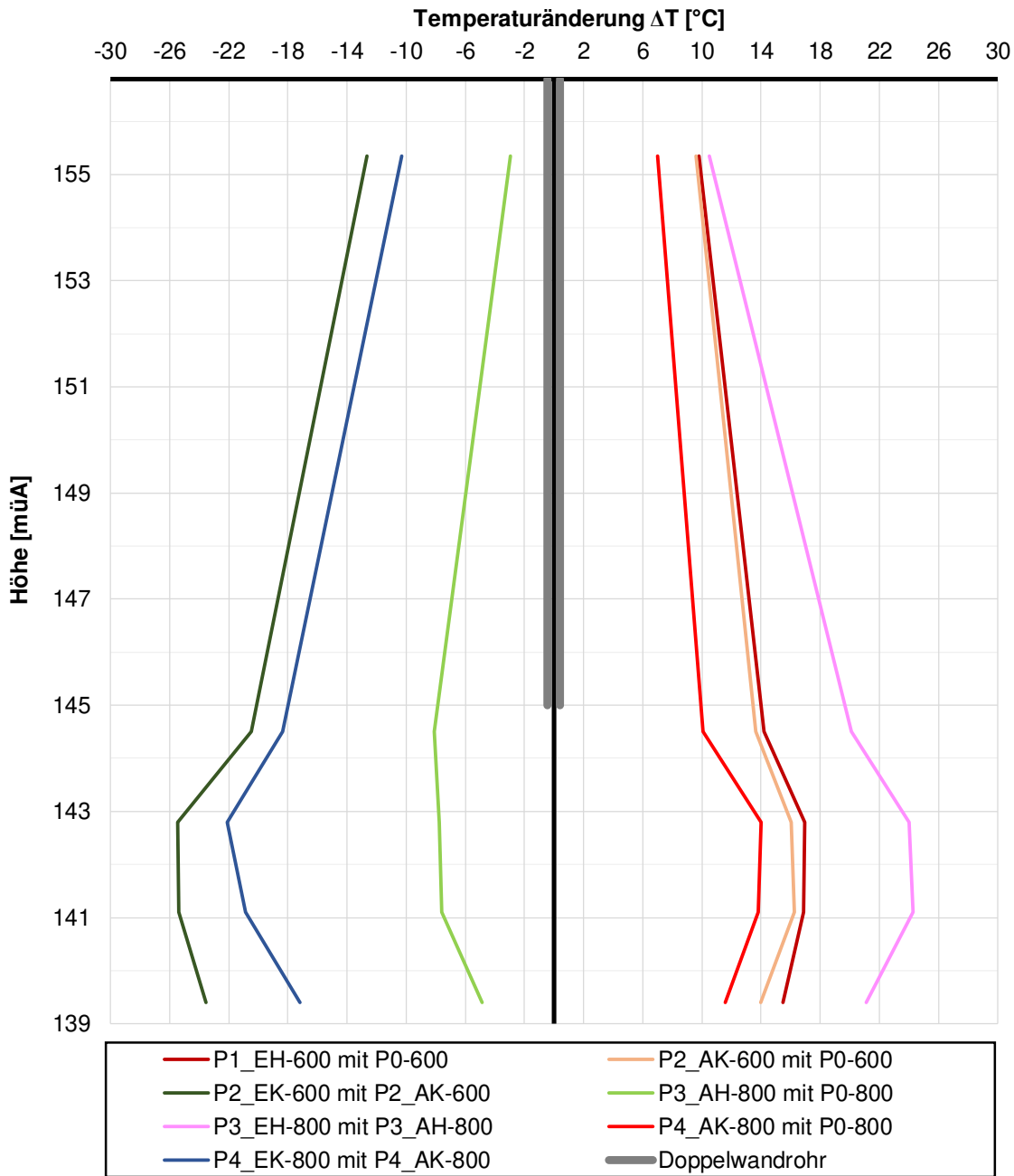
Gemessene Längsdehnungen



Prüfkörper: **B.EM** **Behinderte Längsdehnungen**

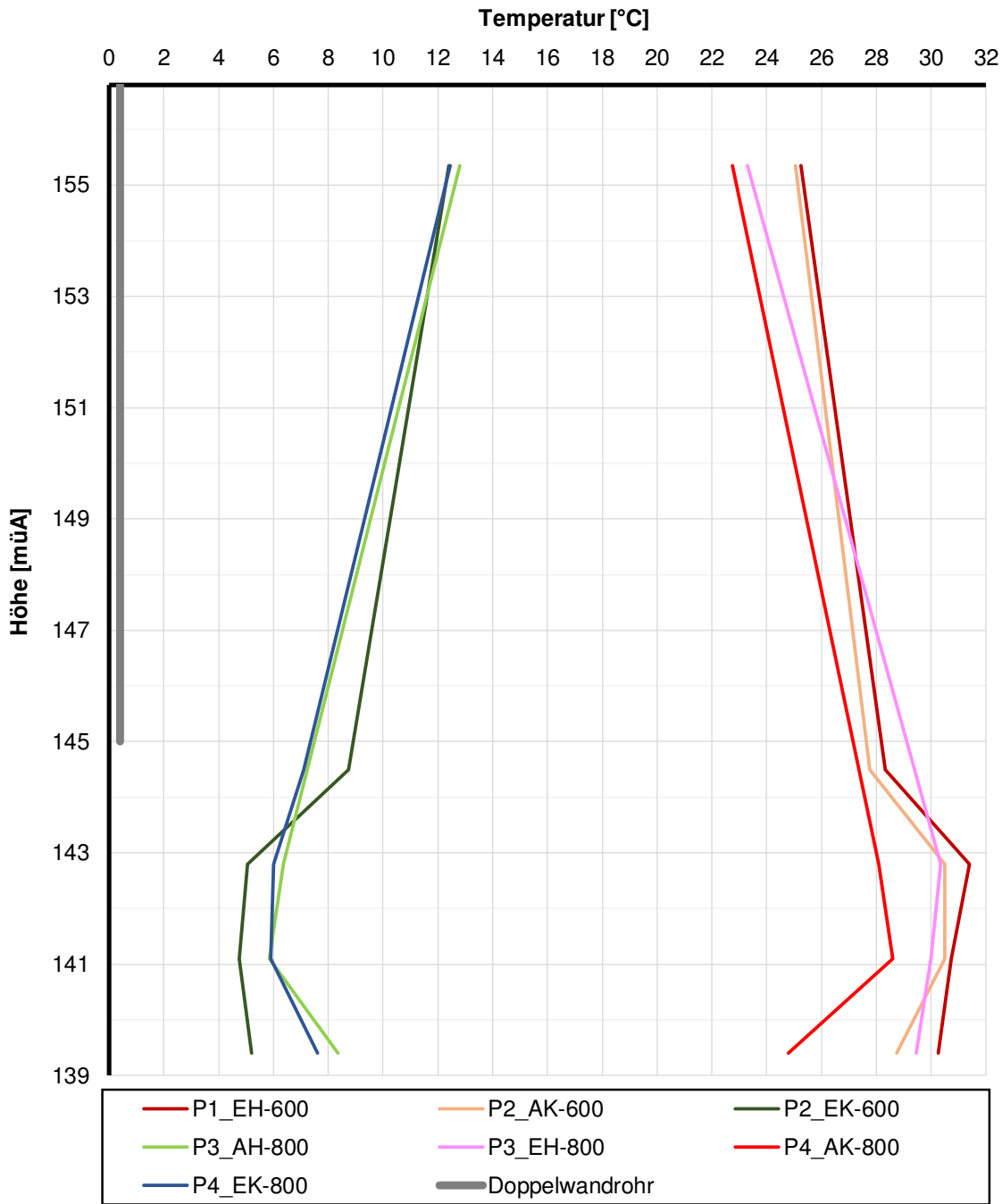


Prüfkörper: B.EM Temperaturänderungen (BS) zw. den gewählten Zeitpunkten



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

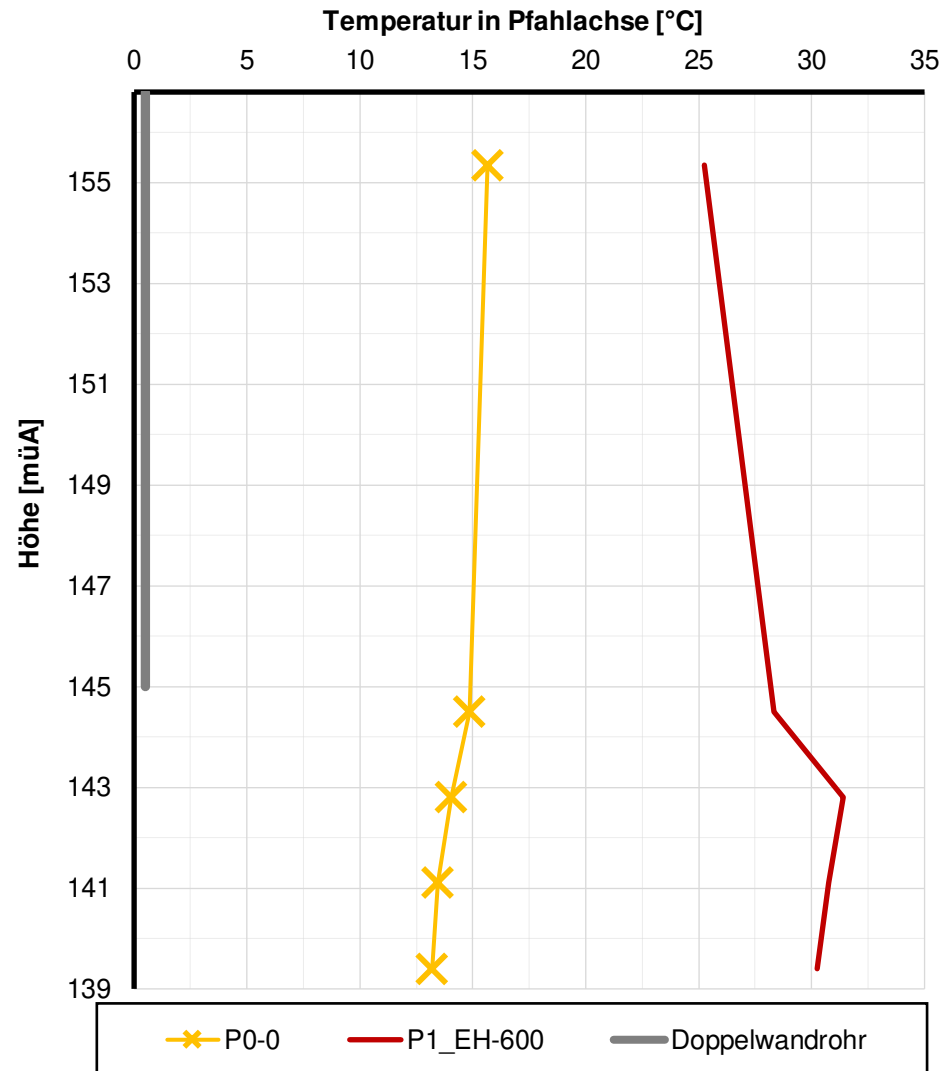
Prüfkörper: B.EM Temperatur (BS) zu den gewählten Zeitpunkten



Prüfkörper: B.EM

Pfahl

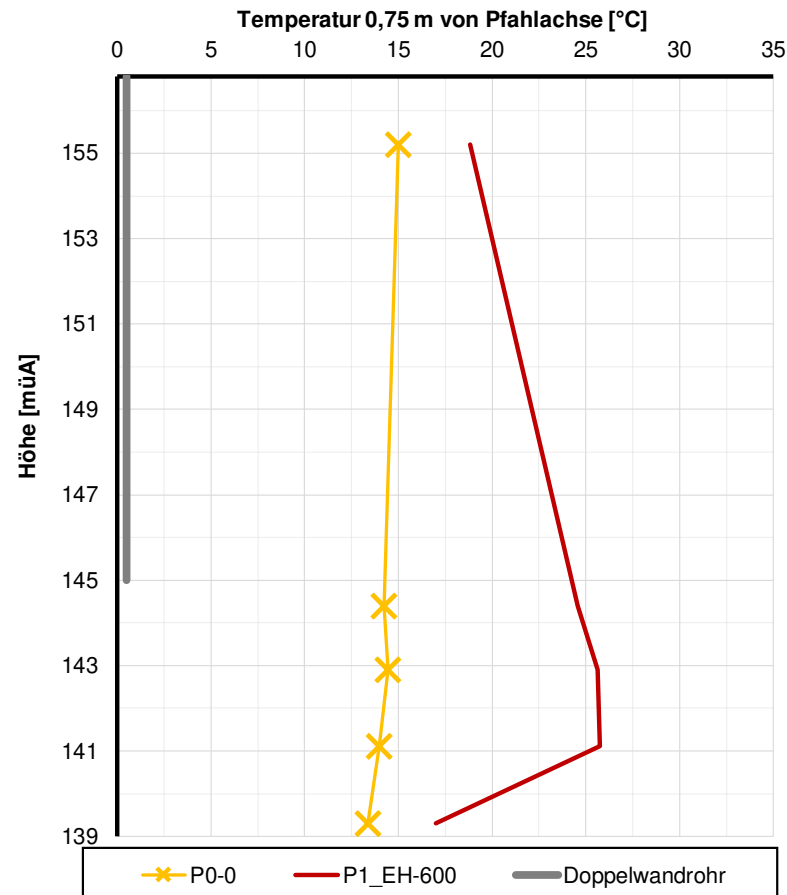
Temperaturverlauf in Pfahlachse



Prüfkörper: B.EM

TS.M1

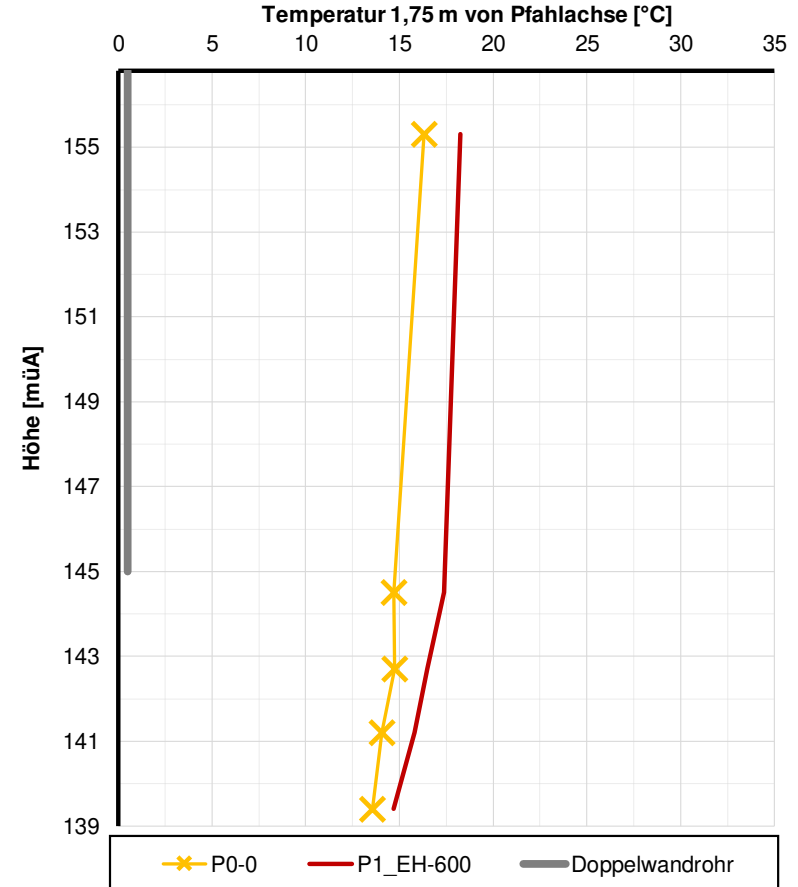
Temperaturverlauf 0,75 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EM

TS.M2

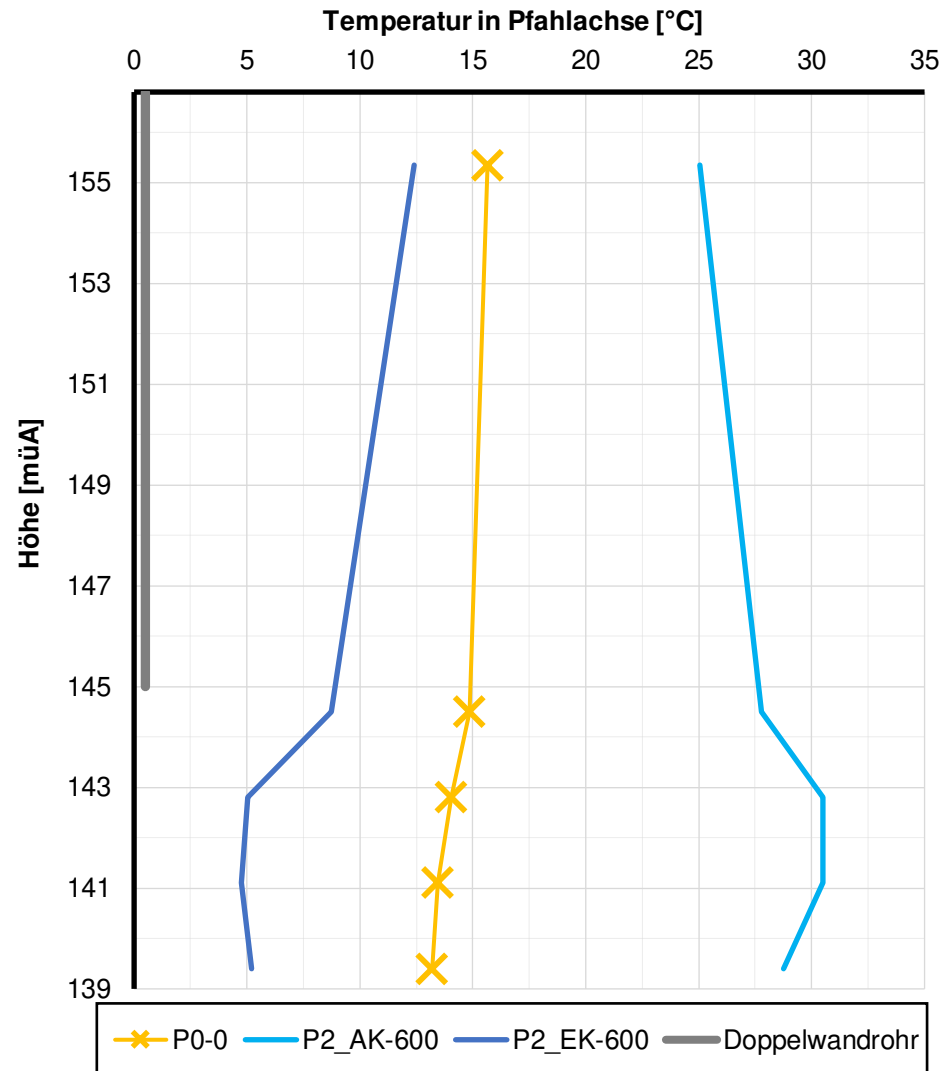
Temperaturverlauf 1,75 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EM

Pfahl

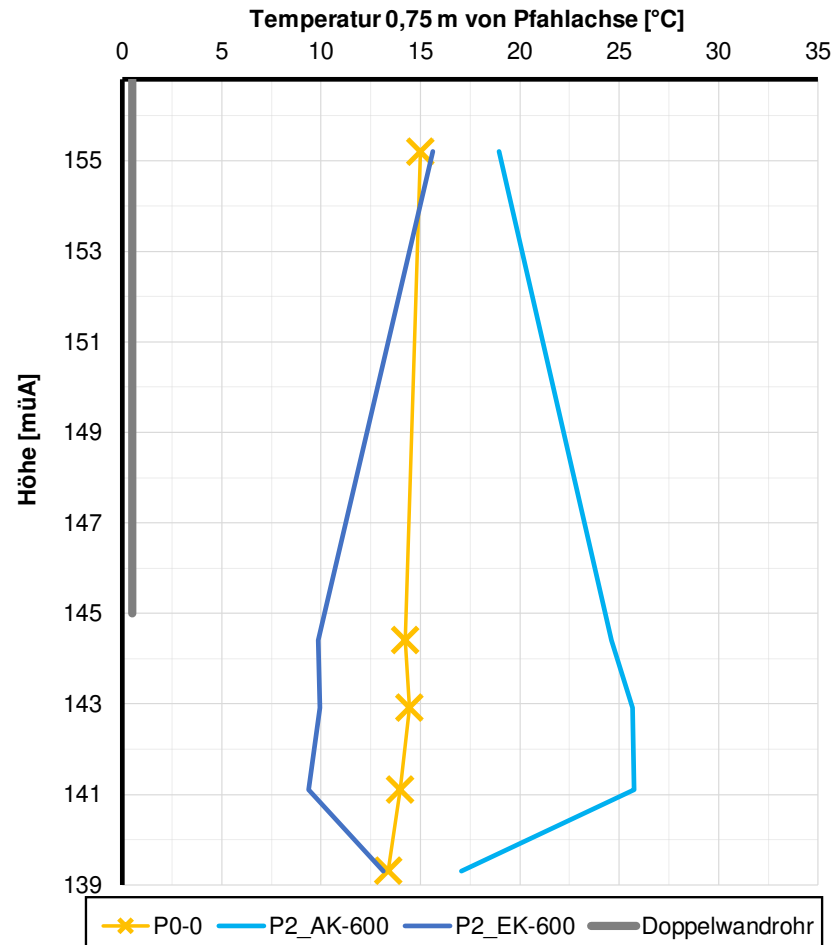
Temperaturverlauf in Pfahlachse



Prüfkörper: B.EM

TS.M1

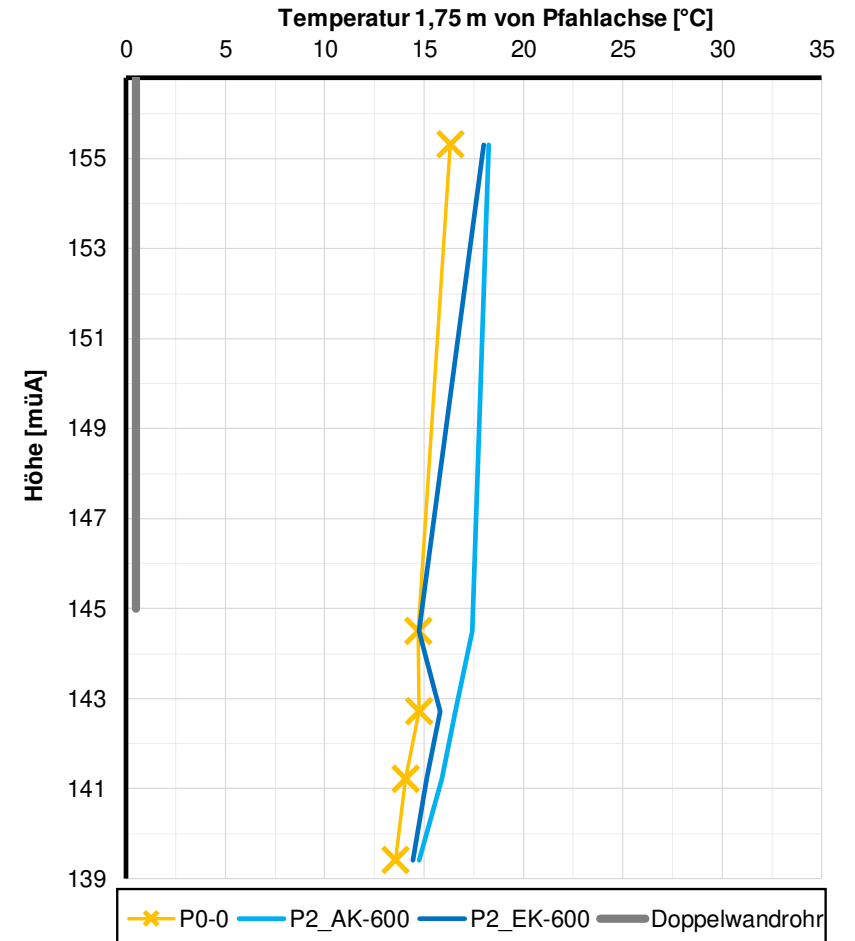
Temperaturverlauf 0,75 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EM

TS.M2

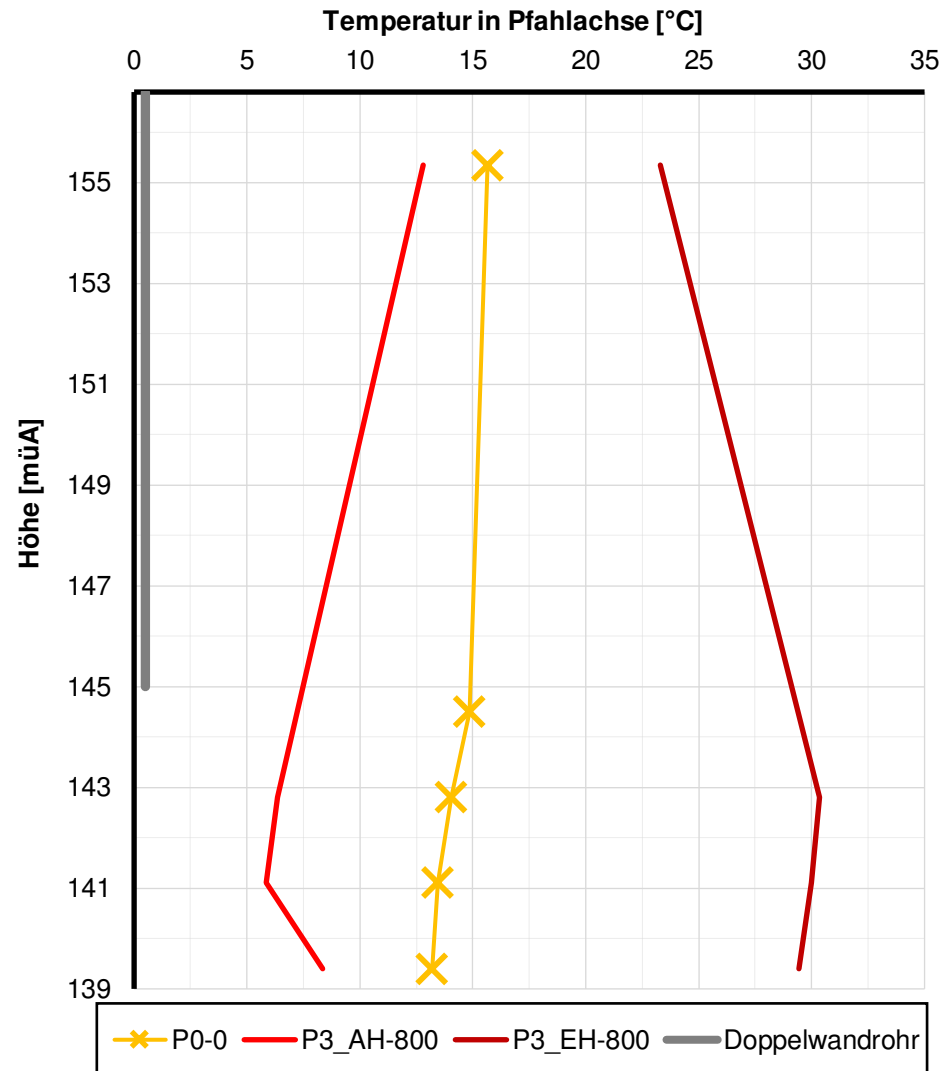
Temperaturverlauf 1,75 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EM

Pfahl

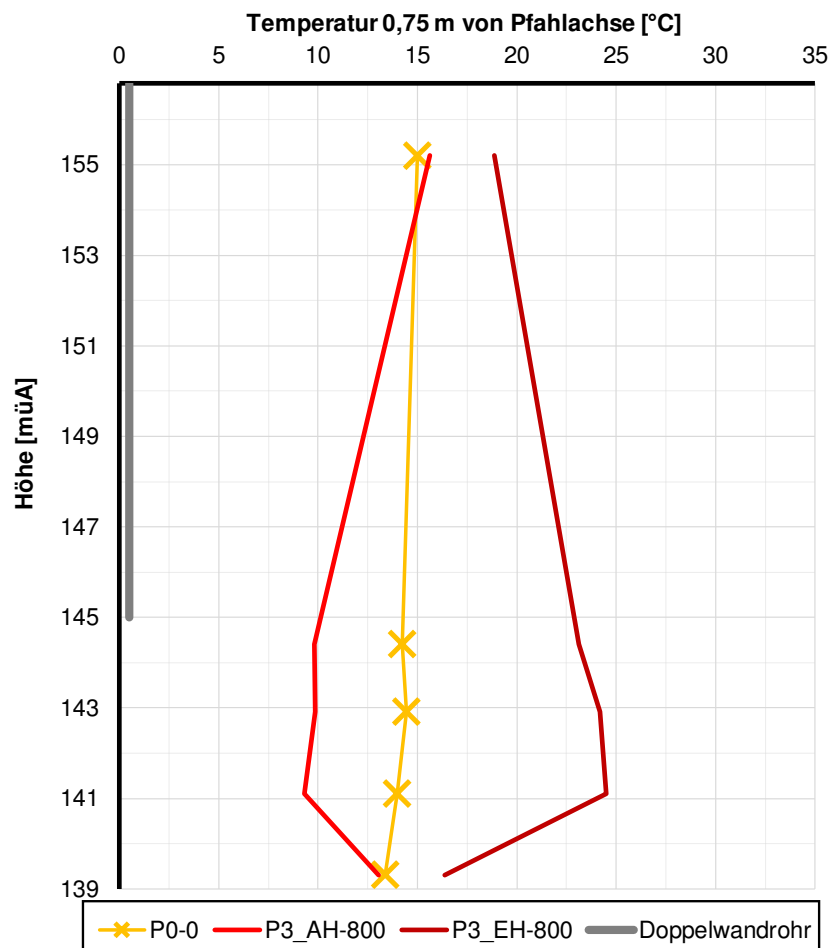
Temperaturverlauf in Pfahlachse



Prüfkörper: B.EM

TS.M1

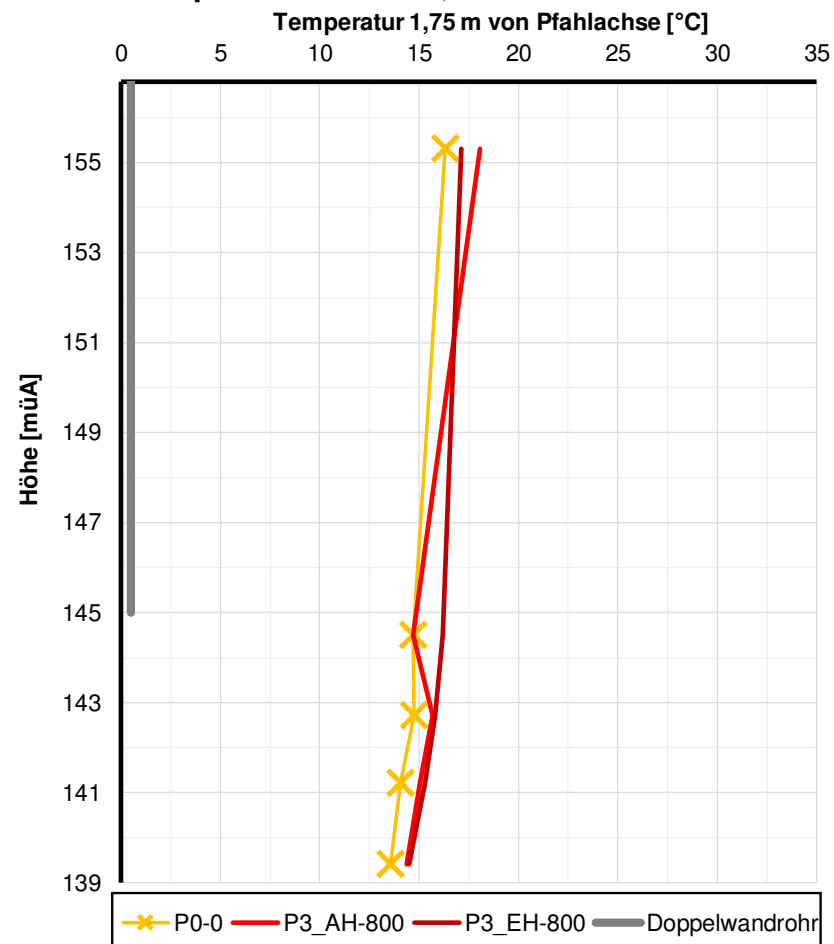
Temperaturverlauf 0,75 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EM

TS.M2

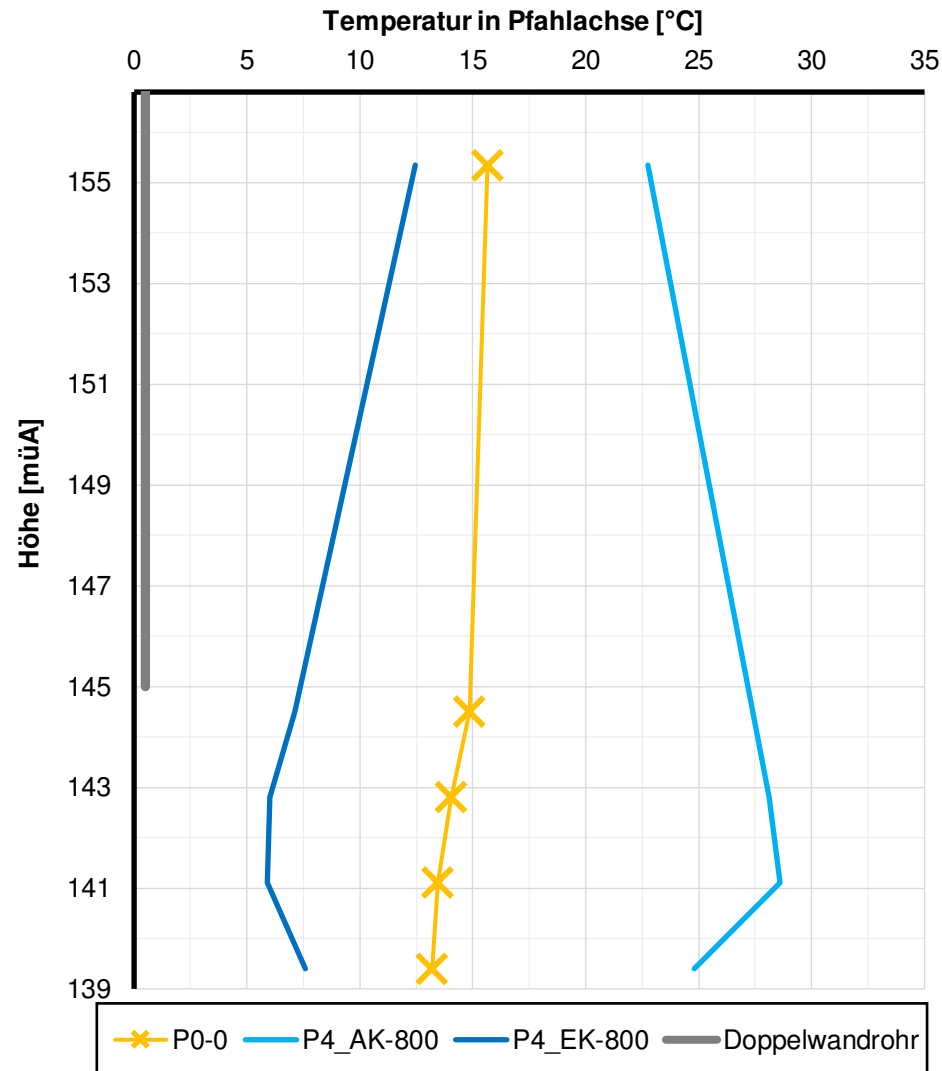
Temperaturverlauf 1,75 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EM

Pfahl

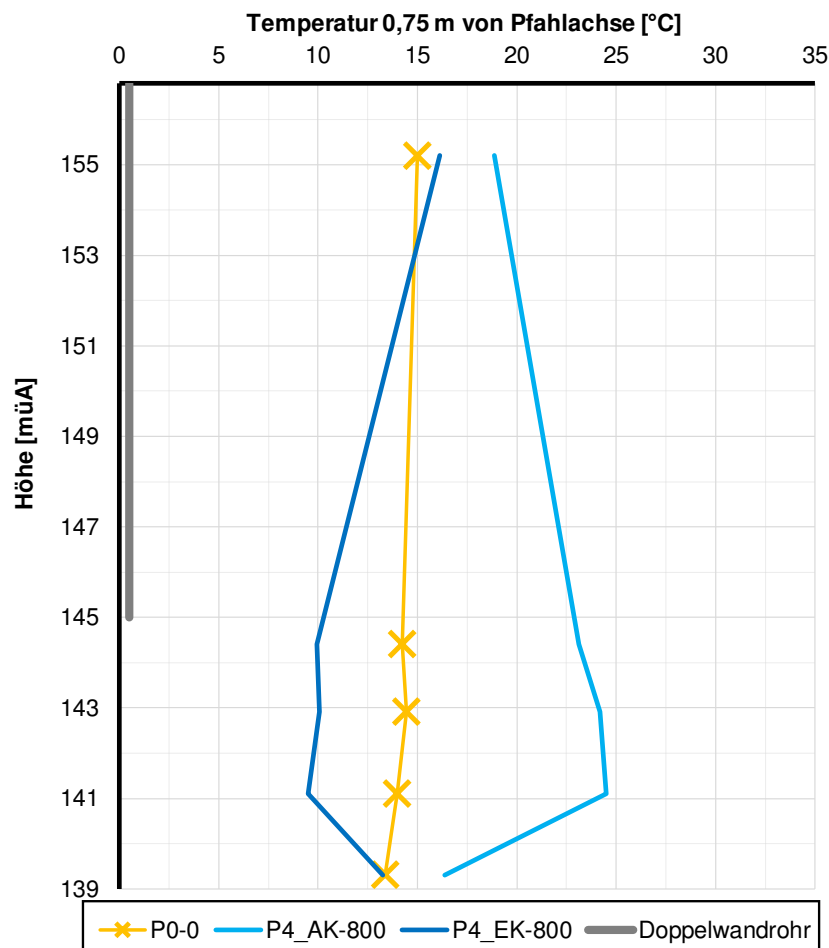
Temperaturverlauf in Pfahlachse



Prüfkörper: B.EM

TS.M1

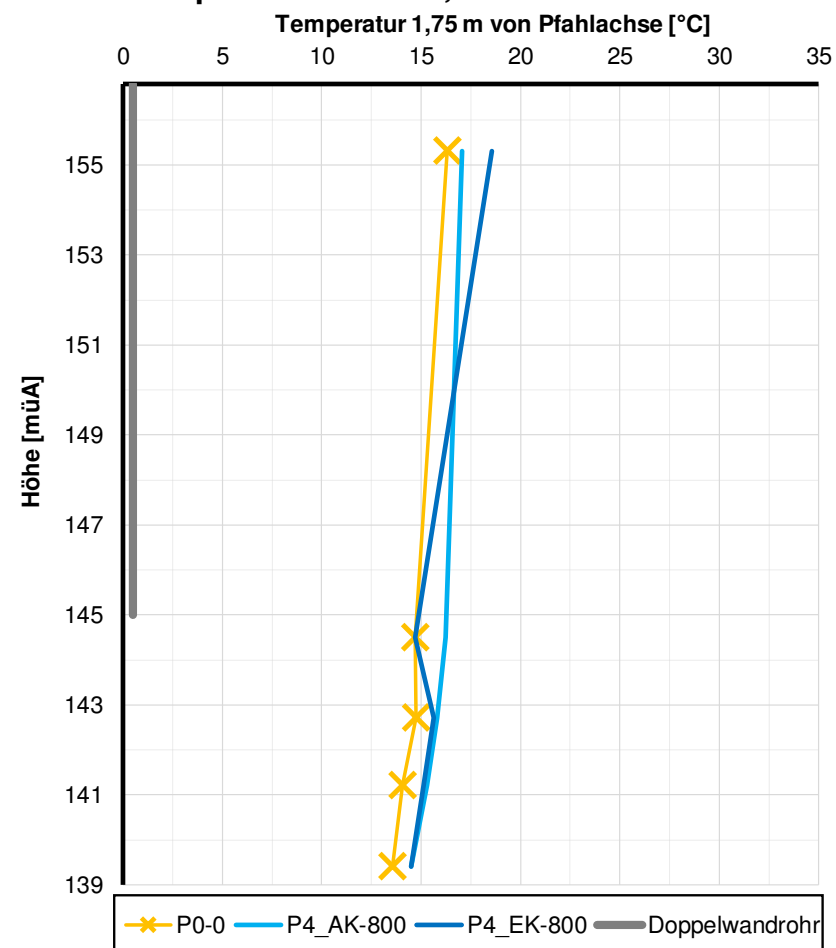
Temperaturverlauf 0,75 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EM

TS.M2

Temperaturverlauf 1,75 m von Pfahlachse



Ergebnisse Phase 6 B.EM

Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

A U S W E R T U N G

der statischen Pfahlprobelastung gemäß EA-Pfähle

Status: in Bearbeitung Stand: 01.11.2018

Allgemeine Angaben:

Prüfkörper:	B.EM
Prüffeld:	2
Versuch:	Großbohrpfahl Druck
Bodenschicht Krafteinleitungsstrecke:	Miozän

Pfahlinstrumentierung (MWES II):

Kettenextensometer:	ja
Bewehrungssensoren:	ja
Sohldruckmessdose:	nein

Versuchsdaten:

Prüfung Nr.:	93
Prüfdatum:	24.07.2018
Versuchsbeginn:	09:43 Uhr
Versuchsende:	01:48 Uhr
Wetterbedingungen:	sonnig, heiter
besondere Versuchsbedingungen:	1 vertikaler Wegaufnehmer defekt- ausgetauscht

Geometrie Prüfkörper:

Bohrdurchmesser:	900,00 mm
Querschnittsfläche $A_{ges} =$	636172,51 mm ²
OK Pfahlkopf (Messniveau GBP, DSV):	156,8 müA
Messniveau (Mikropfahl):	XX müA
OK Pfahl bzw. GOK:	155,80 müA
OK Haftstrecke:	145,00 müA
UK Pfahl:	139,00 müA
Länge Freispielstrecke:	11,80 m
Länge Haftstrecke:	6,00 m
Pfahllänge:	16,80 m

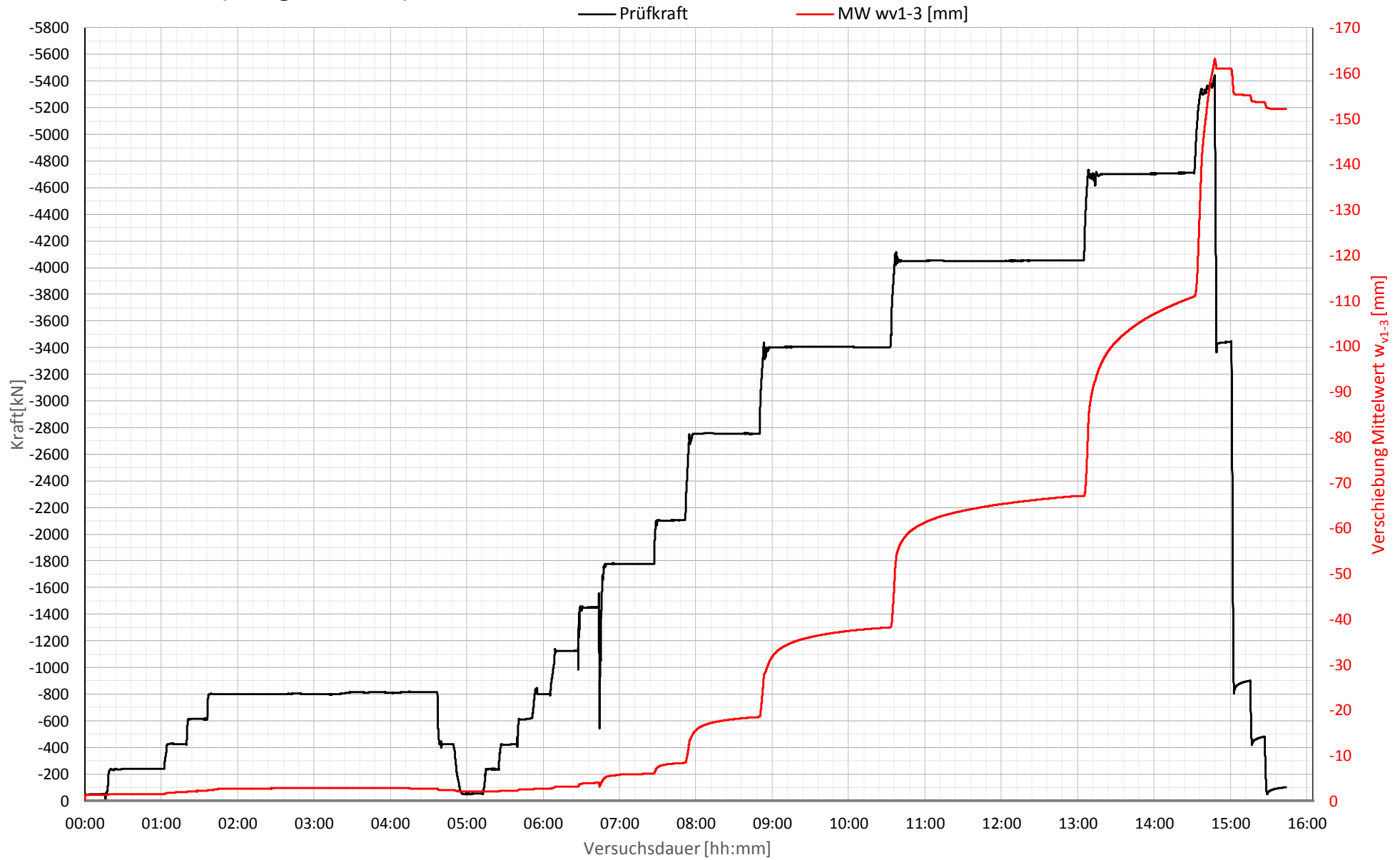
Materialkennwerte:

Betongüte:	C25/30 / BS-TB1	
Zement:	-	
W/B-Wert Zementsuspension:	-	
E-Modul Beton / Zementstein $E_C =$	33,01	kN/mm ²
Typ, Güte Stabstahl (Mikropfahl):	-	
Nennquerschnitt Stabstahl $A_{SS} =$	0,00	mm ²
E-Modul Stabstahl $E_{SS} =$	0,00	kN/mm ²
Güte Bewehrungsstahl:	B 550B	
Gesamtquerschnitt Bewehrung $A_{BS} =$	variiert	mm ²
E-Modul Bewehrungsstahl $E_{BS} =$	200,00	kN/mm ²
Güte Baustahl:	S235	
Gesamtquerschnitt Stahl $A_S =$	13947,46	mm ²
E-Modul Baustahl $E_S =$	200,00	kN/mm ²

Prüfkörper: B.EM (Energie-Miozän)

Belastungsstufen und Pfahlkopfverschiebung

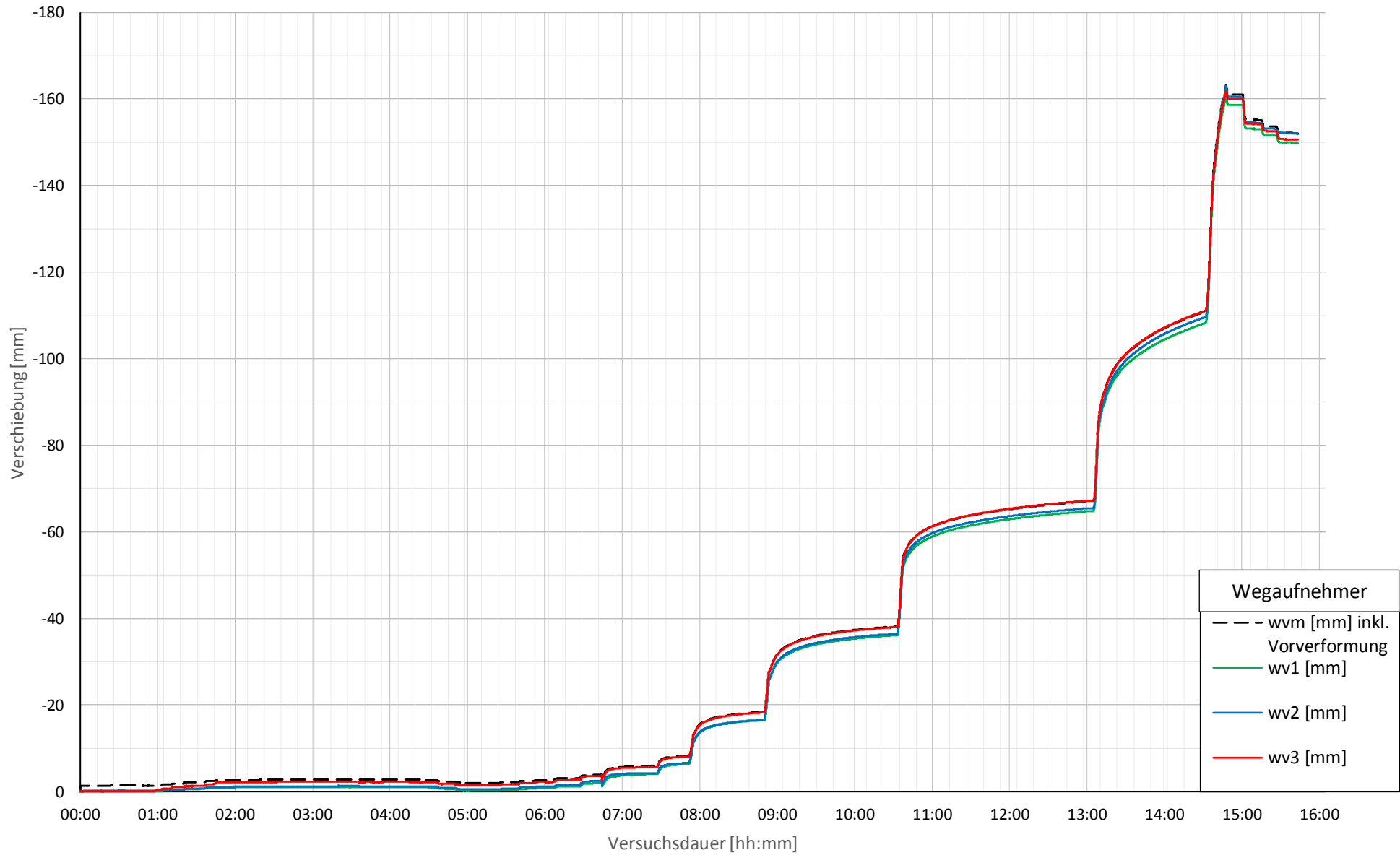
Phase 6



Prüfkörper: B.EM (Energie-Miozän)

Pfahlkopfverschiebung: Einzelwerte und Mittelwert

Phase 6



Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"



Prüfkörper: **B.EM (Energie-Miozän)**

Auswertung MWES I - Belastungsstufen und Verformungen																									
Laststufen			Prüflast und Verschiebung			Mittelwert der Vertikalverformung ab Beginn LS + Δt [min]														Berechnung Kriechmaß					
LS Nr	LS Beginn [hh:mm]	LS Ende [hh:mm]	P Soll [kN]	P Ist [kN]	w _{v,m 1-3} [mm]	Δt 1 min [min]	Δt 2 min [min]	Δt 5 min [min]	Δt 10 min [min]	Δt 15 min [min]	Δt 20 min [min]	Δt 50 min [min]	Δt 60 min [min]	Δt 70 min [min]	Δt 110 min [min]	Δt 120 min [min]	Δt 150 min [min]	Δt 160 min [min]	Δt 170 min [min]	Δt 1 [min]	Δt 2 [mm]	MW 1 [mm]	MW 2 [mm]	Kriechmaß [mm]	
0	10:04	10:19	-50	-46	-1,33																				
1	10:24	11:06	-238	-238	-1,50	-1,41	-1,41	-1,42	-1,45	-1,45	-1,44										20	40	-1,44	-1,50	-0,21
2	11:09	11:24	-425	-423	-1,86	-1,68	-1,68	-1,71	-1,86												2	10	-1,68	-1,86	-0,25
3	11:25	11:40	-613	-612	-2,15	-2,09	-2,09	-2,10	-2,12												5	10	-2,10	-2,12	-0,05
4	11:42	14:41	-800	-815	-2,69	-2,39	-2,40	-2,43	-2,62	-2,62	-2,64	-2,72	-2,78	-2,78	-2,83	-2,74	-2,74	-2,71	-2,70		60	110	-2,78	-2,83	-0,21
5	14:43	14:53	-425	-422	-2,32	-2,34	-2,33	-2,32													0	0			
6	15:01	15:16	-50	-52	-2,04	-2,03	-2,03	-2,04	-2,05												0	0			
7	15:19	15:29	-238	-236	-2,03	-2,01	-2,02	-2,03													2	5	-2,02	-2,03	-0,02
8	15:32	15:42	-425	-423	-2,21	-2,21	-2,21	-2,21													2	5	-2,21	-2,21	0,02
9	15:45	15:55	-613	-617	-2,45	-2,43	-2,43	-2,43													2	5	-2,43	-2,43	0,00
10	15:59	16:09	-800	-799	-2,65	-2,68	-2,68	-2,67													2	5	-2,68	-2,67	0,03
11	16:14	16:31	-1125	-1125	-3,10	-3,03	-3,04	-3,04	-3,06	-3,09											5	15	-3,04	-3,09	-0,10
12	16:33	16:48	-1450	-1449	-3,94	-3,72	-3,75	-3,85	-3,90												5	10	-3,85	-3,90	-0,17
13	16:53	17:33	-1775	-2087	-6,88	-5,21	-5,31	-5,48	-5,69	-5,77	-5,82										15	30	-5,77	-5,88	-0,36
14	17:35	17:55	-2100	-2104	-8,30	-7,61	-7,71	-7,92	-8,10	-8,20											5	15	-7,92	-8,20	-0,60
15	18:02	18:51	-2750	-2752	-18,35	-15,09	-15,41	-16,06	-16,72	-17,15	-17,44										20	40	-17,44	-18,17	-2,41
16	19:03	20:36	-3400	-3401	-38,11	-31,50	-31,90	-32,81	-33,81	-34,54	-35,09	-36,92	-37,29	-37,59							60	90	-37,288	-38,049	-4,3171
17	20:44	23:07	-4050	-4053	-67,03	-56,40	-56,91	-58,12	-59,49	-60,42	-61,14	-63,74	-64,29	-64,78	-66,23	-66,52					100	140	-65,918	-67,028	-7,5922
18	23:25	00:33	-4700	-4710	-110,57	-97,79	-98,25	-99,46	-101,09	-102,40	-103,54	-108,48	-109,69								40	60	-107,11	-109,69	-14,685
19	00:48	00:52	-5300	-5443	-163,10	-158,45	-159,86																		
20	00:54	01:04	-3400	-3441	-160,9984	-161,02	-161,01	-161,01																	
21	01:07	01:18	-800	-897	-155,1659	-155,36	-155,32	-155,27	-155,17																
22	01:21	01:31	-425	-480	-153,65835	-153,78	-153,74	-153,69																	
23	01:33	01:48	-50	0	0																				

Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

Prüfkörper: **B.EM (Energie-Miozän)**

Auswertung Verformungen MWES II - Bewehrungssensoren																		Pfahlwiderstand DMD			
Laststufen			Messwerte je Laststufe und Höhenlage der BS											Rechenwerte je Messquerschnitt					Sohldruckmessdose SMD		
LS	LS Ende	P Ist	BS1.1	BS1.2	BS2.1	BS2.2	BS3.1	BS3.2	BS4.1	BS4.2	BS5.1	BS5.2	BS1.MW	BS2.MW	BS3.MW	BS4.MW	BS5.MW	Rb	Rs	q _{s,m}	
Nr.	[hh:mm]	[kN]	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:		[kN]	[kN]	[kN/m ²]
			[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]				
0	10:19	-46	155,35	155,35	144,50	144,50	142,80	142,80	141,10	141,10	139,40	139,40	155,35	144,50	142,80	141,10	139,40				
1	11:06	-238	-0,0120	-0,0110	-2,6104	-0,0031	-0,2406	-0,0045	-0,0043	-0,0038	-0,0010	-0,0018	-0,0115	-1,3068	-0,1225	-0,0041	-0,0014	0,0	-238,3	-14,0	
2	11:24	-423	-0,0202	-0,0212	-2,5506	-0,0089	-0,2399	-0,0096	-0,0079	-0,0070	-0,0019	-0,0032	-0,0207	-1,2798	-0,1248	-0,0074	-0,0026	0,0	-422,7	-24,9	
3	11:40	-612	-0,0286	-0,0315	-2,5565	-0,0154	-0,2504	-0,0154	-0,0119	-0,0107	-0,0029	-0,0051	-0,0301	-1,2859	-0,1329	-0,0113	-0,0040	0,0	-611,9	-36,1	
4	14:41	-815	-0,0379	-0,0428	-2,5626	-0,0228	-0,2566	-0,0222	-0,0168	-0,0152	-0,0041	-0,0065	-0,0403	-1,2927	-0,1394	-0,0160	-0,0053	0,0	-815,2	-48,1	
5	14:53	-422	-0,0207	-0,0219	-2,5519	-0,0110	-0,2393	-0,0115	-0,0095	-0,0083	-0,0025	-0,0029	-0,0213	-1,2815	-0,1254	-0,0089	-0,0027	0,0	-422,4	-24,9	
6	15:16	-52	-0,0030	-0,0020	-2,5403	0,0004	-0,2316	-0,0004	-0,0021	-0,0013	-0,0004	-0,0002	-0,0025	-1,2700	-0,1160	-0,0017	-0,0003	0,0	-52,3	-3,1	
7	15:29	-236	-0,0115	-0,0114	-2,5458	-0,0035	-0,2423	-0,0043	-0,0051	-0,0039	-0,0013	-0,0018	-0,0114	-1,2746	-0,1233	-0,0045	-0,0015	0,0	-236,4	-13,9	
8	15:42	-423	-0,0203	-0,0213	-2,5515	-0,0094	-0,2402	-0,0100	-0,0086	-0,0073	-0,0020	-0,0034	-0,0208	-1,2804	-0,1251	-0,0080	-0,0027	0,0	-422,9	-24,9	
9	15:55	-617	-0,0292	-0,0317	-2,5569	-0,0160	-0,2290	-0,0158	-0,0125	-0,0110	-0,0029	-0,0050	-0,0304	-1,2865	-0,1224	-0,0118	-0,0040	0,0	-617,4	-36,4	
10	16:09	-799	-0,0372	-0,0416	-2,5624	-0,0226	-0,2556	-0,0221	-0,0165	-0,0148	-0,0042	-0,0063	-0,0394	-1,2925	-0,1388	-0,0157	-0,0052	0,0	-798,6	-47,1	
11	16:31	-1125	-0,0520	-0,0596	-2,5712	-0,0340	-0,2624	-0,0320	-0,0227	-0,0203	-0,0061	-0,0100	-0,0558	-1,3026	-0,1472	-0,0215	-0,0081	0,0	-1125,4	-66,3	
12	16:48	-1449	-0,0670	-0,0783	-2,5798	-0,0448	-0,2604	-0,0427	-0,0298	-0,0273	-0,0096	-0,0153	-0,0727	-1,3123	-0,1515	-0,0286	-0,0124	0,0	-1449,4	-85,4	
13	17:33	-2087	-0,0977	-0,1158	-2,5970	-0,0676	-0,2687	-0,0674	-0,0431	-0,0414	-0,0165	-0,0234	-0,1068	-1,3323	-0,1680	-0,0423	-0,0199	0,0	-2087,1	-123,0	
14	17:55	-2104	-0,0993	-0,1178	-2,5972	-0,0680	-0,2775	-0,0700	-0,0435	-0,0430	-0,0174	-0,0235	-0,1085	-1,3326	-0,1737	-0,0432	-0,0205	0,0	-2104,0	-124,0	
15	18:51	-2752	-0,1325	-0,1598	-2,6141	-0,0877	-0,2722	-0,0922	-0,0586	-0,0532	-0,0303	-0,0390	-0,1462	-1,3509	-0,1822	-0,0559	-0,0347	0,0	-2751,7	-162,2	
16	20:36	-3401	-0,1651	-0,2057	-2,6372	-0,1103	-0,2994	-0,1145	-0,0856	-0,0693	-0,0566	-0,0900	-0,1854	-1,3737	-0,2069	-0,0775	-0,0733	0,0	-3400,8	-200,5	
17	23:07	-4053	-0,1977	-0,2519	-2,6629	-0,1369	-0,3553	-0,1377	-0,1330	-0,0818	-0,0965	-0,1867	-0,2248	-1,3999	-0,2465	-0,1074	-0,1416	0,0	-4053,0	-238,9	
18	00:33	-4710	-0,2311	-0,2981	-2,6873	-0,1653	-0,3959	-0,1630	-0,1857	-0,0949	-0,1444	-0,3098	-0,2646	-1,4263	-0,2794	-0,1403	-0,2271	0,0	-4710,1	-277,6	
19	00:52	-5443	-0,2679	-0,3458	-2,7147	-0,1928	-0,4315	-0,1909	-0,2335	-0,1156	-0,1839	-0,4413	-0,3068	-1,4538	-0,3112	-0,1746	-0,3126	0,0	-5443,4	-320,9	
20	01:04	-3441	-0,1807	-0,2250	-2,6599	-0,1228	-0,3487	-0,1254	-0,1784	-0,0785	-0,1400	-0,3055	-0,2029	-1,3913	-0,2370	-0,1285	-0,2228	0,0	-3440,6	-202,8	
21	01:18	-897	-0,0565	-0,0631	0,3618	-0,0259	-0,2312	-0,0254	-0,0923	-0,0167	-0,0609	-0,0553	-0,0598	0,1680	-0,1283	-0,0545	-0,0581	0,0	-897,0	-52,9	
22	01:31	-480	-0,0346	-0,0364	0,1961	-0,0101	-0,2223	-0,0082	-0,0762	-0,0051	-0,0471	-0,0180	-0,0355	0,0930	-0,1153	-0,0407	-0,0325	0,0	-479,8	-28,3	
23	01:48	0	-0,0128	-0,0130	8,2401	0,0019	-0,2758	0,0066	-0,0593	0,0057	-0,0339	0,0132	-0,0129	4,1210	-0,1346	-0,0268	-0,0103	0,0	-100,7	-5,9	

Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

Prüfkörper: **B.EM (Energie-Miozän)**

Auswertung MWES II - Kettenextensometer										Berechnung E-Modul und Normalkraft										
Laststufen			Kettenextensometer - Verzerrungen					E-Modul		Normalkraft je Messquerschnitt der BS					Anteil der Normalkraft an der Prüfkraft					
LS	LS Ende	P Ist	KEX1	KEX2	KEX3	KEX4	KEX5	Ec / MQ1	Ec / KEX1	N(MQ1)	N(MQ2)	N(MQ3)	N(MQ4)	N(MQ5)	N(MQ1)	N(MQ2)	N(MQ3)	N(MQ4)	N(MQ5)	
Nr.	[hh:mm]	[kN]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[kN/mm ²]	[kN/mm ²]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	
			Höhe / 10 [m]	Höhe / 10 [m]	Höhe / 10 [m]	Höhe / 10 [m]	Höhe / 10 [m]	QS-Nr.: 3	QS-Nr.: 8	QS-Nr.: 3	QS-Nr.: 4	QS-Nr.: 5	QS-Nr.: 6	QS-Nr.: 7						
0	10:19	-46	156,51/11,69	145,03/1,46	143,61/1,47	142,19/1,46	140,77/1,47													
1	11:06	-238	-2,1519	-0,0039	-0,0107	-0,0047	0,0000	41	-16	-204,5	-74,9	-89,1	-94,8	-30,6	86%	31%	37%	40%	13%	
2	11:24	-423	-4,7174	-0,0111	-0,0143	-0,0071	-0,0029	40	-16	-368,1	-212,6	-223,1	-172,9	-56,6	87%	50%	53%	41%	13%	
3	11:40	-612	-4,7260	-0,0181	-0,0199	-0,0126	-0,0050	40	-16	-534,9	-367,8	-358,3	-262,7	-87,7	87%	60%	59%	43%	14%	
4	14:41	-815	-4,7355	-0,0249	-0,0262	-0,0159	-0,0064	40	-16	-717,7	-544,1	-515,6	-370,6	-118,2	88%	67%	63%	45%	14%	
5	14:53	-422	-4,7196	-0,0156	-0,0138	-0,0100	-0,0012													
6	15:16	-52	-4,7032	-0,0048	-0,0035	-0,0023	-0,0007													
7	15:29	-236	-4,7082	-0,0059	-0,0102	-0,0054	-0,0024	41	-16	-203,6	-82,6	-99,2	-104,8	-33,7	86%	35%	42%	44%	14%	
8	15:42	-423	-4,7168	-0,0117	-0,0139	-0,0081	-0,0022	40	-16	-369,5	-223,0	-231,2	-184,7	-59,7	87%	53%	55%	44%	14%	
9	15:55	-617	-4,7259	-0,0160	-0,0186	-0,0127	-0,0047	40	-16	-541,7	-382,3	-367,1	-273,1	-87,8	88%	62%	59%	44%	14%	
10	16:09	-799	-4,7362	-0,0262	-0,0248	-0,0156	-0,0068	40	-16	-700,9	-539,8	-512,6	-363,4	-115,8	88%	68%	64%	46%	14%	
11	16:31	-1125	-4,7503	-0,0353	-0,0352	-0,0234	-0,0080	39	-16	-993,0	-809,6	-742,6	-500,1	-179,0	88%	72%	66%	44%	16%	
12	16:48	-1449	-4,7644	-0,0463	-0,0450	-0,0295	-0,0117	39	-16	-1292,9	-1067,1	-991,0	-662,9	-275,4	89%	74%	68%	46%	19%	
13	17:33	-2087	-4,7966	-0,0649	-0,0650	-0,0486	-0,0215	38	-15	-1899,4	-1611,1	-1564,6	-981,5	-441,2	91%	77%	75%	47%	21%	
14	17:55	-2104	-4,7975	-0,0681	-0,0648	-0,0483	-0,0200	37	-15	-1931,1	-1621,5	-1625,2	-1003,7	-453,4	92%	77%	77%	48%	22%	
15	18:51	-2752	-4,8314	-0,0873	-0,0831	-0,0608	0,0000	36	-15	-2600,3	-2092,3	-2141,0	-1297,8	-767,6	94%	76%	78%	47%	28%	
16	20:36	-3401	-4,7487	-0,1091	-0,1045	-0,0835	-0,0552	35	-15	-3298,2	-2629,6	-2658,0	-1798,7	-1253,2	97%	77%	78%	53%	37%	
17	23:07	-4053	-4,9039	-0,1355	-0,1330	-0,1119	-0,0874	34	-14	-3999,1	-3263,5	-3196,0	-2493,1	-2137,7	99%	81%	79%	62%	53%	
18	00:33	-4710	-4,9390	-0,1646	-0,1651	-0,1406	-0,1236	33	-14	-4707,7	-3942,2	-3783,8	-3257,0	-3198,4	100%	84%	80%	69%	68%	
19	00:52	-5443	-4,9751	-0,1917	-0,1972	-0,1748	0,0000			-5458,3	-4597,1	-4431,9	-4052,7	-4073,4	100%	84%	81%	74%	75%	
20	01:04	-3441	-4,8856	-0,1293	-0,1388	-0,1252	0,0000													
21	01:18	-897	-4,7532	-0,0382	-0,0445	-0,0484	0,0000													
22	01:31	-480	-4,7318	-0,0239	-0,0283	-0,0325	0,0000	MW E-Modul												
23	01:48	0	-4,7125	-0,0073	-0,0121	-0,0200	0,0000	38	-16											

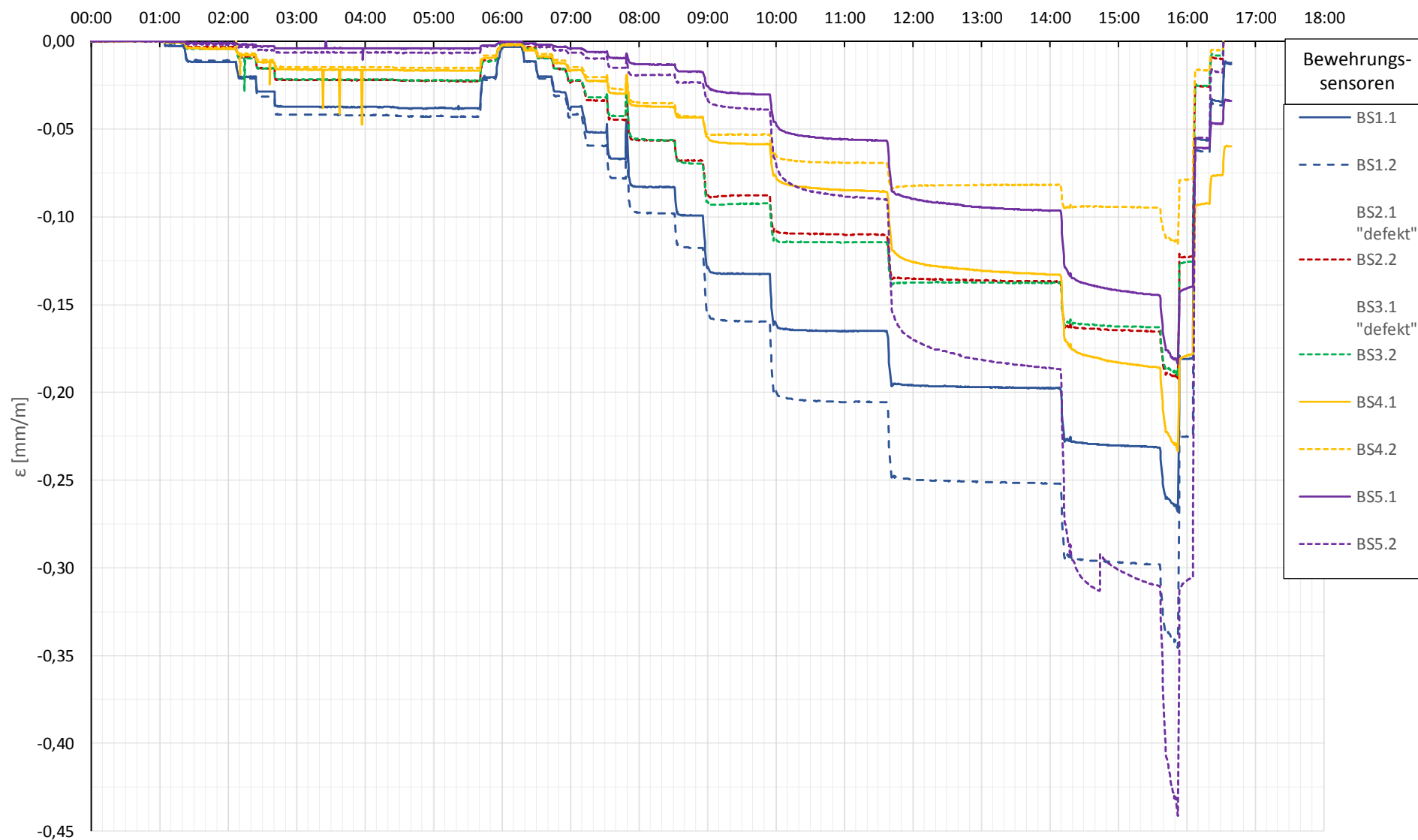
Berechnung der Mantelreibung zwischen den Messquerschnitten										Pfahlwiderstände					
Laststufen			Differenz Längskraft				Mantelreibung				Widerstand errechnet		Widerstand mittels DMD		
LS	LS Ende	P Ist	ΔN(MQ1-2)	ΔN(MQ2-3)	ΔN(MQ3-4)	ΔN(MQ4-5)	qs (MQ1-2)	qs (MQ2-3)	qs (MQ3-4)	qs (MQ4-5)	Rb	Rs	Rb DMD	Rs DMD	q DMD
Nr.	[hh:mm]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN/m ²]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN]	[kN/m ²]
0	10:19	-46	145,00	144,50	142,80	141,10									
			144,82	142,80	141,10	139,40									
1	11:06	-238	-129,7	14,2	5,7	-64,2	-91,7	3,0	1,2	-13,4	-59,5	-178,8	0,0	-238,3	-14,0
2	11:24	-423	-155,5	10,4	-50,1	-116,4	-110,0	2,2	-10,4	-24,2	-102,5	-320,2	0,0	-422,7	-24,9
3	11:40	-612	-167,1	-9,6	-95,5	-175,0	-118,2	-2,0	-19,9	-36,4	-151,6	-460,3	0,0	-611,9	-36,1
4	14:41	-815	-173,6	-28,5	-144,9	-252,4	-122,8	-5,9	-30,2	-52,5	-196,8	-618,4	0,0	-815,2	-48,1
5	14:53	-422													
6	15:16	-52													
7	15:29	-236	-121,1	16,6	5,6	-71,1	-85,6	3,5	1,2	-14,8	-61,2	-175,2	0,0	-236,4	-13,9
8	15:42	-423	-146,6	8,3	-46,6	-124,9	-103,7	1,7	-9,7	-26,0	-103,7	-319,2	0,0	-422,9	-24,9
9	15:55	-617	-159,3	-15,2	-94,0	-185,4	-112,7	-3,2	-19,6	-38,6	-149,6	-467,8	0,0	-617,4	-36,4
10	16:09	-799	-161,1	-27,2	-149,3	-247,6	-113,9	-5,6	-31,1	-51,5	-195,0	-603,6	0,0	-798,6	-47,1
11	16:31	-1125	-183,4	-67,0	-242,5	-321,1	-129,8	-13,9	-50,4	-66,8	-287,2	-838,1	0,0	-1125,4	-66,3
12	16:48	-1449	-225,7	-76,2	-328,0	-387,5	-159,7	-15,8	-68,2	-80,6	-402,9	-1046,4	0,0	-1449,4	-85,4
13	17:33	-2087	-288,3	-46,4	-583,2	-540,2	-203,9	-9,7	-121,3	-112,4	-588,5	-1498,6	0,0	-2087,1	-123,0
14	17:55	-2104	-309,6	3,7	-621,4	-550,3	-219,0	0,8	-129,3	-114,5	-585,1	-1518,9	0,0	-2104,0	-124,0
15	18:51	-2752	-507,9	48,7	-843,3	-530,1	-359,3	10,1	-175,4	-110,3	-879,4	-1872,4	0,0	-2751,7	-162,2
16	20:36	-3401	-668,6	28,3	-859,3	-545,4	-472,9	5,9	-178,8	-113,5	-1314,9	-2085,8	0,0	-3400,8	-200,5
17	23:07	-4053	-735,6	-67,5	-702,9	-355,4	-520,4	-14,0	-146,2	-73,9	-2164,9	-1888,1	0,0	-4053,0	-238,9
18	00:33	-4710	-765,5	-158,3	-526,9	-58,6	-541,5	-32,9	-109,6	-12,2	-3196,4	-1513,7	0,0	-4710,1	-277,6
19	00:52	-5443	-861,2	-165,2	-379,2	20,7	-609,2	-34,4	-78,9	4,3	-4060,0	-1383,3	0,0	-5443,4	-320,9
20	01:04	-3441													
21	01:18	-897													
22	01:31	-480													
23	01:48	0													

Prüfkörper: **B.EM**
(Energie-Miozän)

Bewehrungssensoren

Phase 6

Prüfdauer [hh:mm]

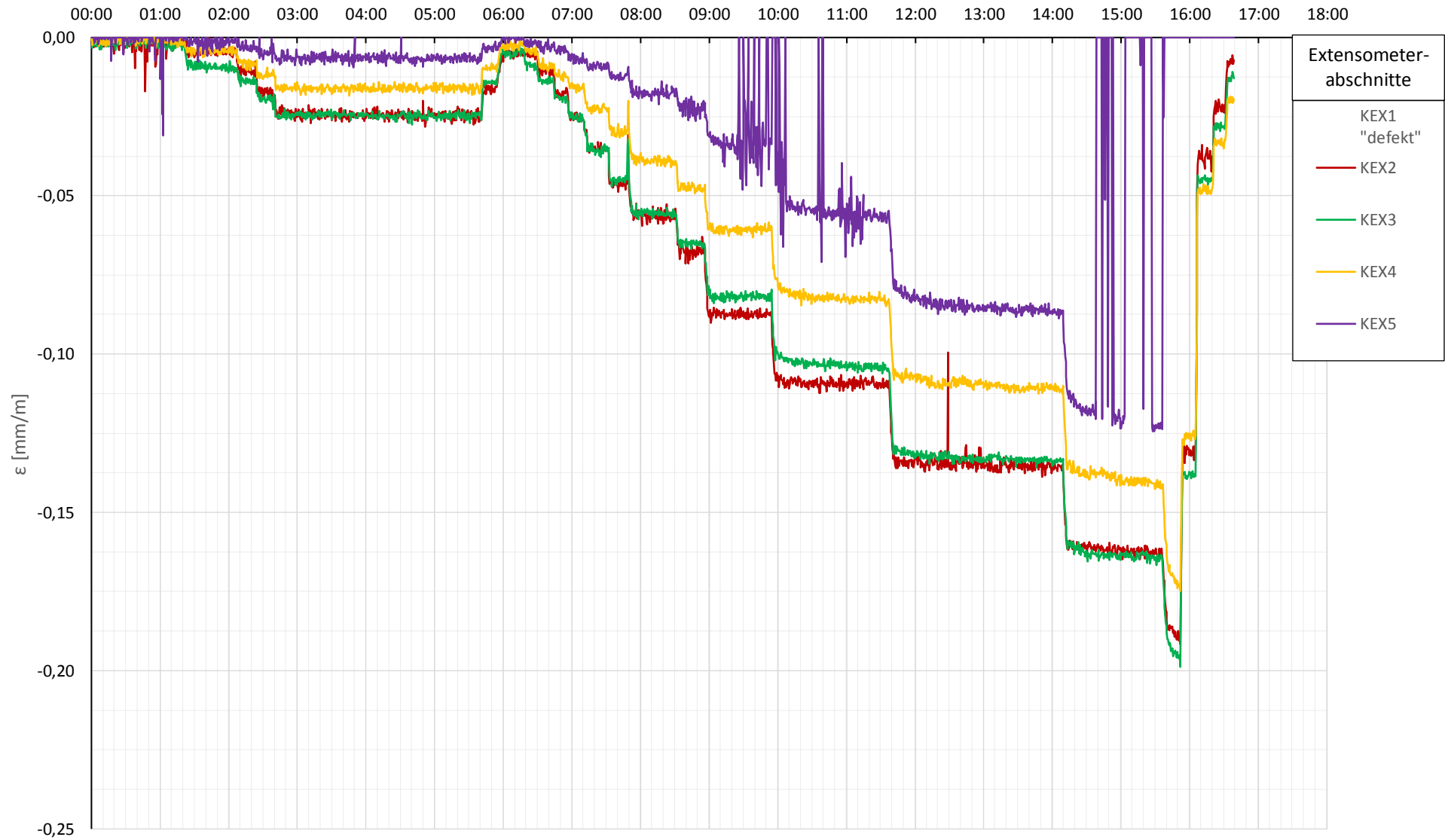


Prüfkörper: **B.EM**
(Energie-Miozän)

Kettenextensometer

Phase 6

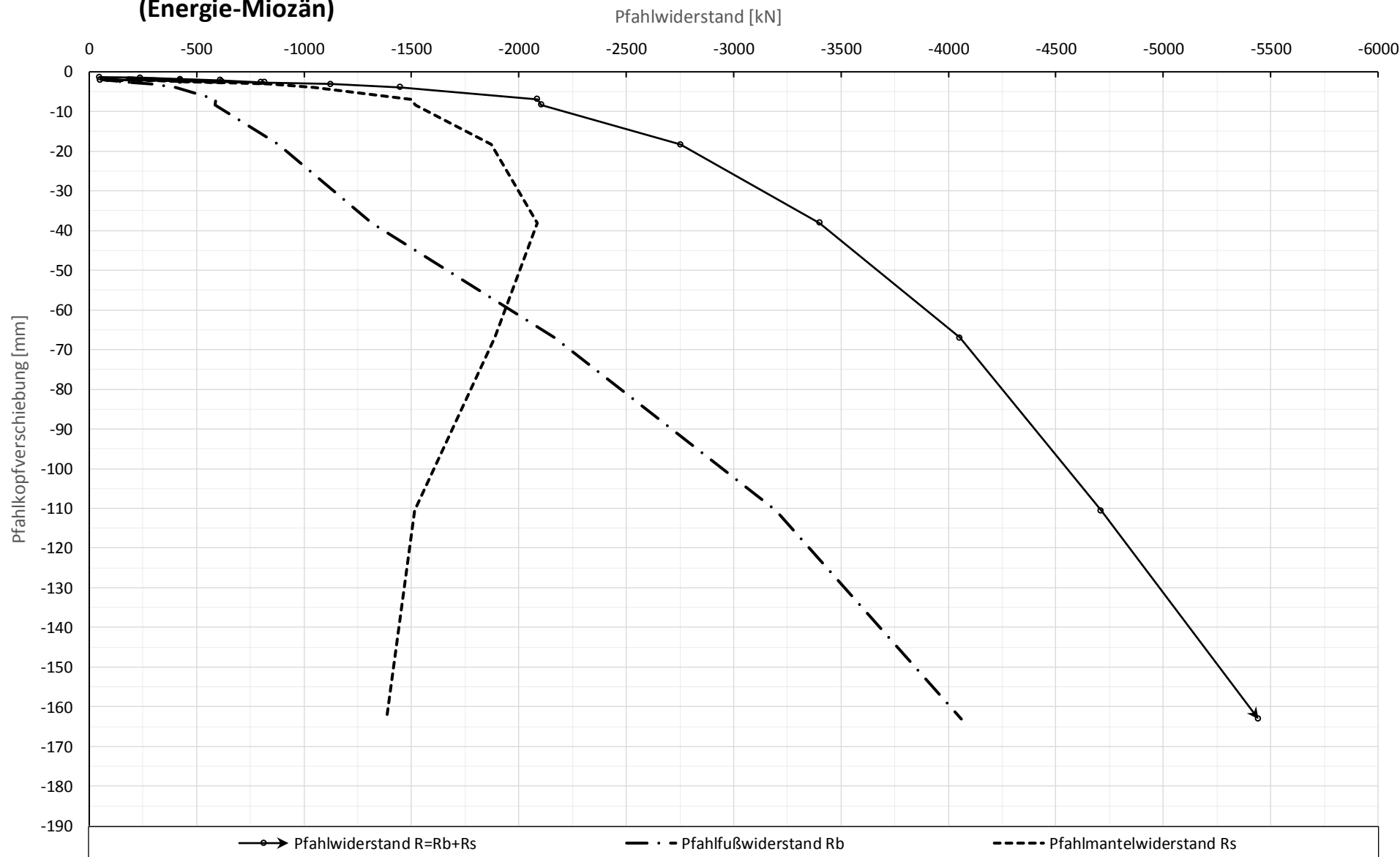
Prüfdauer [hh:mm]



Prüfkörper: **B.EM**
(Energie-Miozän)

Widerstands-Setzungslinie

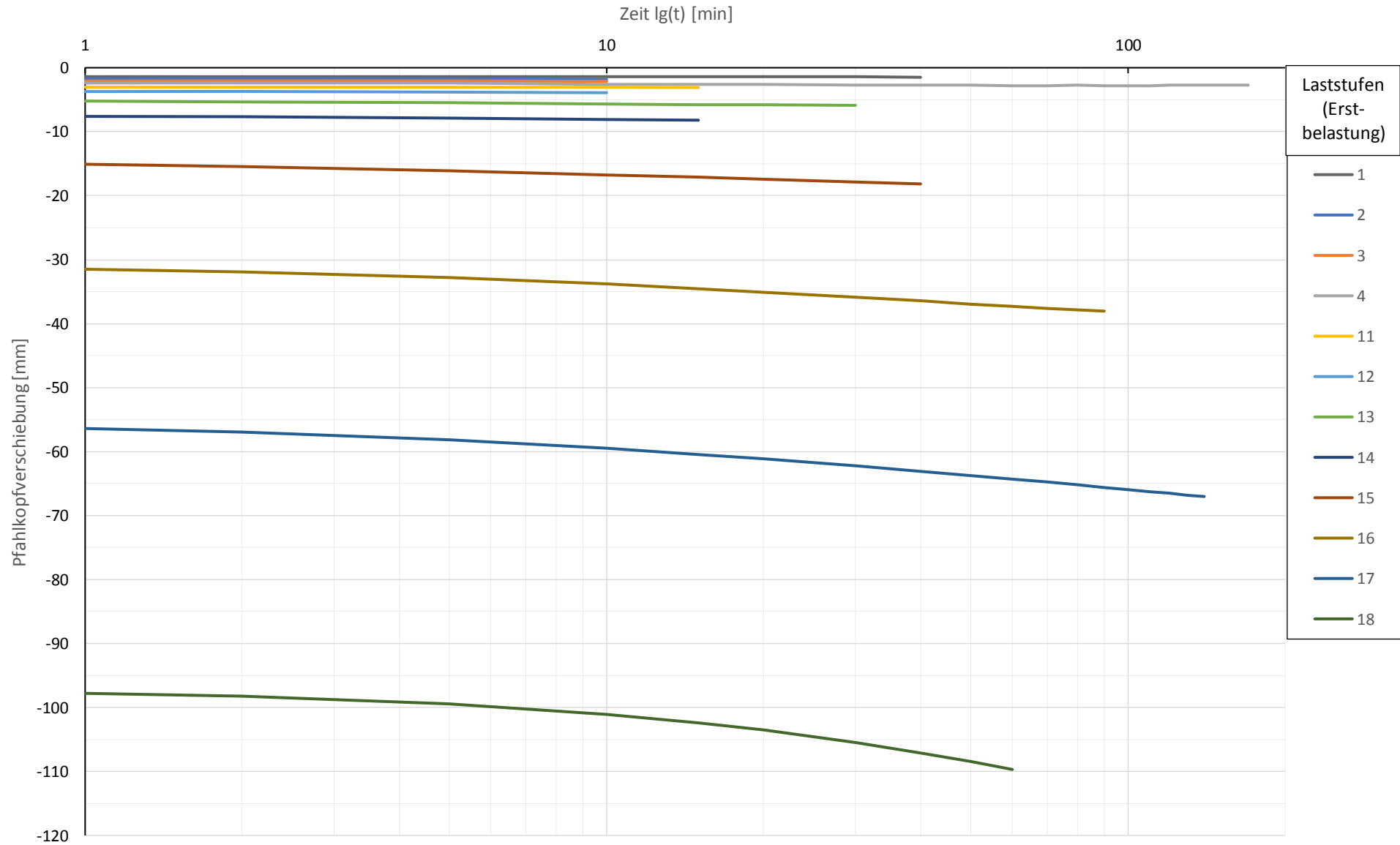
Phase 6



Prüfkörper: B.EM (Energie-Miozän)

Zeitverformung

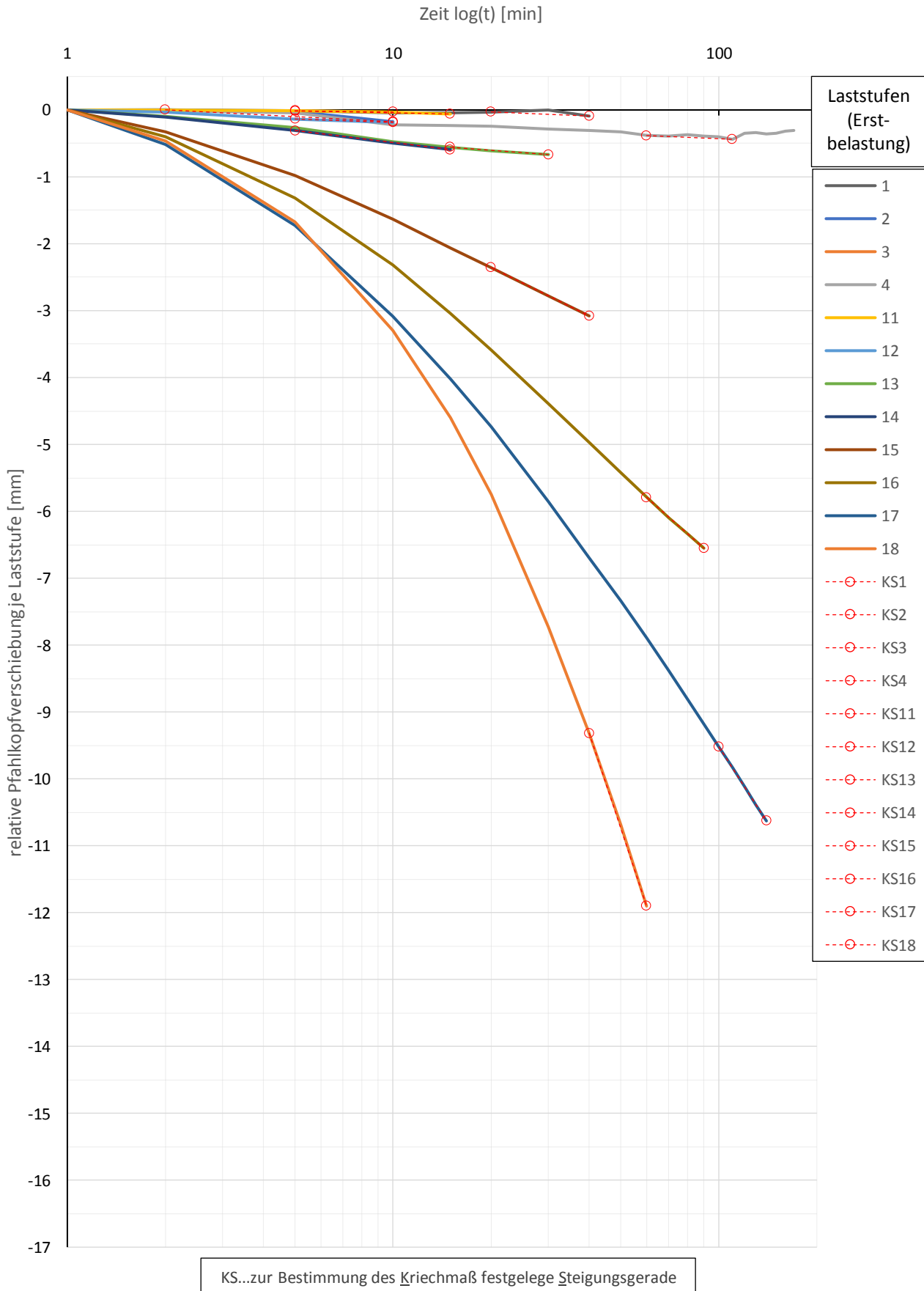
Phase 6



Prüfkörper: B.EM
(Energie-Miozän)

Zeitverformung

Phase 6

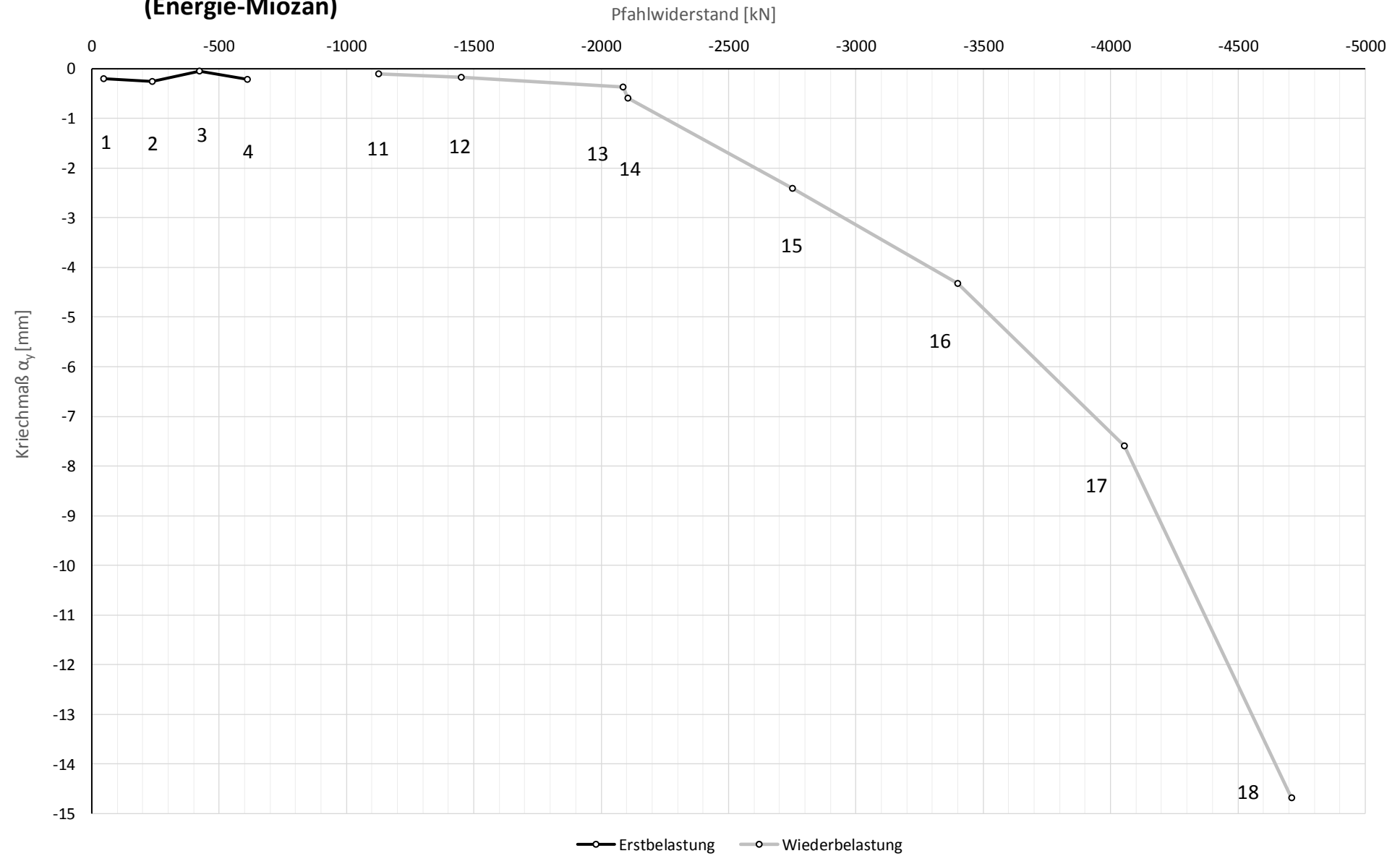


Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper: **B.EM**
(Energie-Miozän)

Widerstands-Kriechmaßlinie

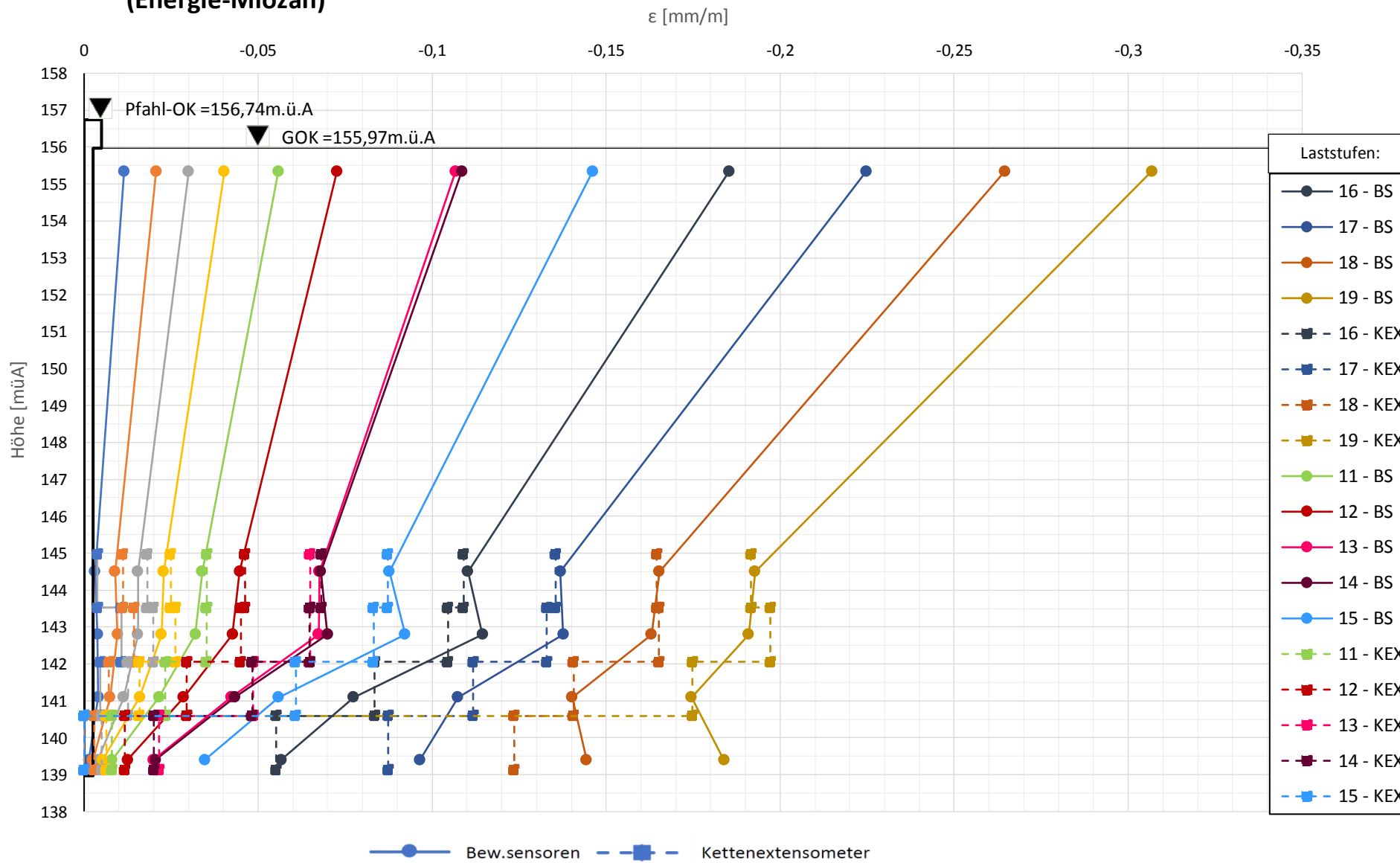
Phase 6



Prüfkörper: **B.EM**
(Energie-Miozän)

Verlauf der axialen Längenänderung je Laststufe

Phase 6



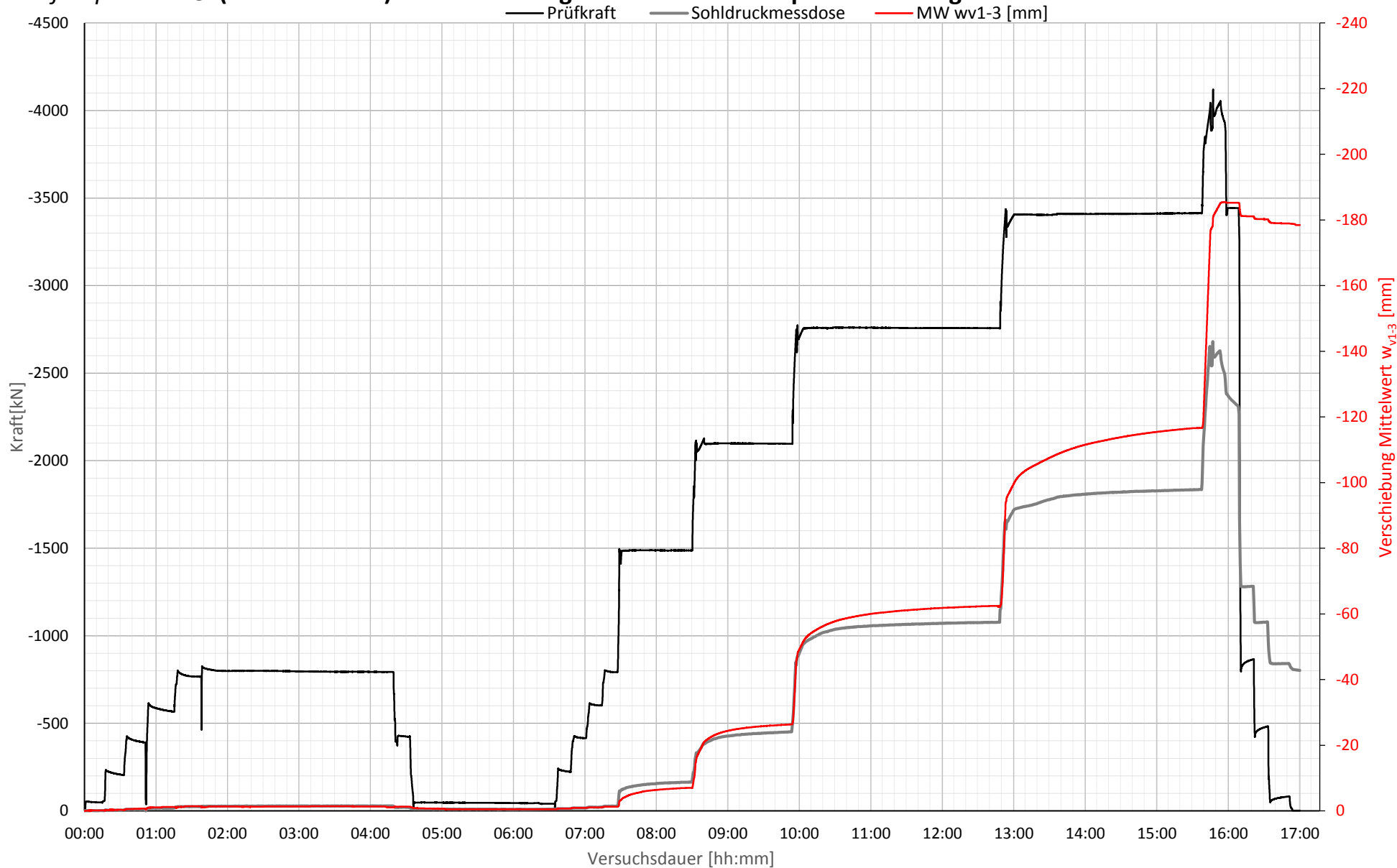
Ergebnisse B.M5

Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

AUSWERTUNG	
der statischen Pfahlprobebelastung gemäß EA-Pfähle	
<i>Status:</i>	in Bearbeitung
<i>Stand:</i>	25.10.2018
Allgemeine Angaben:	
Prüfkörper:	B.M5
Prüffeld:	1
Versuch:	Großbohrpfahl Druck
Bodenschicht Krafteinleitungsstrecke:	Miozän
Pfahlinstrumentierung (MWES II):	
Kettenextensometer:	ja
Bewehrungssensoren:	ja
Sohldruckmessdose:	ja
Versuchsdaten:	
Prüfung Nr.:	1
Prüfdatum:	13.06.2017
Versuchsbeginn:	06:55 Uhr
Versuchsende:	23:55 Uhr
Wetterbedingungen:	6.00: heiter, 20.5°C
besondere Versuchsbedingungen:	Neue Nullung aufgrund Umsetzen der Wegaufnehmer bei 1. Entlastung-LS 6
Geometrie Prüfkörper:	
Bohrdurchmesser:	900,00 mm
Querschnittsfläche $A_{ges} =$	636172,51 mm ²
OK Pfahlkopf (Messniveau GBP, DSV):	156,74 müA
Messniveau (Mikropfahl):	- müA
OK Pfahl bzw. GOK:	155,97 müA
OK Haftstrecke:	145,11 müA
UK Pfahl:	138,97 müA
Länge Freispielstrecke:	11,63 m
Länge Haftstrecke:	6,14 m
Pfahllänge:	17,00 m
Materialkennwerte:	
Betongüte:	C25/30 / BS-TB1
Zement:	-
W/B-Wert Zementsuspension:	-
E-Modul Beton / Zementstein $E_C =$	34,58 kN/mm ²
Typ, Güte Stabstahl (Mikropfahl):	-
Nennquerschnitt Stabstahl $A_{SS} =$	0,00 mm ²
E-Modul Stabstahl $E_{SS} =$	0,00 kN/mm ²
Güte Bewehrungsstahl:	B 550B
Gesamtquerschnitt Bewehrung $A_{BS} =$	10141,00 mm ²
E-Modul Bewehrungsstahl $E_{BS} =$	200,00 kN/mm ²
Güte Baustahl:	S235
Gesamtquerschnitt Stahl $A_S =$	13947,50 mm ²
E-Modul Baustahl $E_S =$	200,00 kN/mm ²

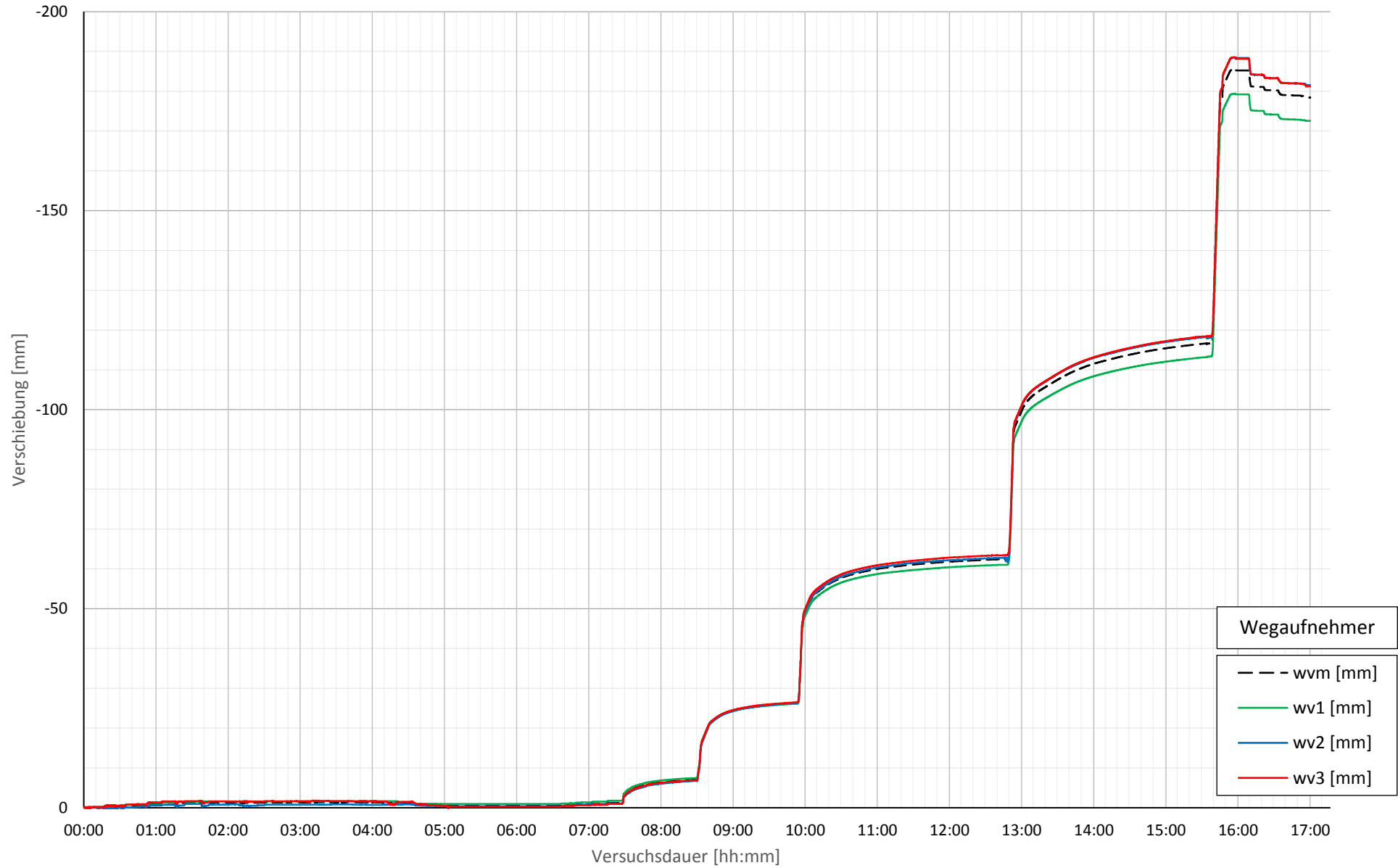
Prüfkörper: B.M5 (Miozän-Druck)

Belastungsstufen und Pfahlkopfverschiebung



Prüfkörper: B.M5 (Miozän-Druck)

Pfahlkopfverschiebung: Einzelwerte und Mittelwert



Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

Prüfkörper: B.M5 (Miozän - Druck)

Auswertung MWES I - Belastungsstufen und Verformungen																									
Laststufen			Prüflast und Verschiebung			Mittelwert der Vertikalverformung ab Beginn LS + Δt [min]															Berechnung Kriechmaß				
LS Nr	LS Beginn [hh:mm]	LS Ende [hh:mm]	P Soll [kN]	P Ist [kN]	w _{v,m 1-3} [mm]	Δt 1 min [min]	Δt 2 min [min]	Δt 5 min [min]	Δt 10 min [min]	Δt 15 min [min]	Δt 20 min [min]	Δt 50 min [min]	Δt 60 min [min]	Δt 70 min [min]	Δt 110 min [min]	Δt 120 min [min]	Δt 150 min [min]	Δt 160 min [min]	Δt 170 min [min]	Δt 1 [min]	Δt 2 [mm]	MW 1 [mm]	MW 2 [mm]	Kriechmaß [mm]	
0	06:55	07:10	-50	-48	-0,13																				
1	07:13	07:28	-238	-204	-0,29	-0,28	-0,28	-0,30	-0,31												5	10	-0,30	-0,31	-0,04
2	07:31	07:46	-425	-390	-0,69	-0,58	-0,57	-0,59	-0,66												5	10	-0,59	-0,66	-0,26
3	07:49	08:10	-613	-566	-1,18	-1,02	-1,02	-1,03	-1,04	-1,19	-1,19										10	20	-1,04	-1,19	-0,49
4	08:13	11:13	-800	-793	-1,08	-1,18	-1,20	-1,21	-1,38	-1,39	-1,33	-1,35	-1,21	-1,26	-1,33	-1,40	-1,35	-1,34	-1,32		60	120	-1,21	-1,40	-0,65
5	11:18	11:28	-425	-427	-1,29	-1,26	-1,26	-1,25																	
6	11:31	13:29	-50	-40	-0,51	-0,82	-0,82	-0,79	-0,69	-0,70	-0,67	-0,52	-0,52	-0,52	-0,52										
7	13:33	13:43	-238	-223	-0,73	-0,68	-0,68	-0,70													2	5	-0,68	-0,70	-0,05
8	13:46	13:56	-425	-415	-0,92	-0,92	-0,92	-0,92													2	5	-0,92	-0,92	0,00
9	13:59	14:09	-613	-602	-1,08	-1,07	-1,07	-1,07													2	5	-1,07	-1,07	-0,01
10	14:12	14:22	-800	-792	-1,26	-1,26	-1,26	-1,26													2	5	-1,26	-1,26	0,00
11	14:25	15:25	-1450	-1488	-7,04	-3,60	-3,88	-4,45	-5,13	-5,55	-5,97	-6,90								20	50	-5,97	-6,90	-2,34	
12	15:28	16:48	-2100	-2097	-26,33	-16,49	-17,25	-19,47	-21,83	-22,93	-23,68	-25,61	-25,90	-26,13						30	70	-24,62	-26,13	-4,12	
13	16:58	19:43	-2750	-2756	-62,44	-52,00	-52,52	-53,62	-54,88	-55,91	-56,79	-59,60	-60,15	-60,52	-61,68	-61,87	-62,32	-62,40		60	160	-60,15	-62,40	-5,28	
14	19:55	22:32	-3400	-3414	-116,66	-100,35	-100,92	-102,23	-103,71	-104,79	-105,73	-110,46	-111,53	-112,37	-114,97	-115,43	-116,55			50	150	-110,46	-116,55	-12,76	
15	22:41	22:42	-4050	-4022	-180,74																				
19	22:53	23:03	-3400	-3443	-185,24	-185,24	-185,24	-185,23																	
20	23:06	23:16	-800	-865	-181,09	-181,19	-181,16	-181,13																	
21	23:18	23:28	-425	-482	-180,21	-180,28	-180,27	-180,24																	
22	23:28	23:45	-50	-81	-178,93	-179,70	-179,28	-179,04	-178,98	-178,94															

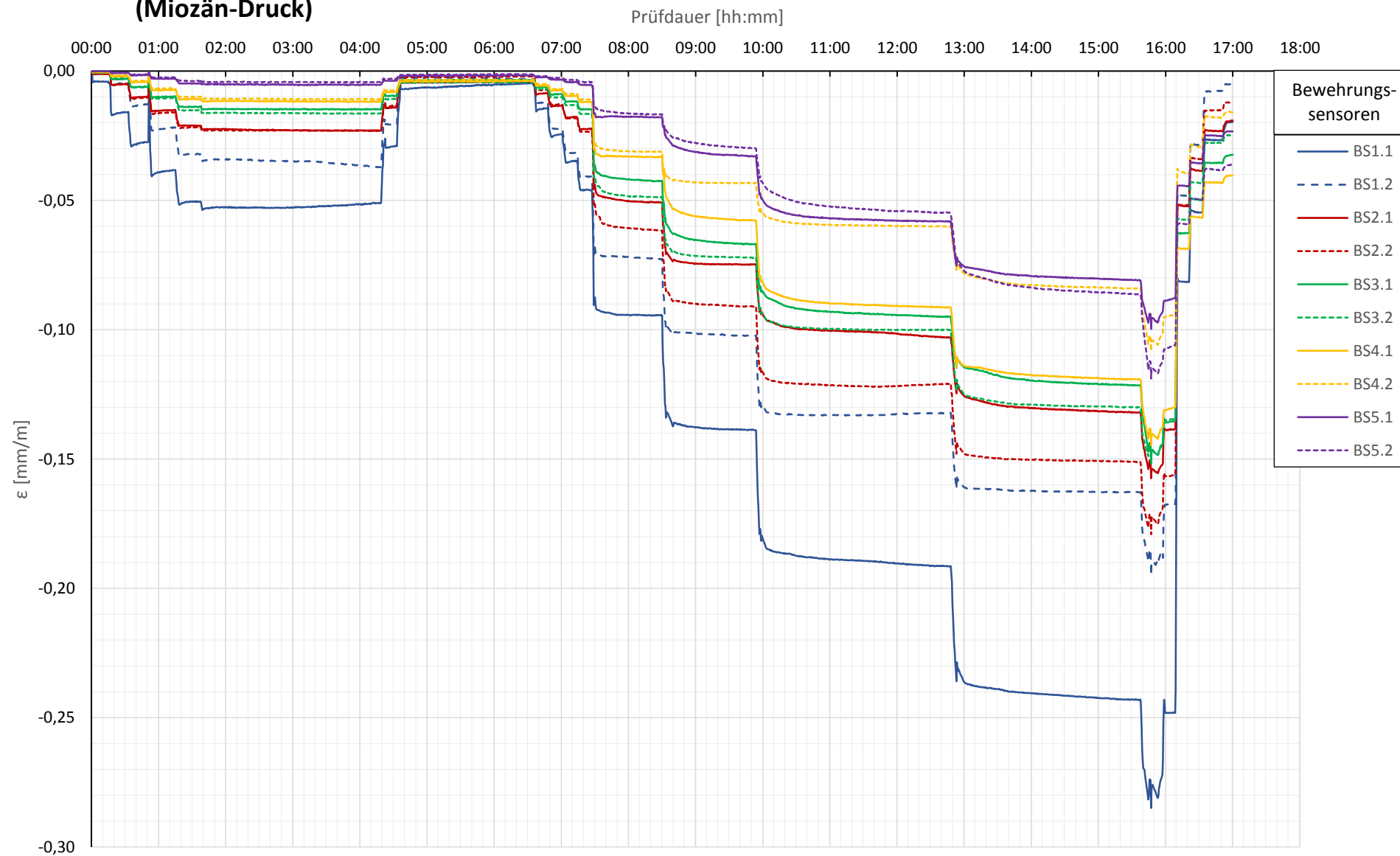
Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

Prüfkörper: B.M5 (Miozän - Druck)

Auswertung Verformungen MWES II - Bewehrungssensoren																	Pfahlwiderstand DMD				
Laststufen			Messwerte je Laststufe und Höhenlage der BS										Rechenwerte je Messquerschnitt					Sohldruckmessdose SMD			
LS	LS Ende	P Ist	BS1.1	BS1.2	BS2.1	BS2.2	BS3.1	BS3.2	BS4.1	BS4.2	BS5.1	BS5.2	BS1.MW	BS2.MW	BS3.MW	BS4.MW	BS5.MW	Rb	Rs	Q _{s,m}	
Nr.	[hh:mm]	[kN]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[kN]	[kN]	[kN/m ²]	
			Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Mantelreib. Diff		
			155,53	144,78	144,78	144,78	142,88	142,88	141,33	141,33	139,58	139,58	155,53	144,78	142,88	141,33	139,58	139,10	Kraft-Rb		
0	07:10	-48																			
1	07:28	-204	-0,0158	-0,0045	-0,0101	-0,0050	-0,0048	-0,0049	-0,0029	-0,0028	-0,0028	-0,0019	-0,0101	-0,0049	-0,0028	-0,0017	-0,0006	-3,4	-200,6	-11,6	
2	07:46	-390	-0,0275	-0,0127	-0,0201	-0,0099	-0,0102	-0,0100	-0,0060	-0,0061	-0,0060	-0,0040	-0,0201	-0,0100	-0,0060	-0,0039	-0,0015	-8,3	-381,3	-22,0	
3	08:10	-566	-0,0383	-0,0219	-0,0301	-0,0151	-0,0160	-0,0156	-0,0098	-0,0104	-0,0101	-0,0073	-0,0301	-0,0156	-0,0101	-0,0070	-0,0027	-16,0	-550,2	-31,7	
4	11:13	-793	-0,0512	-0,0372	-0,0442	-0,0230	-0,0230	-0,0230	-0,0148	-0,0164	-0,0156	-0,0118	-0,0442	-0,0230	-0,0156	-0,0113	-0,0048	-28,6	-764,9	-44,1	
5	11:28	-427	-0,0291	-0,0207	-0,0249	-0,0141	-0,0134	-0,0137	-0,0096	-0,0107	-0,0102	-0,0081	-0,0249	-0,0137	-0,0102	-0,0078	-0,0033	-19,0	-407,6	-23,5	
6	13:29	-40	-0,0044	-0,0030	-0,0037	-0,0041	-0,0021	-0,0031	-0,0034	-0,0043	-0,0038	-0,0039	-0,0037	-0,0031	-0,0038	-0,0036	-0,0015	-9,4	-31,0	-1,8	
7	13:43	-223	-0,0141	-0,0122	-0,0131	-0,0086	-0,0073	-0,0080	-0,0061	-0,0070	-0,0066	-0,0055	-0,0131	-0,0080	-0,0066	-0,0053	-0,0022	-12,2	-210,5	-12,1	
8	13:56	-415	-0,0244	-0,0225	-0,0234	-0,0133	-0,0131	-0,0132	-0,0091	-0,0103	-0,0097	-0,0075	-0,0234	-0,0132	-0,0097	-0,0072	-0,0031	-16,2	-398,3	-22,9	
9	14:09	-602	-0,0347	-0,0317	-0,0332	-0,0178	-0,0182	-0,0180	-0,0118	-0,0130	-0,0124	-0,0096	-0,0332	-0,0180	-0,0124	-0,0093	-0,0038	-20,9	-581,0	-33,5	
10	14:22	-792	-0,0461	-0,0408	-0,0435	-0,0223	-0,0235	-0,0229	-0,0146	-0,0167	-0,0157	-0,0119	-0,0435	-0,0229	-0,0157	-0,0115	-0,0048	-27,6	-764,2	-44,0	
11	15:25	-1488	-0,0944	-0,0727	-0,0835	-0,0508	-0,0618	-0,0563	-0,0424	-0,0488	-0,0456	-0,0332	-0,0835	-0,0563	-0,0456	-0,0322	-0,0173	-163,8	-1324,7	-76,3	
12	16:48	-2097	-0,1389	-0,1023	-0,1206	-0,0747	-0,0912	-0,0830	-0,0670	-0,0722	-0,0696	-0,0577	-0,1206	-0,0830	-0,0696	-0,0506	-0,0314	-451,3	-1645,4	-94,8	
13	19:43	-2756	-0,1914	-0,1321	-0,1618	-0,1030	-0,1208	-0,1119	-0,0949	-0,1001	-0,0975	-0,0914	-0,1618	-0,1119	-0,0975	-0,0757	-0,0565	-1076,2	-1679,5	-96,7	
14	22:32	-3414	-0,2432	-0,1629	-0,2030	-0,1320	-0,1510	-0,1415	-0,1215	-0,1300	-0,1257	-0,1192	-0,2030	-0,1415	-0,1257	-0,1016	-0,0836	-1835,1	-1578,4	-90,9	
15	22:42	-4022	-0,2849	-0,1950	-0,2400	-0,1575	-0,1791	-0,1683	-0,1509	-0,1517	-0,1513	-0,1447	-0,2400	-0,1683	-0,1513	-0,1264	-0,1093	-2679,9	-1342,2	-77,3	
19	23:03	-3443	-0,2481	-0,1673	-0,2077	-0,1386	-0,1563	-0,1475	-0,1354	-0,1344	-0,1349	-0,1301	-0,2077	-0,1475	-0,1349	-0,1121	-0,0969	-2314,1	-1129,1	-65,0	
20	23:16	-865	-0,0815	-0,0483	-0,0649	-0,0522	-0,0519	-0,0521	-0,0628	-0,0573	-0,0600	-0,0689	-0,0649	-0,0521	-0,0600	-0,0542	-0,0519	-1282,5	417,2	24,0	
21	23:28	-482	-0,0547	-0,0289	-0,0418	-0,0387	-0,0342	-0,0365	-0,0498	-0,0433	-0,0466	-0,0567	-0,0418	-0,0365	-0,0466	-0,0431	-0,0428	-1079,1	596,8	34,4	
22	23:45	-81	-0,0267	-0,0077	-0,0172	-0,0233	-0,0152	-0,0192	-0,0355	-0,0277	-0,0316	-0,0431	-0,0172	-0,0192	-0,0316	-0,0306	-0,0317	-841,8	760,3	43,8	

Prüfkörper: B.M5
(Miozän-Druck)

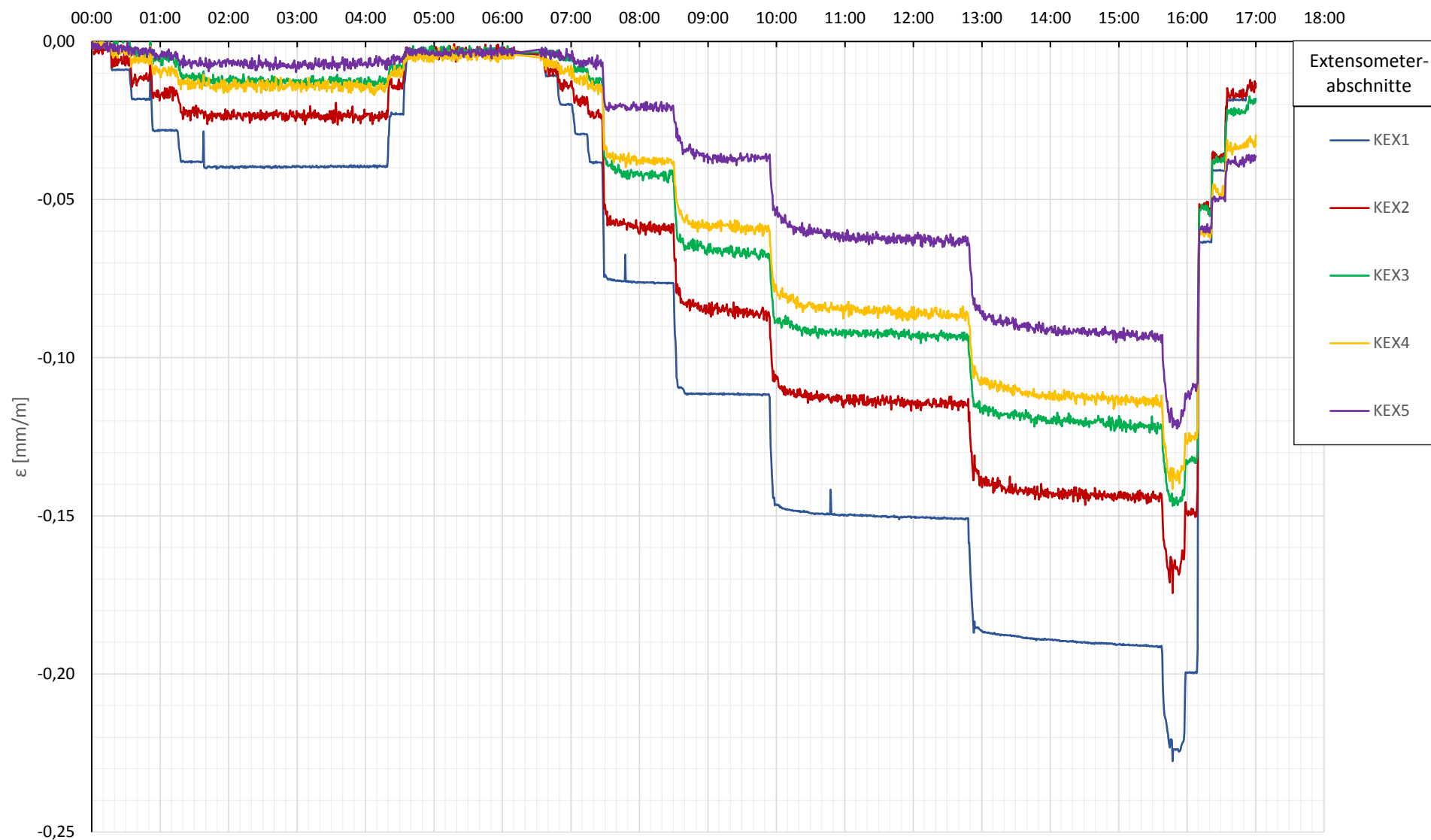
Bewehrungssensoren



Prüfkörper: B.M5
(Miozän-Druck)

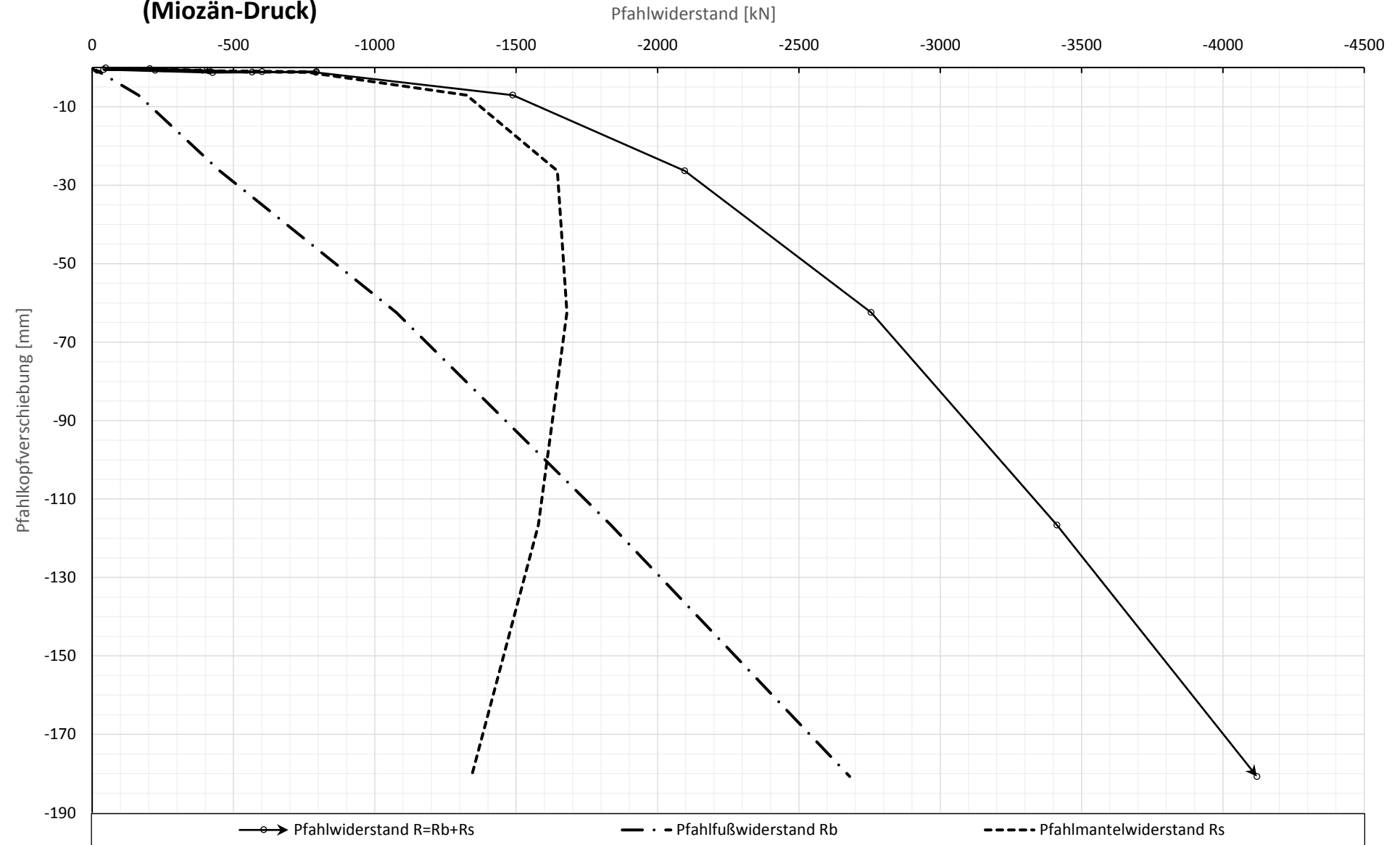
Kettenextensometer

Prüfdauer [hh:mm]



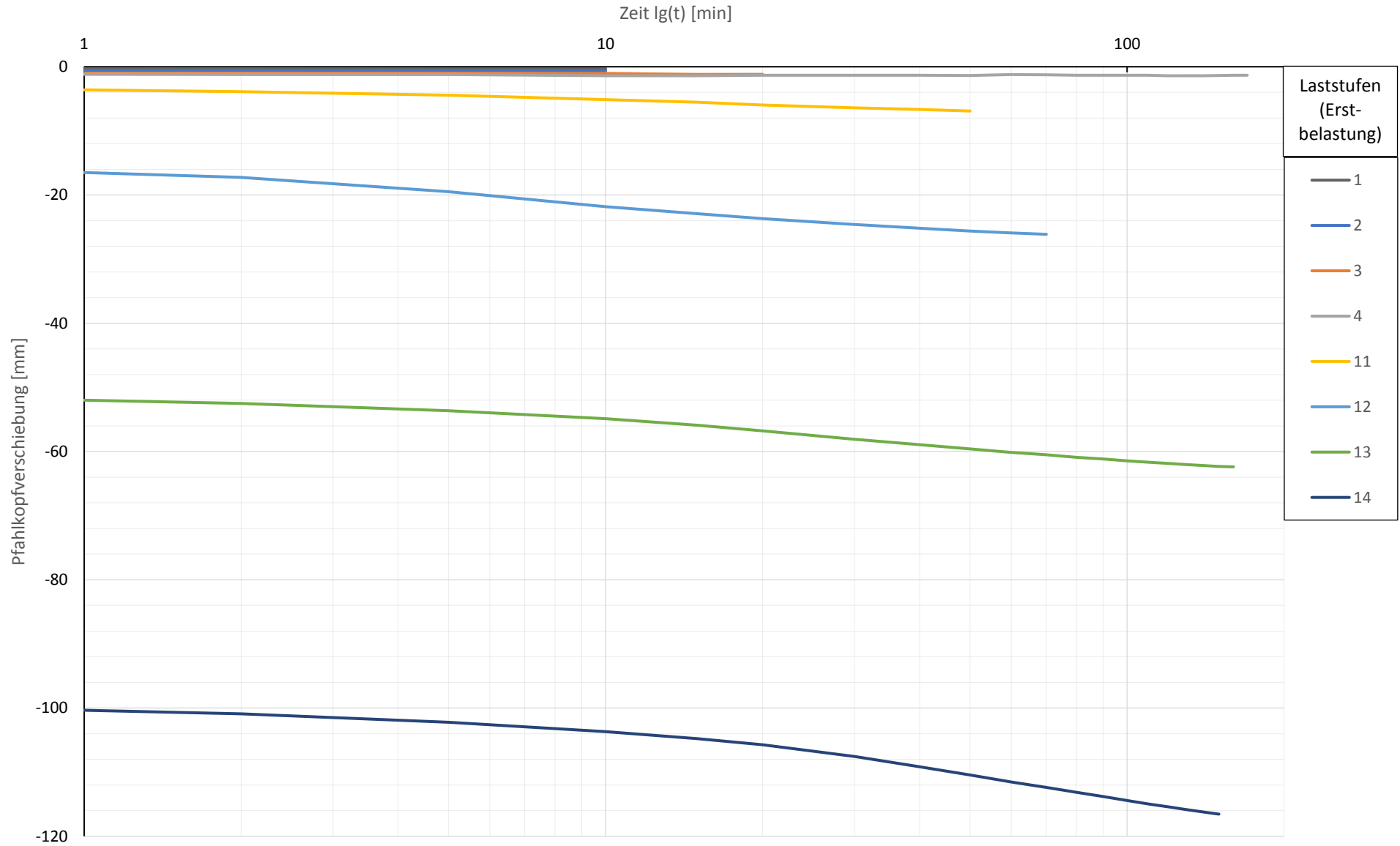
Prüfkörper: B.M5
(Miozän-Druck)

Widerstands-Setzungslinie

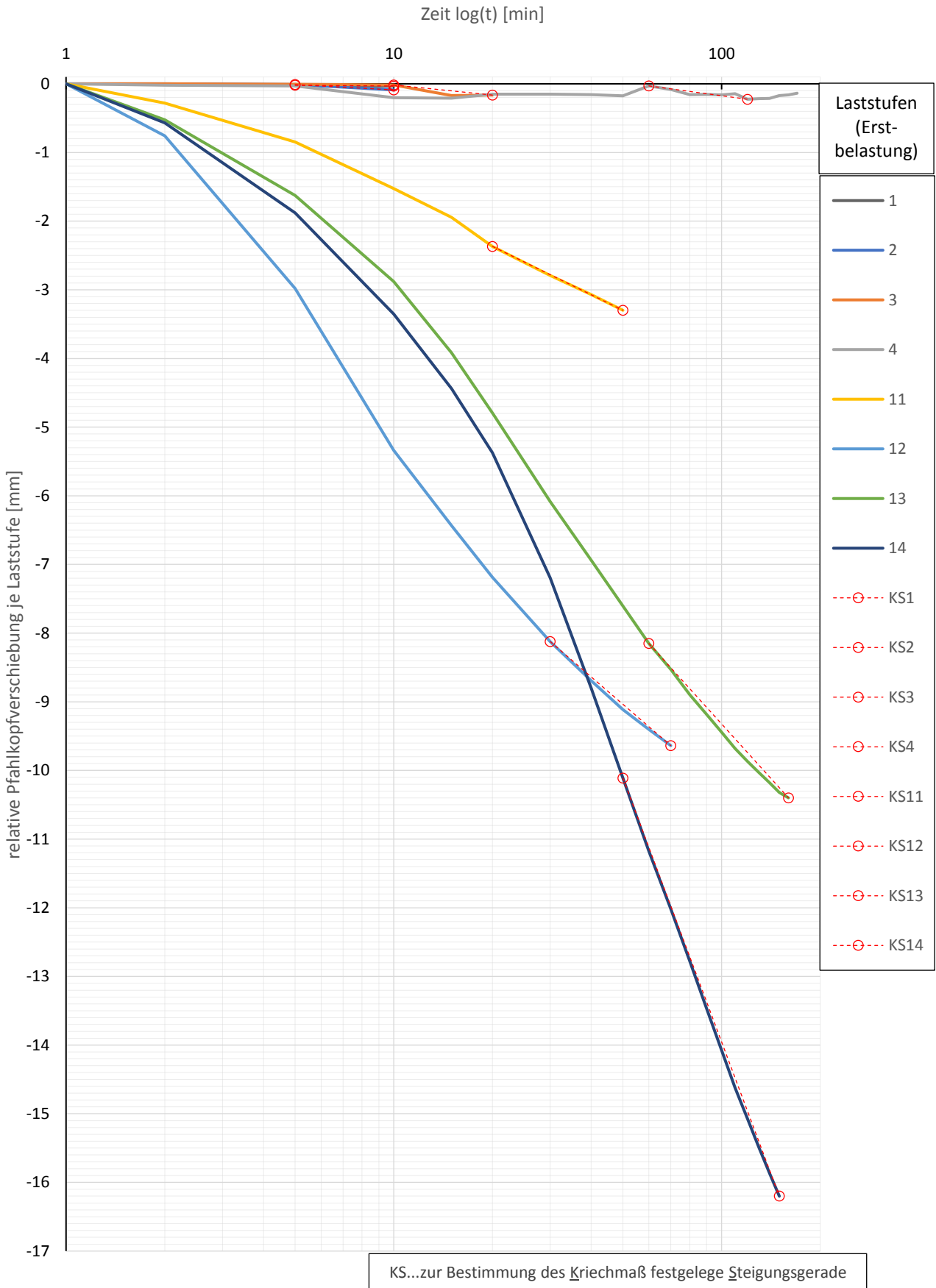


Prüfkörper: B.M5 (Miozän-Druck)

Zeitverformung



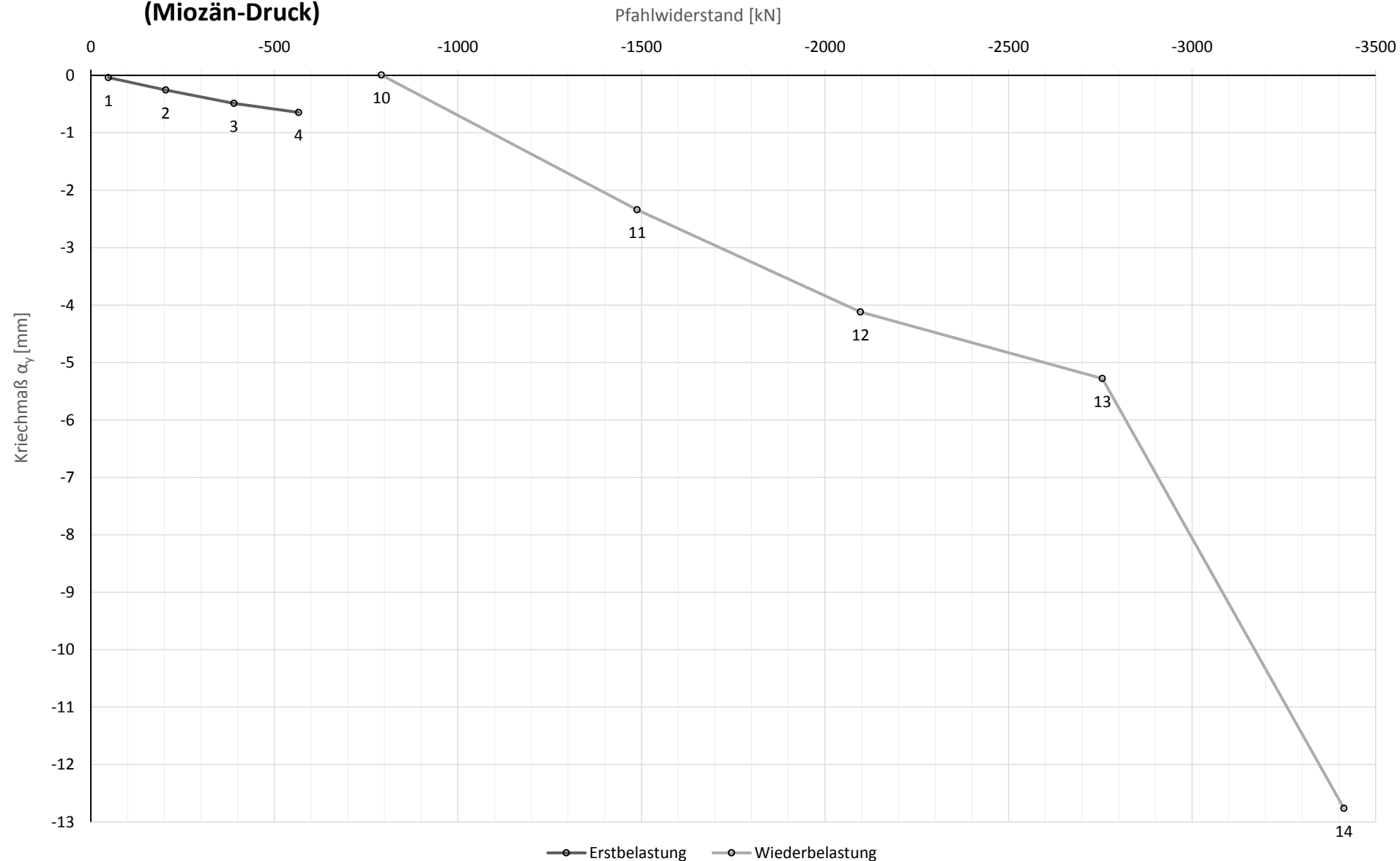
Prüfkörper: B.M5
(Miozän-Druck) Zeitverformung



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper: **B.M5**
(Miozän-Druck)

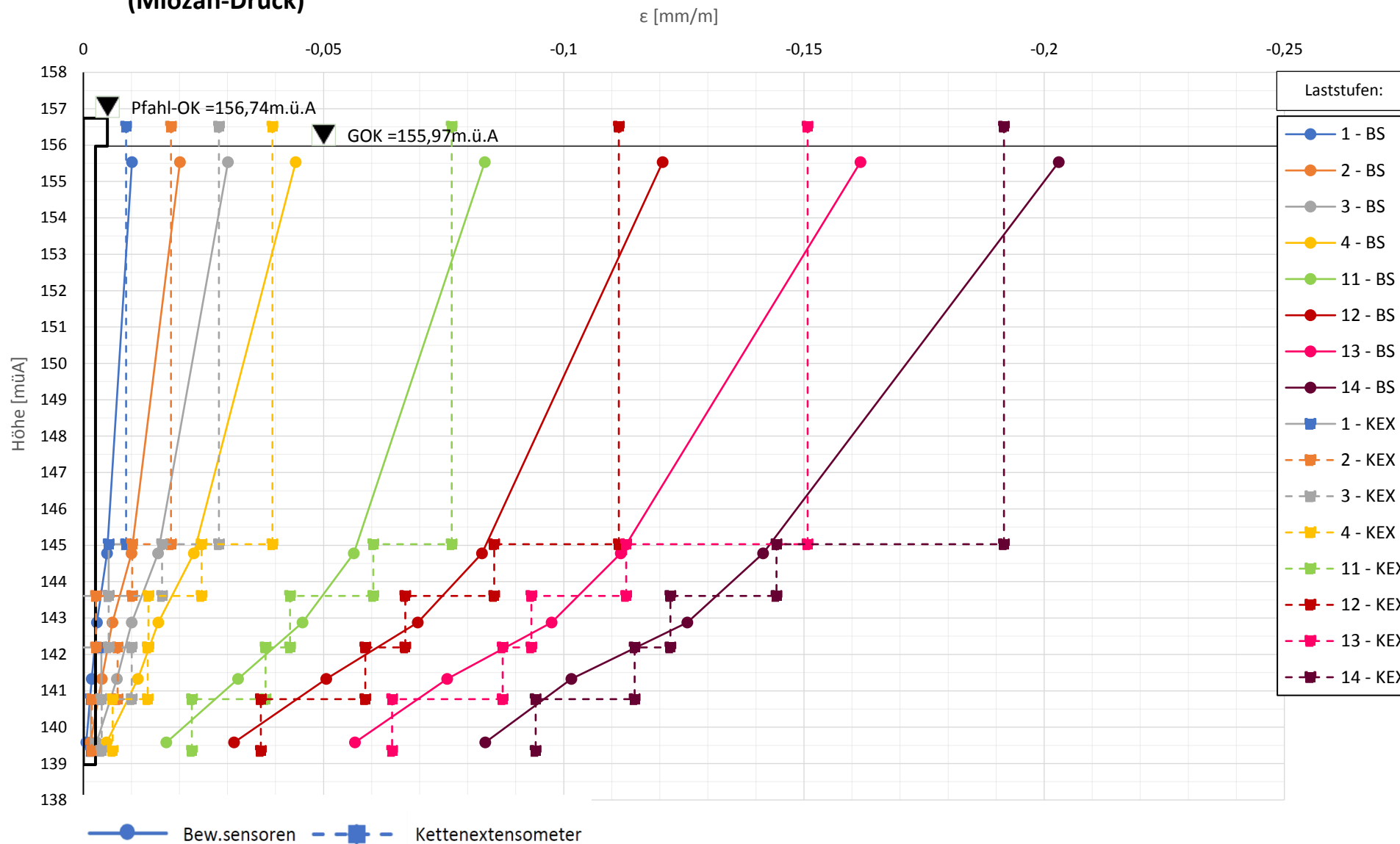
Widerstands-Kriechmaßlinie



Prüfkörper: B.M5

Verlauf der axialen Längenänderung je Laststufe

(Miozän-Druck)



ANHANG F

Ergebnisse Phase 0-5 B.EK

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

A U S W E R T U N G

der statischen Pfahlprobebelastung gemäß EA-Pfähle

Status: in Bearbeitung Stand: 25.10.2018

Allgemeine Angaben:

Prüfkörper:	B.EK
Prüffeld:	2
Versuch:	Großbohrpfahl Druck
Bodenschicht Kräfteeinleitungsstrecke:	0

Pfahlinstrumentierung (MWES II):

Kettenextensometer:	ja
Bewehrungssensoren:	ja
Sohldruckmessdose:	nein

Versuchsdaten:

Prüfung Nr.:	94
Prüfdatum:	31.07.2018-01.10.2018
Versuchsbeginn Uhrzeit:	08:38 Uhr
Versuchsbeginn Datum:	31.07.2018
Versuchsende Uhrzeit:	20:47 Uhr
Versuchsende Datum:	01.10.2018

Geometrie Prüfkörper:

Bohrdurchmesser:	600,00 mm
Querschnittsfläche $A_{ges} =$	282743,34 mm ²
OK Pfahlkopf (Messniveau GBP, DSV):	156,8 müA
Messniveau (Mikropfahl):	0,00 müA
OK Pfahl bzw. GOK:	156,00 müA
OK Haftstrecke:	154,14 müA
UK Pfahl:	150,00 müA
Länge Freispielstrecke:	2,66 m
Länge Haftstrecke:	4,14 m
Pfahllänge:	6,00 m

Materialkennwerte:

Betongüte:	C25/30 / BS-TB1	
Zement:	-	
W/B-Wert Zementsuspension:	-	
E-Modul Beton / Zementstein $E_C =$	23,41	kN/mm ²
Typ, Güte Stabstahl (Mikropfahl):	-	
Nennquerschnitt Stabstahl $A_{SS} =$	0,00	mm ²
E-Modul Stabstahl $E_{SS} =$	0,00	kN/mm ²
Güte Bewehrungsstahl:	B 550B	
Gesamtquerschnitt Bewehrung $A_{BS} =$	variiert	mm ²
E-Modul Bewehrungsstahl $E_{BS} =$	200,00	kN/mm ²
Güte Baustahl:	S235	
Gesamtquerschnitt Stahl $A_S =$	8920,27	mm ²
E-Modul Baustahl $E_S =$	200,00	kN/mm ²

Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

Rohdaten															
	BS1.1	BS1.2	BS2.1	BS2.2	BS3.1	BS3.2	BS4.1	BS4.2	BS5.1	BS5.2	KEX1	KEX2	KEX3	KEX4	KEX5
	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]	[dg]
P0-0	7228,6	6849,9	7059,4	7349,4	6977,8	6856,3	7276,0	6957,1	7197,7	7323,1	6081,6	6016,1	6051,3	6106,3	6038,7
P0-600	6765,6	6766,9	6861,6	7294,2	6798,9	6811,5	7165,7	6900,9	7149,6	7287,7	6042,4	6004,1	6043,5	6100,6	6035,9
P1_EH-600 mit P0-600	6712,3	6745,2	6776,0	7237,0	6693,1	6765,1	7079,0	6851,5	7099,5	7186,0	6070,8	5981,8	6015,8	6069,7	6003,0
P2_AK-600 mit P0-600	6753,1	6752,2	6781,8	7226,5	6700,7	6766,9	7096,0	6859,1	7087,6	7222,2	6067,9	5980,8	6014,2	6067,9	6001,6
P2_EK-600 mit P2_AK-600	6737,8	6674,9	6834,8	7239,2	6778,1	6770,6	7151,3	6851,8	7127,1	7291,7	6024,3	6022,9	6063,1	6119,0	6051,2
P2_EK-600 mit P0-600	6737,8	6674,9	6834,8	7239,2	6778,1	6770,6	7151,3	6851,8	7127,1	7291,7	6024,3	6022,9	6063,1	6119,0	6051,2
P0-800	6662,7	6707,5	6820,3	7261,3	6762,7	6781,4	7137,6	6874,0	7133,5	7272,4	6034,1	6002,5	6042,2	6099,9	6034,9
P3_AH-800 mit P0-800	6591,5	6642,1	6769,9	7217,0	6719,8	6735,8	7103,2	6811,2	7103,9	7254,8	6012,5	6019,5	6060,3	6117,4	6050,5
P3_EH-800 mit P3_AH-800	6577,7	6707,8	6701,2	7205,2	6635,1	6724,6	7041,5	6809,8	7083,1	7170,1	6061,4	5979,2	6012,2	6066,2	6001,3
P4_AK-800 mit P0-800	6577,7	6707,8	6701,2	7205,2	6635,1	6724,6	7041,5	6809,8	7083,1	7170,1	6061,4	5979,2	6012,2	6066,2	6001,3
P4_EK-800 mit P4_AK-800	6564,4	6610,2	6754,3	7203,9	6705,0	6720,6	7090,2	6795,3	7111,8	7230,5	6014,5	6020,1	38083,1	6116,3	6050,5

	BS1.1T	BS1.2T	BS2.1T	BS2.2T	BS3.1T	BS3.2T	BS4.1T	BS4.2T	BS5.1T	BS5.2T	KEX1T	KEX2T	KEX3T	KEX4T	KEX5T
	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]	[°C]
P0-0	22,2	22,3	16,8	16,8	15,7	15,8	14,7	15,1	14,6	14,6	26,7	17,4	16,0	15,2	14,6
P0-600	22,1	22,4	16,9	17,0	15,6	15,9	14,6	15,1	14,5	14,6	26,3	17,4	16,0	15,2	14,6
P1_EH-600 mit P0-600	30,3	27,3	30,2	29,5	30,5	30,3	29,8	29,5	28,0	29,3	24,8	8,1	30,3	22,8	29,1
P2_AK-600 mit P0-600	27,0	27,2	28,7	28,6	28,5	28,4	27,6	27,5	27,0	25,3	24,6	21,5	30,1	-2,0	28,9
P2_EK-600 mit P2_AK-600	7,4	11,6	6,7	7,6	5,7	6,1	5,3	6,1	6,7	5,9	17,5	6,4	6,1	4,3	5,9
P2_EK-600 mit P0-600	7,4	11,6	6,7	7,6	5,7	6,1	5,3	6,1	6,7	5,9	17,5	6,4	6,1	4,3	5,9
P0-800	22,1	22,3	16,9	16,9	15,7	15,9	14,7	15,0	14,6	14,7	26,5	17,4	16,0	15,2	14,6
P3_AH-800 mit P0-800	8,4	11,7	7,2	7,7	6,2	6,6	5,8	6,7	6,9	6,8	17,6	6,5	6,1	1,2	5,9
P3_EH-800 mit P3_AH-800	28,7	24,8	29,7	28,9	30,1	30,1	29,7	29,4	27,9	29,0	20,5	28,8	29,9	28,5	28,9
P4_AK-800 mit P0-800	28,7	24,8	29,7	28,9	30,1	30,1	29,7	29,4	27,9	29,0	20,5	28,8	29,9	28,5	28,9
P4_EK-800 mit P4_AK-800	9,1	10,0	7,5	7,7	6,9	7,3	6,7	7,6	7,3	8,9	14,6	7,4	5,9	4,8	5,9

Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

Formeln		Umrechnungen der dg-Werte														
BSP.:	$\Delta TR1 = TR1 - T0$	ϵM BS1.1	$\epsilon T-OBS$ BS1.1	ϵOBS BS1.1	$\Delta T-1.1$	$\epsilon T-Free,1-1$	ϵM BS1.2	$\epsilon T-OBS$ BS1.2	ϵOBS BS1.2	$\Delta T-1.2$	$\epsilon T-Free,1-2$	ϵM BS2.1	$\epsilon T-OBS$ BS2.1	ϵOBS BS2.1	$\Delta T-2.1$	$\epsilon T-Free,2-1$
BSP.:	$\epsilon T-Free = \Delta T * \alpha C$	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]
R0	$\epsilon M - T0 = (R0 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	0,0000		0,0000			0,0000		0,0000			0,0000		0,0000		
R1	$\epsilon M - R1 = (RR1 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	-0,1604		-0,1614			-0,0289		-0,0279			-0,0688		-0,0678		
T1	$\epsilon T - Obs = (RT1 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		0,0816	-0,0798	8,2000	0,0820		0,0522	0,0243	4,9000	0,0490		0,1324	0,0645	13,3000	0,1330
T2	$\epsilon T - Obs = (RT2 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		0,0555	-0,1060	4,9000	0,0490		0,0534	0,0255	4,8000	0,0480		0,1161	0,0483	11,8000	0,1180
T3	$\epsilon T - Obs = (RT3 - RT2) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,2444	-0,3504	-19,6000	-0,1960		-0,2174	-0,1920	-15,6000	-0,1560		-0,2499	-0,2016	-22,0000	-0,2200
T4	$\epsilon T - Obs = (RT4 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,1890	-0,3504	-14,7000	-0,1470		-0,1641	-0,1920	-10,8000	-0,1080		-0,1338	-0,2016	-10,2000	-0,1020
R2	$\epsilon M - R2 = (RR2 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	-0,1960		-0,1970			-0,0500		-0,0500			-0,0832		-0,0822		
T5	$\epsilon T - Obs = (RT5 - RR2) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,1918	-0,3888	-13,7000	-0,1370		-0,1523	-0,2023	-10,6000	-0,1060		-0,1359	-0,2182	-9,7000	-0,0970
T6	$\epsilon T - Obs = (RT6 - RT5) * C + \Delta T * \alpha S$		0,2429	-0,1459	20,3000	0,2030		0,1829	-0,0194	13,1000	0,1310		0,2505	0,0324	22,5000	0,2250
T7	$\epsilon T - Obs = (RT7 - RR2) * C + \Delta T * \alpha S$		0,0511	-0,1459	6,6000	0,0660		0,0306	-0,0194	2,5000	0,0250		0,1146	0,0324	12,8000	0,1280
T8	$\epsilon T - Obs = (RT8 - RT7) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,2437	-0,3896	-19,6000	-0,1960		-0,2148	-0,2342	-14,8000	-0,1480		-0,2523	-0,2200	-22,2000	-0,2220

Formeln		Umrechnungen der dg-Werte														
BSP.:	$\Delta TR1 = TR1 - T0$	ϵM BS2.2	$\epsilon T-OBS$ BS2.2	ϵOBS BS2.2	$\Delta T-2.2$	$\epsilon T-Free,2-2$	ϵM BS3.1	$\epsilon T-OBS$ BS3.1	ϵOBS BS3.1	$\Delta T-3.1$	$\epsilon T-Free,3-1$	ϵM BS3.2	$\epsilon T-OBS$ BS3.2	ϵOBS BS3.2	$\Delta T-3.2$	$\epsilon T-Free,3-2$
BSP.:	$\epsilon T-Free = \Delta T * \alpha C$	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]
R0	$\epsilon M - T0 = (R0 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	0,0000		0,0000			0,0000		0,0000			0,0000		0,0000		
R1	$\epsilon M - R1 = (RR1 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	-0,0189		-0,0169			-0,0627		-0,0637			-0,0154		-0,0144		
T1	$\epsilon T - Obs = (RT1 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1325	0,1156	12,5000	0,1250		0,1449	0,0812	14,9000	0,1490		0,1595	0,1451	14,4000	0,1440
T2	$\epsilon T - Obs = (RT2 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1178	0,1010	11,6000	0,1160		0,1231	0,0595	12,9000	0,1290		0,1370	0,1225	12,5000	0,1250
T3	$\epsilon T - Obs = (RT3 - RT2) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,2518	-0,1508	-21,0000	-0,2100		-0,2512	-0,1917	-22,8000	-0,2280		-0,2708	-0,1483	-22,3000	-0,2230
T4	$\epsilon T - Obs = (RT4 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,1339	-0,1508	-9,4000	-0,0940		-0,1280	-0,1917	-9,9000	-0,0990		-0,1338	-0,1483	-9,8000	-0,0980
R2	$\epsilon M - R2 = (RR2 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	-0,0306		-0,0296			-0,0750		-0,0750			-0,0259		-0,0249		
T5	$\epsilon T - Obs = (RT5 - RR2) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,1278	-0,1574	-9,2000	-0,0920		-0,1309	-0,2059	-9,5000	-0,0950		-0,1293	-0,1543	-9,3000	-0,0930
T6	$\epsilon T - Obs = (RT6 - RT5) * C + \Delta T * \alpha S$		0,2545	0,0972	21,2000	0,2120		0,2620	0,0561	23,9000	0,2390		0,2828	0,1285	23,5000	0,2350
T7	$\epsilon T - Obs = (RT7 - RR2) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1268	0,0972	12,0000	0,1200		0,1311	0,0561	14,4000	0,1440		0,1534	0,1285	14,2000	0,1420
T8	$\epsilon T - Obs = (RT8 - RT7) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,2591	-0,1620	-21,2000	-0,2120		-0,2587	-0,2026	-23,2000	-0,2320		-0,2796	-0,1511	-22,8000	-0,2280

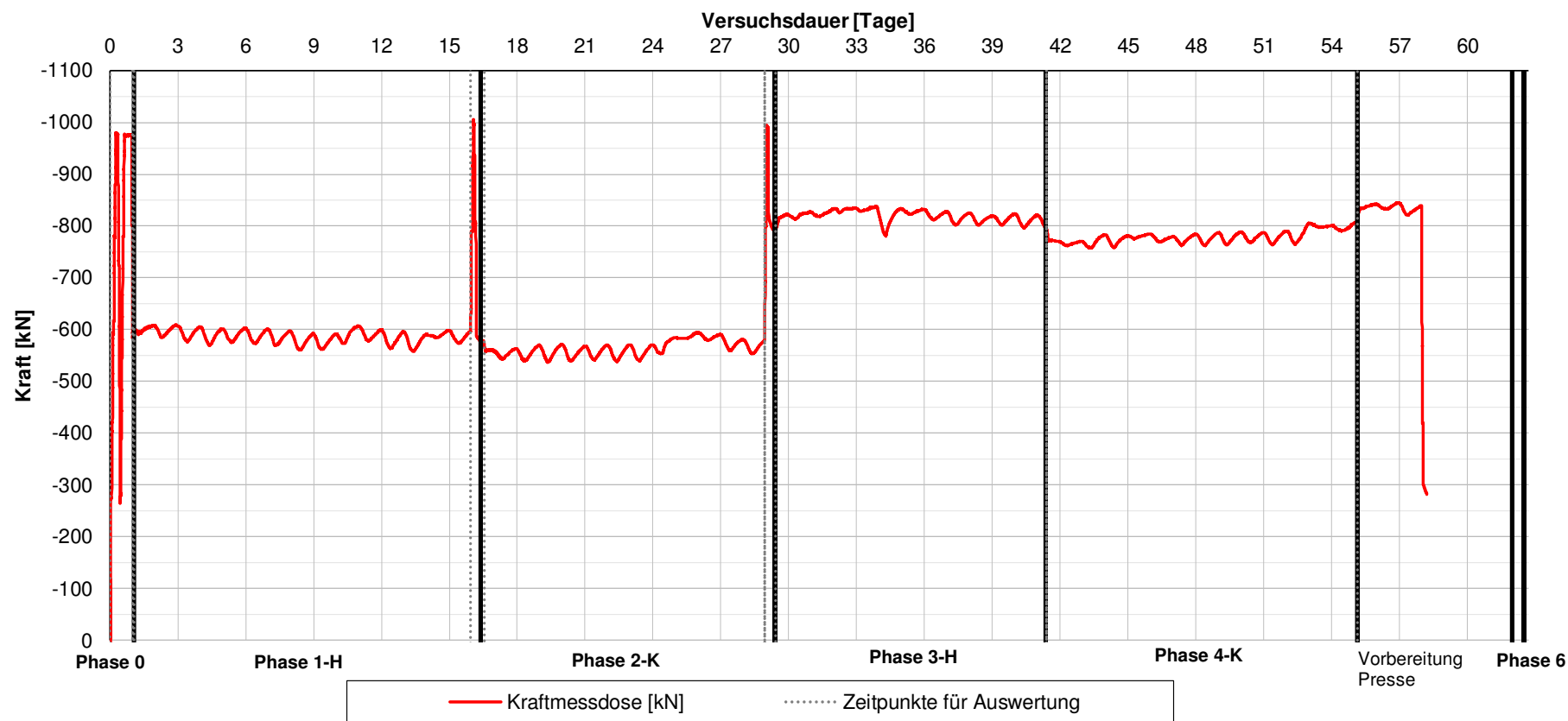
Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

Formeln		Umrechnungen der dg-Werte									
BSP.:	$\Delta TR1 = TR1 - T0$	ϵM BS4.1	$\epsilon T-OBS$ BS4.1	ϵOBS BS4.1	$\Delta T-4.1$	$\epsilon T-Free, 4-1$	ϵM BS4.2	$\epsilon T-OBS$ BS4.2	ϵOBS BS4.2	$\Delta T-4.2$	$\epsilon T-Free, 4-2$
BSP.:	$\epsilon T-Free = \Delta T * \alpha C$	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]
R0	$\epsilon M - T0 = (R0 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	0,0000		0,0000			0,0000		0,0000		
R1	$\epsilon M - R1 = (RR1 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	-0,0384		-0,0394			-0,0196		-0,0196		
T1	$\epsilon T - Obs = (RT1 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1555	0,1161	15,2000	0,1520		0,1586	0,1388	14,4000	0,1440
T2	$\epsilon T - Obs = (RT2 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1345	0,0951	13,0000	0,1300		0,1367	0,1171	12,4000	0,1240
T3	$\epsilon T - Obs = (RT3 - RT2) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,2529	-0,1578	-22,3000	-0,2230		-0,2636	-0,1465	-21,4000	-0,2140
T4	$\epsilon T - Obs = (RT4 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,1184	-0,1578	-9,3000	-0,0930		-0,1269	-0,1465	-9,0000	-0,0900
R2	$\epsilon M - R2 = (RR2 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	-0,0479		-0,0479			-0,0292		-0,0302		
T5	$\epsilon T - Obs = (RT5 - RR2) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,1205	-0,1684	-8,9000	-0,0890		-0,1230	-0,1534	-8,3000	-0,0830
T6	$\epsilon T - Obs = (RT6 - RT5) * C + \Delta T * \alpha S$		0,2703	0,1019	23,9000	0,2390		0,2765	0,1230	22,7000	0,2270
T7	$\epsilon T - Obs = (RT7 - RR2) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1498	0,1019	15,0000	0,1500		0,1534	0,1230	14,4000	0,1440
T8	$\epsilon T - Obs = (RT8 - RT7) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,2638	-0,1619	-23,0000	-0,2300		-0,2710	-0,1480	-21,8000	-0,2180

Formeln		Umrechnungen der dg-Werte									
BSP.:	$\Delta TR1 = TR1 - T0$	ϵM BS5.1	$\epsilon T-OBS$ BS5.1	ϵOBS BS5.1	$\Delta T-5.1$	$\epsilon T-Free, 5-1$	ϵM BS5.2	$\epsilon T-OBS$ BS5.2	ϵOBS BS5.2	$\Delta T-5.2$	$\epsilon T-Free, 5-2$
BSP.:	$\epsilon T-Free = \Delta T * \alpha C$	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[mm/m]	[°C]	[mm/m]
R0	$\epsilon M - T0 = (R0 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	0,0000		0,00000			0,0000		0,00000		
R1	$\epsilon M - R1 = (RR1 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	-0,0169		-0,01792			-0,0124		-0,01242		
T1	$\epsilon T - Obs = (RT1 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1473	0,12938	13,5	0,1350		0,1438	0,13134	14,7	0,1470
T2	$\epsilon T - Obs = (RT2 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1310	0,11306	12,5	0,1250		0,1076	0,09523	10,7	0,1070
T3	$\epsilon T - Obs = (RT3 - RT2) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,2340	-0,12090	-20,3	-0,2030		-0,2124	-0,11713	-19,4	-0,1940
T4	$\epsilon T - Obs = (RT4 - RR1) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,1030	-0,12090	-7,8	-0,0780		-0,1047	-0,11713	-8,7	-0,0870
R2	$\epsilon M - R2 = (RR2 - R0) * C + \Delta T * (\alpha S - \alpha C)$	-0,0223		-0,02229			-0,0175		-0,01652		
T5	$\epsilon T - Obs = (RT5 - RR2) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,1042	-0,12649	-7,7	-0,0770		-0,1026	-0,11908	-7,9	-0,0790
T6	$\epsilon T - Obs = (RT6 - RT5) * C + \Delta T * \alpha S$		0,2490	0,12247	21,0	0,2100		0,2412	0,12213	22,2	0,2220
T7	$\epsilon T - Obs = (RT7 - RR2) * C + \Delta T * \alpha S$		0,1448	0,12247	13,3	0,1330		0,1386	0,12213	14,3	0,1430
T8	$\epsilon T - Obs = (RT8 - RT7) * C + \Delta T * \alpha S$		-0,2413	-0,11888	-20,6	-0,2060		-0,2241	-0,10198	-20,1	-0,2010

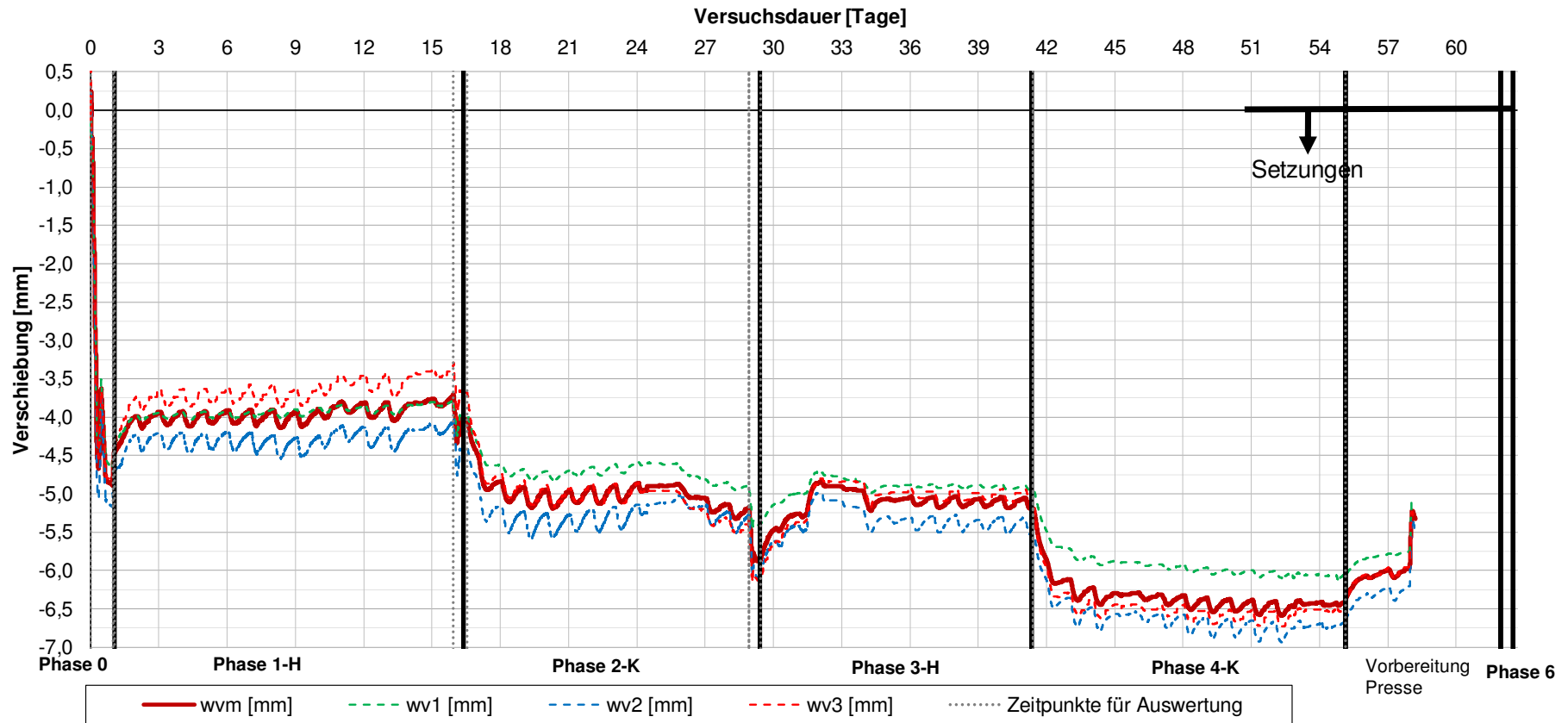
Prüfkörper: B.EK

Last auf Pfahlkopf

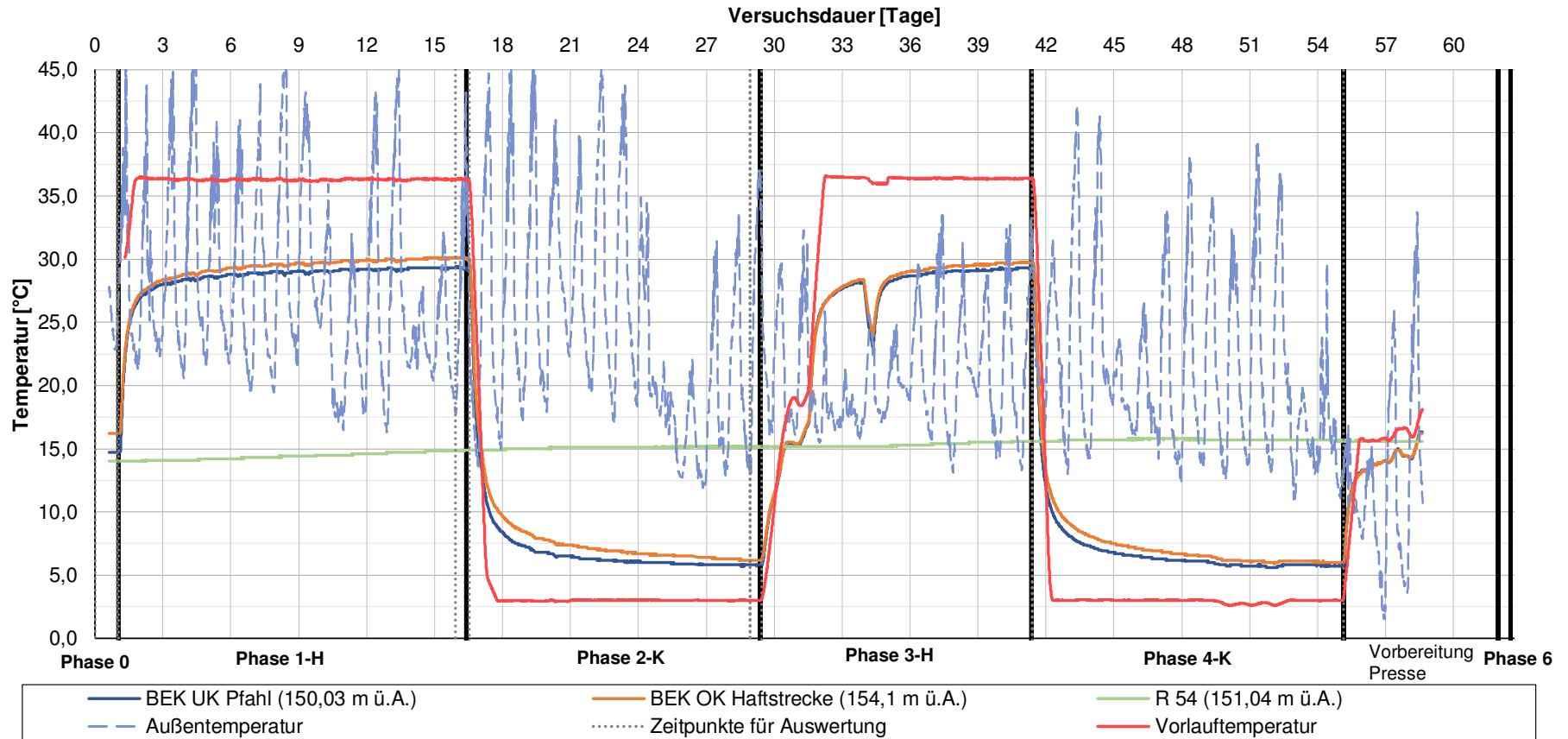


Prüfkörper: B.EK

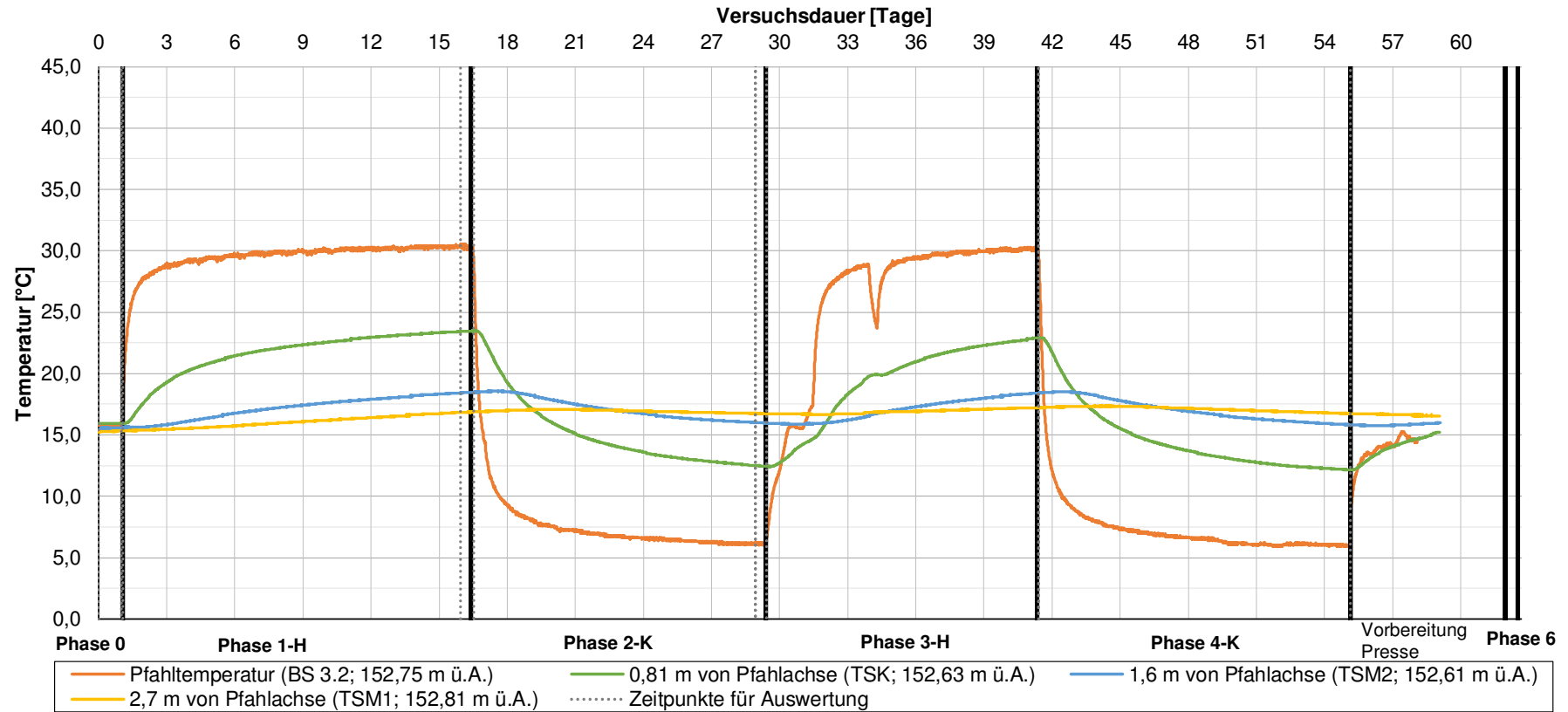
Vertikale Pfahlkopfverschiebung



Prüfkörper: B.EK Vorlauftemperatur, Außentemperatur, Pfahltemperatur, Reaktionspfahltemperatur

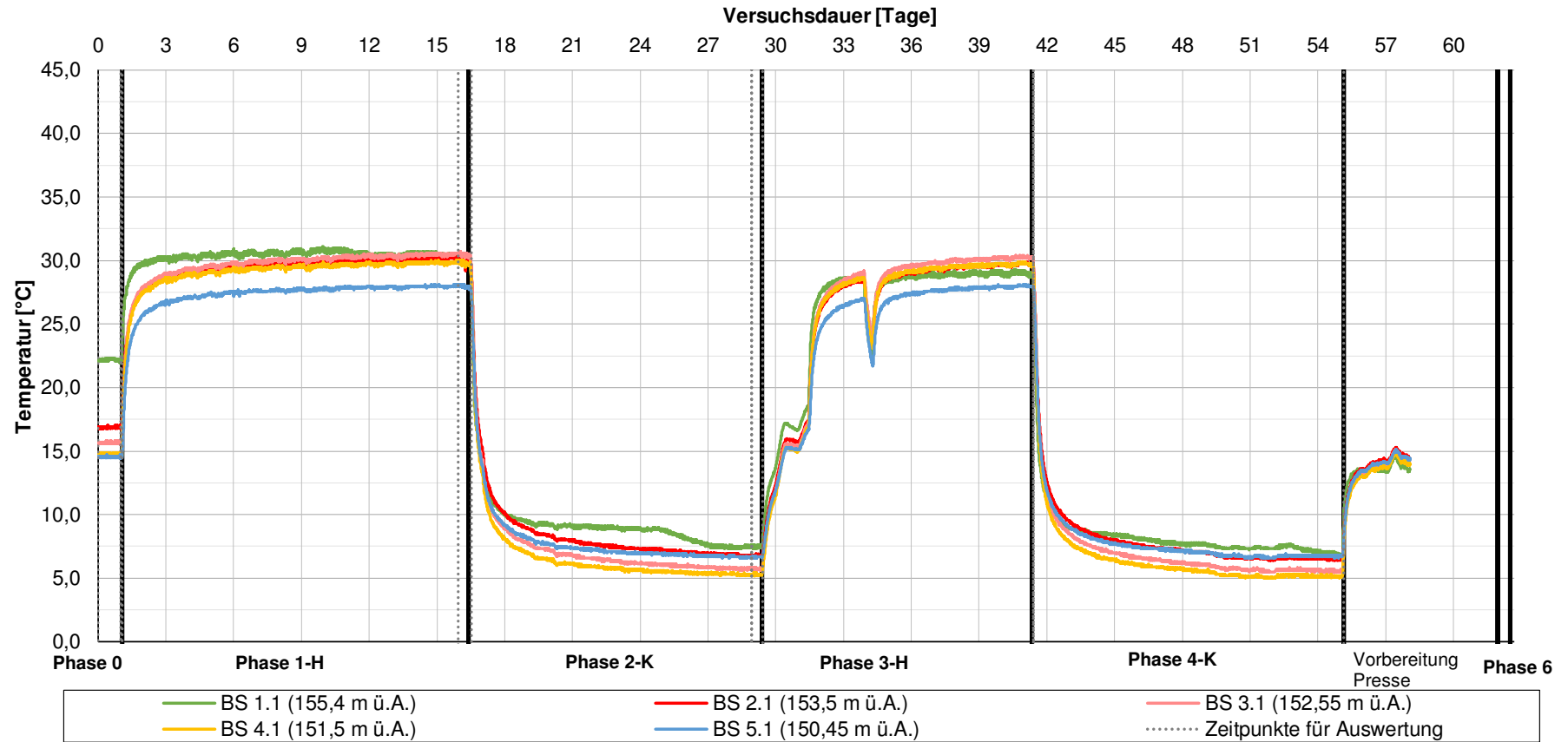


Prüfkörper: B.EK **Pfahltemperatur (BS) & Temperatur in den Zusatzbohrungen auf Höhenkote ca. 152,6 m ü.A.**



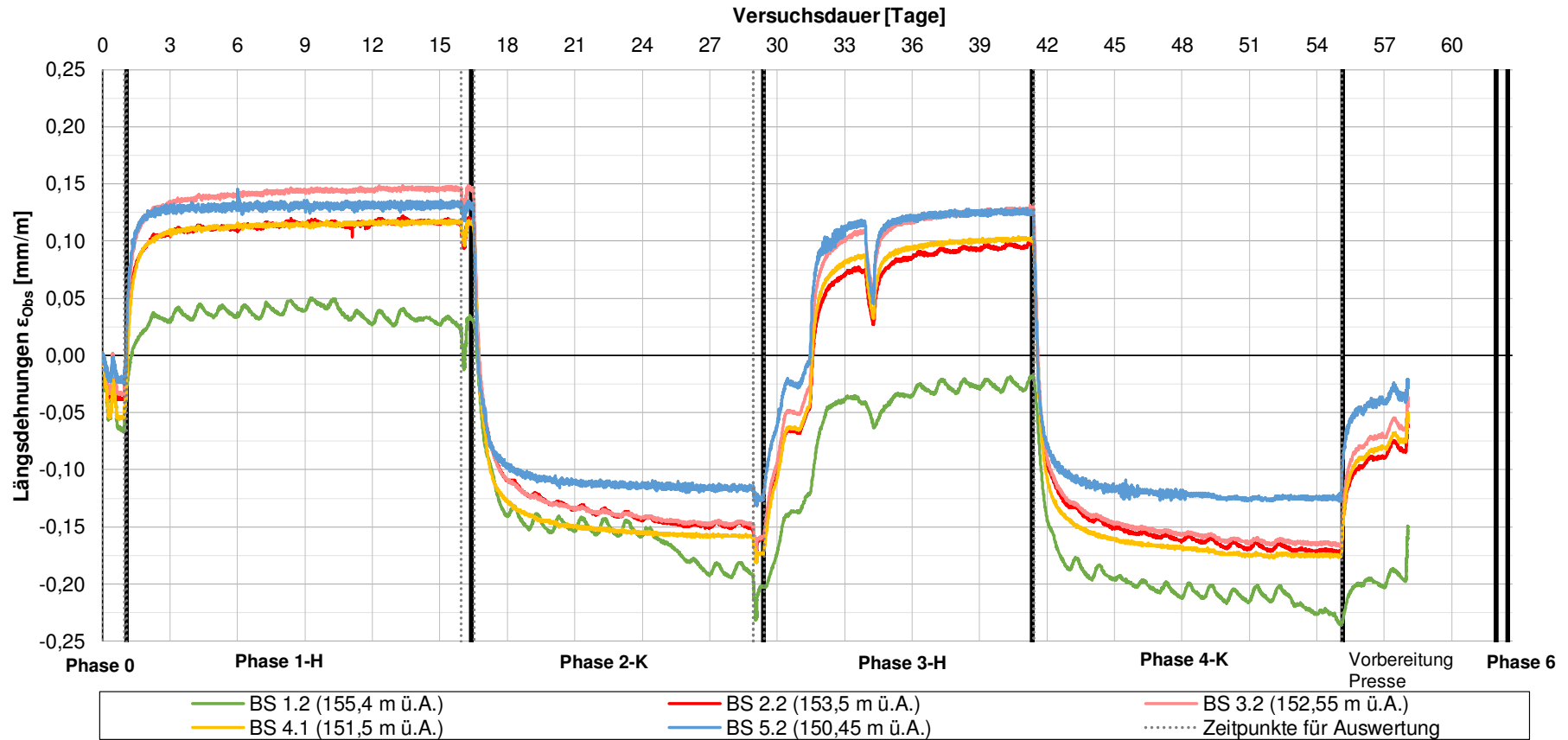
Prüfkörper: B.EK

Temperatur Bewehrungssensoren



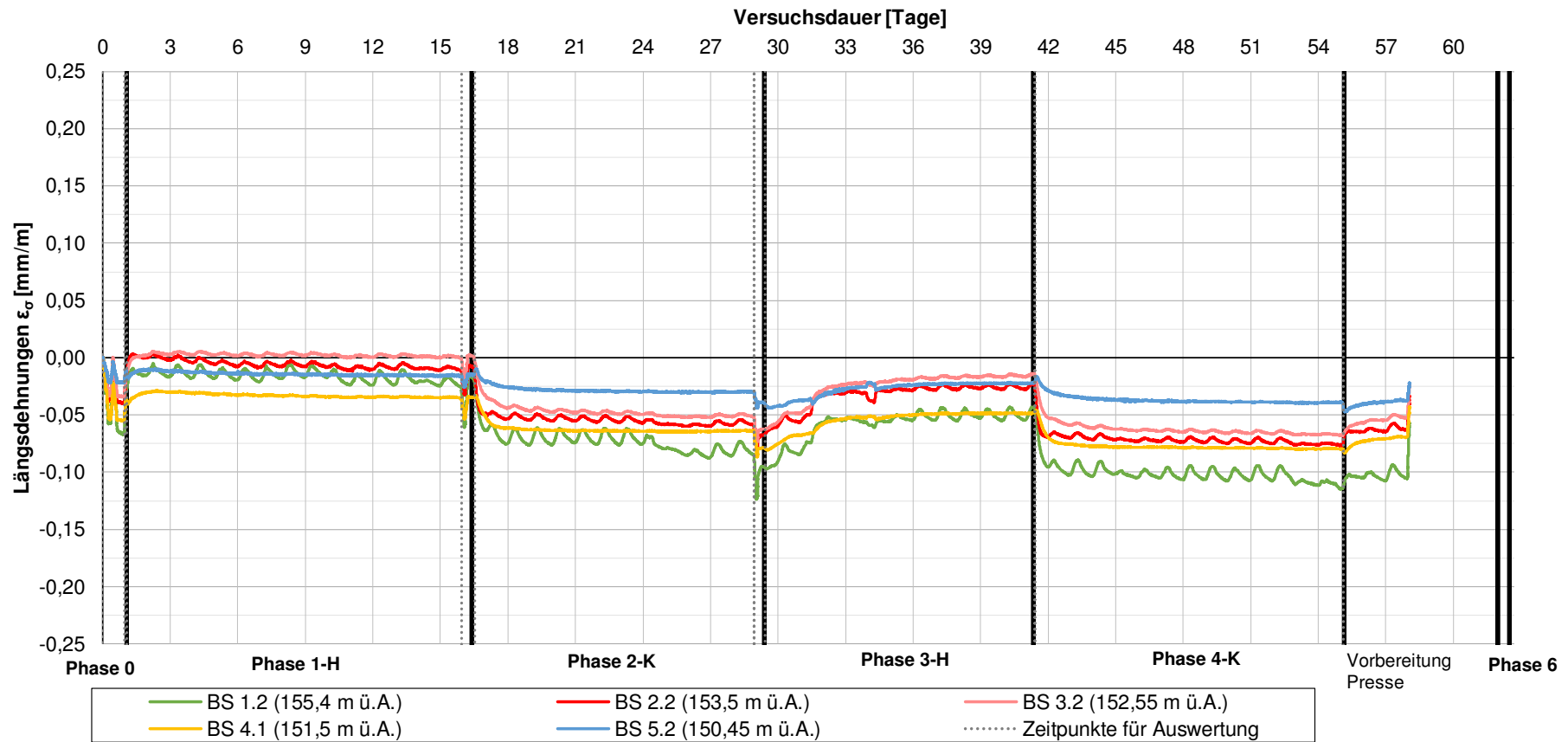
Prüfkörper: B.EK

Längsdehnungen Bewehrungssensoren ϵ_{Obs} (Auswahl)



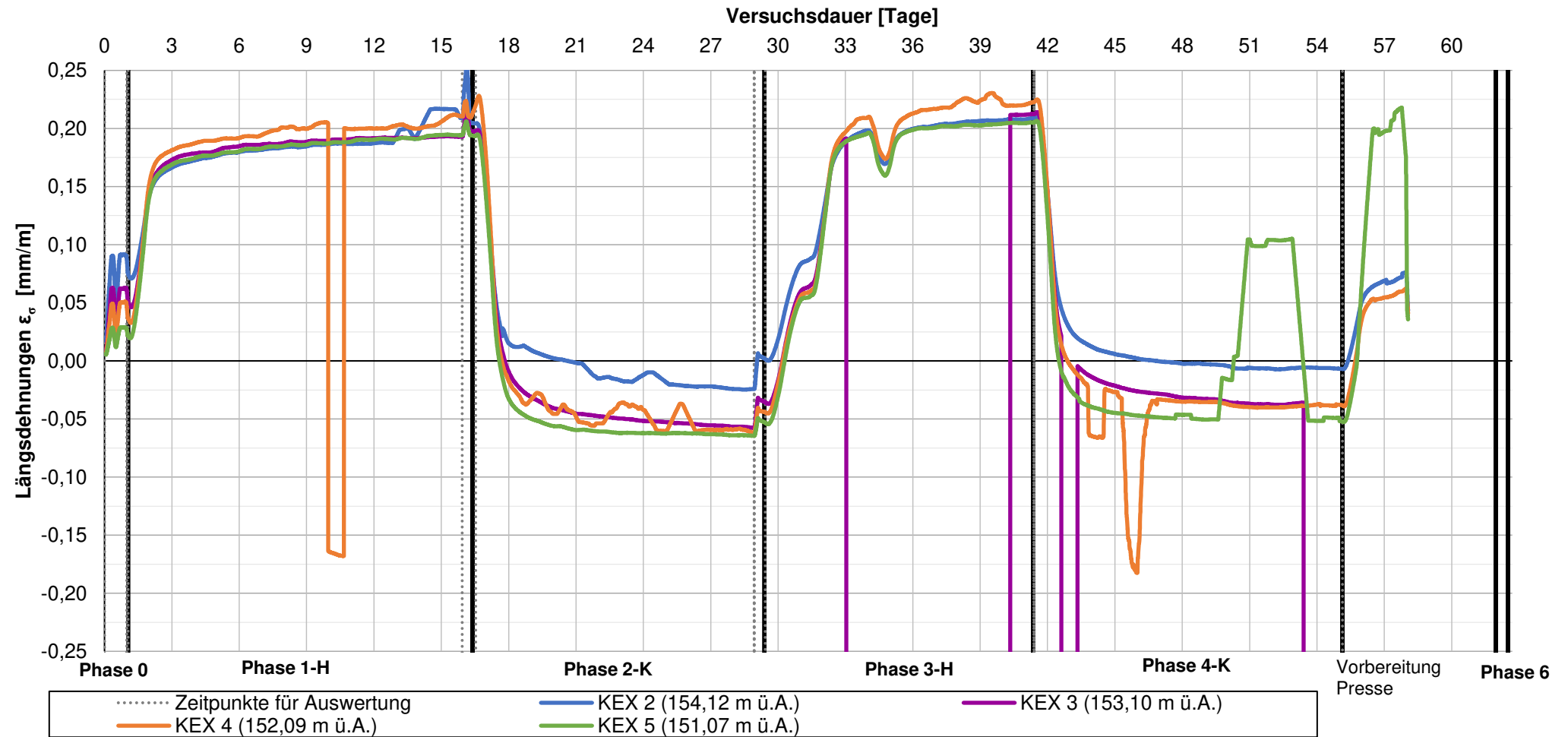
Prüfkörper: **B.EK**

Längsdehnungen Bewehrungssensoren ϵ_σ (Auswahl)



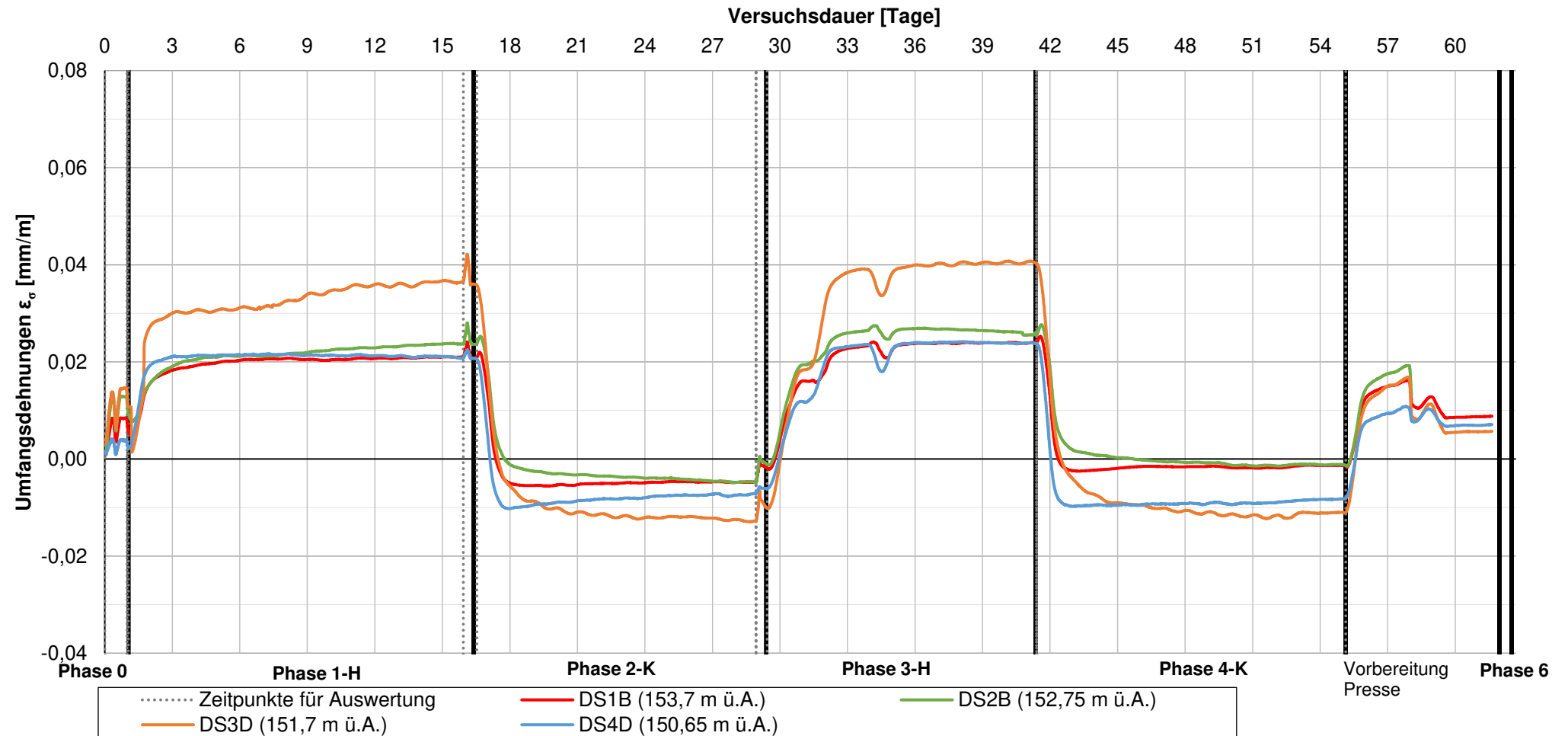
Prüfkörper: B.EK

Längsdehnungen Kettenextensometer ϵ_σ (Auswahl)

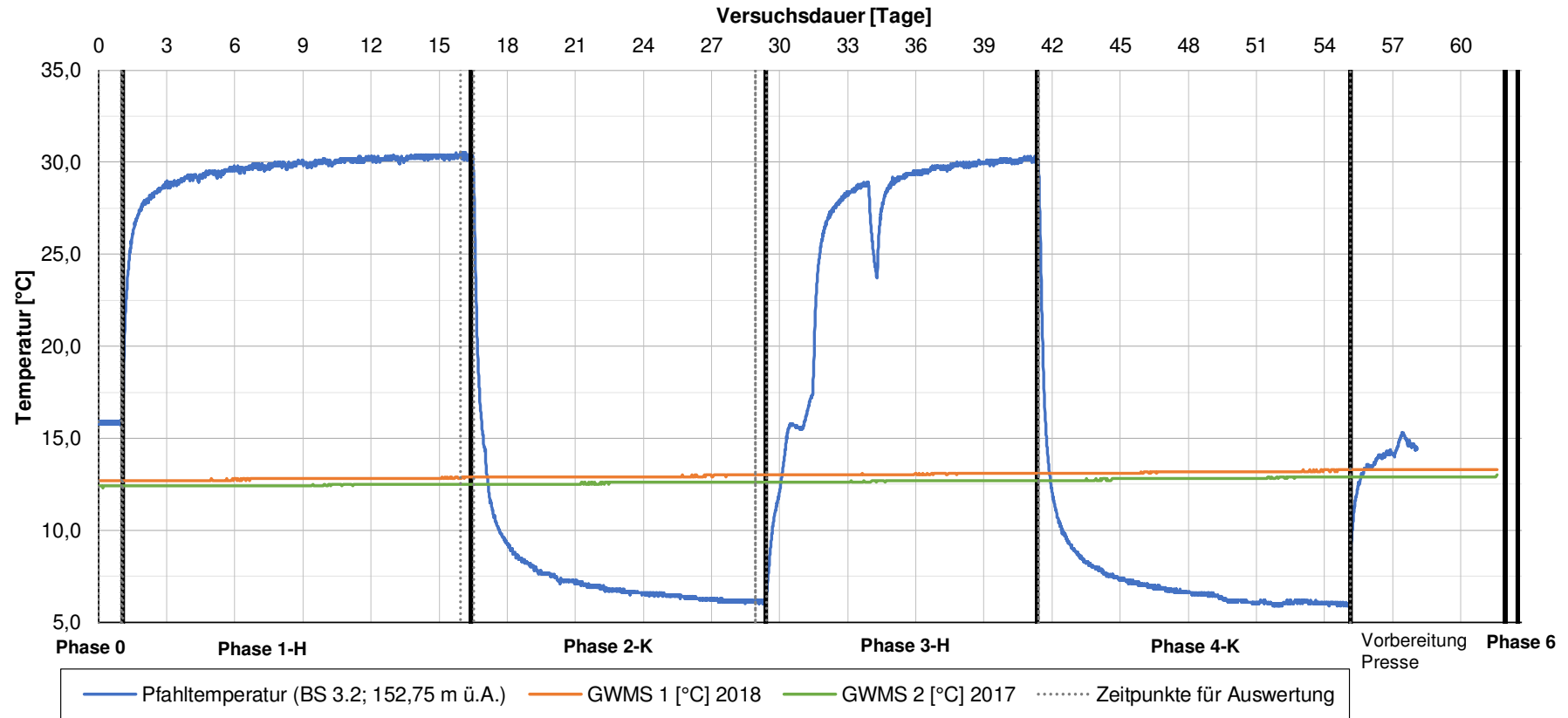


Prüfkörper: B.EK

Umfangsdehnungen ϵ_σ (Auswahl)

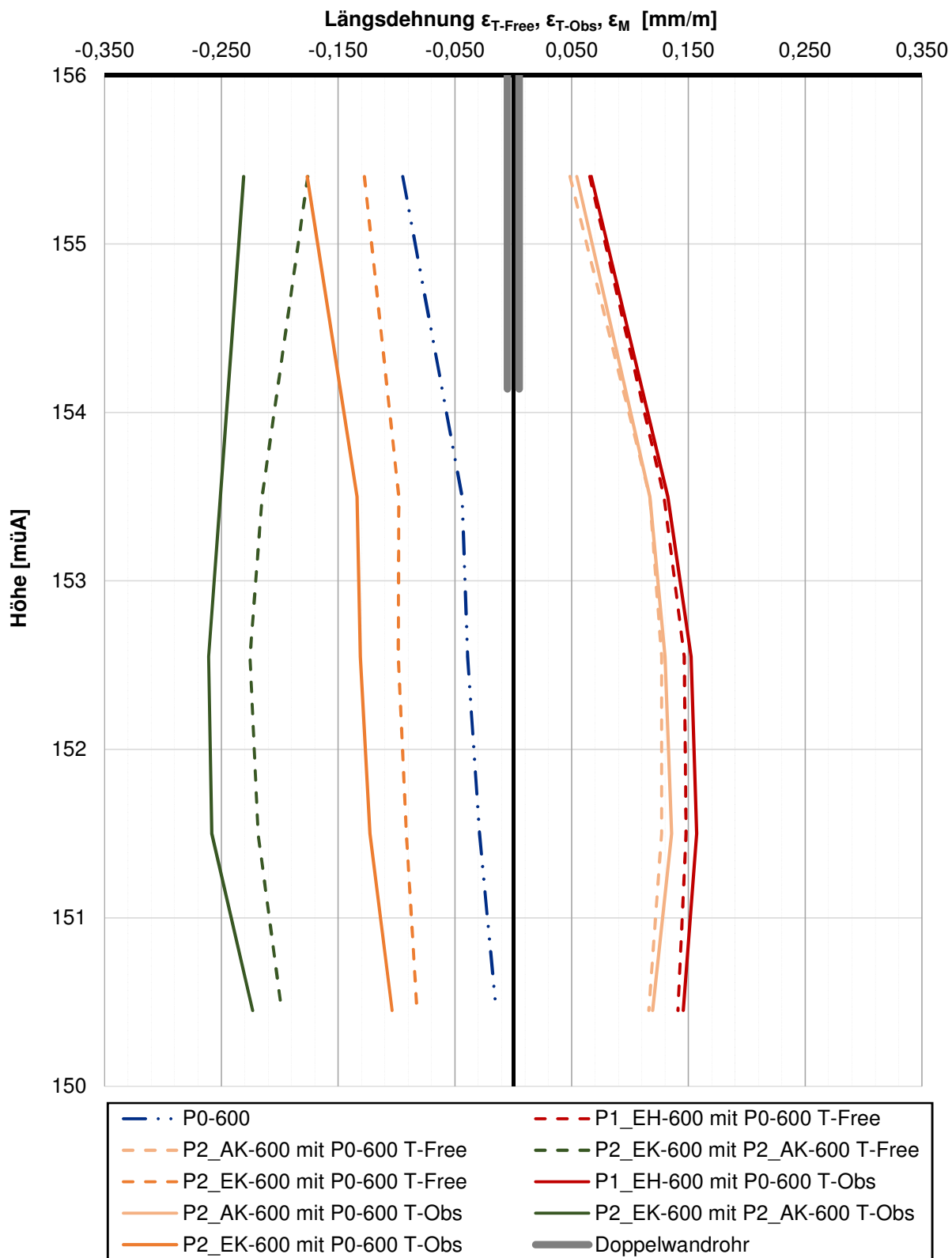


Prüfkörper: B.EK **Temperatur der Grundwassermessstelle 1 während der Versuchsdurchführung (2018) und im Jahr zuvor (2017)**



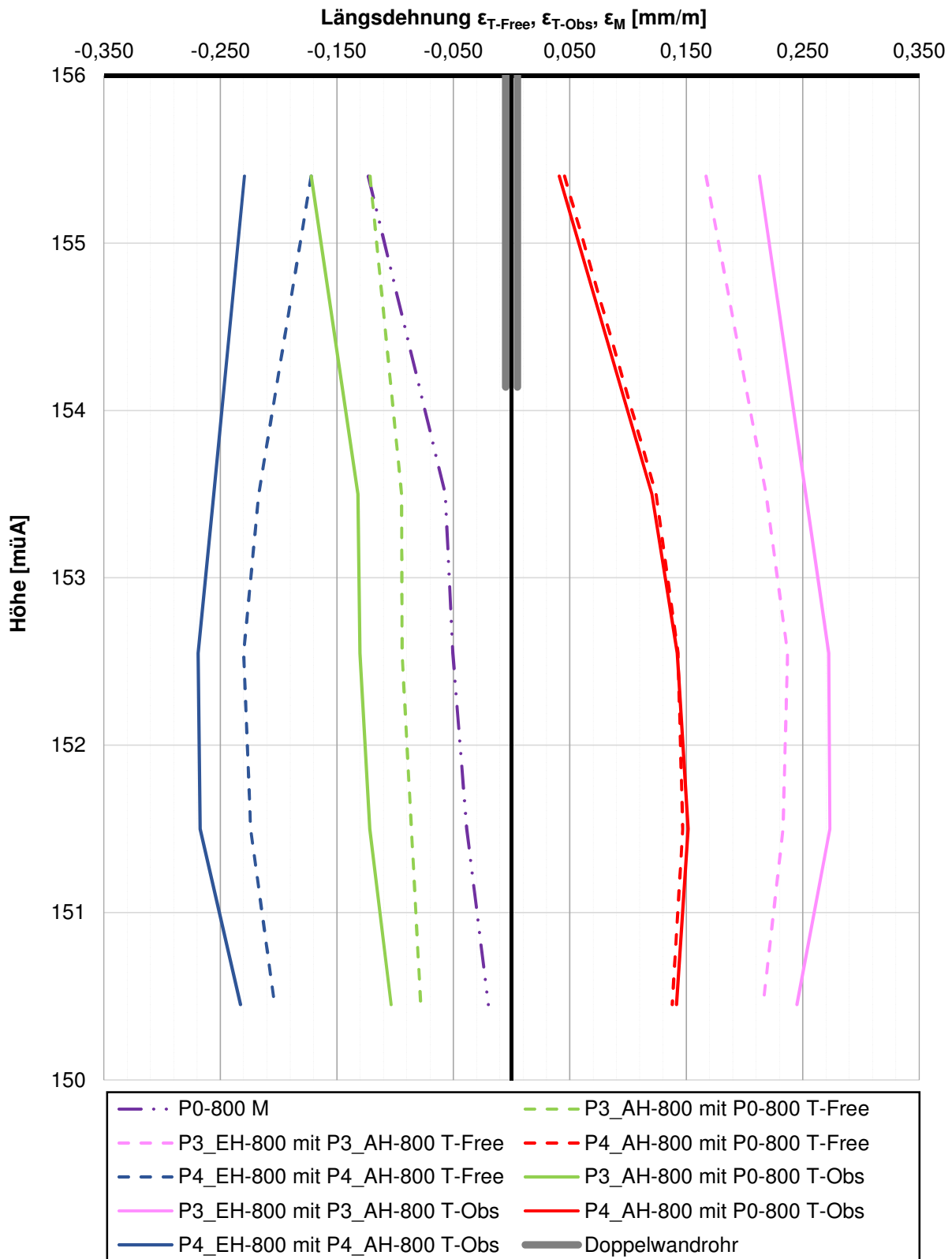
Prüfkörper: B.EK

Vergleich ϵ_{T-Free} , ϵ_{T-Obs} und ϵ_M - Last 600 kN

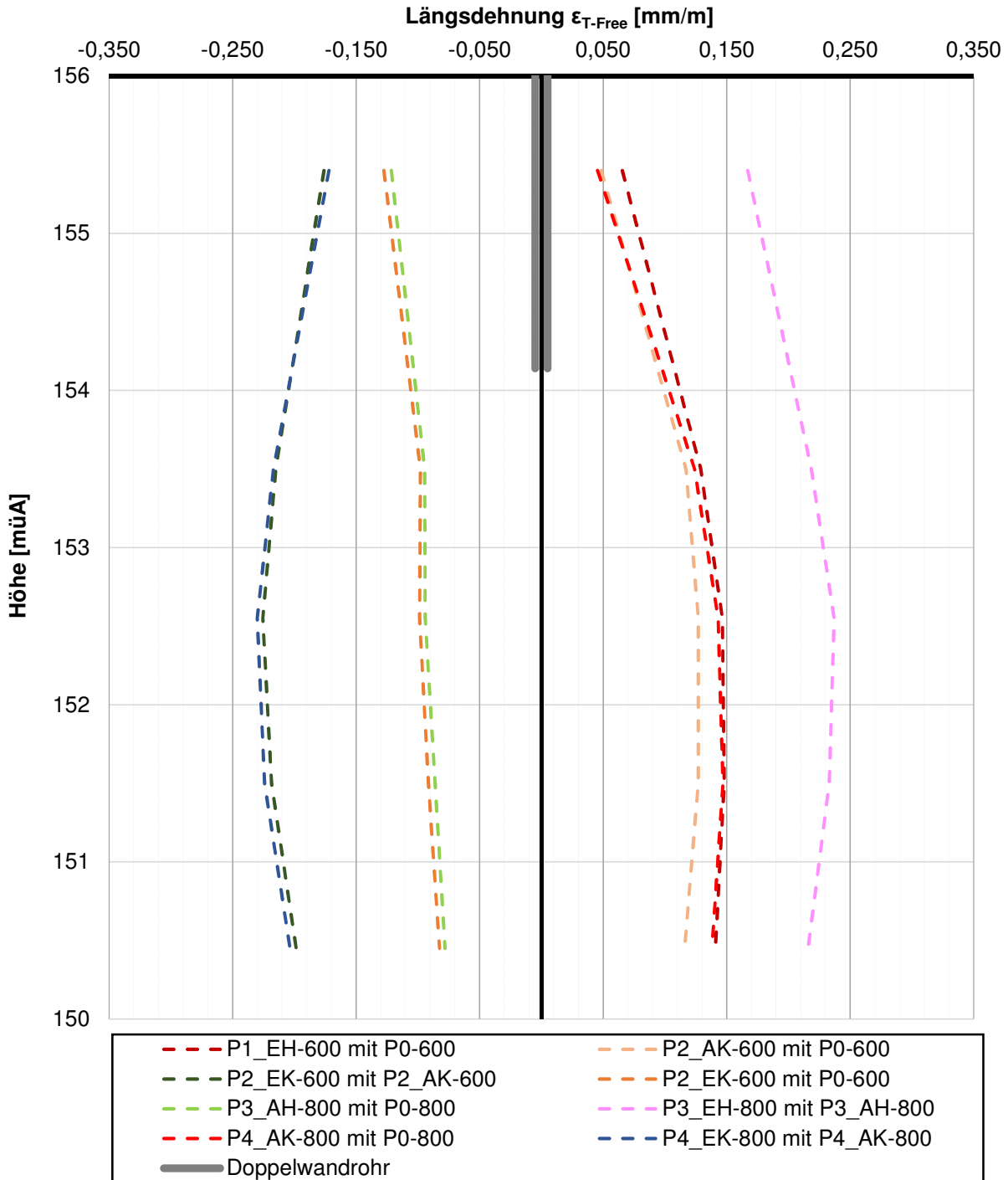


Prüfkörper: **B.EK**

Vergleich ϵ_{T-Free} , ϵ_{T-Obs} und ϵ_M - Last 800 kN

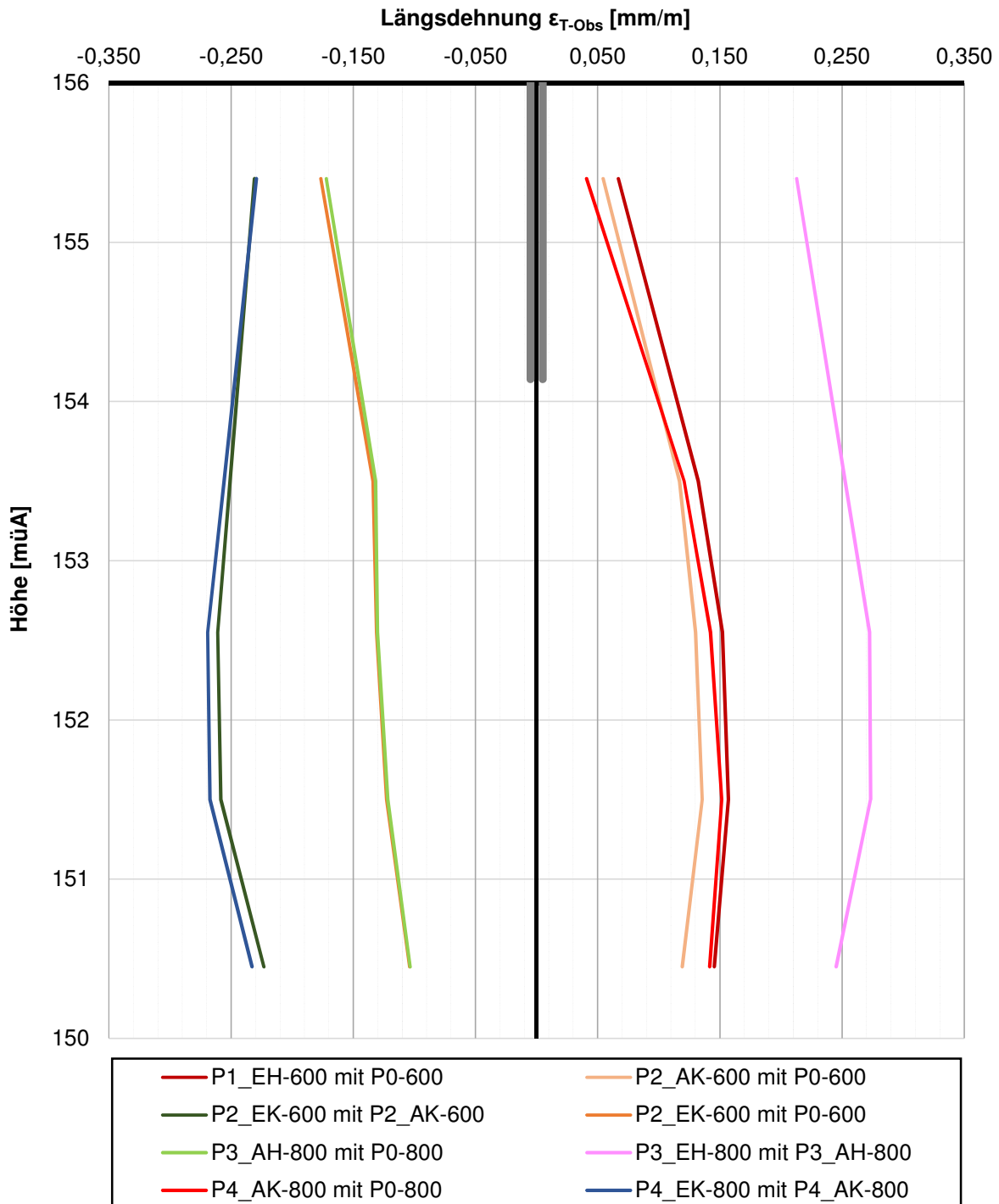


Prüfkörper: B.EK Freie Längsdehnungen



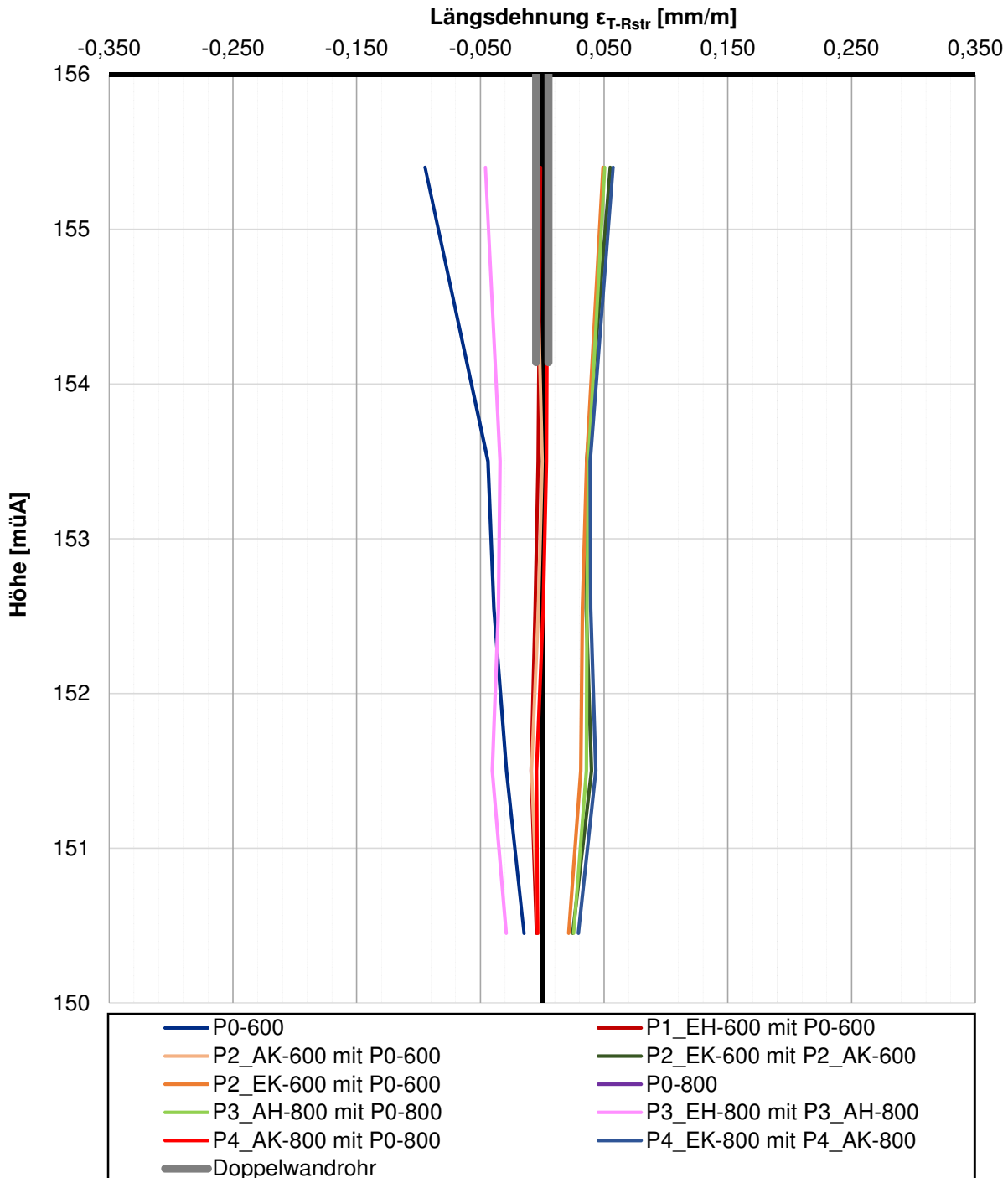
Prüfkörper: B.EK

Gemessene Längsdehnungen

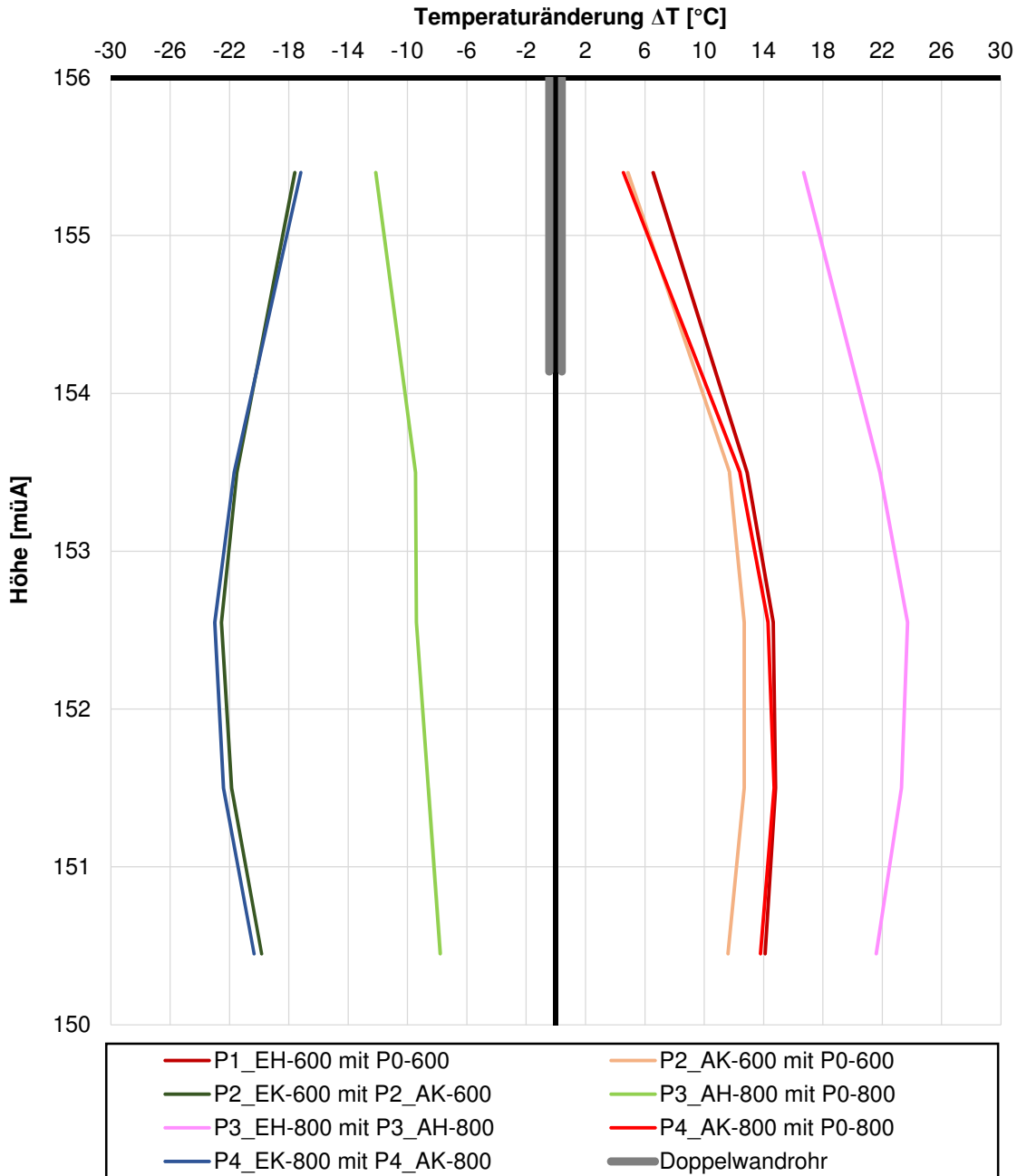


Prüfkörper: B.EK

Behinderte Längsdehnungen

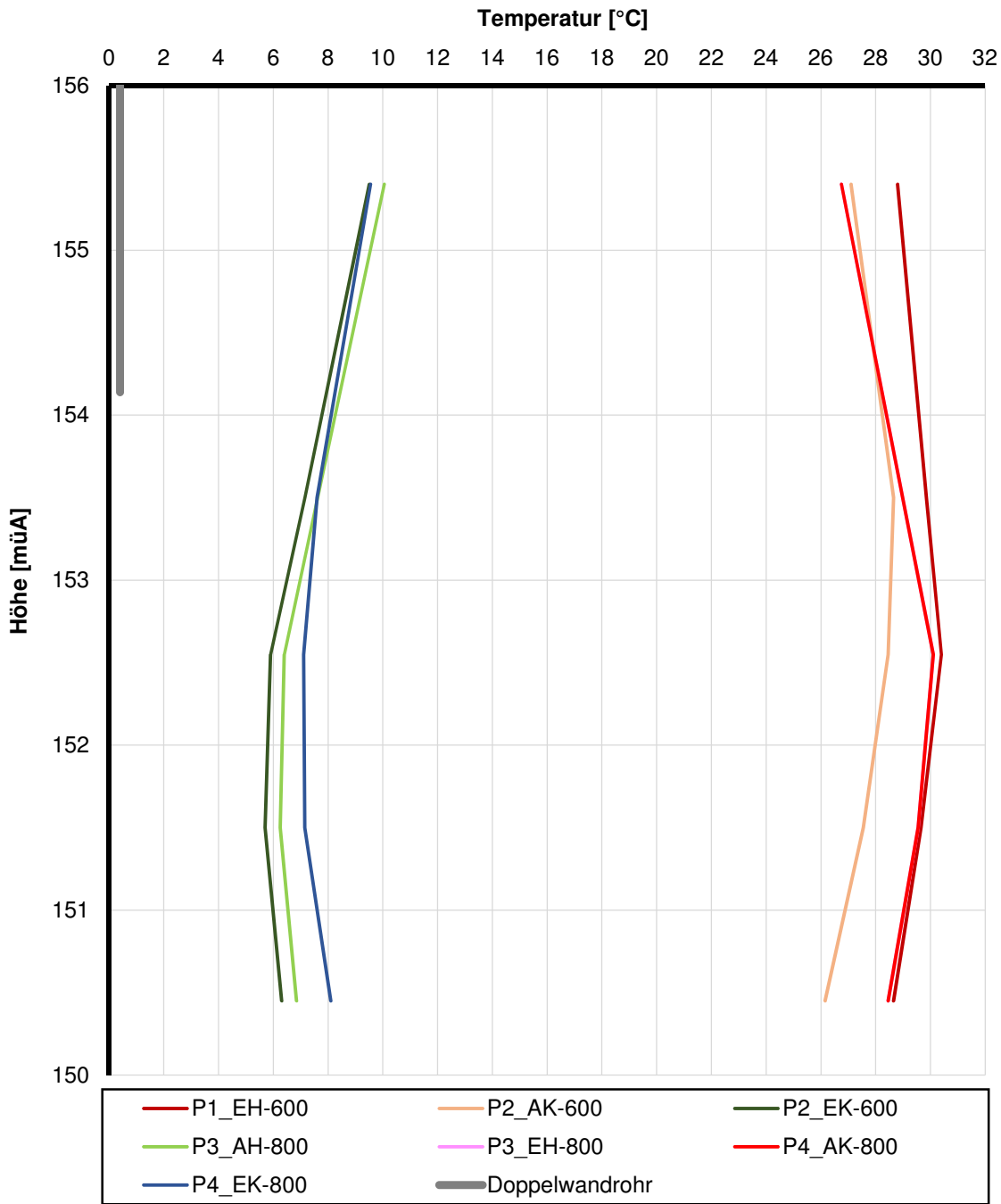


Prüfkörper: B.EK **Temperatänderungen (BS) zw. den gewählten Zeitpunkten**



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

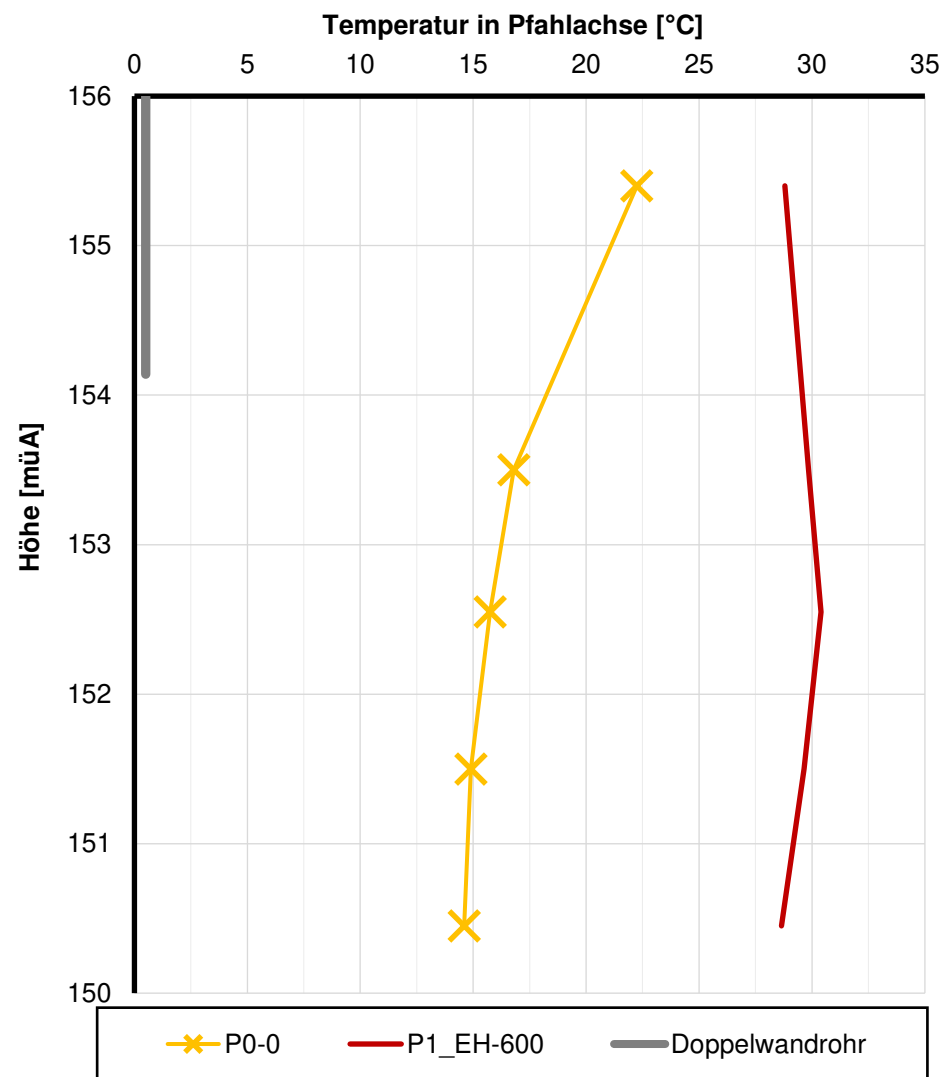
Prüfkörper: B.EK Temperatur (BS) zu den gewählten Zeitpunkten



Prüfkörper: B.EK

Pfahl

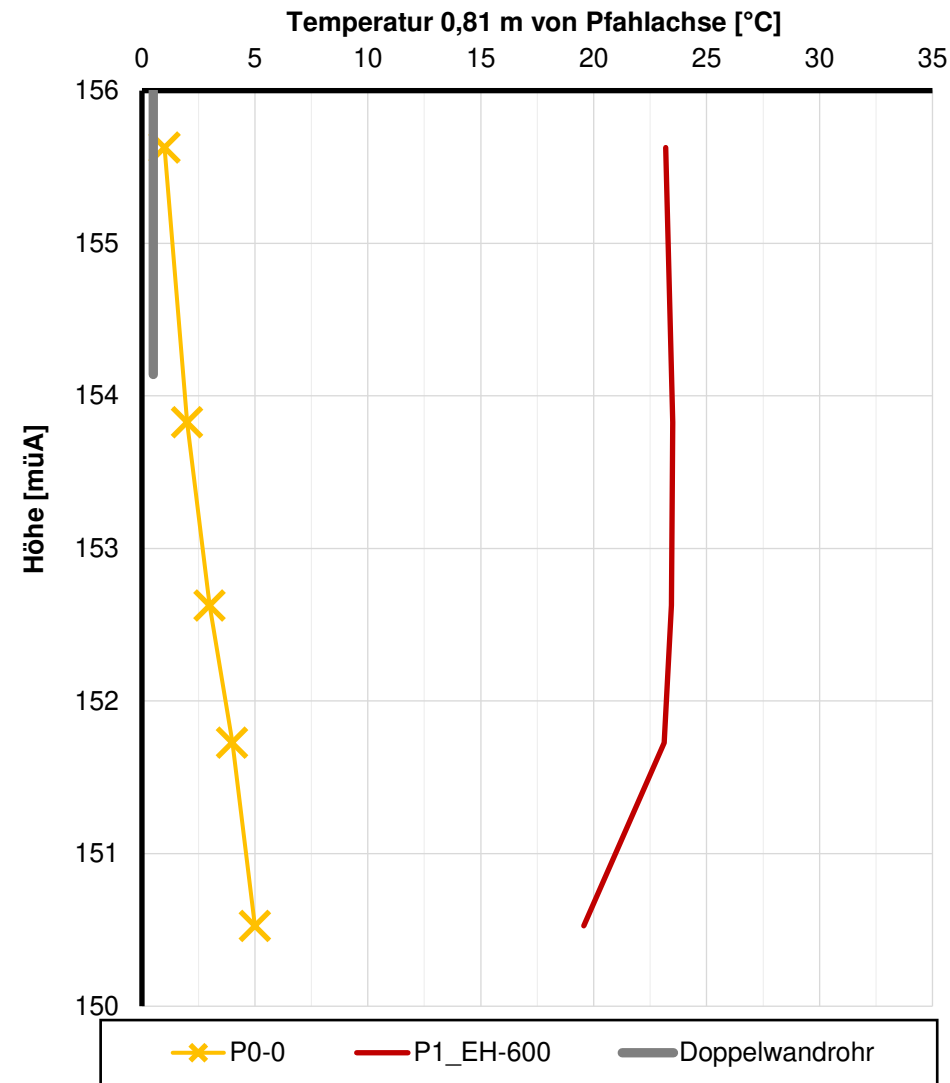
Temperaturverlauf in Pfahlachse



Prüfkörper: B.EK

TS.K

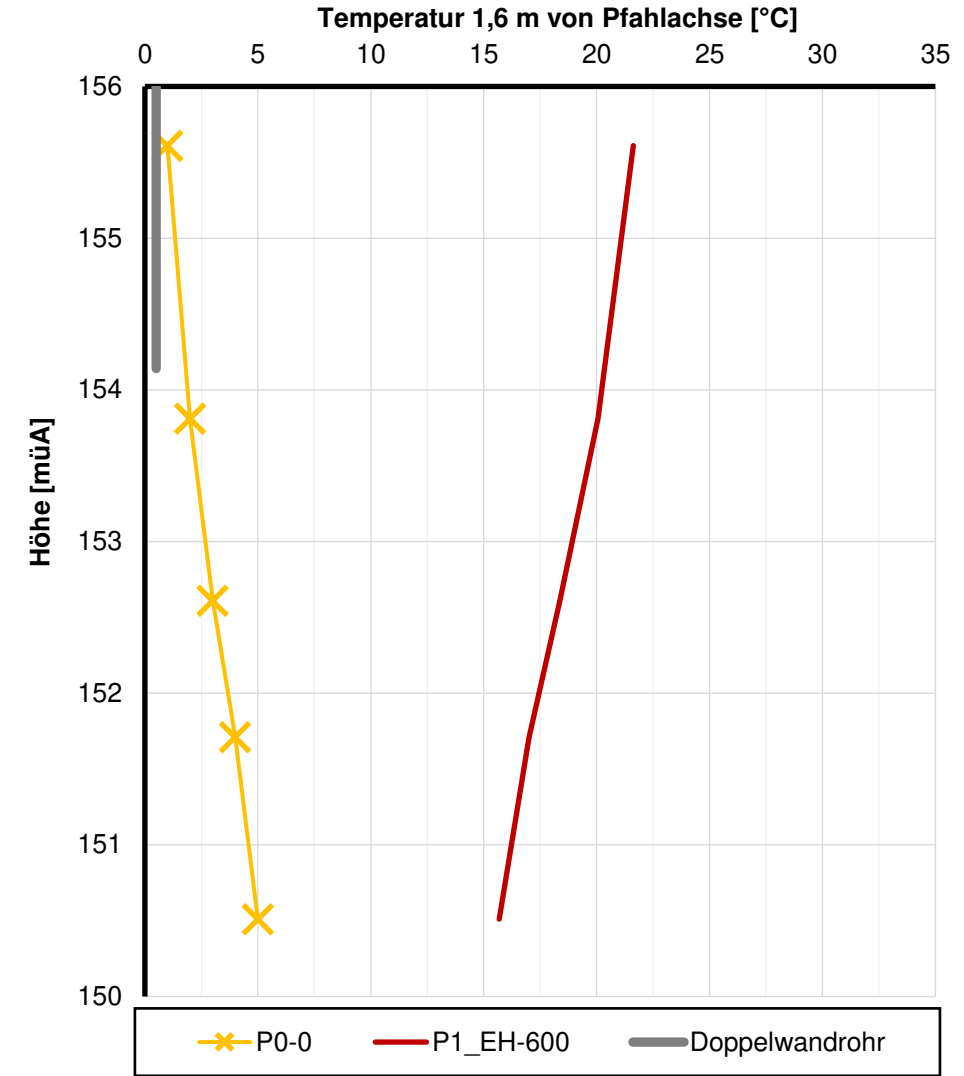
Temperaturverlauf 0,81 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EK

TS.M2

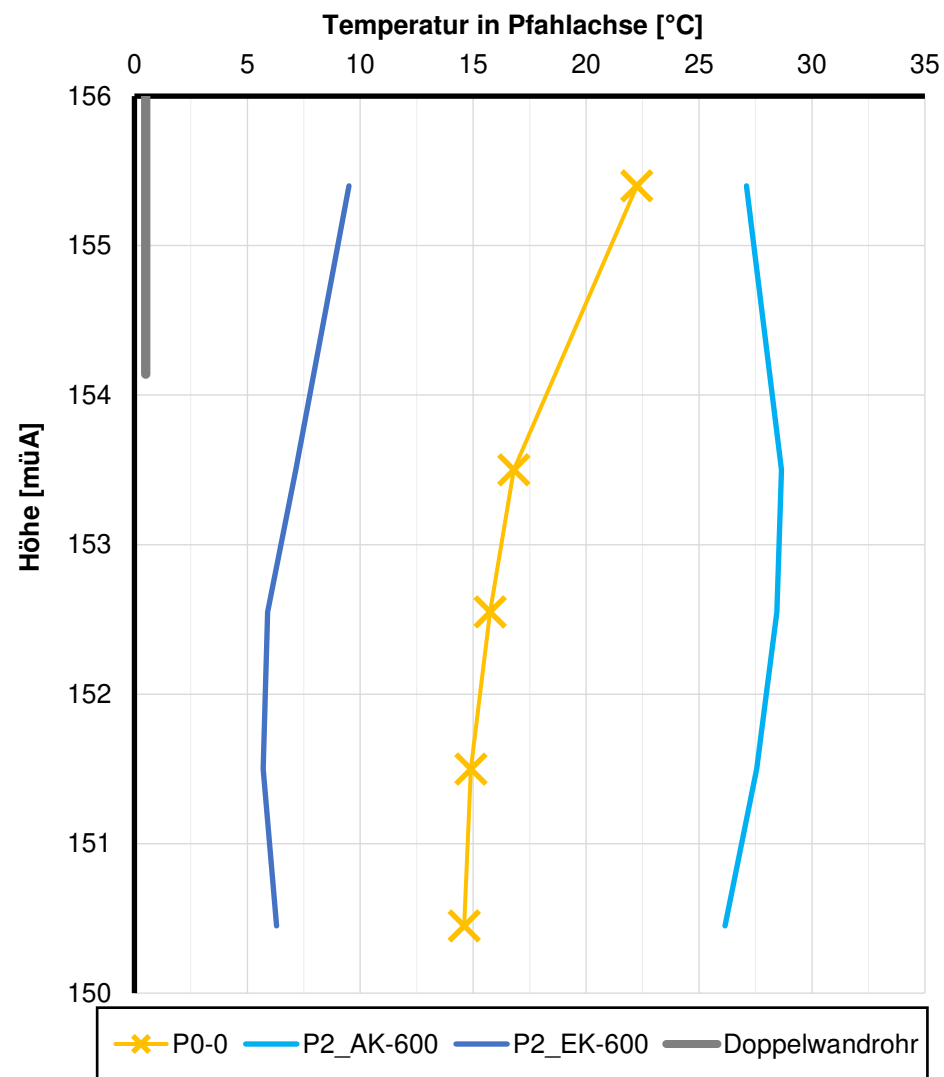
Temperaturverlauf 1,6 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EK

Pfahl

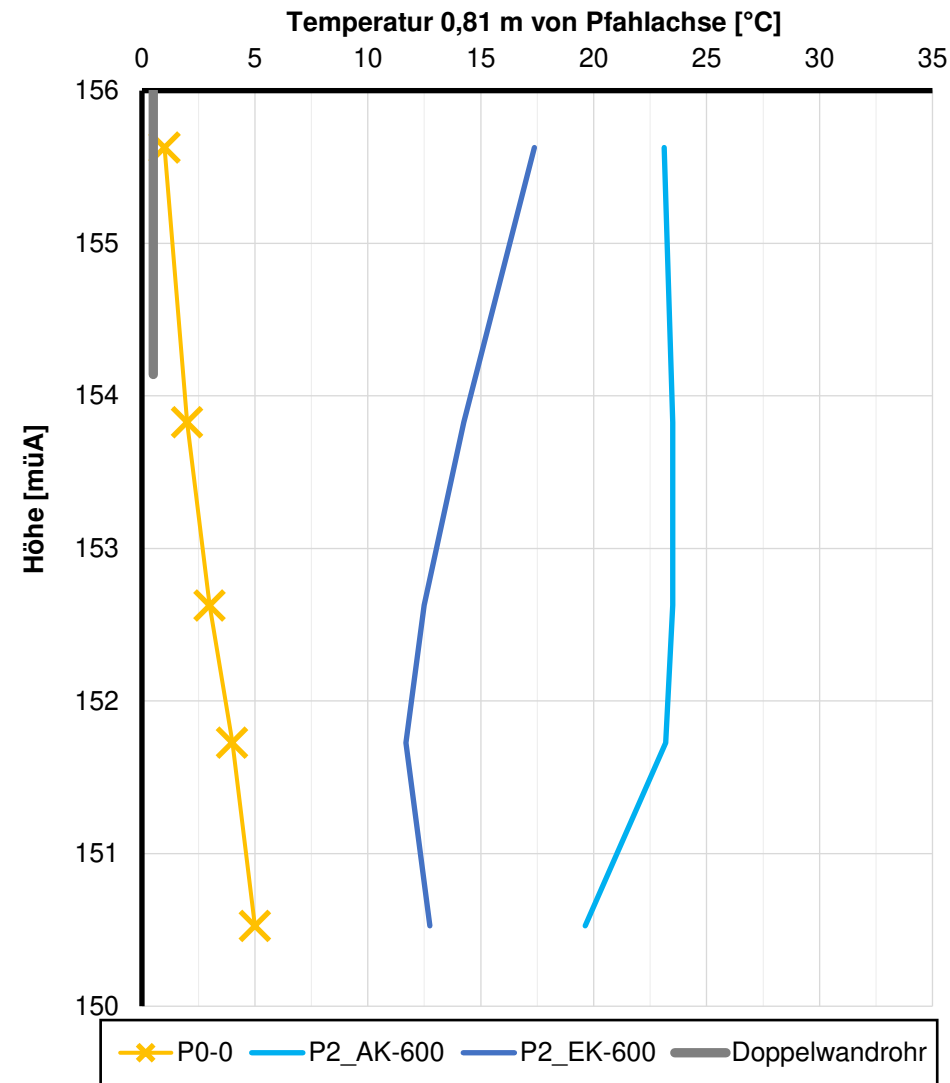
Temperaturverlauf in Pfahlachse



Prüfkörper: B.EK

TS.K

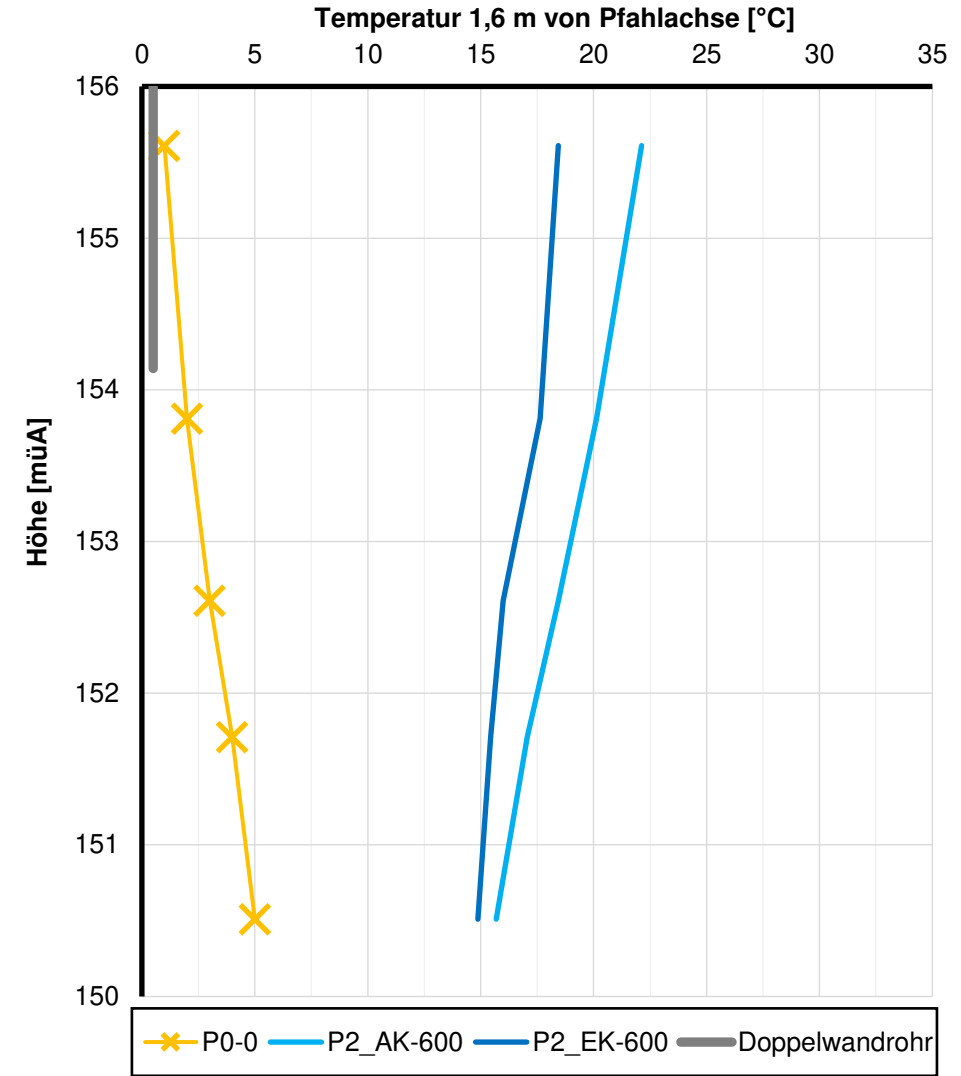
Temperaturverlauf 0,81 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EK

TS.M2

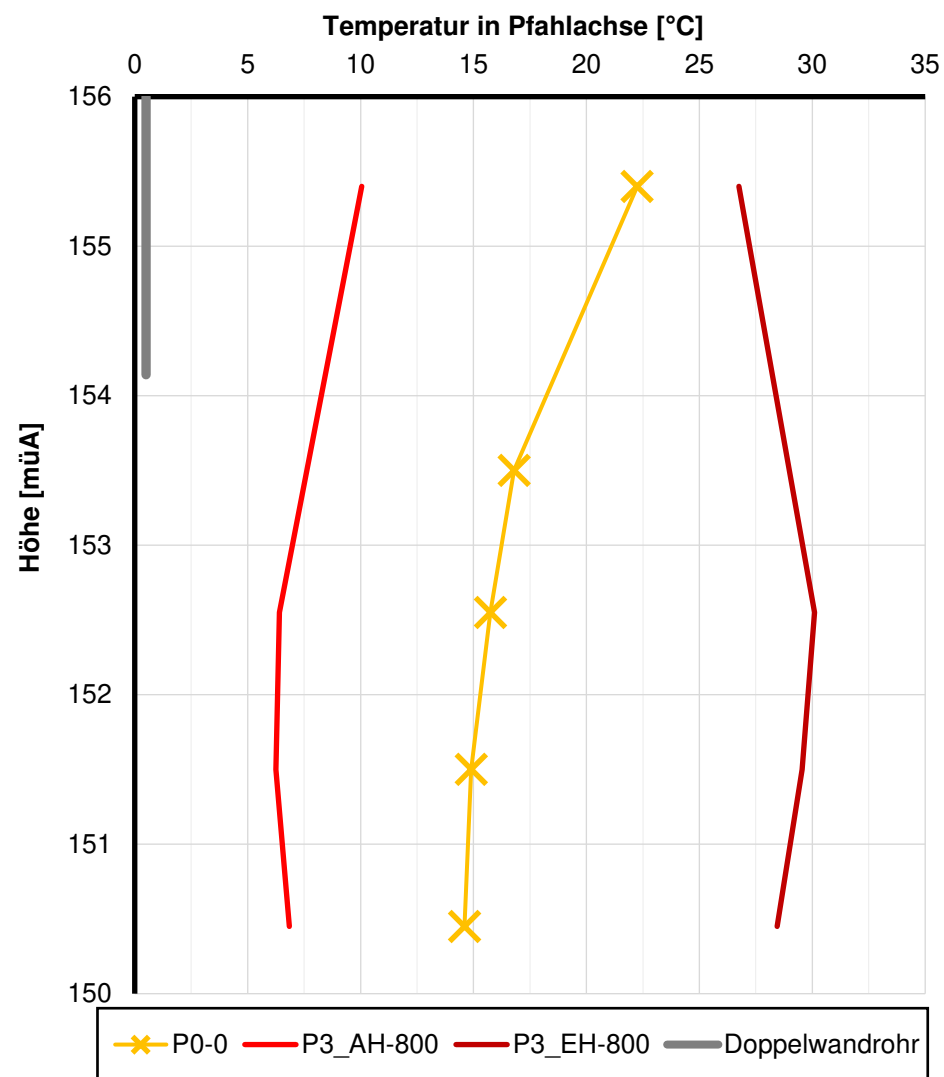
Temperaturverlauf 1,6 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EK

Pfahl

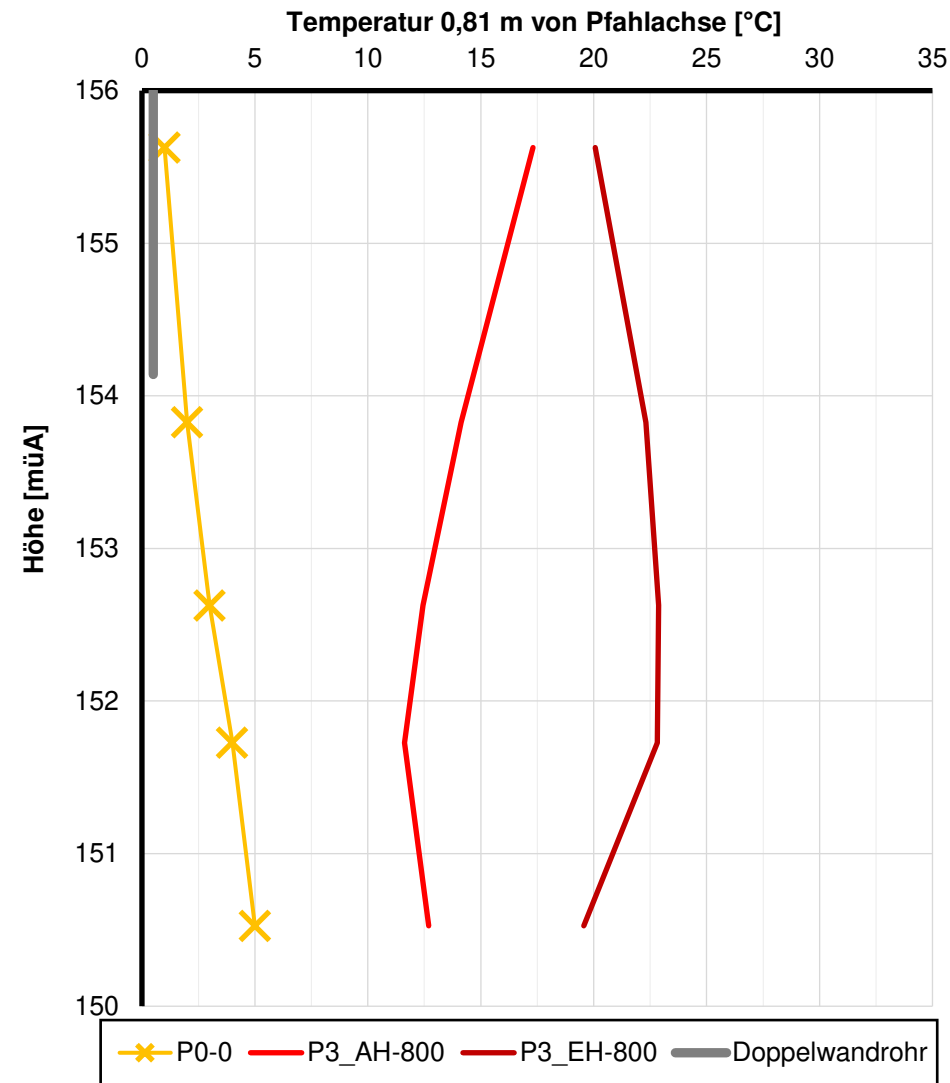
Temperaturverlauf in Pfahlachse



Prüfkörper: B.EK

TS.K

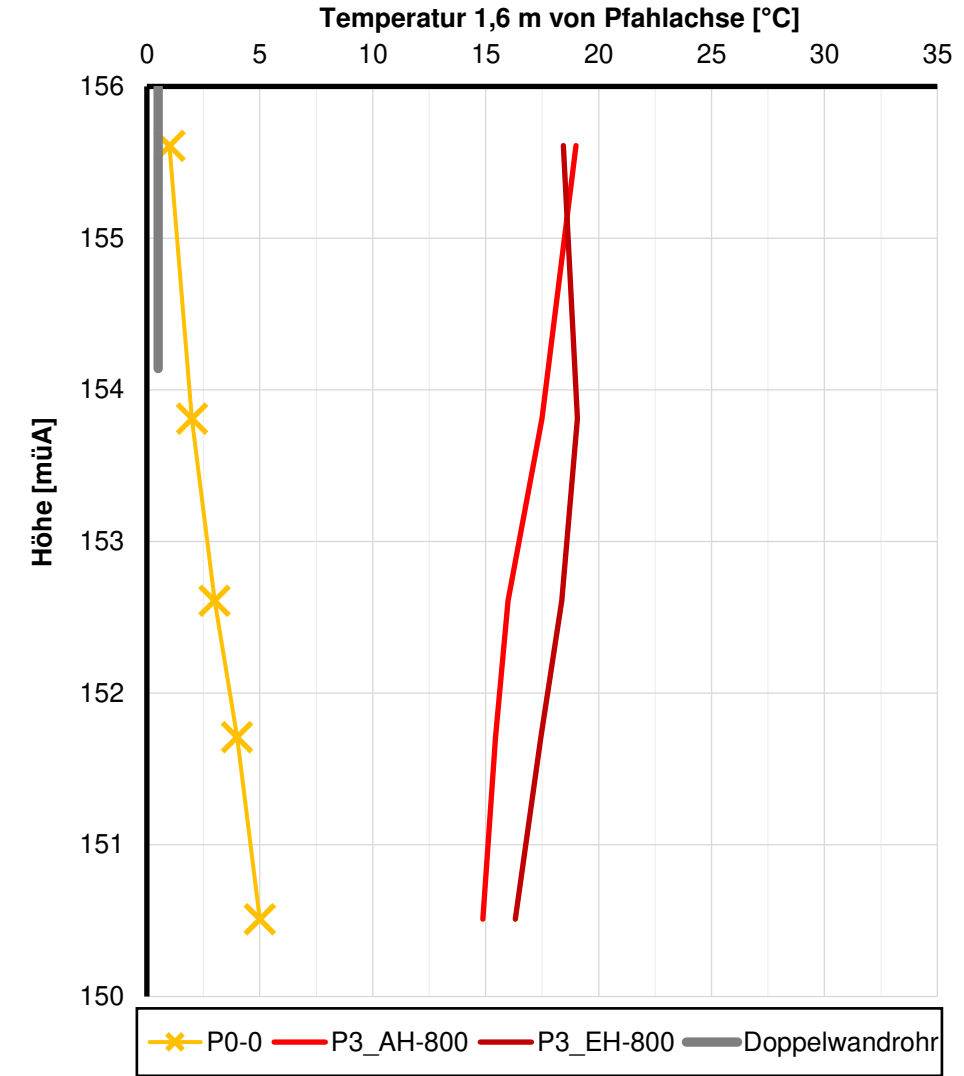
Temperaturverlauf 0,81 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EK

TS.M2

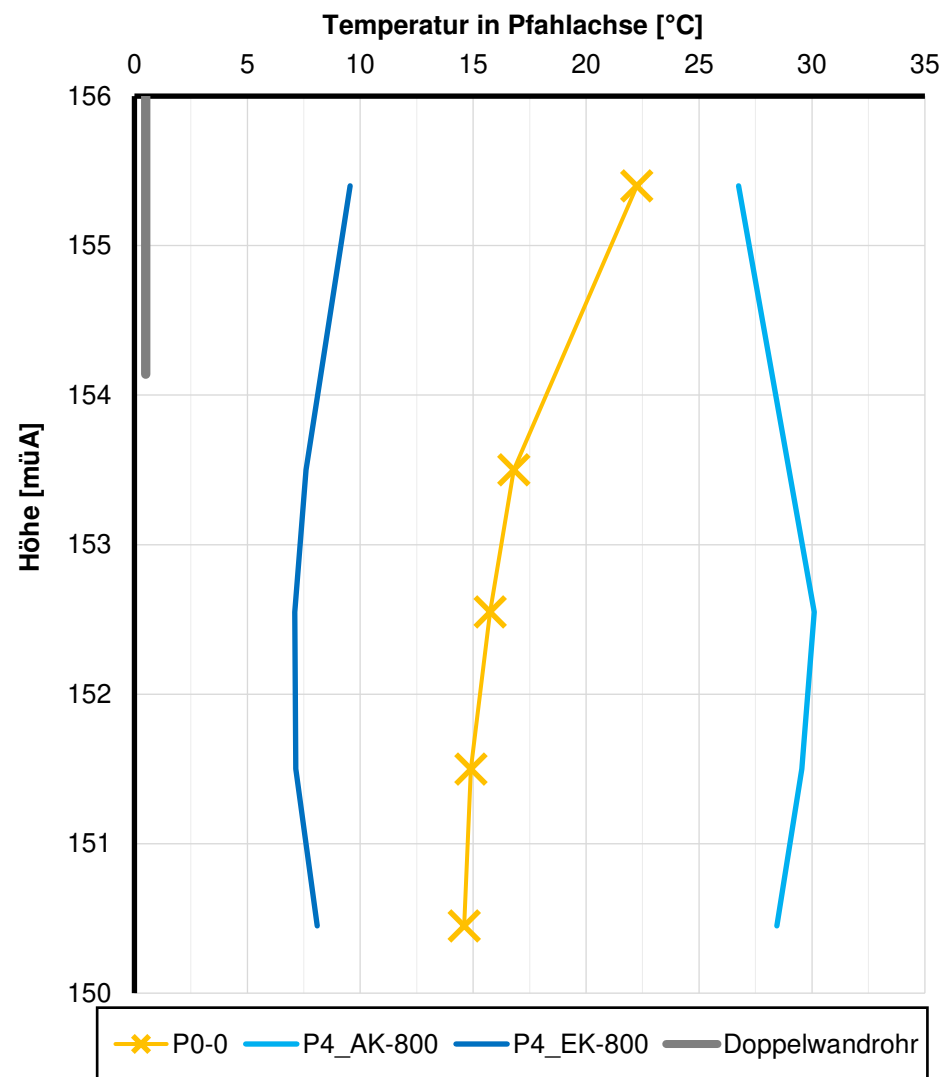
Temperaturverlauf 1,6 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EK

Pfahl

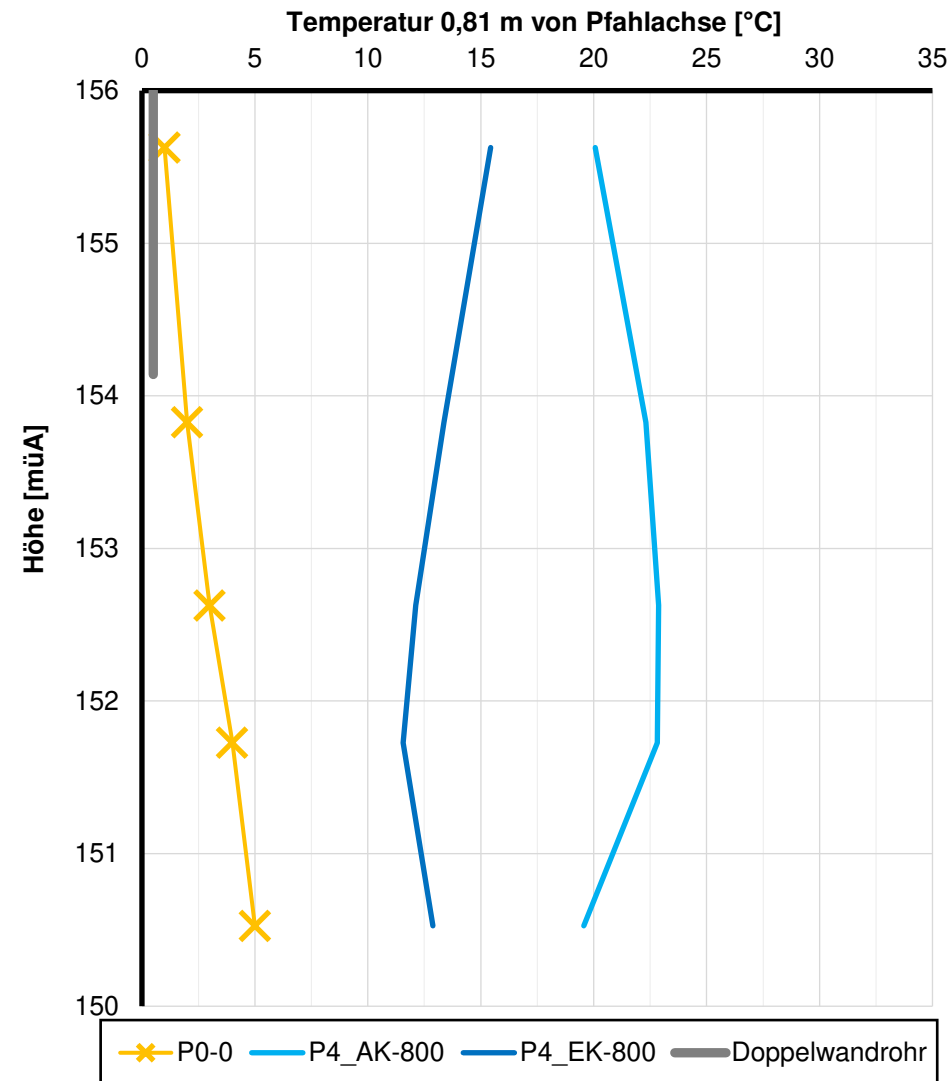
Temperaturverlauf in Pfahlachse



Prüfkörper: B.EK

TS.K

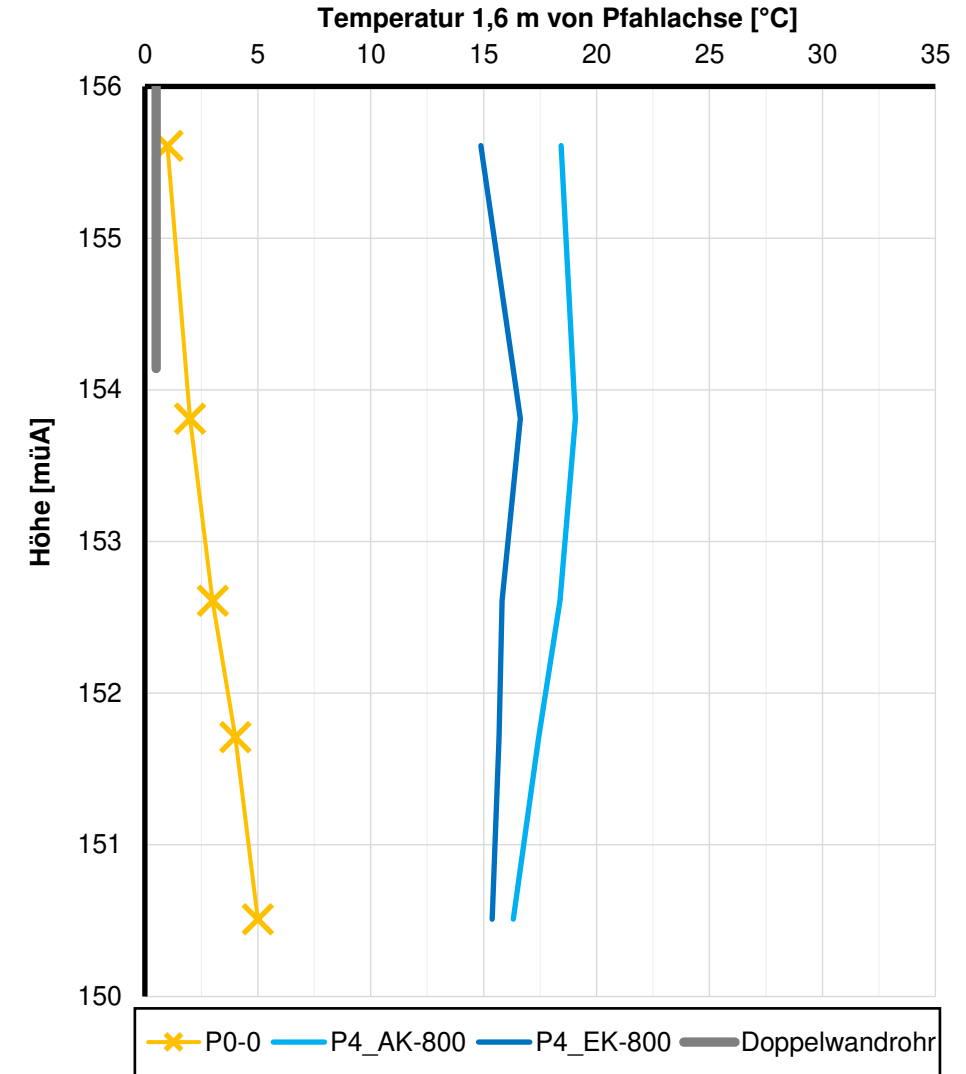
Temperaturverlauf 0,81 m von Pfahlachse



Prüfkörper: B.EK

TS.M2

Temperaturverlauf 1,6 m von Pfahlachse



Ergebnisse Phase 6 B.EK

Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

A U S W E R T U N G

der statischen Pfahlprobebelastung gemäß EA-Pfähle

Status: in Bearbeitung Stand: 01.11.2018

Allgemeine Angaben:

Prüfkörper:	B.EK
Prüffeld:	2
Versuch:	Großbohrpfahl Druck
Bodenschicht Krafteinleitungsstrecke:	Kies

Pfahlinstrumentierung (MWES II):

Kettenextensometer:	ja
Bewehrungssensoren:	nein
Sohldruckmessdose:	nein

Versuchsdaten:

Prüfung Nr.:	94
Prüfdatum:	01.10.2018
Versuchsbeginn:	07:50 Uhr
Versuchsende:	20:47 Uhr
Wetterbedingungen:	heiter, sonnig
besondere Versuchsbedingungen:	Umsetzen Vertikaler Wegaufnehmer 18:15

Geometrie Prüfkörper:

Bohrdurchmesser:	600,00 mm
Querschnittsfläche $A_{ges} =$	282743,34 mm ²
OK Pfahlkopf (Messniveau GBP, DSV):	156,8 müA
Messniveau (Mikropfahl):	0,00 müA
OK Pfahl bzw. GOK:	156,00 müA
OK Haftstrecke:	154,14 müA
UK Pfahl:	150,00 müA
Länge Freispielstrecke:	2,66 m
Länge Haftstrecke:	4,14 m
Pfahllänge:	6,00 m

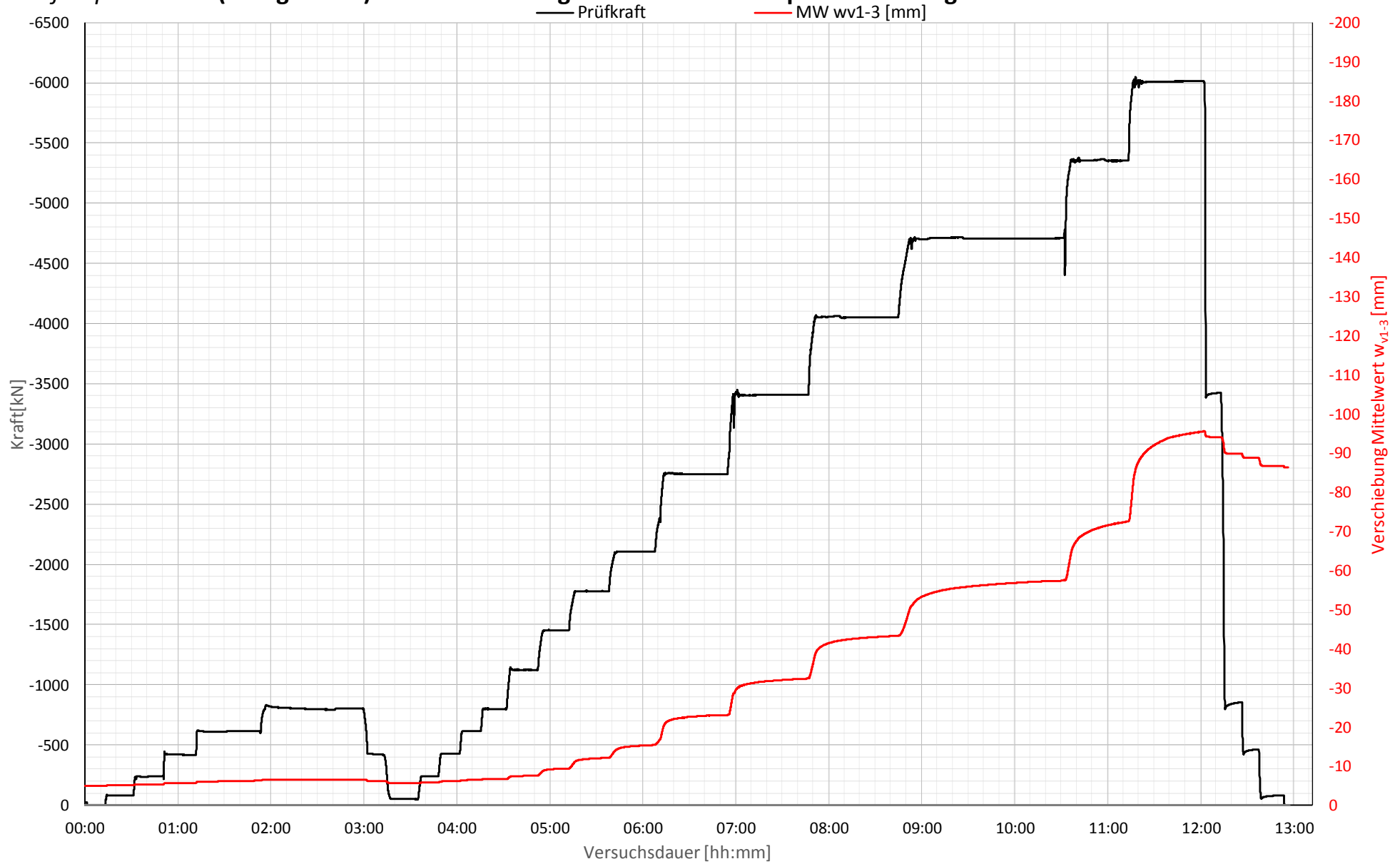
Materialkennwerte:

Betongüte:	C25/30 / BS-TB1	
Zement:	-	
W/B-Wert Zementsuspension:	-	
E-Modul Beton / Zementstein $E_C =$	23,41	kN/mm ²
Typ, Güte Stabstahl (Mikropfahl):	-	
Nennquerschnitt Stabstahl $A_{SS} =$	0,00	mm ²
E-Modul Stabstahl $E_{SS} =$	0,00	kN/mm ²
Güte Bewehrungsstahl:	B 550B	
Gesamtquerschnitt Bewehrung $A_{BS} =$	8920,27	mm ²
E-Modul Bewehrungsstahl $E_{BS} =$	200,00	kN/mm ²
Güte Baustahl:	S235	
Gesamtquerschnitt Stahl $A_S =$	492,88	mm ²
E-Modul Baustahl $E_S =$	200,00	kN/mm ²

Prüfkörper: B.EK (Energie-Kies)

Belastungsstufen und Pfahlkopfverschiebung

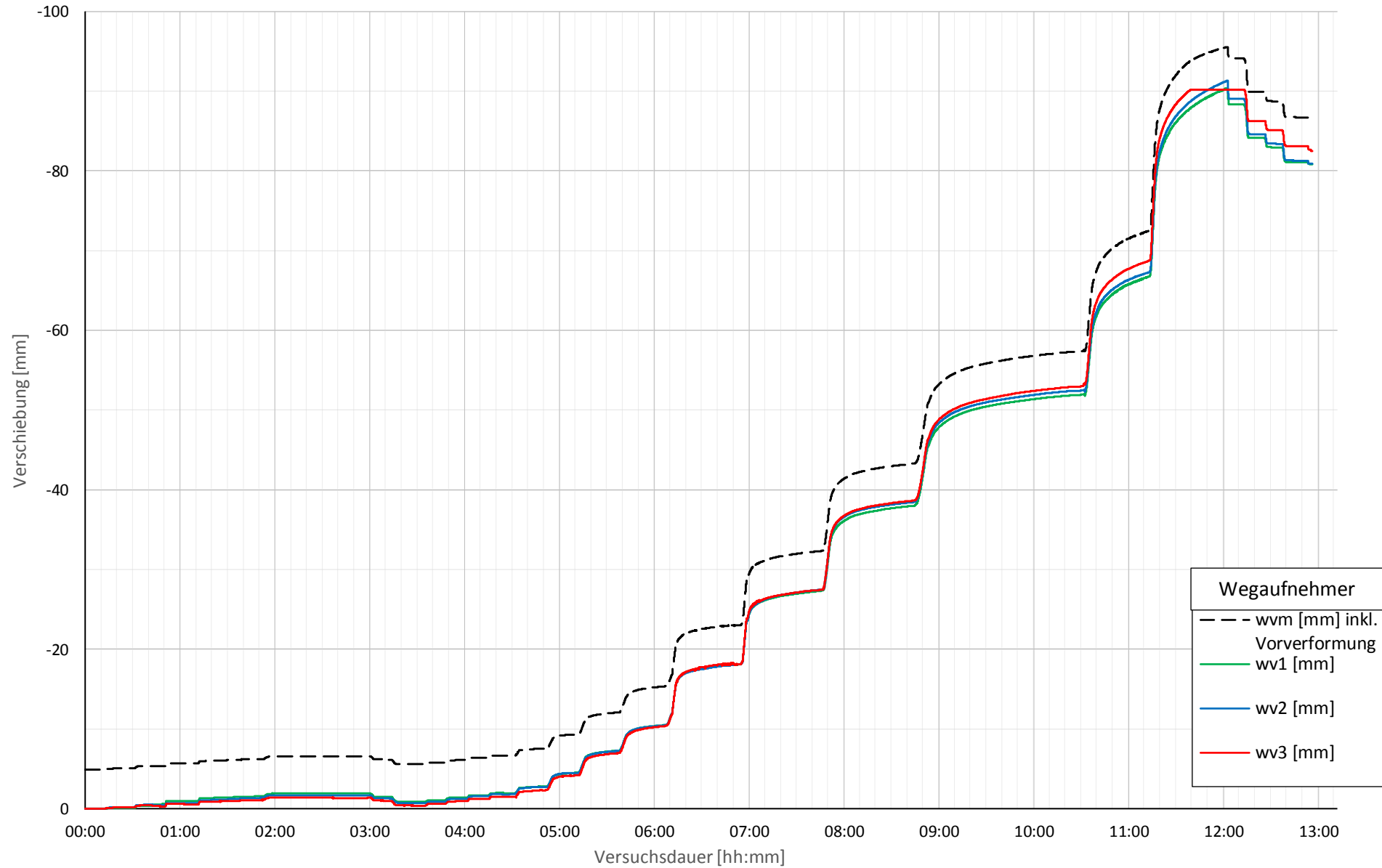
Phase 6



Prüfkörper: B.EK (Energie-Kies)

Pfahlkopfverschiebung: Einzelwerte und Mittelwert

Phase 6



Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"



Prüfkörper: **B.EK (Energie-Kies)**

Auswertung MWES I - Belastungsstufen und Verformungen																									
Laststufen			Prüflast und Verschiebung			Mittelwert der Vertikalverformung ab Beginn LS + Δt [min]														Berechnung Kriechmaß					
LS Nr	LS Beginn [hh:mm]	LS Ende [hh:mm]	P Soll [kN]	P Ist [kN]	$w_{v,m 1-3}$ [mm]	Δt 1 min	Δt 2 min	Δt 5 min	Δt 10 min	Δt 15 min	Δt 20 min	Δt 50 min	Δt 60 min	Δt 70 min	Δt 110 min	Δt 120 min	Δt 150 min	Δt 160 min	Δt 170 min	Δt 1	Δt 2	MW 1	MW 2	Kriechmaß	
						[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[min]	[mm]	[mm]	[mm]
0	08:06	08:21	-50	-239	-5,04																				
1	08:24	08:40	-238	-416	-5,33	-5,31	-5,31	-5,32	-5,34	-5,33											2	15	-5,31	-5,33	-0,02
2	08:43	09:00	-425	-613	-5,65	-5,67	-5,67	-5,66	-5,66	-5,65											2	10	-5,67	-5,66	0,01
3	09:04	09:42	-613	-800	-6,24	-5,98	-5,98	-6,00	-6,04	-6,07	-6,12										20	30	-6,12	-6,20	-0,45
4	09:50	10:50	-800	-419	-6,54	-6,57	-6,58	-6,58	-6,57	-6,57	-6,56	-6,54									2	5	-6,58	-6,58	0,00
5	10:53	11:03	-425	-49	-6,15	-6,21	-6,20	-6,17													0	0	0,00	0,00	0,00
6	11:08	11:23	-50	-240	-5,57	-5,59	-5,59	-5,58	-5,58												0	0	0,00	0,00	0,00
7	11:28	11:38	-238	-426	-5,74	-5,73	-5,74	-5,74													2	5	-5,74	-5,74	0,00
8	11:41	11:52	-425	-616	-6,12	-6,06	-6,07	-6,10	-6,11												5	10	-6,10	-6,11	-0,05
9	11:55	12:05	-613	-799	-6,41	-6,40	-6,40	-6,41													2	5	-6,40	-6,41	-0,02
10	12:08	12:21	-800	-1123	-6,66	-6,66	-6,67	-6,67	-6,65												1	2	-6,66	-6,67	-0,01
11	12:27	12:42	-1125	-1453	-7,51	-7,37	-7,39	-7,43	-7,51												5	10	-7,43	-7,51	-0,26
12	12:48	13:03	-1450	-1778	-9,31	-9,04	-9,10	-9,20	-9,27												5	10	-9,20	-9,27	-0,22
13	13:08	13:27	-1775	-2106	-12,06	-11,47	-11,55	-11,72	-11,88	-11,99											10	15	-11,88	-11,99	-0,65
14	13:35	13:57	-2100	-2750	-15,33	-14,57	-14,67	-14,87	-15,07	-15,19	-15,30										15	20	-15,19	-15,30	-0,84
15	14:06	14:44	-2750	-3408	-23,00	-21,49	-21,67	-22,02	-22,33	-22,55	-22,70										20	30	-22,70	-22,95	-1,41
16	14:54	15:37	-3400	-4051	-32,35	-30,58	-30,77	-31,01	-31,36	-31,60	-31,76										30	40	-32,05	-32,27	-1,77
17	15:43	16:33	-4050	-4709	-43,23	-39,92	-40,28	-40,99	-41,65	-42,09	-42,34										30	40	-42,72	-43,02	-2,33
18	16:47	18:21	-4700	-5352	-57,40	-52,61	-52,87	-53,48	-54,20	-54,73	-55,12	-56,42	-56,70	-56,95							70	90	-56,95	-57,30	-3,21
19	18:33	19:03	-5350	-6009	-72,45	-68,91	-69,17	-69,81	-70,64	-71,27	-71,71										10	20	-70,64	-71,71	-3,55
20	19:15	19:30	-6000	-2540	-93,829726	-90,617	-90,962	-91,85	-92,959												5	10	-91,85	-92,96	-3,68
21	19:54	20:05	-3400	-854	-93,128406	-94,113	-94,111	-94,105	-94,013																
22	20:07	20:17	-800	-464	-89,880881	-89,892	-89,892	-89,891																	
23	20:18	20:28	-425	7	-88,692812	-88,748	-88,742	-88,725																	
24	20:29	20:47	-50	#NV	-86,338591	-86,791	-86,747	-86,731	-86,715	-86,701															

Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"



Prüfkörper: **B.EK (Energie-Kies)**

Auswertung Verformungen MWES II - Bewehrungssensoren																		Pfahlwiderstand DMD			
Laststufen			Messwerte je Laststufe und Höhenlage der BS											Rechenwerte je Messquerschnitt					Sohldruckmessdose SMD		
LS	LS Ende	P Ist	BS1.1 [mm/m]	BS1.2 [mm/m]	BS2.1 [mm/m]	BS2.2 [mm/m]	BS3.1 [mm/m]	BS3.2 [mm/m]	BS4.1 [mm/m]	BS4.2 [mm/m]	BS5.1 [mm/m]	BS5.2 [mm/m]	BS1.MW [mm/m]	BS2.MW [mm/m]	BS3.MW [mm/m]	BS4.MW [mm/m]	BS5.MW [mm/m]	Rb [kN]	Rs [kN]	q _{s,m} [kN/m ²]	
Nr.	[hh:mm]	[kN]	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Höhe:	Mantelreib. Diff Kraft-Rb	
0	08:21	-239	155,60	153,70	153,70	153,70	152,75	152,75	151,70	151,70	150,65	150,65	155,60	153,70	152,75	151,70	150,65	0,00			
1	08:40	-416	-0,0383	-0,0225	-0,0304	-0,0163	-0,0138	-0,0150	-0,0142	-0,0126	-0,0134	-0,0105	-0,0304	-0,0163	-0,0138	-0,0150	-0,0142	0,0	-238,6	-30,6	
2	09:00	-613	-0,0647	-0,0409	-0,0528	-0,0287	-0,0249	-0,0268	-0,0256	-0,0230	-0,0243	-0,0193	-0,0528	-0,0287	-0,0249	-0,0268	-0,0256	0,0	-416,5	-53,4	
3	09:42	-800	-0,0960	-0,0610	-0,0785	-0,0426	-0,0367	-0,0397	-0,0382	-0,0341	-0,0361	-0,0289	-0,0785	-0,0426	-0,0367	-0,0397	-0,0382	0,0	-612,8	-78,5	
4	10:50	-419	-0,1227	-0,0838	-0,1032	-0,0549	-0,0495	-0,0522	-0,0494	-0,0456	-0,0475	-0,0380	-0,1032	-0,0549	-0,0495	-0,0522	-0,0494	0,0	-800,2	-102,5	
5	11:03	-49	-0,0728	-0,0386	-0,0557	-0,0328	-0,0250	-0,0289	-0,0291	-0,0241	-0,0266	-0,0213	-0,0557	-0,0328	-0,0250	-0,0289	-0,0291	0,0	-418,7	-53,7	
6	11:23	-240	-0,0181	0,0016	-0,0083	-0,0083	-0,0004	-0,0043	-0,0064	-0,0016	-0,0040	-0,0038	-0,0083	-0,0043	-0,0004	-0,0028	-0,0017	0,0	-49,0	-6,3	
7	11:38	-426	-0,0488	-0,0160	-0,0324	-0,0215	-0,0114	-0,0164	-0,0180	-0,0118	-0,0149	-0,0122	-0,0324	-0,0215	-0,0114	-0,0164	-0,0180	0,0	-239,5	-30,7	
8	11:52	-616	-0,0768	-0,0355	-0,0561	-0,0340	-0,0230	-0,0285	-0,0295	-0,0223	-0,0259	-0,0211	-0,0561	-0,0340	-0,0230	-0,0285	-0,0295	0,0	-425,9	-54,6	
9	12:05	-799	-0,1032	-0,0567	-0,0800	-0,0461	-0,0348	-0,0405	-0,0403	-0,0332	-0,0368	-0,0298	-0,0800	-0,0461	-0,0348	-0,0405	-0,0403	0,0	-615,5	-78,9	
10	12:21	-1123	-0,1325	-0,0744	-0,1034	-0,0590	-0,0451	-0,0521	-0,0517	-0,0430	-0,0474	-0,0386	-0,1034	-0,0590	-0,0451	-0,0521	-0,0517	0,0	-799,3	-102,4	
11	12:42	-1453	-0,1806	-0,1094	-0,1450	-0,0802	-0,0641	-0,0722	-0,0710	-0,0595	-0,0652	-0,0541	-0,1450	-0,0802	-0,0641	-0,0722	-0,0710	0,0	-1123,4	-144,0	
12	13:03	-1778	-0,2278	-0,1470	-0,1874	-0,1026	-0,0844	-0,0935	-0,0922	-0,0777	-0,0850	-0,0717	-0,1874	-0,1026	-0,0844	-0,0935	-0,0922	0,0	-1453,1	-186,2	
13	13:27	-2106	-0,2776	-0,1832	-0,2304	-0,1276	-0,1050	-0,1163	-0,1157	-0,0960	-0,1058	-0,0908	-0,2304	-0,1276	-0,1050	-0,1163	-0,1157	0,0	-1778,0	-227,8	
14	13:57	-2750	-0,3260	-0,2234	-0,2747	-0,1531	-0,1282	-0,1407	-0,1402	-0,1167	-0,1284	-0,1109	-0,2747	-0,1531	-0,1282	-0,1407	-0,1402	0,0	-2105,5	-269,8	
15	14:44	-3408	-0,4218	-0,3067	-0,3642	-0,2046	-0,1798	-0,1922	-0,1880	-0,1618	-0,1749	-0,1478	-0,3642	-0,2046	-0,1798	-0,1922	-0,1880	0,0	-2749,9	-352,4	
16	15:37	-4051	-0,5240	-0,3915	-0,4577	-0,2573	-0,2341	-0,2457	-0,2342	-0,2110	-0,2226	-0,1812	-0,4577	-0,2573	-0,2341	-0,2457	-0,2342	0,0	-3407,9	-436,7	
17	16:33	-4709	-0,6271	-0,4763	-0,5517	-0,3099	-0,2893	-0,2996	-0,2788	-0,2594	-0,2691	-0,2128	-0,5517	-0,3099	-0,2893	-0,2996	-0,2788	0,0	-4051,0	-519,1	
18	18:21	-5352	-0,7407	-0,5674	-0,6540	-0,3656	-0,3496	-0,3576	-0,3228	-0,3118	-0,3173	-0,2450	-0,6540	-0,3656	-0,3496	-0,3576	-0,3228	0,0	-4709,1	-603,4	
19	19:03	-6009	-0,8481	-0,6555	-0,7518	-0,4155	-0,4062	-0,4109	-0,3633	-0,3601	-0,3617	-0,2783	-0,7518	-0,4155	-0,4062	-0,4109	-0,3633	0,0	-5351,6	-685,8	
20	19:30	-2540	-0,9634	-0,7510	-0,8572	-0,4692	-0,4652	-0,4672	-0,4098	-0,4115	-0,4107	-0,3180	-0,8572	-0,4692	-0,4652	-0,4672	-0,4098	0	-6009,3	-770,1	
21	20:05	-854	-0,5834	-0,4218	-0,5026	-0,2935	-0,2750	-0,2842	-0,2592	-0,2429	-0,2510	-0,1976	-0,5026	-0,2935	-0,2750	-0,2842	-0,2592	0	-2539,5	-325,4	
22	20:17	-464	-0,2142	-0,1098	-0,1620	-0,1103	-0,0782	-0,0943	-0,1014	-0,0577	-0,0795	-0,0684	-0,1620	-0,1103	-0,0782	-0,0943	-0,1014	0	-854,3	-109,5	
23	20:28	7	-0,1501	-0,0613	-0,1057	-0,0778	-0,0450	-0,0614	-0,0735	-0,0253	-0,0494	-0,0473	-0,1057	-0,0778	-0,0450	-0,0614	-0,0735	0	-463,9	-59,4	
24	20:47	#NV	-0,0549	-0,0207	-0,0378	-0,0286	-0,0147	-0,0217	-0,0324	0,0053	-0,0135	-0,0194	-0,0378	-0,0286	-0,0147	-0,0217	PRÜFEN	0	7,0	0,9	

Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

Prüfkörper: **B.EK (Energie-Kies)**

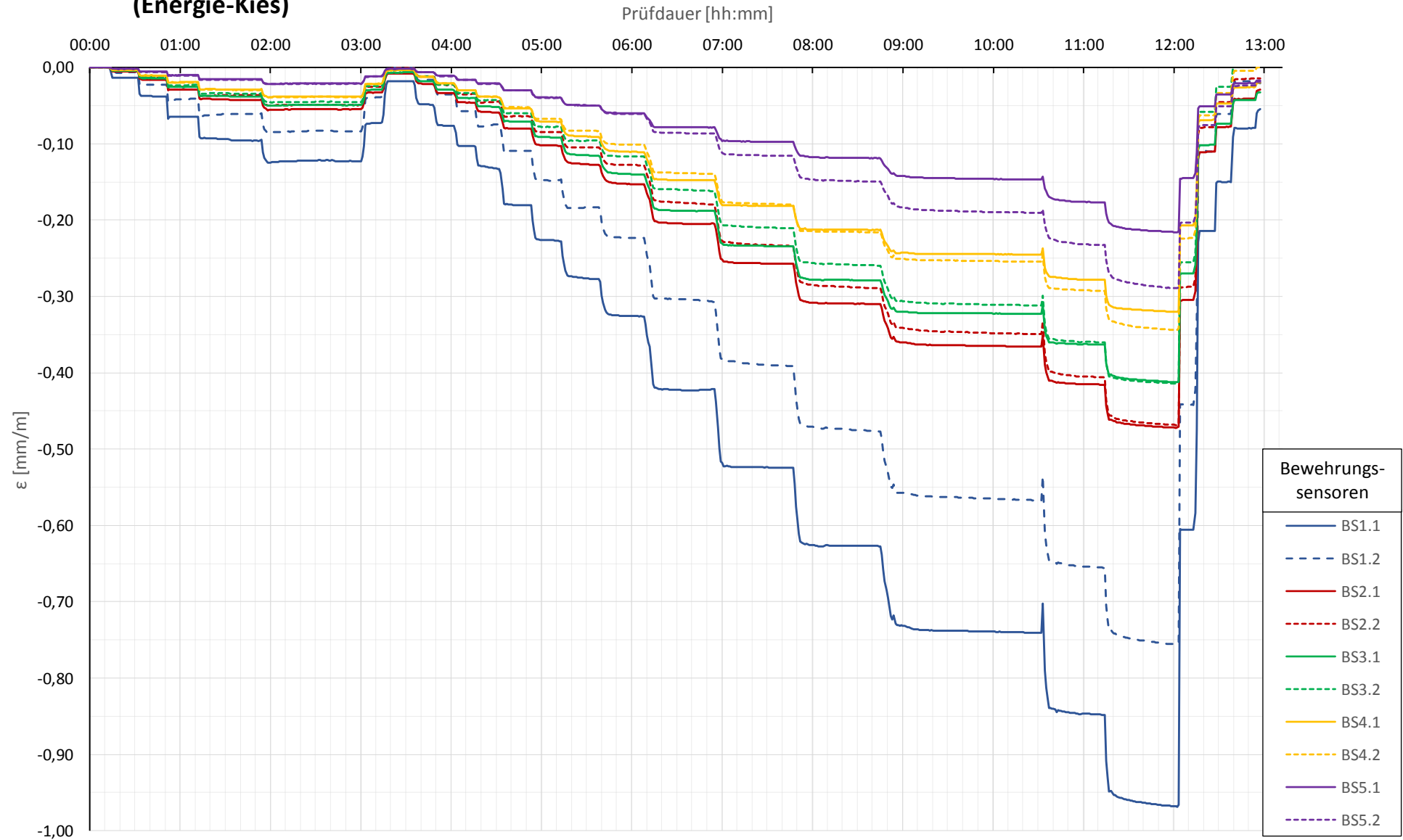
Auswertung MWES II - Kettenextensometer										Berechnung E-Modul und Normalkraft					Anteil der Normalkraft an der Prüfkraft				
Laststufen			Kettenextensometer - Verzerrungen					Normalkraft je Messquerschnitt der BS											
LS	LS Ende	P Ist	KEX1 [mm/m]	KEX2 [mm/m]	KEX3 [mm/m]	KEX4 [mm/m]	KEX5 [mm/m]	N(MQ1) [kN]	N(MQ2) [kN]	N(MQ3) [kN]	N(MQ4) [kN]	N(MQ5) [kN]	N(MQ1) [%]	N(MQ2) [%]	N(MQ3) [%]	N(MQ4) [%]	N(MQ5) [%]		
Nr.	[hh:mm]	[kN]	Höhe / 10 [m]	Höhe / 10 [m]	Höhe / 10 [m]	Höhe / 10 [m]	Höhe / 10 [m]	QS-Nr.: 8	QS-Nr.: 9	QS-Nr.: 10	QS-Nr.: 11	QS-Nr.: 12							
0	08:21	-239	156,65/2,53	154,12/1,02	153,10/1,01	152,09/1,02	151,07/1,02												
1	08:40	-416	-0,0285	-0,0158	-0,0059	-0,0094	-0,0073	-214,4	-133,4	-110,6	-117,9	-111,1	90%	56%	46%	49%	47%		
2	09:00	-613	-0,0498	-0,0309	-0,0204	-0,0199	-0,0109	-372,4	-234,6	-200,3	-210,2	-201,0	89%	56%	48%	50%	48%		
3	09:42	-800	-0,0742	-0,0482	-0,0300	-0,0298	-0,0166	-554,1	-348,3	-295,0	-310,9	-299,5	90%	57%	48%	51%	49%		
4	10:50	-419	-0,0956	-0,0617	-0,0449	-0,0386	-0,0225	-728,5	-448,7	-397,4	-409,0	-387,4	91%	56%	50%	51%	48%		
5	11:03	-49	0,0000	-0,0371	-0,0254	-0,0228	-0,0118	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0%	0%	0%	0%	0%		
6	11:23	-240	-0,0081	-0,0036	-0,0011	-0,0021	-0,0012	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0%	0%	0%	0%	0%		
7	11:38	-426	-0,0313	-0,0170	-0,0103	-0,0140	-0,0068	-228,7	-175,6	-91,4	-128,8	-141,3	95%	73%	38%	54%	59%		
8	11:52	-616	-0,0525	-0,0332	-0,0202	-0,0220	-0,0137	-396,0	-277,9	-223,6	-231,5	-231,5	93%	65%	43%	53%	54%		
9	12:05	-799	0,0000	-0,0483	-0,0312	-0,0318	-0,0196	-564,4	-376,8	-279,7	-317,2	-316,2	92%	61%	45%	52%	51%		
10	12:21	-1123	-0,0966	-0,0619	-0,0445	-0,0400	-0,0227	-729,8	-482,0	-362,6	-408,0	-405,3	91%	60%	45%	51%	51%		
11	12:42	-1453	0,0000	-0,0875	-0,0618	-0,0560	-0,0339	-1023,1	-655,7	-515,4	-565,9	-556,4	91%	58%	46%	50%	50%		
12	13:03	-1778	-0,1729	-0,1128	-0,0845	-0,0761	-0,0448	-1322,7	-838,7	-678,5	-733,2	-722,9	91%	58%	47%	50%	50%		
13	13:27	-2106	-0,2096	-0,1347	-0,1049	-0,0901	-0,0534	-1625,7	-1042,6	-843,7	-911,6	-906,9	91%	59%	47%	51%	51%		
14	13:57	-2750	-0,2498	-0,1654	-0,1272	-0,1152	-0,0676	-1938,5	-1251,0	-1030,7	-1102,7	-1098,8	92%	59%	49%	52%	52%		
15	14:44	-3408	-0,3310	-0,2253	-0,1753	-0,1491	-0,0912	-2570,2	-1671,9	-1445,0	-1506,6	-1473,4	93%	61%	53%	55%	54%		
16	15:37	-4051	-0,4171	-0,2819	-0,2262	-0,1899	-0,1148	-3230,1	-2103,0	-1881,3	-1926,1	-1836,1	95%	62%	55%	57%	54%		
17	16:33	-4709	-0,5045	-0,3394	-0,2710	-0,2277	-0,1404	-3893,2	-2532,8	-2324,7	-2348,5	-2185,6	96%	63%	57%	58%	54%		
18	18:21	-5352	0,0000	-0,4043	-0,3159	-0,2649	-0,1754	-4615,3	-2987,4	-2809,4	-2803,0	-2530,3	98%	63%	60%	60%	54%		
19	19:03	-6009	0,0000	-0,4622	-0,3616	-0,3016	-0,2108	-5305,1	-3395,2	-3264,7	-3220,6	-2847,5	99%	63%	61%	60%	53%		
20	19:30	-2540	0,0000	-0,5200	-0,4095	-0,3500	-0,2497	-6049,1	-3834,2	-3738,3	-3662,2	-3212,5	101%	64%	62%	61%	53%		
21	20:05	-854	0,0000	-0,2519	-0,1854	-0,1620	-0,1215	-3546,6	-2398,0	-2209,8	-2227,9	-2032,0	140%	94%	87%	88%	80%		
22	20:17	-464	0,0000	-0,1122	-0,0829	-0,0756	-0,0528	-1143,2	-901,6	-628,8	-739,1	-794,8	134%	106%	74%	87%	93%		
23	20:28	7	0,0000	-0,0744	-0,0546	-0,0461	-0,0332	-745,8	-635,7	-361,4	-481,1	-576,4	161%	137%	78%	104%	124%		
24	20:47	#NV	0,0000	-0,0244	-0,0155	-0,0103	-0,0108	-266,7	-234,1	-118,4	-170,0		-3817%	-3350%	-1694%	-2433%			

Berechnung der Mantelreibung zwischen den Messquerschnitten										Pfahlwiderstände					
Laststufen			Differenz Längskraft				Mantelreibung				Widerstand errechnet		Widerstand mittels DMD		
LS	LS Ende	P Ist	$\Delta N(MQ1-2)$ [kN]	$\Delta N(MQ2-3)$ [kN]	$\Delta N(MQ3-4)$ [kN]	$\Delta N(MQ4-5)$ [kN]	$q_s(MQ1-2)$ [kN/m ²]	$q_s(MQ2-3)$ [kN/m ²]	$q_s(MQ3-4)$ [kN/m ²]	$q_s(MQ4-5)$ [kN/m ²]	Rb [kN]	Rs [kN]	Rb DMD [kN]	Rs DMD [kN]	diff DMD [kN/m ²]
Nr.	[hh:mm]	[kN]	154,14 144,82	153,50 152,55	152,55 151,50	151,50 150,45									
1	08:40	-416	-81,1	-22,8	7,3	-6,8	-67,2	-12,7	3,7	-3,5	-104,3	-134,3		-238,6	-30,6
2	09:00	-613	-137,8	-34,3	9,9	-9,2	-114,3	-19,2	5,0	-4,6	-172,7	-243,8		-416,5	-53,4
3	09:42	-800	-205,8	-53,3	15,9	-11,4	-170,6	-29,8	8,1	-5,8	-256,1	-356,7		-612,8	-78,5
4	10:50	-419	-279,8	-51,3	11,6	-21,6	-231,9	-28,6	5,9	-10,9	-344,0	-456,2		-800,2	-102,5
5	11:03	-49													
6	11:23	-240													
7	11:38	-426	-53,1	-84,2	37,4	12,5	-44,0	-47,0	18,9	6,3	-85,7	-153,9		-239,5	-30,7
8	11:52	-616	-118,1	-92,7	38,4	7,9	-97,9	-51,7	19,4	4,0	-163,4	-262,5		-425,9	-54,6
9	12:05	-799	-187,5	-97,1	37,4	-1,0	-155,5	-54,2	18,9	-0,5	-248,3	-367,2		-615,5	-78,9
10	12:21	-1123	-247,8	-119,4	45,4	-2,7	-205,4	-66,7	22,9	-1,4	-324,9	-474,4		-799,3	-102,4
11	12:42	-1453	-367,4	-140,3	50,4	-9,5	-304,5	-78,3	25,5	-4,8	-468,0	-655,4		-1123,4	-144,0
12	13:03	-1778	-484,0	-160,2	54,7	-10,3	-401,2	-89,4	27,6	-5,2	-601,2	-851,9		-1453,1	-186,2
13	13:27	-2106	-583,1	-198,9	67,8	-4,7	-483,3	-111,1	34,3	-2,4	-719,5	-1058,6		-1778,0	-227,8
14	13:57	-2750	-687,5	-220,3	72,0	-3,8	-569,9	-123,0	36,4	-1,9	-840,1	-1265,4		-2105,5	-269,8
15	14:44	-3408	-898,4	-226,9	61,6	-33,2	-744,7	-126,7	31,1	-16,8	-1101,4	-1648,6		-2749,9	-352,4
16	15:37	-4051	-1127,1	-221,7	44,9	-90,1	-934,3	-123,8	22,7	-45,5	-1406,3	-2001,6		-3407,9	-436,7
17	16:33	-4709	-1360,5	-208,1	23,9	-162,9	-1127,7	-116,2	12,1	-82,3	-1729,8	-2321,1		-4051,0	-519,1
18	18:21	-5352	-1627,9	-178,0	-6,4	-272,7	-1349,4	-99,4	-3,2	-137,8	-2122,2	-2586,9		-4709,1	-603,4
19	19:03	-6009	-1909,9	-130,5	-44,1	-373,2	-1583,2	-72,9	-22,3	-188,5	-2508,5	-2843,2		-5351,6	-685,8
20	19:30	-2540	-2215,0	-95,8	-76,2	-449,7	-1836,1	-53,5	-38,5	-227,2	-2898,0	-3111,3		-6009,3	-770,1

Prüfkörper: **B.EK**
(Energie-Kies)

Bewehrungssensoren

Phase 6

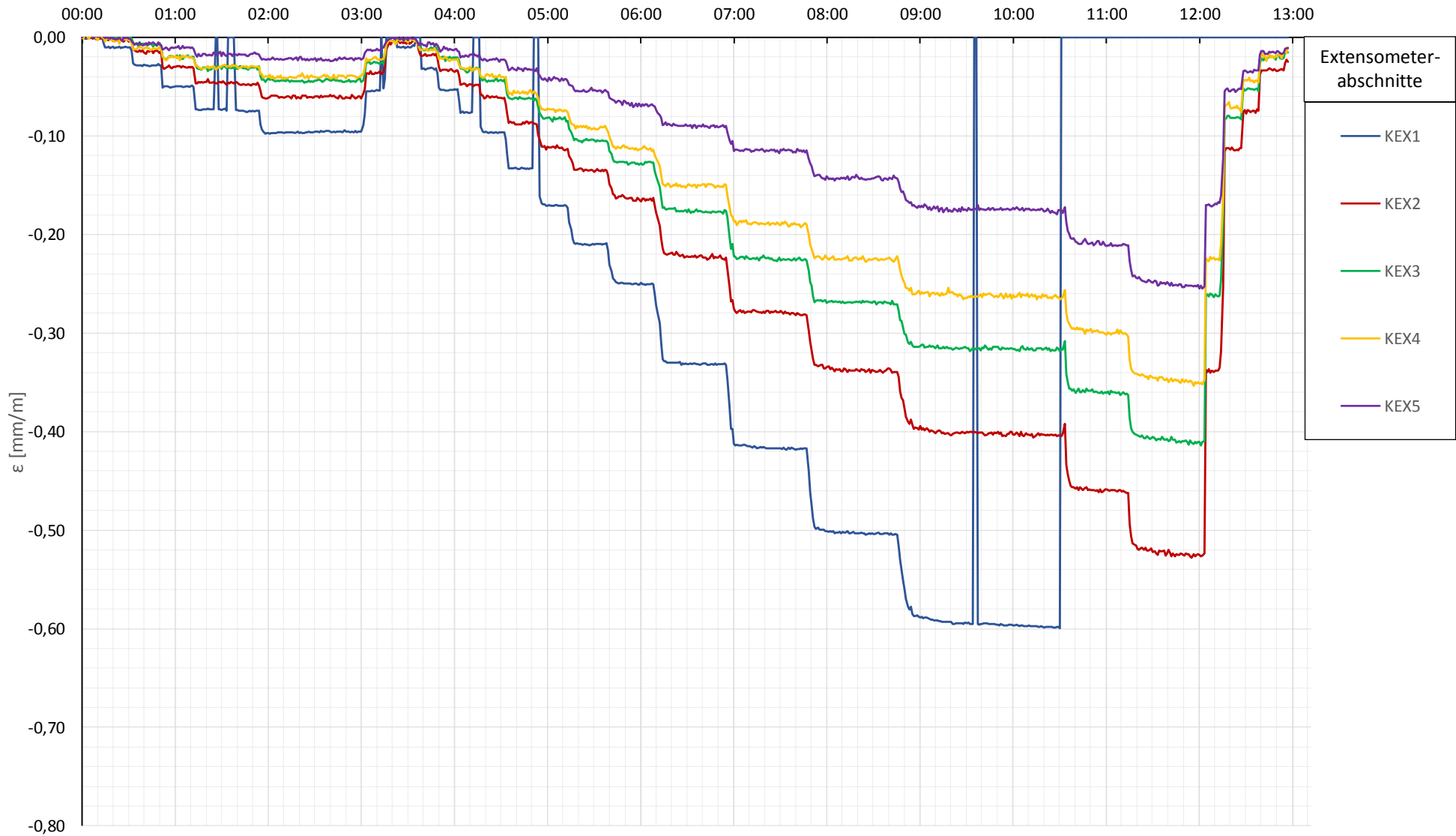


Prüfkörper: **B.EK**
(Energie-Kies)

Kettenextensometer

Phase 6

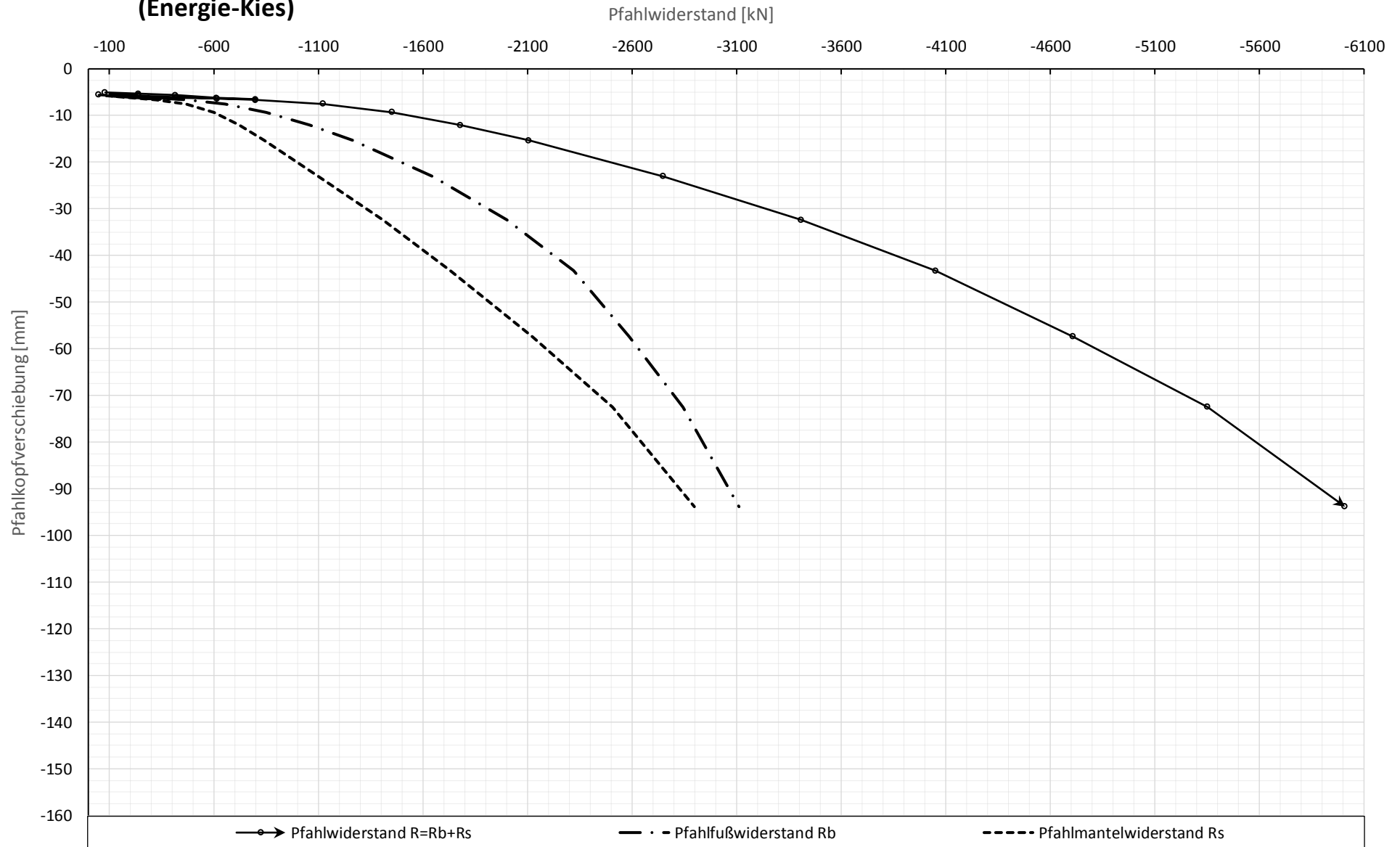
Prüfdauer [hh:mm]



Prüfkörper: **B.EK**
(Energie-Kies)

Widerstands-Setzungslinie

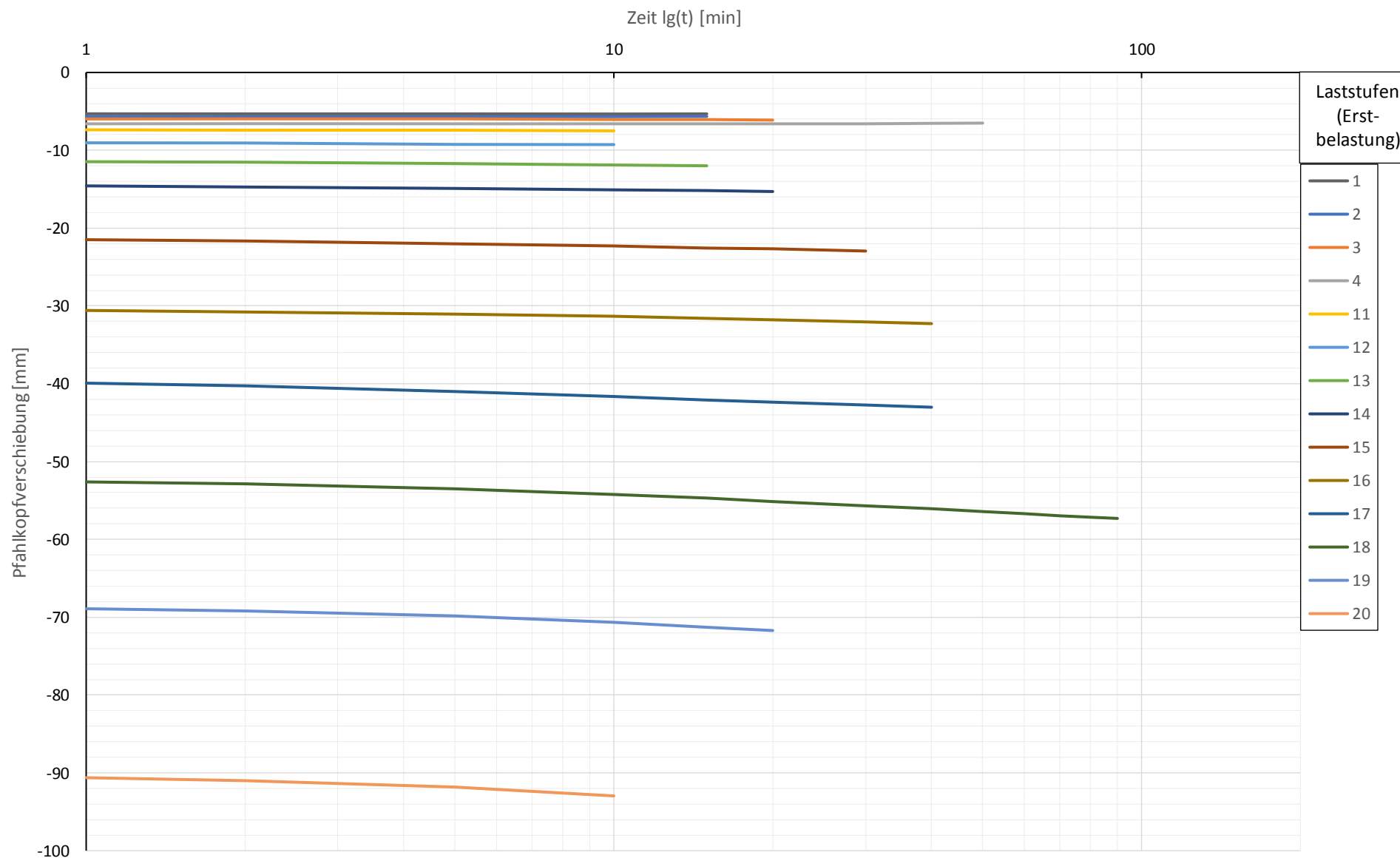
Phase 6



Prüfkörper: B.EK (Energie-Kies)

Zeitverformung

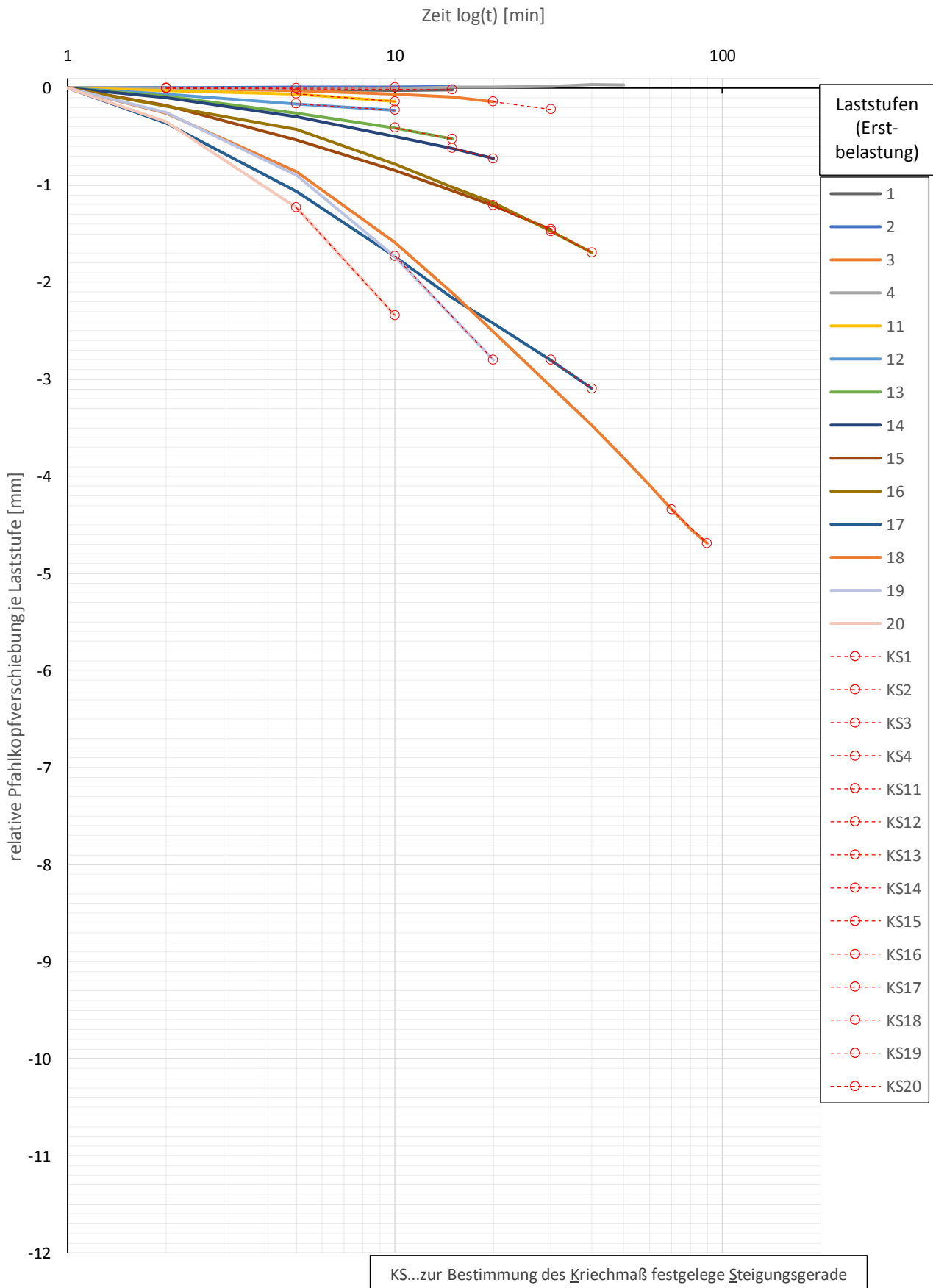
Phase 6



Prüfkörper: B.EK
(Energie-Kies)

Zeitverformung

Phase 6

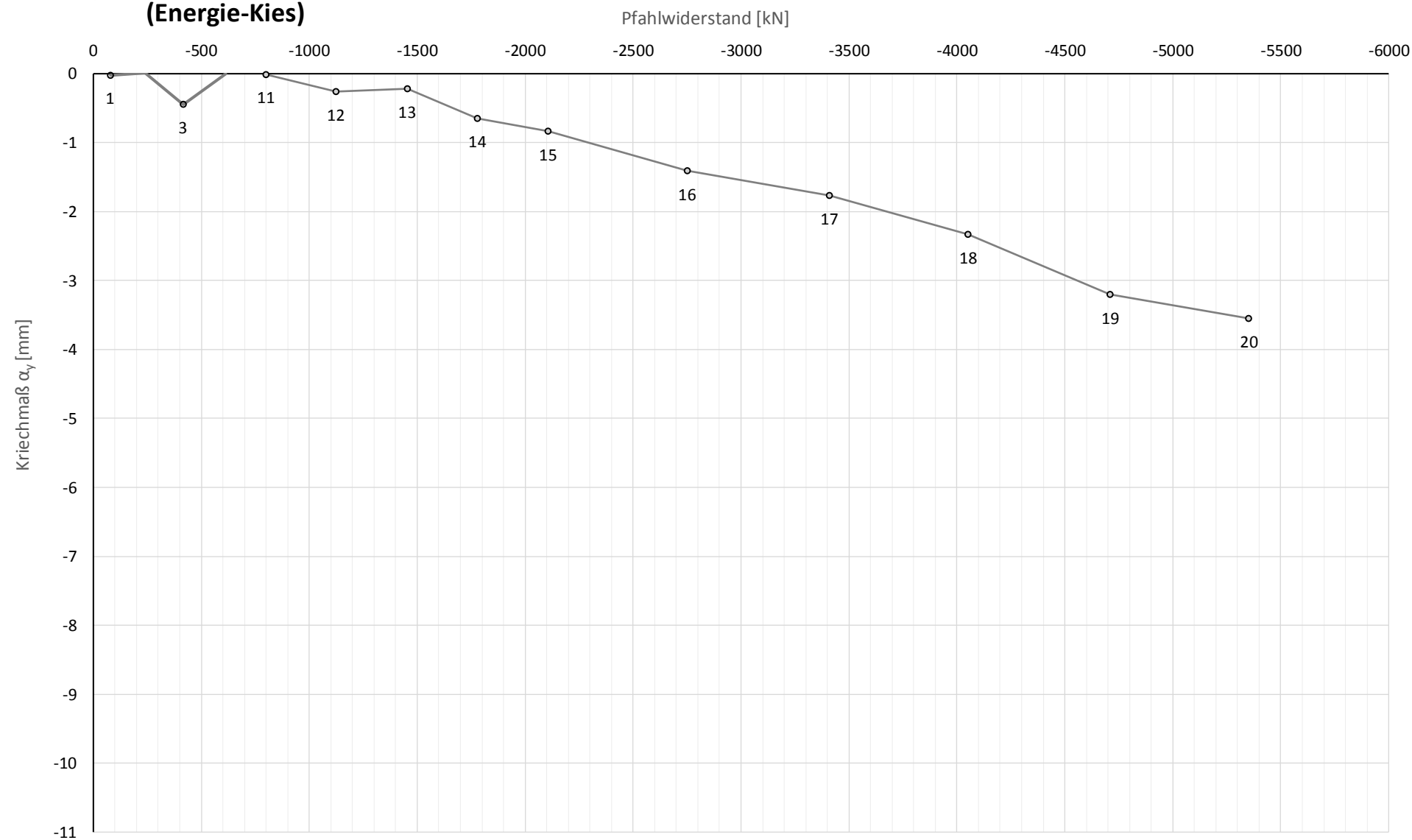


Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper: **B.EK**
(Energie-Kies)

Widerstands-Kriechmaßlinie

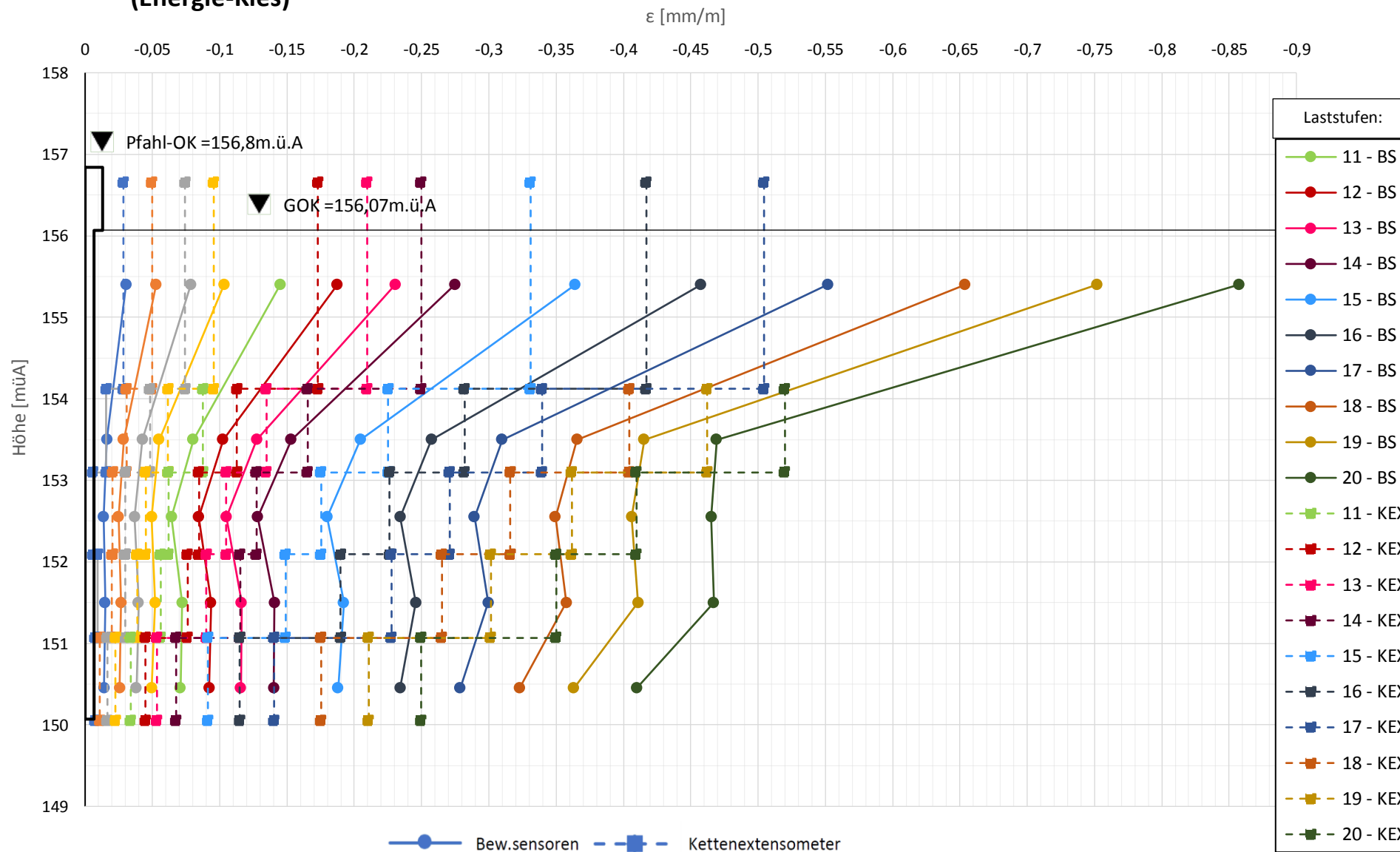
Phase 6



Prüfkörper: **B.EK**
(Energie-Kies)

Verlauf der axialen Längenänderung je Laststufe

Phase 6



Ergebnisse B.K55

Forschungsprojekt "Unteres Hausfeld"

AUSWERTUNG

der statischen Pfahlprobelastung gemäß EA-Pfähle

Status: **in Bearbeitung** Stand: 25.10.2018

Allgemeine Angaben:

Prüfkörper:	B.K55
Prüffeld:	2
Versuch:	Großbohrpfahl Druck
Bodenschicht Krafteinleitungsstrecke:	Kies

Pfahlinstrumentierung (MWES II):

Kettenextensometer:	ja
Bewehrungssensoren:	nein
Sohldruckmessdose:	nein

Versuchsdaten:

Prüfung Nr.:	7
Prüfdatum:	12.07.2017
Versuchsbeginn:	07:49 Uhr
Versuchsende:	23:03 Uhr
Wetterbedingungen:	7:00h 24°C heiter
besondere Versuchsbedingungen:	

Geometrie Prüfkörper:

Bohrdurchmesser:	600,00 mm
Querschnittsfläche A_{ges} =	282743,34 mm ²
OK Pfahlkopf (Messniveau GBP, DSV):	156,84 müA
Messniveau (Mikropfahl):	0,00 müA
OK Pfahl bzw. GOK:	156,07 müA
OK Haftstrecke:	154,21 müA
UK Pfahl:	150,07 müA
Länge Freispielstrecke:	2,63 m
Länge Haftstrecke:	4,14 m
Pfahllänge:	6,00 m

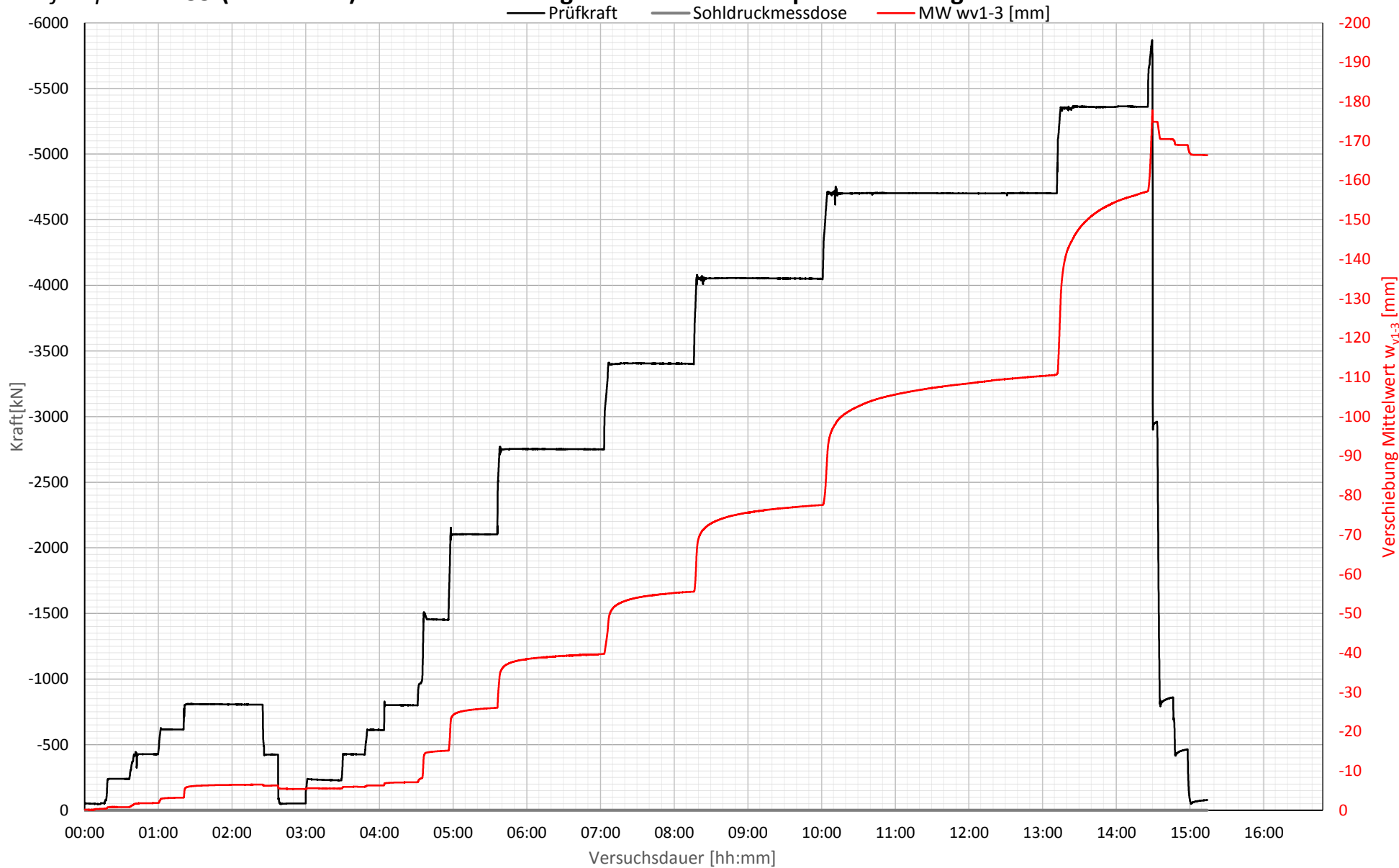
Materialkennwerte:

Betongüte:	C25/30 / BS-TB1	
Zement:	-	
W/B-Wert Zementsuspension:	-	
E-Modul Beton / Zementstein E_C =	37,00	kN/mm ²
Typ, Güte Stabstahl (Mikropfahl):	-	
Nennquerschnitt Stabstahl A_{SS} =	0,00	mm ²
E-Modul Stabstahl E_{SS} =	0,00	kN/mm ²
Güte Bewehrungsstahl:	B 550B	
Gesamtquerschnitt Bewehrung A_{BS} =	8256,00	mm ²
E-Modul Bewehrungsstahl E_{BS} =	200,00	kN/mm ²
Güte Baustahl:	S235	
Gesamtquerschnitt Stahl A_S =	8712,88	mm ²
E-Modul Baustahl E_S =	200,00	kN/mm ²

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar. The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

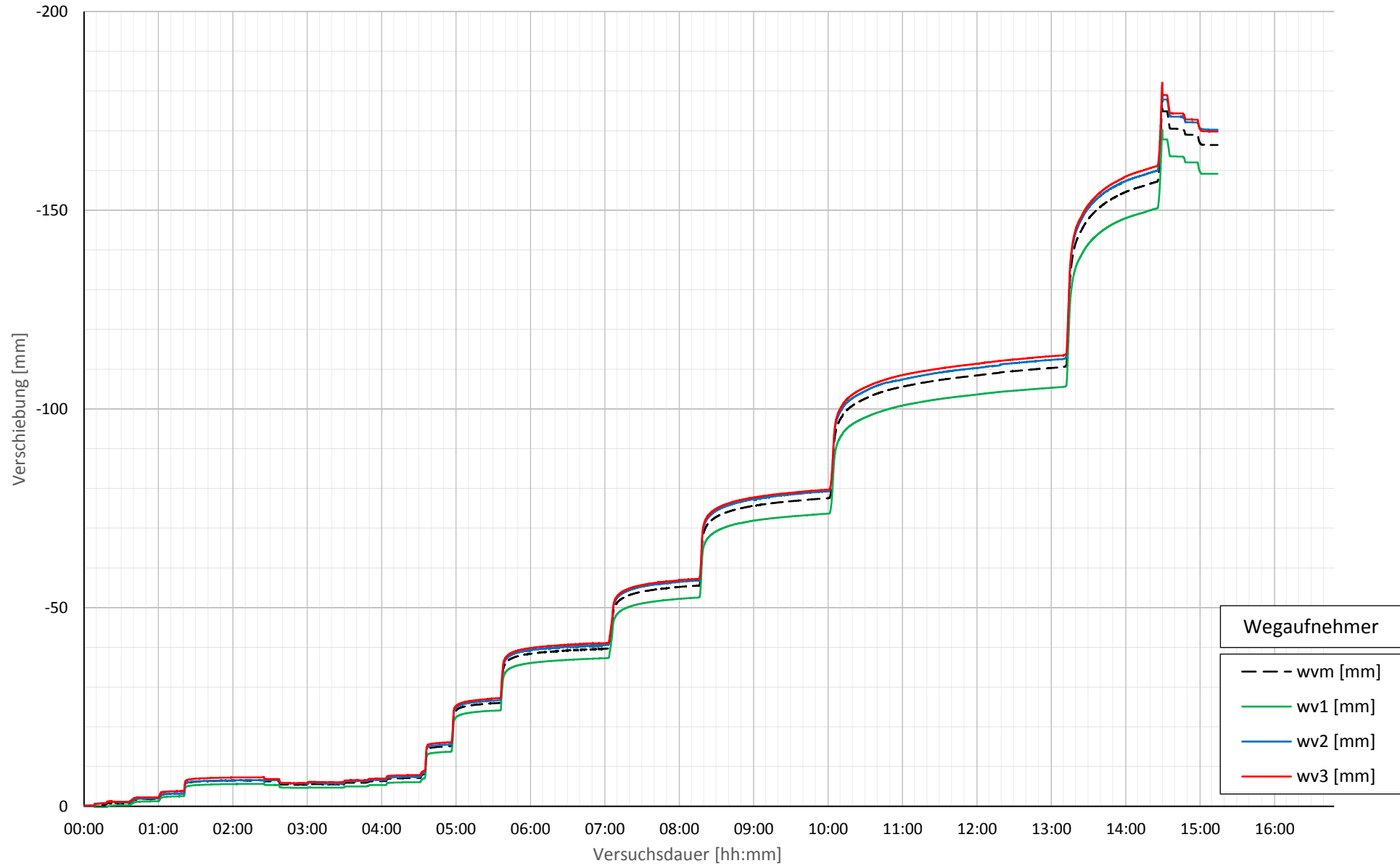
Prüfkörper: B.K55 (Kies-Druck)

Belastungsstufen und Pfahlkopfverschiebung



Prüfkörper: B.K55 (Kies-Druck)

Pfahlkopfverschiebung: Einzelwerte und Mittelwert



Prüfkörper: B.K55 (Kies-Druck)

Auswertung MWES I - Belastungsstufen und Verformungen																									
Laststufen			Prüflast und Verschiebung			Mittelwert der Vertikalverformung ab Beginn LS + Δt [min]														Berechnung Kriechmaß					
LS Nr	LS Beginn [hh:mm]	LS Ende [hh:mm]	P Soll [kN]	P Ist [kN]	w _{v,m 1-3} [mm]	Δt 1 min [min]	Δt 2 min [min]	Δt 5 min [min]	Δt 10 min [min]	Δt 15 min [min]	Δt 20 min [min]	Δt 50 min [min]	Δt 60 min [min]	Δt 70 min [min]	Δt 110 min [min]	Δt 120 min [min]	Δt 150 min [min]	Δt 160 min [min]	Δt 170 min [min]	Δt 1 [min]	Δt 2 [mm]	MW 1 [mm]	MW 2 [mm]	Kriechmaß [mm]	
0	07:49	08:05	-50	-239	-0,41																				
1	08:09	08:24	-238	-427	-0,81	-0,83	-0,83	-0,83	-0,82												2	10	-0,83	-0,82	0,02
2	08:32	08:47	-425	-615	-1,83	-1,77	-1,77	-1,79	-1,81												2	10	-1,77	-1,81	-0,06
3	08:51	09:07	-613	-805	-3,19	-2,97	-3,02	-3,09	-3,16	-3,18											5	15	-3,09	-3,18	-0,19
4	09:11	10:12	-800	-425	-6,51	-5,86	-5,95	-6,10	-6,23	-6,29	-6,35	-6,49	-6,52								40	60	-6,48	-6,52	-0,21
5	10:15	10:25	-425	-52	-6,28	-6,27	-6,26	-6,26																	
6	10:29	10:44	-50	-229	-5,44	-5,48	-5,47	-5,45	-5,39																
7	10:50	11:15	-238	-426	-5,50	-5,62	-5,62	-5,60	-5,57	-5,48	-5,54										10	20	-5,57	-5,54	0,09
8	11:19	11:35	-425	-611	-5,95	-5,94	-5,94	-5,95	-5,99	-5,95											5	15	-5,95	-5,95	0,01
9	11:39	11:51	-613	-800	-6,32	-6,31	-6,31	-6,32	-6,32												2	10	-6,31	-6,32	-0,01
10	11:53	12:18	-800	-1451	-7,12	-6,90	-6,93	-6,99	-7,05	-7,08	-7,11										10	20	-7,05	-7,11	-0,18
11	12:27	12:43	-1450	-2102	-15,12	-14,69	-14,75	-14,87	-15,00	-15,10											5	15	-14,87	-15,10	-0,47
12	12:47	13:23	-2100	-2751	-25,99	-23,78	-24,17	-24,75	-25,19	-25,44	-25,62										15	30	-25,44	-25,88	-1,46
13	13:28	14:50	-2750	-3403	-39,63	-36,07	-36,44	-37,11	-37,72	-38,10	-38,34	-39,21	-39,36	-39,45							60	80	-39,36	-39,63	-2,17
14	14:57	16:04	-3400	-4050	-55,52	-50,86	-51,29	-52,13	-52,93	-53,49	-53,88	-55,13	-55,39								40	60	-54,82	-55,39	-3,22
15	16:14	17:49	-4050	-4701	-77,53	-71,99	-72,24	-72,87	-73,62	-74,19	-74,66	-76,28	-76,63	-76,91							70	90	-76,91	-77,43	-4,82
16	18:02	20:56	-4700	-5361	-110,47	-99,35	-99,67	-100,46	-101,51	-102,30	-103,04	-105,79	-106,40	-106,93	-108,54	-108,91	-109,88	-110,15	-110,38		140	170	-109,59	-110,38	-9,29
17	21:12	22:12	-5350	-5863	-156,99	-144,82	-145,43	-147,01	-148,97	-150,47	-151,71	-156,00									30	50	-153,57	-156,00	-10,93
18	22:15	22:18	-6000	-860	-175,35	-160,67	-166,89																		
19	22:25	22:35	-800	-461	-170,46	-170,50	-170,50	-170,49																	
20	22:37	22:45	-425	-78	-168,97677	-169,02	-169	-168,99																	
21	22:47	23:03	-50	#NV	-166,41194	-167,48	-166,85	-166,47	-166,43	-166,42															

Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
 The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper: B.K55 (Kies-Druck)

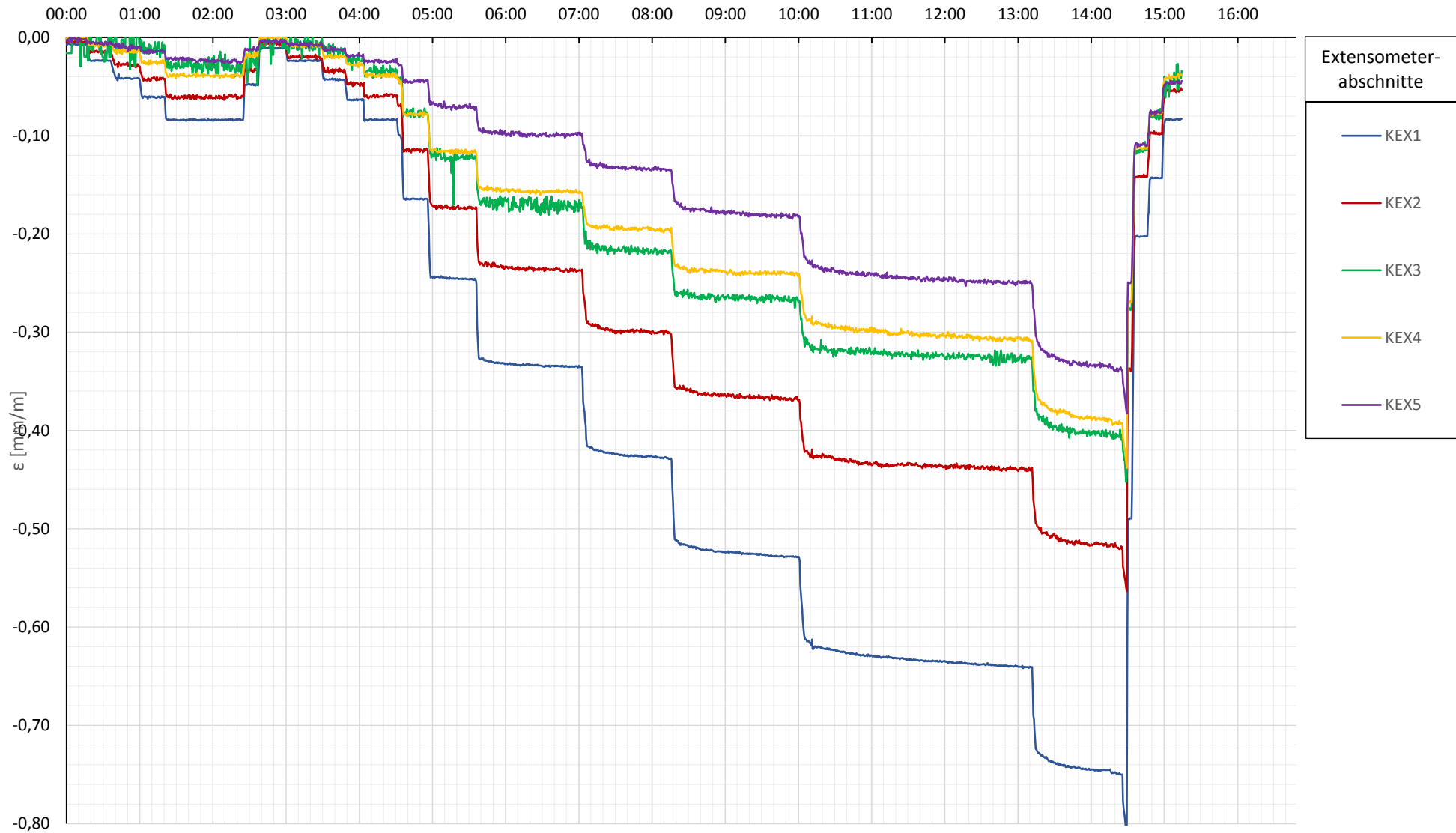
Auswertung MWES II - Kettenextensometer								Berechnung E-Modul und Normalkraft									
Laststufen			Kettenextensometer - Verzerrungen					Normalkraft je Messquerschnitt der BS					Anteil der Normalkraft an der Prüfkraft				
LS	LS Ende	P Ist	KEX1 [mm/m]	KEX2 [mm/m]	KEX3 [mm/m]	KEX4 [mm/m]	KEX5 [mm/m]	N(MQ1) [kN]	N(MQ2) [kN]	N(MQ3) [kN]	N(MQ4) [kN]	N(MQ5) [kN]	N(MQ1) [%]	N(MQ2) [%]	N(MQ3) [%]	N(MQ4) [%]	N(MQ5) [%]
Nr.	[hh:mm]	[kN]	Höhe / l0 [m]	Höhe / l0 [m]	Höhe / l0 [m]	Höhe / l0 [m]	Höhe / l0 [m]	QS-Nr.:	QS-Nr.:	QS-Nr.:	QS-Nr.:	QS-Nr.:					
0	08:05	-239	156,68/2,50	154,18/0,94	153,24/0,95	152,29/0,94	151,35/0,94	8	9	10	11	12					
1	08:24	-427	-0,0238	-0,0156	-0,0202	-0,0056	-0,0044	-209,6	-185,3	-237,7	-64,8	-51,2	88%	78%	100%	27%	21%
2	08:47	-615	-0,0413	-0,0271	0,0087	-0,0120	-0,0095	-363,8	-322,0	103,0	-138,6	-109,7	85%	75%	-24%	32%	26%
3	09:07	-805	-0,0599	-0,0413	-0,0143	-0,0259	-0,0128	-527,5	-491,0	-168,0	-299,6	-148,5	86%	80%	27%	49%	24%
4	10:12	-425	-0,0840	-0,0616	-0,0390	-0,0395	-0,0246	-740,3	-732,8	-459,7	-457,4	-284,7	92%	91%	57%	57%	35%
5	10:25	-52	-0,0477	-0,0331	-0,0330	-0,0183	-0,0116	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
6	10:44	-229	-0,0111	-0,0066	0,0274	0,0019	-0,0044	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
7	11:15	-426	-0,0241	-0,0206	-0,0103	-0,0076	-0,0088	-212,5	-244,7	-121,8	-88,3	-102,3	93%	107%	53%	39%	45%
8	11:35	-611	-0,0435	-0,0342	-0,0128	-0,0204	-0,0142	-383,2	-407,0	-150,4	-236,8	-165,0	90%	96%	35%	56%	39%
9	11:51	-800	-0,0643	-0,0475	-0,0245	-0,0269	-0,0192	-566,5	-564,9	-288,8	-311,4	-221,9	93%	92%	47%	51%	36%
10	12:18	-1451	-0,0836	-0,0588	-0,0387	-0,0403	-0,0239	-736,5	-699,0	-456,5	-466,6	-277,1	92%	87%	57%	58%	35%
11	12:43	-2102	-0,1644	-0,1141	-0,0772	-0,0787	-0,0436	-1448,6	-1356,5	-909,4	-911,4	-505,5	100%	93%	63%	63%	35%
12	13:23	-2751	-0,2469	-0,1738	-0,1233	-0,1169	-0,0719	-2175,6	-2067,4	-1453,5	-1353,9	-833,2	103%	98%	69%	64%	40%
13	14:50	-3403	-0,3353	-0,2372	-0,1716	-0,1576	-0,0970	-2954,9	-2820,6	-2021,8	-1825,8	-1123,6	107%	103%	74%	66%	41%
14	16:04	-4050	-0,4285	-0,3011	-0,2160	-0,1985	-0,1356	-3776,0	-3580,2	-2545,7	-2299,4	-1570,5	111%	105%	75%	68%	46%
15	17:49	-4701	-0,5283	-0,3704	-0,2694	-0,2408	-0,1831	-4655,3	-4405,2	-3174,9	-2790,0	-2120,9	115%	109%	78%	69%	52%
16	20:56	-5361	-0,6411	-0,4415	-0,3253	-0,3053	-0,2496	-5648,8	-5251,0	-3833,4	-3536,8	-2891,7	120%	112%	82%	75%	62%
17	22:12	-5863	-0,7487	-0,5208	-0,4063	-0,3902	-0,3375	-6597,3	-6193,8	-4787,9	-4521,1	-3909,9	123%	116%	89%	84%	73%
18	22:18	-860	-0,8117	-0,5635	-0,4476	-0,4381	-0,3825	-7152,7	-6701,4	-5274,6	-5076,0	-4431,5	122%	114%	90%	87%	76%
19	22:35	-461	-0,2023	-0,1390	-0,1143	-0,1095	-0,1099	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
20	22:45	-78	-0,1433	-0,0988	-0,0779	-0,0764	-0,0769	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					
21	23:03	#NV	-0,0829	-0,0535	-0,0341	-0,0382	-0,0443	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0					

Berechnung der Mantelreibung zwischen den Messquerschnitten								Pfahlwiderstände							
Laststufen			Differenz Längskraft				Mantelreibung				Widerstand errechnet		Widerstand mittels DMD		
LS	LS Ende	P Ist	$\Delta N(MQ1-2)$ [kN]	$\Delta N(MQ2-3)$ [kN]	$\Delta N(MQ3-4)$ [kN]	$\Delta N(MQ4-5)$ [kN]	$q_s(MQ1-2)$ [kN/m ²]	$q_s(MQ2-3)$ [kN/m ²]	$q_s(MQ3-4)$ [kN/m ²]	$q_s(MQ4-5)$ [kN/m ²]	Rb [kN]	Rs [kN]	Rb DMD [kN]	Rs DMD [kN]	diff DMD [kN/m ²]
Nr.	[hh:mm]	[kN]	154,21	154,18	153,24	152,29									
0	08:05	-239	144,82	153,24	152,29	151,35									
1	08:24	-427	-24,3	52,4	-172,9	-13,6	-429,5	29,6	-96,6	-7,7	-164,3	-74,4		-238,6	-30,6
2	08:47	-615	-41,8	-425,0	241,7	-28,9	-739,1	-239,9	135,0	-16,3	-266,6	-160,3		-426,9	-54,7
3	09:07	-805	-36,5	-323,0	131,6	-151,1	-645,4	-182,3	73,5	-85,3	-444,5	-170,6		-615,0	-78,8
4	10:12	-425	-7,5	-273,1	-2,3	-172,7	-133,2	-154,1	-1,3	-97,5	-530,5	-274,5		-805,0	-103,2
5	10:25	-52													
6	10:44	-229													
7	11:15	-426	32,3	-122,9	-33,5	14,0	570,6	-69,4	-18,7	7,9	-104,1	-124,8		-228,9	-29,3
8	11:35	-611	23,8	-256,6	86,3	-71,8	421,0	-144,8	48,2	-40,5	-249,3	-176,5		-425,9	-54,6
9	11:51	-800	-1,6	-276,1	22,6	-89,5	-28,5	-155,8	12,6	-50,5	-383,4	-227,9		-611,2	-78,3
10	12:18	-1451	-37,5	-242,5	10,1	-189,4	-663,9	-136,9	5,7	-106,9	-541,5	-258,9		-800,4	-102,6
11	12:43	-2102	-92,1	-447,1	2,0	-406,0	-1627,8	-252,3	1,1	-229,1	-1119,1	-332,1		-1451,1	-186,0
12	13:23	-2751	-108,2	-613,9	-99,6	-520,7	-1913,5	-346,5	-55,6	-293,9	-1568,1	-534,0		-2102,1	-269,4
13	14:50	-3403	-134,2	-798,8	-196,0	-702,3	-2373,9	-450,8	-109,5	-396,3	-2135,7	-614,8		-2750,5	-352,5
14	16:04	-4050	-195,8	-1034,6	-246,2	-728,9	-3462,4	-583,9	-137,5	-411,4	-2521,4	-882,0		-3403,4	-436,1
15	17:49	-4701	-250,2	-1230,3	-384,9	-669,1	-4424,4	-694,4	-214,9	-377,6	-2824,5	-1225,6		-4050,1	-519,0
16	20:56	-5361	-397,8	-1417,6	-296,6	-645,1	-7035,4	-800,1	-165,6	-364,1	-3036,7	-1664,0		-4700,7	-602,4
17	22:12	-5863	-403,5	-1406,0	-266,8	-611,2	-7135,7	-793,5	-149,0	-344,9	-2952,3	-2408,2		-5360,5	-686,9
18	22:18	-860	-451,3	-1426,8	-198,6	-644,5	-7981,2	-805,2	-110,9	-363,8	-3000,6	-2862,6		-5863,2	-751,3

Prüfkörper: B.K55
(Kies-Druck)

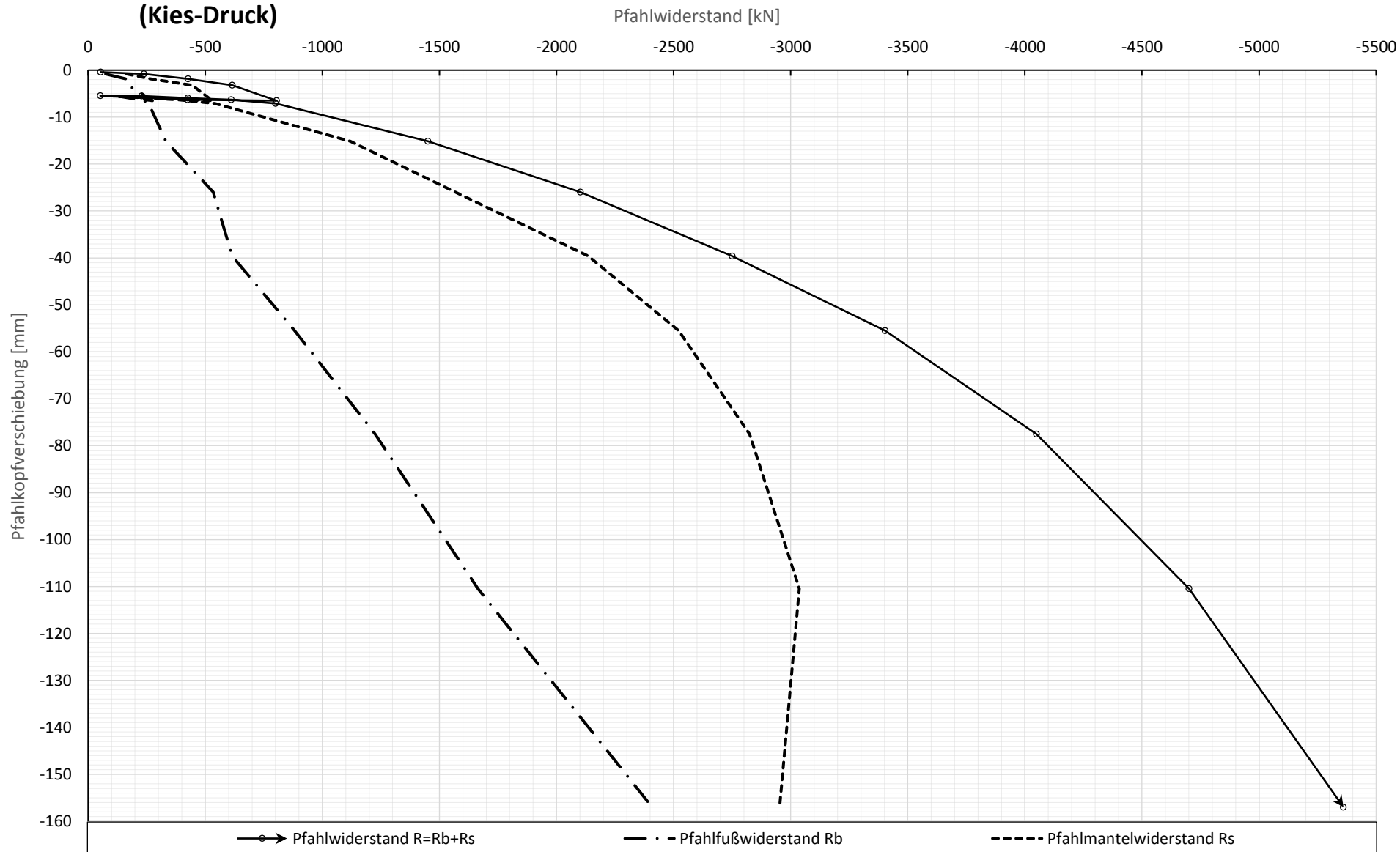
Kettenextensometer

Prüfdauer [hh:mm]



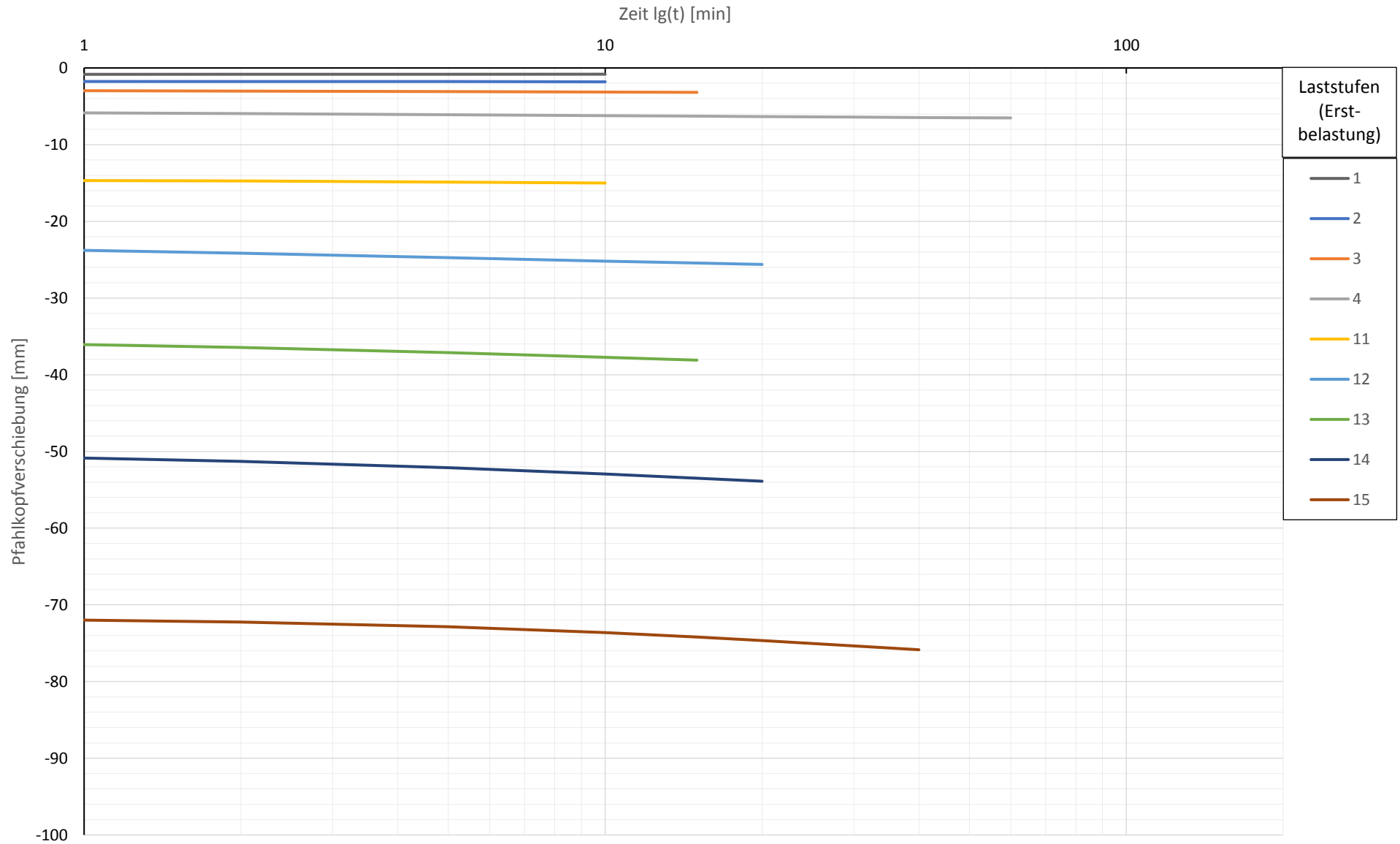
Prüfkörper: B.K55
(Kies-Druck)

Widerstands-Setzungslinie



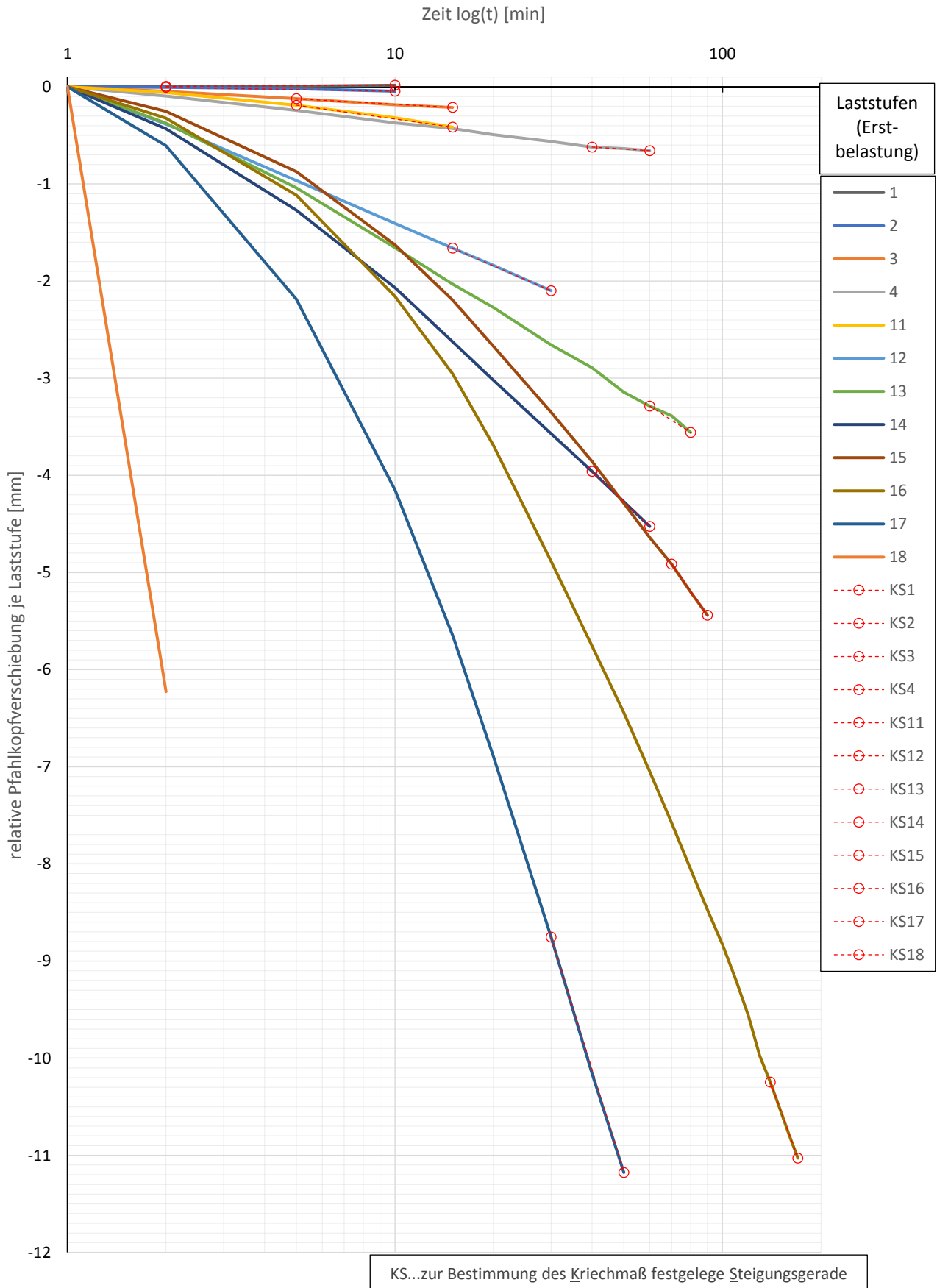
Prüfkörper: B.K55 (Kies-Druck)

Zeitverformung



Prüfkörper: B.K55
(Kies-Druck)

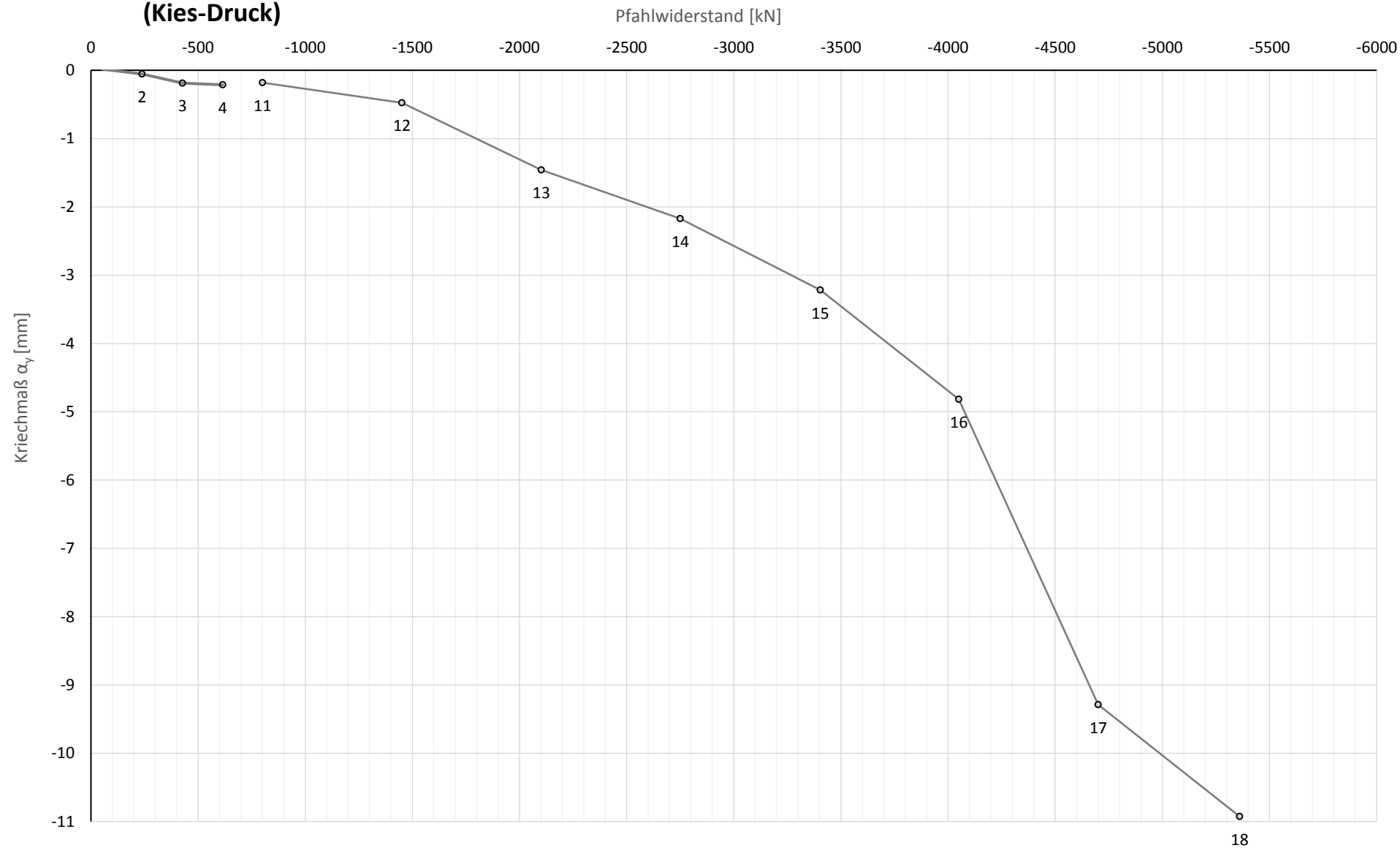
Zeitverformung



Die approbierte gedruckte Originalversion dieser Diplomarbeit ist an der TU Wien Bibliothek verfügbar.
The approved original version of this thesis is available in print at TU Wien Bibliothek.

Prüfkörper: **B.K55**
(Kies-Druck)

Widerstands-Kriechmaßlinie



Prüfkörper: B.K55
(Kies-Druck)

Verlauf der axialen Längenänderung je Laststufe

