



Florian Kainz, BSc

# Impulsartige Prüfmethode für nicht vorgespannte Zugelemente

**Diplomarbeit**

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

eingereicht an der

**Technischen Universität Graz**

Betreuer

Univ. Prof. Dipl.- Ing. Dr.techn. Roman Marte

Bmst. Dipl.-Ing. Dipl.-Ing. Dr.techn. BSc Matthias Rebhan

Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik

Graz, September 2021



# Eidesstattliche Erklärung

Ich erkläre an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst, andere als die angegebenen Quellen/Hilfsmittel nicht benutzt, und die den benutzten Quellen wörtlich und inhaltlich entnommenen Stellen als solche kenntlich gemacht habe. Das in TUGRAZonline hochgeladene Textdokument ist mit der vorliegenden Arbeit identisch.

.....  
Datum

.....  
Unterschrift



# Zeit Danke zu sagen...

Zu Beginn möchte ich allen Personen danken, die mich im Laufe meines Studiums und insbesondere bei der Erstellung dieser Arbeit unterstützt haben. Der Rückhalt und die aufbauenden Worte, die ich in dieser Zeit genießen durfte, haben mich stets motiviert und dazu angespornt mein Bestes zu geben.

Es ist mir ein großes Anliegen, mich bei einigen Personen, die mich während meines Studiums geprägt haben, namentlich zu bedanken.

Zuallererst darf ich meinen Dank an meinen Diplomarbeitsbetreuer Dr.techn. Matthias J. Rebhan aussprechen. Von der Themenfindung über die Versuchsplanung und -durchführung bis hin zu den Diskussionen der Ergebnisse fand ich immer ein offenes Ohr für fachliche Gespräche. Trotz der kleineren Rückschläge in dieser Zeit kam auch der Humor nie zu kurz. Ebenso möchte ich Univ. Prof. Roman Marte meinen großen Dank aussprechen. Durch die Gespräche und Diskussionen wurde mein Interesse an der Geotechnik maßgeblich geprägt. Ich danke dem gesamten Team des Instituts für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik für die lehrreichen Diskussionen und Aufgaben, die ich erledigen durfte.

Mein größter Dank richtet sich an meine Familie! Danke Mama und danke Papa, dass ihr es mir ermöglicht habt, diesen Weg zu gehen. Ihr gebt mir den Rückhalt und die Unterstützung, ohne die ich es nicht so weit geschafft hätte. Ich darf mich auch bei meiner Schwester Andrea ganz herzlich bedanken, dass sie mir in schwierigen Zeiten immer wieder aus der einen oder anderen prekären Situation geholfen hat.

Mit Worten lässt es sich nur schwer beschreiben, wie dankbar ich meiner Freundin Clara bin. Es war für mich nie selbstverständlich, dass ich während meiner ganzen Studienlaufbahn in dieser Art und Weise von dir unterstützt, aufgebaut und motiviert wurde immer weiter zu machen. An dieser Stelle möchte ich auch an deine Familie einen herzlichen Dank für die motivierenden Worte richten.

Ein riesiges Dankeschön geht an meinen besten Freund Flo. Hätten wir uns nicht kennen gelernt, würde ich diesen Text vermutlich nicht verfassen (müssen), da du mich erst dazu gedrängt hast gemeinsam mit dir diesen Weg einzuschlagen. Auf diesem Weg haben sich Freundschaften entwickelt, die mein Leben bereichern und hoffentlich ein Leben lang bestehen bleiben. Danke Flo, Julia, Kathi, Tomflo und Cedric für die gemeinsame Studienzeit und die vielen schönen Momente.

Maßgeblich zu meinem Studienerfolg beigetragen hat die Mitgliedschaft im besten Zeichensaal. Ein riesiges Dankeschön an alle aktuellen Mitglieder und alle frisch gebackenen Veteranen des Beton- und Holzbauzeichensaals. Die Zeit im BHZ war unbeschreiblich geil!

# Kurzfassung

## **Impulsartige Prüfmethode für nicht vorgespannte Zuelemente**

Diese Arbeit behandelt eine neu konzipierte Prüfmethode für impulsartige Einwirkungen auf Zuelemente in der Geotechnik. Die Idee dahinter ist es, eine anwendungsnähere Prüfmethode im Hinblick auf Abnahme- oder Eignungsprüfungen für Verankerungen von Schutzbauten zu entwickeln und erste Validierungen hierzu durchzuführen. Dafür wurden zunächst aktuell gültige normative Grundlagen für Bemessung, Ausführung und Untersuchung von Zuelementen in der Geotechnik und im Speziellen für Mikropfähle im Anwendungsbereich von Schutzbauten für Österreich kritisch gegenübergestellt. Aufbauend auf dieser Gegenüberstellung und dem Stand der Technik, was die Prüfung von Mikropfählen bei Schutzbauten betrifft, wurde in Zusammenarbeit mit Matthias J. Rebhan im Zuge des Forschungsprojektes DAT ein eigenes Kapitel in die Arbeit aufgenommen. Dieses Kapitel dient dem Aufzeigen von aktuell auftretenden Problemen und gibt in weiterer Folge Empfehlungen für Adaptierungen im Bereich von Abbruchkriterien und der Anordnung des Prüfaufbaus.

Der Hauptteil der Arbeit bestand in der Entwicklung, dem Bau und der Erprobung eines Prüfgerätes für auf Zug beanspruchte Mikropfähle. Um Zugbeanspruchungen abweichend von klassischen Prüfungen (mittels Hydraulikpressen) in Form einer schlagartigen Beanspruchung in einer für Mikropfähle ausreichenden Größenordnung zu erreichen wurde ein eigens dafür konzipierter Versuchsaufbau basierend auf einem Kerbschlagversuch entwickelt. Dies konnte im Zuge eines Versuchsfeldes am Gelände der Technischen Universität Graz, in den Inffeldgründen, an mehreren Mikropfählen erprobt und somit einer ersten Validierung unterzogen werden.

Die Messungen der auf die Mikropfähle aufgebrachten Kräfte lieferten erste sehr zufriedenstellende Ergebnisse und bestätigten die Anwendbarkeit dieser Untersuchungsmethode. Zudem wurden die Versuchsergebnisse mit den Ergebnissen aus klassischen – statischen – Mikropfahlprüfungen gegenübergestellt. Abschließend fand zudem eine Aufbereitung der Versuchsdurchführung, des Versuchsaufbaues und der durchgeführten Untersuchungen statt, um die Grundlage einer Weiterentwicklung des Prüfaufbaues und dieser Prüfmethode zu ermöglichen.

# **Abstract**

## **Dynamic testing method for non pre-stressed tensile elements**

This thesis deals with a newly designed test method for dynamic impacts on tensile elements in geotechnical engineering. The idea is to develop a more application-oriented test method with regard to acceptance or suitability tests of anchorages of natural hazard protection structures and to carry out a first validation. For this purpose, currently valid (Austrian) normative standards for the design, execution and testing of tensile elements in geotechnics and, in particular, micro piles used for protective structures were critically compared. Based on this comparison and the state of the art regarding the testing of micro piles in protective structures, a separate chapter was included in the work in cooperation with Matthias J. Rebhan along the research project DAT. This chapter serves to point out currently occurring problems and subsequently gives recommendations for adaptations of break-off criteria and the arrangement of the test setup.

The main part of this thesis consisted in the development, construction and testing of a dynamic testing device for micro piles subjected to tensile loads. In order to be able to implement such tensile stresses in deviation from classical tests using hydraulic presses and to achieve an impact stress sufficient for micro piles, a specially designed test setup based on the Charpy pendulum impact test was developed. This could be tested on several micro piles on a test field on the premises of the Graz University of Technology, in the Inffeldgründe, and thus subjected to an initial validation.

The measurement results of the forces applied to the micro piles provided first very satisfactory results and thus confirmed the applicability of this test method. In addition, the test results were compared with the results from classical – static – micro pile tests. Finally, a review of the test procedure, the test setup and the investigations accomplished was carried out in order to provide a basis for further development of the test setup and this test method.





# Inhalt

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Zielsetzung</b>	<b>2</b>
<b>3</b>	<b>Zugelemente in der Geotechnik</b>	<b>4</b>
3.1	Arten von Zugelementen	4
3.1.1	Verpressanker	4
3.1.2	Bodennagel	6
3.1.3	Verpresspfahl	8
3.2	Anwendungsgebiete und Möglichkeiten	10
3.3	Entwurf und Bemessung	11
3.3.1	Grenzzustand der Tragfähigkeit	12
3.3.2	Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit für Mikropfähle	13
<b>4</b>	<b>Prüf- und Untersuchungsmethoden für Zugelemente</b>	<b>15</b>
4.1	Art der Prüfung	15
4.1.1	Untersuchungsprüfung	15
4.1.2	Eignungsprüfung	16
4.1.3	Abnahmeprüfung	16
4.1.4	Langzeitüberwachung	17
4.2	Prüfverfahren	17
4.2.1	Prüfverfahren 1	17
4.2.2	Prüfverfahren 2	18
4.2.3	Prüfverfahren 3	19
4.3	Untersuchungsmethoden für Mikropfähle	19
4.3.1	Statische Probelastung	19
4.3.2	Dynamische Probelastung	20
4.3.3	Integritätsprüfung	20
4.4	Ergebnisse von Zugelementuntersuchungen	21
4.5	Interpretation von Zugelementuntersuchungen	23
4.5.1	Kriechmaß $\alpha$	23
4.5.2	Rechnerisch freie Stahllänge $L_{app}$	24
4.5.3	Widerlagerverformung	24

<b>5</b>	<b>Zerstörungsfreie Prüfmethoden</b>	<b>26</b>
5.1	Ultraschallprüfungen an Litzen- und Stabankern	26
5.2	Impuls-Echo-Methode (Low Strain)	26
<b>6</b>	<b>Dynamische Untersuchungen bei geotechnischen Elementen</b>	<b>27</b>
6.1	Dynamische Untersuchungsmethoden	27
6.2	Dynamische Prüfmethoden für Pfähle	28
6.3	Dynamische Pfahlprüfung	28
6.3.1	Dynamic Load Testing (DLT)	28
6.3.2	Dynamische Pfahlprobelastung an Holzpfählen	31
6.4	Dynamische Prüfung von Zugelementen	33
<b>7</b>	<b>Problemstellungen der Prüfungen von Mikropfählen bei Schutzbauten</b>	<b>34</b>
7.1	Abbruchkriterien für die Prüfung von Mikropfählen bei Schutzbauten	34
7.2	Vorschläge für Prüfaufbau und Abläufe der Abnahmeprüfung von Mikropfählen bei Schutzbauten	35
7.2.1	Anforderungen an die Prüfung und das Prüfequipment	35
7.2.2	Vorschlag zu einer Anpassung der Abbruchkriterien und des Prüfaufbaues	36
<b>8</b>	<b>Impulsartige Prüfung von Zugelementen</b>	<b>38</b>
8.1	Konzept und Methode	38
8.1.1	Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy	38
8.2	Planung Versuchsaufbau	40
8.2.1	Versuchsaufbau „Fallgewicht 1“	40
8.2.2	Versuchsaufbau „Fallgewicht 2“	42
8.2.3	Versuchsaufbau „Kerbschlag“	44
8.3	Herstellung der Probe-Mikropfähle	45
8.4	Vorversuche	47
<b>9</b>	<b>Versuche zur impulsartigen Prüfung von nicht vorgespannten Zugelementen</b>	<b>51</b>
9.1	Parametervariation	51
9.1.1	Fallmasse	51

9.1.2	Fallhöhe	51
9.2	Versuchsdurchführung	53
9.3	Messkonzept	56
9.3.1	Kraftmessung	56
9.3.2	Verschiebungsmessung	57
9.4	Versuchsauswertung	58
9.5	Interpretation der Versuchsergebnisse	63
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>67</b>
<b>11</b>	<b>Ausblick</b>	<b>68</b>
<b>12</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>70</b>
<b>13</b>	<b>Anhang</b>	<b>73</b>



# Formelzeichen und Abkürzungen

## Kleine Buchstaben

c	[m/s]	Spannungswellengeschwindigkeit
g	[m/s <sup>2</sup> ]	Erdbeschleunigung
h	[m]	Fallhöhe des Rammhärens
k <sub>s</sub>	[mm]	Kriechmaß
l <sub>2</sub>	[m]	Abstand zwischen dem Angriffspunkt der Kraft F und der Drehachse
m <sub>bär</sub>	[kg]	Masse des Rammhärens
s <sub>a</sub>	[mm]	Verschiebung des Zuggliedes zum Zeitpunkt t <sub>a</sub>
s <sub>b</sub>	[mm]	Verschiebung des Zuggliedes zum Zeitpunkt t <sub>b</sub>
s <sub>pl</sub>	[mm]	Plastische Pfahlbewegung zufolge des Stoßes
s <sub>el</sub>	[mm]	Elastische Pfahlbewegung zufolge des Stoßes
t <sub>a</sub>	[s]	Beginn des betrachteten Zeitintervalls
t <sub>b</sub>	[s]	Ende des betrachteten Zeitintervalls
u <sub>1</sub>	[cm]	Verschiebung des Mikropfahls
u <sub>2</sub>	[cm]	Verschiebung des Auflagers links
u <sub>3</sub>	[cm]	Verschiebung des Auflagers rechts

## Große Buchstaben

A	[m <sup>2</sup> ]	Pfahlquerschnittsfläche
A <sub>1</sub>	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen oder Beanspruchungen für GEO
A <sub>MP</sub>	[cm]	Absoluter Ausziehweg
A <sub>t</sub>	[m <sup>2</sup> ]	Querschnittsfläche des Ankerzuggliedes
C	[-]	Wirkungsgrad des Stoßes
CAPWAP	[-]	CAsE Pile Wave Analysis Programm
CC1	[-]	Schadensfolgeklasse 1
CC2	[-]	Schadensfolgeklasse 2
CC3	[-]	Schadensfolgeklasse 3
DAT	[-]	Dauerhaftigkeit in der Ankertechnik
DLT	[-]	Dynamic Load Testing
DN <sub>B</sub>	[cm]	Nenn Durchmesser des Mikropfahls
E	[kN/m <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul des Betons

$E_{a,k}$	[kN]	Charakteristische Einwirkung auf Fundierungselemente
$E_d$	[kN]	Bemessungswert der Beanspruchung
$E_t$	[kN/m <sup>2</sup> ]	Elastizitätsmodul des Ankerzugliedes
$F$	[kN]	Auf den Pfahlkopf aufgebracht Kraft
$F$	[N]	Die vom Pendel im Abstand $l_2$ in der waagrechten Position auf das Kraftanzeigegerät ausgeübte Kraft
$F_{max}$	[kN]	Hubkraft der Hohlkolbenpresse
$F_{pk}$	[kN]	Charakteristische Bruchkraft
$F_{rep}$	[kN]	Repräsentative Einwirkungen
GEO	[-]	Nachweis von Grenzzuständen im Baugrund gemäß ÖNORM B 1997-1-1
GOK	[-]	Geländeoberkante
$H_{max}$	[cm]	Hub (Weg der Hohlkolbenpresse)
Hz	[-]	Hertz
KLH	[-]	Kreuzlagenholz
KMZ	[-]	Kraftmesszelle
KV	[J]	Berechnete verbrauchte Energie
$L_{app}$	[m]	Rechnerisch freie Stahllänge
$L_{\ddot{u}}$	[cm]	Abstand zwischen GOK und Oberkante Muffe
M1	[-]	Teilsicherheitsbeiwert Bodenkenngrößen gemäß ÖNORM B 1997-1-1
MoSeS	[-]	Mobile Seismic Simulator
NV 2	[-]	Nachweisverfahren 2 nach ÖNORM B 1997-1-1
NV 2*	[-]	Nachweisverfahren 2 nach ÖNORM B 1997-1-1 für Pfahlgründungen
$P_a$	[kN]	Vorbelastung
$P_c$	[kN]	Kritische Kriechkraft
PIT	[-]	Pile Integrity Test
$P_p$	[kN]	Prüflast
$Q_{dyn}$	[kN]	Dynamische Eindringwiderstandskraft
R2	[-]	Teilsicherheitsbeiwerte für Bohrpfähle gemäß ÖNORM B 1997-1-1
$R_a$	[kN]	Herauszieh Widerstand eines Verpressankers
$R_{a,d}$	[kN]	Bemessungswert des Widerstandes eines Pfahls bei Zugbeanspruchungen
$R_{a,d,1}$	[kN]	Bemessungswert des Herauszieh-Widerstandes des Zugliedes

$R_{a;k}$	[kN]	Charakteristischer Ausziehwiiderstand eines Mikropfahls
$R_{a;k,l}$	[kN]	Charakteristischer Ausziehwiiderstandes eines Mikropfahls
$(R_{a;m})_{\min}$	[kN]	Minimalwert des Ausziehwiiderstandes eines Mikropfahls aus mehreren Probepfahl-Zugversuchen
$(R_{c;m})_{\min}$	[kN]	Kleinster Wert der aus Probebelastungen auf Druck gemessenen Werte von Pfahlwiiderständen
$R_{b;k}$	[kN]	Charakteristischer Wert der Pfahlspitzendruckkraft
$R_{c,d,stat}$	[kN]	Bemessungswert für die Tragfähigkeit
$R_{c;d}$	[kN]	Bemessungswert des Wiiderstandes eines Pfahls bei Druckbeanspruchung
$R_{c;k}$	[kN]	Charakteristischer Wert des Pfahlwiiderstandes
$R_d$	[kN]	Bemessungswert der Wiiderstände
$R_{s;k}$	[kN]	Charakteristischer Wert der Pfahlmantelreibungskraft

### Kleine griechische Buchstaben

$\alpha$	[mm]	Kriechmaß
$\alpha^b$	[°]	Fallwinkel
$\beta^a$	[°]	Steigwinkel
$\Delta s_{el}$	[mm]	Elastische Verschiebung des luftseitigen Endes des Zuggliedes
$\varepsilon$	[%]	Gemessene Stauchung
$\gamma_b$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für Spitzendruck von Pfählen gemäß ÖNORM B 1997-1-1
$\gamma_R$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für Wiiderstände bei Nachweisen der Gesamtstandsicherheit
$\gamma_s$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert bei Mantelreibung (Druck)
$\gamma_{s;t}$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für den Wiiderstand gegen Herausziehen gemäß Tabelle 13 ONR 24810: (2020)
$\gamma_t$	[-]	Teilsicherheitsbeiwert für den Gesamtwiiderstand bei Druckpfählen gemäß ÖNORM B 1997-1-1
$\eta_{p;c}$	[-]	Modellfaktor für Druckpfähle zur Bestimmung der charakteristischen Pfahlwiiderstände
$\eta_{p;i}$	[-]	Modellfaktor der charakteristischen Pfahlwiiderstände
$\eta_{p;t}$	[-]	Modellfaktor für Zugpfähle zur Bestimmung der charakteristischen Pfahlwiiderstände
$\rho$	[kg/m <sup>3</sup> ]	Betondichte
$\xi_2$	[-]	Streuungsfaktor für Pfahlgründungen nach Tabelle 8 aus ÖNORM B 1997-1-1:(2013)





# 1 Einleitung

Im Bereich von Schutzbauten, wie etwa Steinschlagnetzen oder Lawinverbauungen werden häufig Mikropfähle als Verankerung für Abspannungen oder als Fundierung für Stützen eingesetzt. Um zu überprüfen, ob die hergestellten passiven Zugelemente die Bemessungsanforderungen erfüllen, werden aktuell statische Zugprüfung, meist mittels Hydraulikpressen und entsprechenden Widerlagern (vgl. Abb. 18) durchgeführt. Diese Abnahmeprüfungen liefern üblicherweise Ergebnisse zur aufbringbaren Prüfkraft, dem Kriechmaß und einem möglichen Prüfkraftabfall während einer Laststufe.

Beim Vergleich der aktuell angewendeten statischen Prüfmethode mit der im Anwendungsfall auftretenden (meist stoß- bzw. impulsartigen) Belastung ergibt sich eine leichte Diskrepanz. Grund hierfür ist, dass die Belastung, wie in Abb. 1 ersichtlich, schlagartig eintritt, die Prüfung jedoch durch die Aufbringung einer statischen Prüfkraft durchgeführt wird.

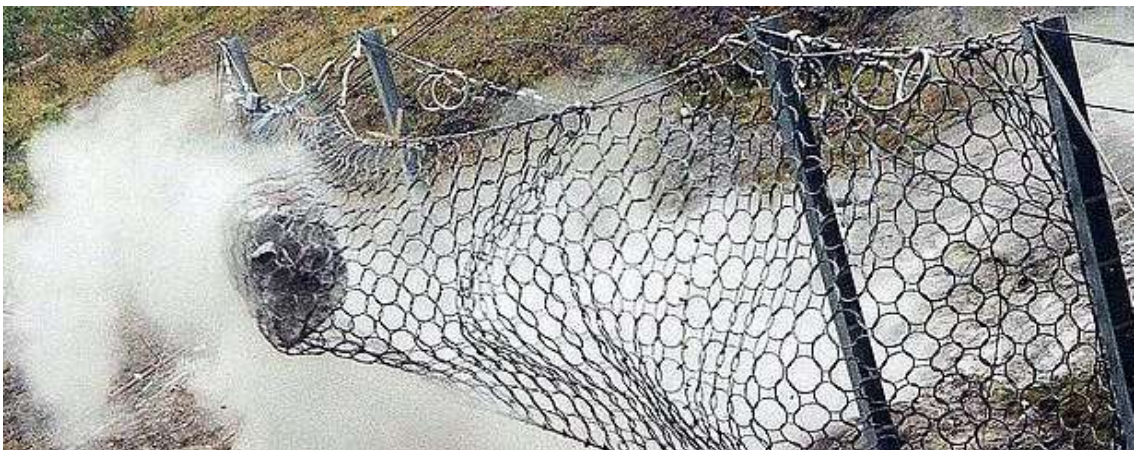


Abb. 1: Steinschlagereignis (Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft WSL, 2021)

Ziel dieser Arbeit ist es, das Verhalten von Mikropfählen unter dynamischen und stoßartigen Zugbeanspruchungen genauer zu beleuchten und einen Vorschlag für ein anwendungsnäheres Beprüfen derartiger Zugelemente unter derartigen Belastungen zu erarbeiten. Zu diesem Zweck wird ein eigens konzipiertes Prüfgerät gebaut, um im Rahmen des Forschungsprojektes DAT (2021) eine Vorstudie an Probemikropfählen durchzuführen. Mit diesem Prüfgerät soll eine schlagartige Belastung von Zugglieder simuliert werden können, welche mit statischen Probelastungen verglichen und validiert werden kann.

Nachfolgend wird hierzu einleitend auf die Zielsetzung und Abgrenzung der Arbeit eingegangen, ehe die Kapitel der Zugelemente und deren Prüfung und Untersuchung – unter anderem mit Fokus auf die zerstörungsfreie Prüfung – ausgeführt werden. Hierauf aufbauend wird die Entwicklung des Prüfgerätes angeführt. Weiters werden die zur Validierung der Anwendung durchgeführten Feldversuche sowie die Ergebnisse hieraus dargestellt.

## 2 Zielsetzung

Das nachfolgende Kapitel „Zielsetzung“ erläutert den Aufbau der Arbeit und soll dabei helfen, den Zusammenhang zwischen den einzelnen Kapiteln besser nachvollziehen zu können.

Wie bereits eingangs erwähnt, ist es das Ziel dieser Arbeit eine impulsartige Zugbelastungen auf Mikropfähle zu untersuchen. Neben der Aufarbeitung der Zugelemente und dem Stand der Technik zur Prüfung und Kontrolle dieser wird hierzu eine derartige Beanspruchung in Form eines Feldversuches aufgebracht und diese Ergebnisse mit jenen aus statischen Zugversuchen verglichen. Damit es bei einzelnen Begrifflichkeiten und Definitionen nicht zu Missverständnissen kommt, werden in den Kapiteln 3 bis 5 allgemein gültige Definitionen erläutert, bevor es in Kapitel 6 um dynamische Untersuchungen geht, welche unter anderem im Bereich der Geotechnik bereits angewendet werden.

Zu Beginn wird in Kapitel 3 auf Zugelemente in der Geotechnik eingegangen, um einen Gesamtüberblick über die unterschiedlichen Elemente zu geben. Dabei werden Zugelemente nach ÖNORM B 1997-1-1 (2013) unterschieden, die einzelnen Bestandteile von Verpressankern, Nägeln und Mikropfählen dargestellt, sowie ihre Wirkungsweise beschrieben. Neben den Beschreibungen zum Einbau der unterschiedlichen Elemente werden in diesem Kapitel auch die Anwendungsgebiete von Zugelementen in der Geotechnik, sowie der generelle Ablauf zu Entwurf und Bemessung als Grundlage für die Prüfung dieser aufgezeigt. Hierzu bietet Kapitel 4 einen Überblick zu den aktuellen Anforderungen und den Abläufen von Prüfungen nach den jeweils gültigen Prüfnormen und Vorschriften, welche grundsätzlich eine statische Prüfung der Zugelemente vorsehen. Zusätzlich werden die Abbruchkriterien für die Durchführung der Prüfung von Zugelementen nach unterschiedlichen Normen dargestellt und verglichen. Da es in dieser Arbeit in weiterer Folge um eine impuls- bzw. schlagartige Untersuchung von Mikropfählen geht, wird in Kapitel 4 explizit auf Untersuchungsmethoden für Mikropfähle und deren Ergebnisse bzw. die Beurteilung dieser eingegangen. Damit bildet dieses Kapitel die Basis für alle weiteren Überlegungen, welche in Richtung einer impulsartigen Untersuchung von Zugelementen in der Geotechnik abzielen.

Das Kapitel 5 – Zerstörungsfreie Prüfmethode soll zeigen, dass es bereits Prüfmethode gibt, welche über die Erfassung von Wellenausbreitungen die Integrität von beispielsweise Bohrpfählen untersuchen. Dieses Kapitel beschreibt zwei ausgewählte zerstörungsfreie Prüfmethode um aufzuzeigen, dass es sich hierbei trotz Wellenausbreitung entlang einer Stab- bzw. Pfahlachse um keine impulsartigen Prüfmethode – in Form einer schlagartigen Beanspruchung des Zugelementes – handelt. Zusätzlich sollen durch die Erläuterungen in diesem Kapitel die Unterschiede zu dynamischen Prüfmethode herausgearbeitet werden.

Um einen Vergleich zu bereits etablierten dynamischen oder schlagartigen Untersuchungsmethoden zu bieten, welche generell im Bauwesen und im Speziellen in der Geotechnik zum Einsatz kommen, liefert Kapitel 6 einen ersten Überblick zu dieser Themenstellung. Außerdem soll aufgezeigt werden, dass die bisherigen Forschungen und Anwendungen entweder in Richtung der Schwingungssimulation für z.B. schienengebundene Fahrzeuge gingen, oder schlagartige Druckbeanspruchungen bewirkten. Als Quintessenz soll dieses Kapitel zeigen, dass dynamische und schlagartige Untersuchungen viele Vorteile gegenüber von statischen Prüfungen haben und daher weitere Forschungen und Entwicklungen in diesem Bereich durchaus als sinnvoll anzusehen sind.

Bevor in den Kapiteln 8 und 9 auf die Versuchsplanung, die Versuchsdurchführung, sowie die Interpretation der Ergebnisse der Feldversuche eingegangen wird, zeigt Kapitel 7 die aktuellen Problemstellungen bei der Prüfung von Mikropfählen mit Fokus auf Schutzbauten. Des Weiteren werden Vorschläge für Änderungen an den derzeitigen Prüfaufbauten getätigt bzw. werden die derzeitigen Abbruchkriterien kritisch hinterfragt. Außerdem wird eine Empfehlung für eine Adaption dieser Abbruchkriterien, sowohl für statische als auch die im Zuge dieser Arbeit entwickelte impulsartige Prüfmethode, abgegeben.

Auszüge dieser Arbeit wurde gemeinsam mit Matthias J. Rebhan verfasst und in die Ausführungen des Forschungsprojektes DAT bzw. auch aktuell in Entstehung befindliche Normen und Regelwerke eingebunden.

## 3 Zugelemente in der Geotechnik

In nachfolgendem Kapitel werden Zugelemente in der Geotechnik kurz beschrieben. Der Fokus hierbei liegt auf der Unterscheidung zwischen einem Verpressanker, einem Bodennagel und einem Verpresspfahl, wobei letzterer, als Grundlage für die weitere Nutzung in dieser Arbeit umfassender ausgeführt wird.

### 3.1 Arten von Zugelementen

Generell werden in ÖNROM B 1997-1-1 (2013) drei Arten von Verankerungen definiert, das sind Verpressanker, Verpresspfähle und Bodennägel. Nachfolgend werden diese kurz beschrieben und erklärt, um einen Überblick zum aktuellen Stand der Technik zu geben.

#### 3.1.1 Verpressanker

Ein Verpressanker - im weiteren Text als Anker bezeichnet - ist laut Definition nach Adam (2016) „*eine zugfeste Verbindung ohne Druck- und Biegetragfähigkeit und wird durch zwei Bestandteile in seiner Lage definiert*“. Diese Bestandteile sind der an der Luftseite angebrachte Ankerkopf welcher mit dem im Untergrund befindlichen Verpresskörper durch ein Zugglied verbunden ist. Der Verpresskörper erstreckt sich nur über einen Teil der Länge des Zuggliedes, was bedeutet, dass es eine definierte Krafteintragungslänge in den Untergrund gibt. Daher eignen sich Anker dazu, Lasten in tieferliegende (kompetente) Schichten des Untergrundes zu transportieren bzw. in diese einzuleiten.

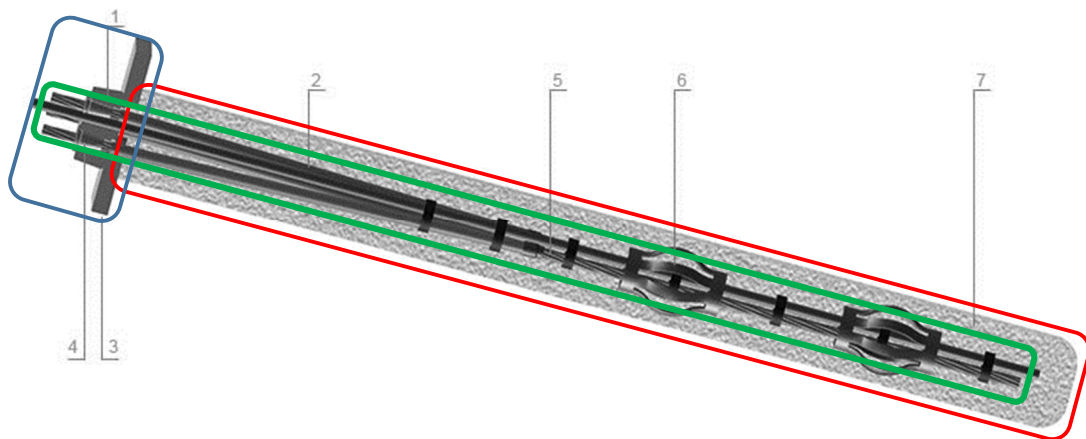
##### 3.1.1.1 Ankerbestandteile

Die drei wichtigsten Bestandteile eines Ankers - dargestellt in Abb. 2 - sind wie bereits erwähnt:

- der Ankerkopf, siehe Abb. 2(blau markierter Bereich);
- das Zugglied, siehe Abb. 2(grün markierter Bereich);
- der Verpresskörper, siehe Abb. 2(rot markierter Bereich).

Jeder Bestandteil hat eine spezifische Aufgabe zu erfüllen, um die Tragfähigkeit und Zuverlässigkeit des Verankerungssystems zu gewährleisten. Dem Ankerkopf obliegt die Aufgabe die Krafteinleitung in den jeweiligen Verbau (z.B. Ankerwand, Baugrubensicherung), sowie die Abstützung der Presse während des Spannvorganges zu ermöglichen (Adam, 2016). Das Zugglied kann als Litzanker mit einer oder mehreren Litzen oder auch als Stabanker ausgeführt werden. Diese, meist als Stahlelemente ausgeführten Zugglieder, transferieren die Kräfte vom Ankerkopf hin zum Verpresskörper. Zu beachten ist, dass auf den Korrosionsschutz insbesondere dauerhafter Zugglieder ein besonderes Augenmerk gelegt werden muss, da einerseits nicht das ganze Zugglied mit Zementstein

umhüllt ist, um die Bewegungsmöglichkeit der Freispielstrecke sicherzustellen und andererseits insbesondere die Ankerkopfkonstruktion nur mit hoher Ausführungsqualität (ausreichend) dauerhaft korrosionssicher ausgeführt bzw. instandgesetzt werden kann. Dieser Korrosionsschutz kann in einfacher oder doppelter Ausführung zur Anwendung kommen, abhängig von der geplanten Nutzungsdauer (siehe ÖNORM B 4456 (2021)) des Ankers und den Umgebungsbedingungen (Adam, 2016). Aufgrund des typischen Einsatzgebietes dieser Systeme sind sie häufig korrosionsfördernden Einwirkungen ausgesetzt. Solche sind beispielsweise Wasser, Tausalz und andere Taumittel, sowie chemische und biologische Einflüsse, aber auch große Temperaturwechsel. Daraus folgend kann es zu verschiedenen Korrosionserscheinungen an den Zuggliedern und anderen metallischen Bauteilen (Kopfplatte, Mutter) kommen. Die häufigsten Formen sind die Sauerstoffkorrosion, bei hochfesten Stählen die Spannungsrisskorrosion, die Kontaktkorrosion, oder auch die Schwingungsrisskorrosion (Burtscher, et al., 2017).



- |   |                  |   |                |
|---|------------------|---|----------------|
| 1 | Keilplatte       | 5 | Litzen         |
| 2 | Korrosionsschutz | 6 | Abstandhalter  |
| 3 | Kopfplatte       | 7 | Verpresskörper |
| 4 | Keil             |   |                |

Abb. 2: Schematische Darstellung eines Kurzzeitlizenankers (dywidag-systems, 2021), bearbeitet

Aufgrund der in den letzten 10 bis 15 Jahren verstärkt detektierten Korrosionsschäden an Ankerkonstruktionen wurden Forschungsprojekte und Bestandsaufnahmen durchgeführt. Teilweise wurden erhebliche Korrosionsschäden (vor allem an den Zuggliedern) festgestellt, welche jedoch nur in den seltensten Fällen zum Bauwerksversagen geführt haben. Neben zumeist ausreichender Lastumlagerungsmöglichkeiten verankerter Konstruktionen, liegt der Grund geringer Totalversagensereignisse auch darin, dass die Schäden an den Ankern meist früh genug erkannt wurden und die Querschnittsreduktion des Zuggliedes mit Ersatzankern oder anderen Instandsetzungsmaßnahmen kompensiert werden konnte. Zusätzlich positiv wirkt sich im Korrosionsfall die Bemessungsreserve zufolge konservativer Annahmen aus (Hunkeler F., 2005).

Die Aufgabe der Kraftübertragung vom Zugglied in den Untergrund wird durch den Verpresskörper (Haftstrecke) übernommen. Auch beim Verpresskörper muss auf den Korrosionsschutz geachtet werden, da durch die (Zug-) Belastung Risse im Zementstein entstehen (können), wodurch der Stahl keinen ausreichenden Korrosionsschutz aufweist (Adam, 2016).

Nach ÖNORM EN 1537 (2015) können Anker nach zwei Arten unterschieden werden. Zum einen gibt es die Unterteilung zwischen vorgespannten und nicht vorgespannten Ankern, so genannten Totmann-Ankern, welche in weiterer Folge nicht näher behandelt werden. Zum anderen kann eine Unterteilung nach der geplanten Einsatz-, Nutzungs- oder Lebensdauer der Anker vorgenommen werden. Handelt es sich um einen Kurzzeitanker, wird die geplante Nutzungsdauer mit zwei Jahren definiert. Spricht man von einem Daueranker wird mit einer geplanten Nutzungsdauer von mehr als zwei Jahren gerechnet. Zudem können in Österreich auch noch semi-permanente Verankerungen mit einer geplanten Nutzungsdauer von sieben Jahren verwendet werden.

### 3.1.2 Bodennagel

Nach ÖNORM EN 14490 (2010) sind (Boden-)Nägel stabförmige Elemente welche als Kollektiv wirken und einen Verbundkörper mit dem umliegenden Boden erzeugen. Die Nägel werden in einem Raster installiert, wobei der Achsabstand zwischen den einzelnen Elementen nicht größer als 1,50 m sein soll. Hierdurch wird eine Bodennagelkonstruktion errichtet, welche in die drei Bereiche Bodennagelsystem, Frontausbildungssystem und Drainagesystem unterteilt werden kann. Bodenvernagelungen werden nicht vorgespannt, sie werden durch die Verformung des zu stabilisierenden bzw. zu stützenden Bodenkörpers aktiviert. Der übliche Installationsprozess einer Bodenvernagelung ist in Abb. 3 dargestellt, die typischen Elemente sind in Abb. 4 abgebildet.

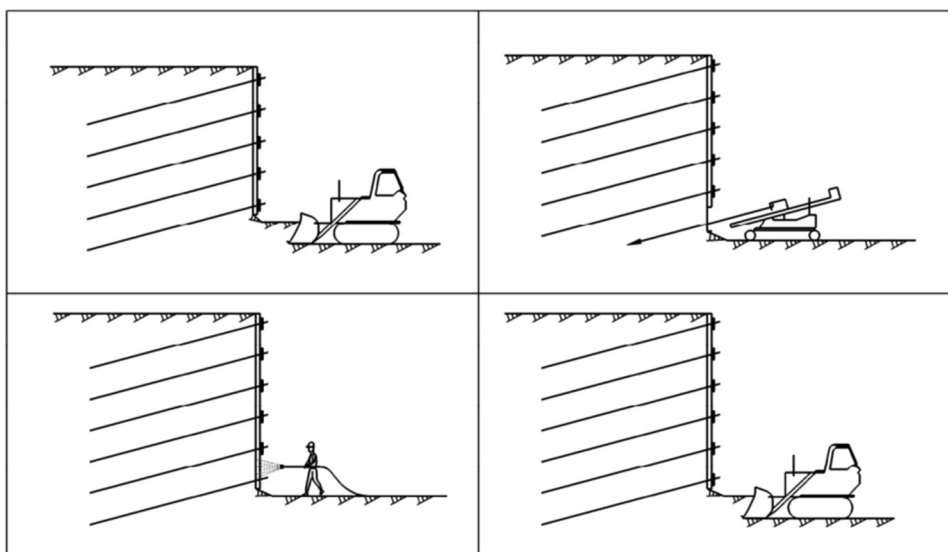
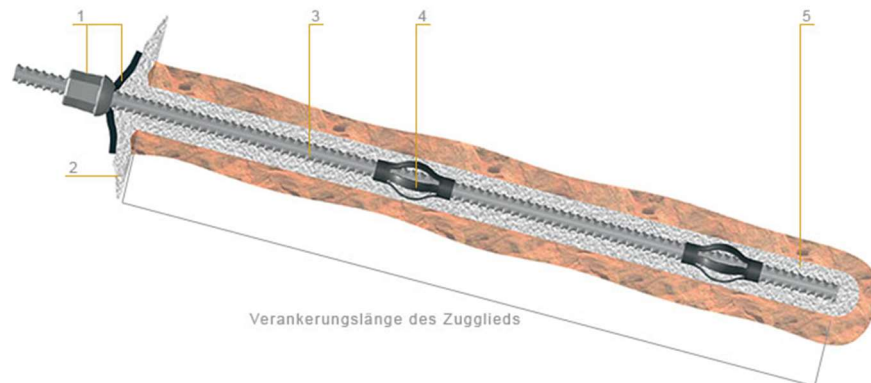


Abb. 3: Übliche Abfolge von Aushub und Nageleinbau (ÖNORM EN 14490, 2010); Aushub (oben links); Einbau der Nägel (oben rechts); Installation der Frontausbildung (unten links); Nächster Aushubschritt (unten rechts)

Der Bodennagel wird üblicherweise aus Stahl hergestellt, kann in Ausnahmefällen aber auch aus faserverstärktem Kunststoff oder Geokunststoffen ausgeführt werden. Was den Querschnitt betrifft können massive (Voll-)Stäbe, Hohlbohrstäbe aber auch Winkelprofile oder andere Formen verwendet werden. Häufig sind die Zugelemente einer Bodenvernagelung gerippt ausgeführt, um den Verbund zum Einpressmittel zu verbessern. Die Installation kann entweder selbstbohrend, gerammt oder eingestellt in vorgebohrte Bohrlöcher (ÖNORM EN 14490, 2010) vorgenommen werden.



- |   |                 |   |               |
|---|-----------------|---|---------------|
| 1 | Nagelkopf       | 4 | Abstandhalter |
| 2 | Frontausbildung | 5 | Zementmörtel  |
| 3 | Nagel           |   |               |

Abb. 4: Schema eines Bodennagels (dywidag-systems, 2021)

Die Frontausbildung muss gewährleisten, dass Lasten (i.A. der Erddruck) aus der Frontausbildung auf die Nägel übertragen werden können sowie, dass differenzielle Setzungen zwischen Boden und Frontausbildung zu keinem Schaden führen. Dazu gibt es verschiedenste Ausführungsvarianten, die je nach Anwendung und eingesetztem Material verschieden steife Oberflächen bilden. Während starre Frontausbildungen z.B. aus Beton oder Spritzbeton die Aufgabe haben, den zwischen den Nägeln liegende Bodenkörper zu stabilisieren, müssen bedingt nachgiebige Frontausbildungen (z.B. Geogitter-Stahlmatten) die Böschungsfrent zwischen den Stützpunkten der Bodenvernagelung stabilisieren und einen Erosionsschutz gewährleisten. Außerdem gibt es die Möglichkeit einer weichen Frontausbildung die hauptsächlich die Aufgabe des Erosionsschutzes sowie der Verhinderung des Aufreißen der Oberfläche innehat. In Ausnahmefällen kann auch auf eine Frontausbildung verzichtet werden, wie dies beispielsweise bei Felsvernagelungen der Fall ist (ÖNORM EN 14490, 2010).

Die Aufgaben des Drainagesystems bestehen darin Grund- und Hangwässer zu sammeln und diese gezielt abzuführen, um den Aufbau eines Wasserdruckes hinter der Frontausbildung bzw. auch eine unkontrollierte Erosion zu verhindern. Das Drainagesystem ist abhängig von der Frontausbildung und besteht aus Oberflächen- und Fußentwässerung, Untergrunddrainagen, Sammelleitungen und Drainageöffnungen in der Frontausbildung.

### 3.1.3 Verpresspfahl

Nach ÖNORM B 1997-1-1 (2013) „sind Verpresspfähle Mikropfähle gemäß ÖNORM EN 14199 oder verpresste Verdrängungspfähle gemäß ÖNORM EN 12699, die als Verankerung auf Zug beansprucht werden und als Einzeltragglied wirken“. Im folgenden Kapitel werden mit dem Begriff „Verpresspfahl“ ausschließlich Mikropfähle nach ÖNORM EN 14199 (2015) adressiert.

Grundsätzlich sind Mikropfähle (gebohrte) Pfähle mit einem Durchmesser kleiner 300 mm. Die Aufgabe der Mikropfähle besteht darin, direkte und indirekte Lasten abzutragen oder auch Setzungen zu reduzieren. Direkte Lasten sind beispielsweise das Eigengewicht, Erddrücke, oder auch Verkehrslasten. Indirekte Lasten sind jene, die z.B. durch Feuchtigkeitsänderungen im Boden, ungleiche Setzungen, Quellen bzw. Schrumpfen des Bodens oder auch durch Erdbeben ausgelöst werden (Möller, 2016). Um diesen Anforderungen gerecht zu werden, gibt es verschiedene Ausführungsvarianten, was die Querschnittsgestaltung betrifft. So kann der Querschnitt über die gesamte Pfahllänge konstant sein, sich teleskopartig verändern oder an bestimmten Positionen (z.B. am Pfahlfuß) aufgeweitet werden, um die Tragfähigkeit zu erhöhen. Mikropfähle werden im Regelfall nicht vorgespannt, womit sie gemeinsam mit Bodennägeln zu den passiven Verankerungen zählen. Die Bestandteile von Mikropfählen – zu sehen in Abb. 5 – sind das Zugglied, welches üblicherweise aus Stahl hergestellt wird und der Verpresskörper, welcher entweder als reiner Zementmörtel oder auch aus Feinkornbeton bzw. Beton hergestellt werden kann.

#### 3.1.3.1 Herstellung von Verpresspfählen

Vor Beginn der Bohrarbeiten muss für jeden Mikropfahl die Position des Ansatzpunktes, Richtung und Länge des Bohrlochs festgelegt werden. Die Art des gewählten Bohrverfahrens hängt stark von den örtlichen Gegebenheiten ab, da nach ÖNORM EN 14199 (2015) ein standsicheres Bohrloch sichergestellt werden muss. Mögliche Bohrverfahren sind daher die Spülbohrung, das Schlag- oder Drehbohrverfahren oder die Verwendung von Greifer- und Meißelbohrung sowie die Verwendung von segmentierten Hohlbohrschnecken.

Um den Bohrvorgang zu erleichtern ist es möglich, Spülflüssigkeiten, wie z.B. Wasser oder Luft zu verwenden. Es ist jedoch darauf zu achten, dass es durch die Verwendung dieser Medien nicht zu nachteiligen Auswirkungen auf beispielsweise benachbarte Bauwerke oder Inhomogenitäten des Untergrundes (z.B. Sandlinsen) kommt. Das fertiggestellte Bohrloch muss zumindest für die Dauer des Einbaues des Zuggliedes und der Einbringung des Verfüllmaterials stabile Bohrlochwände aufweisen. Sollte das umgebende Erdmaterial diese Anforderung nicht erfüllen können, muss eine Verrohrung oder Bohrlochstützung verwendet werden (ÖNORM EN 14199, 2015).



Werden keine selbstbohrenden Systeme (z.B. dreh Schlagender Einbau) als Tragglied verwendet, ist im Anschluss an die Fertigstellung des Bohrloches das Zugelement bzw. das Tragglied einzubauen. Dabei ist darauf zu achten, dass mittels Abstandhalter eine Zentrierung im Bohrloch sichergestellt wird, um die erforderliche Überdeckung mit Verpressgut zu gewährleisten. Nach dem Verfüllvorgang kann eine Nachverpressung durchgeführt werden, um die Tragfähigkeit der Zugelemente zu erhöhen. Dieser Vorgang kann mehrmals wiederholt werden. (ÖNORM EN 14199, 2015)

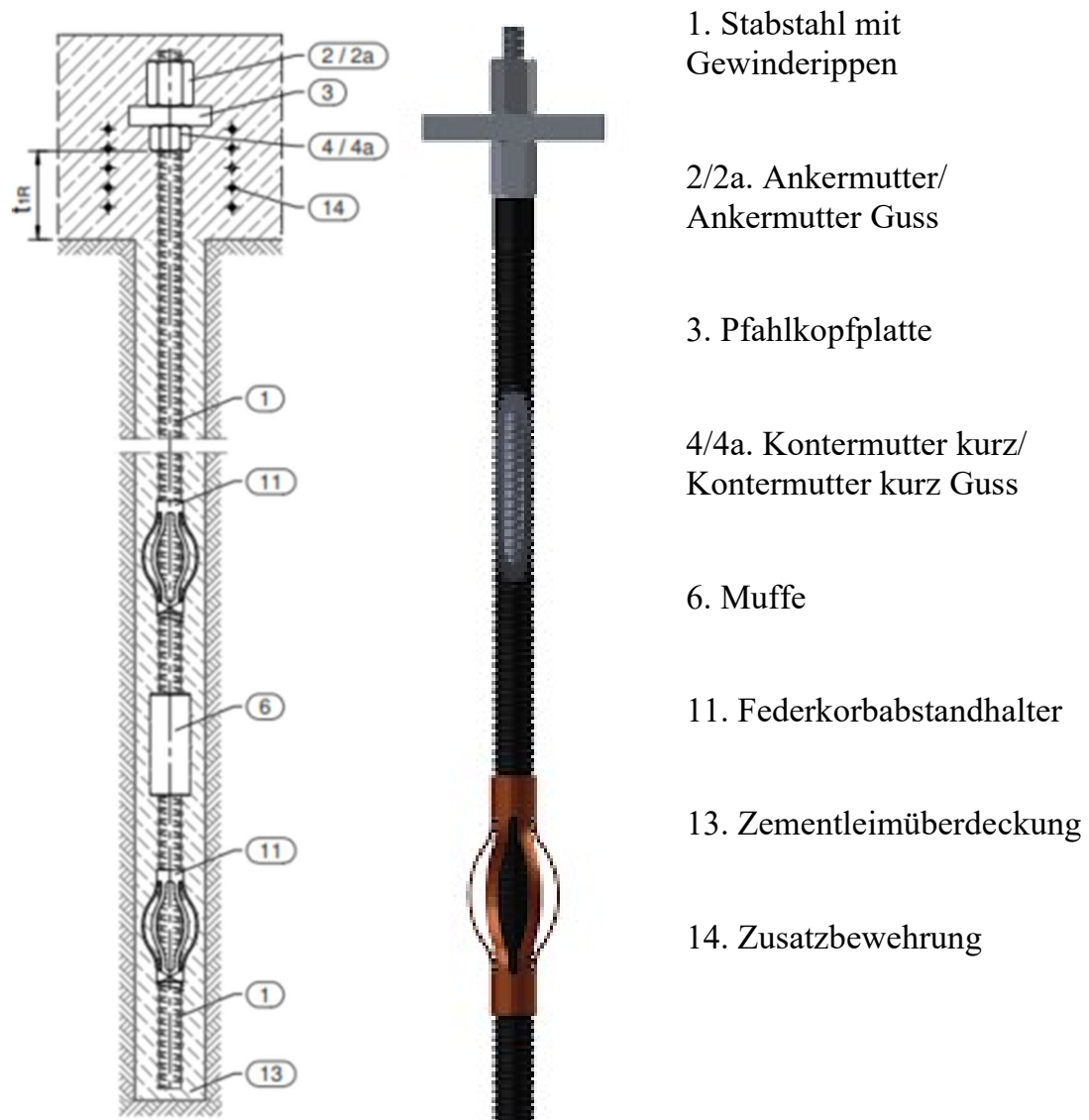


Abb. 5: Schematische Darstellung eines Mikropfahls (ANP-Systems, 2016)

## 3.2 Anwendungsgebiete und Möglichkeiten

Die Anwendungsgebiete und Möglichkeiten von Zugelementen in der Geotechnik decken einen sehr großen Bereich ab. Wobei es je nach Typ der Verankerung verschiedene Einsatzbereiche gibt, die sich teilweise überschneiden. Generell kann festgehalten werden, dass vorgespannte Anker vorrangig dort zum Einsatz kommen, wo ein aktives Zugelement erforderlich ist, also Verformungen klein gehalten werden sollen. Wohingegen Mikropfähle bzw. Nägel dort eingesetzt werden, wo die notwendige Verformung, die zur Aktivierung des Systems erforderlich ist, sich nicht nachteilig auf die Umgebung auswirkt.

Übliche Einsatzgebiete von vorgespannten Ankern sind temporäre Baugrubensicherungen in Kombination mit z.B. Bohrpfählen oder Spundwänden als Baugrubenverbau, die Sicherung und Stabilisierung von Hängen oder auch Sicherungen von Hanganschnitten, siehe Abb. 6. Anker können aber auch in der Fellsicherung oder bei Auftriebsicherungen Anwendung finden.



Abb. 6: Sicherung eines Hanganschnittes mittels Anker und Bodenvernagelung

Bodennägel haben ein ähnliches Anwendungsfeld wie Anker, so werden sie häufig bei Baugrubensicherungen, Böschungssicherungen, siehe Abb. 7 links und Hanganschnitten verwendet. Wie schon im vorherigen Kapitel erwähnt, kommen Nägel meist in Kombination mit einem Frontausbildungssystem und einem Drainagesystem, welches in Abb. 6 gut zu erkennen ist, zum Einsatz. Da Mikropfähle im Vergleich zu den beiden anderen Elementen nicht nur Zug-, sondern auch Druckkräfte übertragen können, werden sie unter anderem als Gründungselement eingesetzt. Weiters dienen Mikropfähle als Auftriebsicherung, werden für Hangsicherungen eingesetzt oder auch als Fundierung von Schutzbauten wie Steinschlagschutznetze, wie in Abb. 7 rechts, oder dergleichen eingesetzt. Mikropfähle können auf Grund ihrer großen Anpassbarkeit zudem auch als nachträgliche Verstärkung von Bauwerken (z.B. Verankerung von Gewichtskonstruktionen) verwendet werden.



Abb. 7: Bodenvernagelung (links), Mikropfähle als Fundierung eines Steinschlag-schutzbauwerkes (rechts)

### 3.3 Entwurf und Bemessung

Die ÖNORM EN 1997-1 (2013) sieht vor, dass unabhängig davon ob ein Element als Anker, Nagel oder Mikropfahl geplant ist, dieses Element auch als solches bemessen, ausgeführt und getestet werden muss. Das bedeutet, dass es nicht erlaubt ist während der Bemessung, der Ausführung oder der Prüfung zwischen den unterschiedlichen Typen zu variieren bzw. zu wechseln. Nachfolgend wird genauer auf die Anforderungen und Vorgaben zu Mikropfählen (bzw. Verpresspfählen) mit Fokus auf Schutzbauten eingegangen. Genauere Ausführungen zu Ankern und Bodenvernagelungen sind der ÖNORM B 1997-1-1 (2013) für die Bemessung, der ÖNORM EN 1537 (2015) zur Ausführung von Verpressankern und der ÖNORM EN 14990 (2010) zur Ausführung von Bodenvernagelungen zu entnehmen.

Nach ONR 24810 (2020) muss beim Einsatz von Mikropfählen für Schutzbauten schon beim Entwurf darauf geachtet werden, dass gewisse Anforderungen erfüllt werden. Das sind z.B., dass der kleinste Bohrlochdurchmesser 90 mm beträgt, welcher sich aus einer Mindestmörtelüberdeckung des Zug- bzw. Druckgliedes von 20 mm ergibt. Weiters gilt, dass sie nicht flacher als  $15^\circ$  zur Horizontalen installiert werden dürfen und die Haftstrecken, mit Ausnahme bei Stützenfundierungen einen Mindestabstand von 1,0 m nicht unterschreiten dürfen. Eine weitere Anforderung an die Haftstrecke ist, dass die statisch wirksame Länge auf 10 m begrenzt werden sollte.

Die ONR 24810 (2020) sieht für die Bemessung der Fundierung vor, dass ein Nachweis zur Aufnahme der Scherkräfte durch das Verankerungssystem zu führen ist. Weiters sagt die ONR 24810 (2020): „für den Nachweis GEO von Ankern und Zugpfählen, sofern erforderlich, ist gemäß ÖNORM B 1997-1-1 das Nachweisverfahren NV 2 zu verwenden.“

### 3.3.1 Grenzzustand der Tragfähigkeit

Um den Nachweis der äußeren Tragfähigkeit von Pfahlgründungen zu führen, wird das Versagen des Baugrundes (GEO) herangezogen. Im Anwendungsfall gestaltet sich der Nachweis wie folgt (ONR 24810, 2020):

$$E_d \leq R_d \quad (1)$$

mit:

$E_d$  Bemessungswert der Beanspruchung als Folge von repräsentativen Einwirkungen  $F_{rep}$

$R_d$  Bemessungswert der Widerstände

Die ÖNORM EN 1997-1 sieht für das Nachweisverfahren NV 2 untenstehende Kombination aus Teilsicherheitsbeiwerten vor,

$$A1 "+" M1 "+" R2 \quad (2)$$

Dabei ist

A1 Teilsicherheitsbeiwert für Einwirkungen oder Beanspruchung für den Nachweis von Grenzzuständen im Baugrund (GEO) gemäß ÖNORM B 1997-1-1

M1 Teilsicherheitsbeiwert Bodenkenngößen gemäß ÖNORM B 1997-1-1

R2 Teilsicherheitsbeiwerte für Bohrpfähle gemäß ÖNORM B 1997-1-1

Bei Pfahlgründungen kommt nach ÖNORM B 1997-1-1 das Nachweisverfahren NV 2\* zur Anwendung. Somit werden die Teilsicherheitsbeiwerte auf die Widerstände des Baugrundes, sowie auf die Beanspruchung angewendet.

### 3.3.2 Nachweis des Grenzzustandes der Tragfähigkeit für Mikropfähle

Die ONR 24810 (2020) unterscheidet beim Nachweis für den Grenzzustand der Tragfähigkeit bei Mikropfählen zwischen zwei Versagensformen. Einerseits geht es darum eine ausreichend hohe Sicherheit gegen Herausziehen nachzuweisen, was dem geotechnischen Nachweis der äußeren Tragfähigkeit entspricht. Andererseits ist nachzuweisen, dass eine ausreichende Sicherheit in Bezug auf ein Versagen des Zuggliedes gegeben ist, diese Versagensform kann man auch als innere Tragfähigkeit bezeichnen.

Bei der Ermittlung der Bemessungswerte für die Widerstände der Mikropfähle sind nach ONR 24810 (2020) eine „*Bemessung nach Tabellenwerten*“ und eine „*Bemessung nach Pfahlversuchen*“ möglich.

#### 3.3.2.1 Bemessung nach Tabellenwerten

Wird eine Bemessung nach Tabellenwerten durchgeführt, stellt die ONR 24810 (2020) in Tabelle B.1 charakteristische Werte für die Pfahlmantelreibung bei verpressten Mikropfählen und in Tabelle B.2 Erfahrungswerte für die charakteristische Pfahlmantelreibung bei Bohrpfählen in Fels zur Verfügung.

Die Ermittlung der Bemessungswerte  $R_{c;d}$  bzw.  $R_{a;d}$  über Tabellenwerte geschieht für auf Druck belastete Pfähle wie folgt;

$$R_{c;d} = R_{c;k} / (\eta_{P;c} * \gamma_t) \quad (3)$$

$$R_{c;d} = R_{b;k} / (\eta_{P;c} * \gamma_b) + R_{s;k} / (\eta_{P;c} * \gamma_s) . \quad (4)$$

Für auf Zug belastete Pfähle gilt:

$$R_{a;d} = R_{a;k} / (\eta_{P;t} * \gamma_{s;t}) \quad (5)$$

Bei dieser Variante sind Tabelle 10 und Tabelle 11 der ONR 24810 (2020) anzuwenden, um die jeweiligen Modellfaktoren  $\eta_P$  bzw. die Teilsicherheitsbeiwerte  $\gamma_R$  zu bestimmen.

#### 3.3.2.2 Bemessung nach Pfahlversuchen

Werden für die Bestimmung der Bemessungswerte des Widerstandes Pfahlversuche als Basis verwendet, ergibt sich  $R_{c;d}$  bei Druckpfählen aus:

$$R_{c;d} = R_{c;k} / (\eta_{P;c} * \gamma_s), \quad (6)$$

wobei

$$R_{c;k} = (R_{c;m})_{\min} / \xi_2 \quad (7)$$

ist.

Die ONR 24810: (2020) sieht folgende Annahme vor: „Wird der äußere Tragwiderstand von axial auf Druck beanspruchten Pfählen mit Hilfe von Pfahlzugversuchen nachgewiesen, darf ohne weiteren Nachweis der charakteristische Wert des Gesamtwiderstandes auf Druck  $R_{c;k}$  wie folgt abgeschätzt werden:“

$$R_{c;k} = 1,3 * R_{a;k} \quad (8)$$

bzw. kann  $R_{a;d}$  bei Zugpfählen wie folgt bestimmt werden:

$$R_{a;k} = (R_{a;m})_{\min} / \xi_2 \quad (9)$$

$$R_{a;d,1} = R_{a;k,1} / \gamma_{s,t} \quad (10)$$

Dabei ist:

$(R_{c;m})_{\min}$  kleinster gemessener Wert aus allen Druckversuchen

$\xi_2$  Streuungsfaktor für Pfahlgründungen nach Tabelle 8 aus ÖNORM B 1997-1-1: (2013)

$R_{a;k,1}$  gemessener Wert bei Zugprobebelastungen

$R_{c;k}$  charakteristischer Wert des Pfahlwiderstandes

$\gamma_s$  Teilsicherheitsbeiwert bei Mantelreibung (Druck)

$\gamma_{s,t}$  Teilsicherheitsbeiwert für den Widerstand gegen Herausziehen gemäß Tabelle 13 ONR 24810: (2020)

$\eta_{P,i}$  Modellfaktor der charakteristischen Pfahlwiderstände

Zum Nachweis der inneren Tragfähigkeit des Mikropfahles muss das Bewehrungselement die Bedingungen nach 6.2.3.4.3.2 der ONR 24810: (2020) erfüllen.

## 4 Prüf- und Untersuchungsmethoden für Zugelemente

Die Prüf- und Untersuchungsmethoden bei vorgespannten Verankerungen werden nach ÖNORM EN 1537 (2015) in folgende Arten unterschieden:

- Untersuchungsprüfungen;
- Eignungsprüfungen;
- Abnahmeprüfungen.

Als vierte wichtige Form der Ankerprüfung könnte man die Abhebekontrolle (RVS 13.03.21 - Geankerte Stützbauwerke, 2013) als weitere Art der Ankerprüfung, welche bei Bestandsbauwerken angewendet wird, erwähnen.

Die Anzahl der zu prüfenden Elemente für Abnahmeprüfungen sind in ÖNORM B 1997-1-1 (2013) geregelt. Tab. 1 zeigt, dass bei Verpressankern und Verpresspfählen die Anzahl der zu prüfenden Elemente nicht von der Schadensfolgeklasse (CC1 bis CC3) abhängen. Im Gegensatz hierzu hat die Schadensfolgeklasse bei Bodenvernagelungen einen direkten Einfluss auf die Anzahl der durchzuführenden Prüfungen.

Tab. 1: Anzahl der zu prüfenden Zugelemente (ÖNORM B 1997-1-1, 2013)

Eigenschaft	Verpressanker	Verpresspfähle	Nägel
Anzahl der Prüfungen n	100%	$\geq 3 \%$ ; $n \geq 3$	in CC1: $\geq 2 \%$ ; $n \geq 3$ in CC2: $\geq 2 \%$ ; $n \geq 3$ in CC3: $\geq 3 \%$ ; $n \geq 5$

### 4.1 Art der Prüfung

Im folgenden Kapitel wird auf die Untersuchungsmethoden bei oben genannten Prüfungen näher eingegangen. Für alle Methoden gleich ist die Tatsache, dass eine Vorbelastung  $P_a$  aufgebracht werden muss, um Bewegungen des Versuchsaufbaus, welche bei Erstbelastung entstehen, zu minimieren (ÖNORM EN 1537, 2015).

#### 4.1.1 Untersuchungsprüfung

Untersuchungsprüfungen werden grundsätzlich vor der Herstellung des Bauwerks bzw. der Zugelemente durchgeführt. Es ist jedoch zu erwähnen, dass die Art der Prüfung in Österreich nur in Sonderfällen wie beispielsweise bei der Erprobung neuer Ankersysteme oder bei unzureichendem Wissen über die Tragfähigkeit des Untergrundes, durchgeführt wird (ÖNORM B 1997-1-1, 2013). Gründe für Untersuchungsprüfungen können folgende sein:

- Ermittlung des Herausziehwiderstandes in Abhängigkeit der verwendeten Baustoffe und des Baugrundes;
- Prüfung der Fachkompetenz der ausführenden Firma;
- Testen eines Ankertyps bis zum Versagen an der Grenzfläche von Baugrund und Verpressmörtel;
- Aufbringung einer höheren Gebrauchslast, als bisher unter vergleichbaren Bedingungen aufgebracht wurde.

Die Ergebnisse der Untersuchungsprüfung sind unter anderem, der Herausziehwiderstand  $R_a$  eines Verpressankers, die kritische Kriechlast, das Kriechverhalten des Ankersystems bei Belastung bis zum Versagen bzw. der Spannkraftabfall des Ankersystems im Grenzzustand der Gebrauchstauglichkeit und die rechnerisch freie Stahllänge (ÖNORM EN 1537, 2015).

### 4.1.2 Eignungsprüfung

Nach ÖNORM B 1997-1-1 (2013) sind Widerstände des Untergrundes, welche durch Erfahrungs- oder Tabellenwerte, siehe Ostermayer H. (2001) und ONR 24810 (2020) ermittelt wurden, durch Eignungsprüfungen an mindestens drei Zuelementen zu prüfen. „Hierbei wird die Ankerkopfverschiebung in Abhängigkeit der Ankerkraft durch mehrfache Be- und Entlastung des Ankers gemessen“ (Hübner, 2019). Die oben erwähnte Ankerkopfverschiebung beschreibt in diesem Kontext die Kopfverschiebungen aller Zugglieder die sich während einer Eignungsprüfung einstellen.

Im Zuge einer Eignungsprüfung lassen sich

- die Tragfähigkeit unter einer bestimmten Prüflast  $P_p$ ,
- das Kriechverhalten oder der Spannkraftabfall bis zur Prüflast, und
- die rechnerisch freie Stahllänge

kontrollieren bzw. bestimmen (ÖNORM EN 1537, 2015).

### 4.1.3 Abnahmeprüfung

Abnahmeprüfungen sind nach ÖNORM EN 1537 (2015) für jeden Anker durchzuführen und werden im Zuge des Spannvorganges geführt. Die daraus ermittelten Ergebnisse beschreiben wie die Eignungsprüfung folgende Bereiche:

- die Tragfähigkeit unter einer bestimmten Prüflast  $P_p$ ,
- das Kriechverhalten oder der Spannkraftabfall bis zur Prüflast, und
- die rechnerisch freie Stahllänge (ÖNORM EN 1537, 2015).

Werden Abnahmeprüfungen bei Mikropfählen durchgeführt muss nach ONR 24810 (2020) „mindestens ein Mikropfahl je 25 Stück der auf Zug belasteten Mikropfähle“ geprüft werden. Sind Mikropfähle auf Druck belastet, besteht die Möglichkeit diese durch Zugversuche zu überprüfen. Die Auswahl der zu



prüfenden Mikropfähle hat so zu erfolgen, dass kritische Pfähle beprüft werden. Kritische Pfähle sind jene, die im Einzelversagensfall zu einem Versagen des gesamten Systems führen können, z.B. Abspannungen von Tragseilen.

Die Prüflast  $P_p$  ist nach ONR 24810: (2020) wie folgt definiert:

$$P_p = 1,25 * E_{a,k} \quad (11)$$

mit:

$E_{a,k}$  charakteristische Einwirkung auf das Fundierungselement

### 4.1.4 Langzeitüberwachung

In ÖNORM B 1997-1-1 (2013) wird gefordert, dass Bauwerke angemessen gewartet und instandgehalten werden sollen, wobei diese für Verankerungen hier auf die ÖNORM EN 1537 (2015) verweist. Zu diesem Zweck nennt die ÖNORM EN 1537 (2015) einige Punkte, welche bei einer Langzeitüberwachung in Betracht gezogen werden sollten.

- Sollte das Bauwerk sensibel auf Laständerungen oder Baugrundverformungen reagieren, kann mittels Überwachungseinrichtungen die gesamte Nutzungsdauer überwacht werden.
- Empfohlen wird die Anzahl der zu überwachenden Anker und die Messintervalle schon in der Entwurfsphase festzulegen.
- Sofern eine Überwachung erfolgt, sollten nicht weniger als 5 % der Anker regelmäßig kontrolliert werden.
- Die Überwachung sollte auch eine regelmäßige Inspektion des Korrosionsschutzes aller zugänglichen Teile beinhalten.
- Sollte ein Anker mit einer Kraftmesseinrichtung ausgeführt worden sein, sind zwei zusätzliche Anker desselben Typs, mit derselben Gebrauchslast im Nahbereich herzustellen. Die Idee dahinter ist, dass eine Referenz der Überwachungseinrichtung möglich ist, sollte die vorhandene Ankerkraft durch Abhebeversuche geprüft werden müssen – beispielsweise um ein getauschtes Kraftmessteller nachzujustieren.

## 4.2 Prüfverfahren

Generell werden Prüfverfahren für Zugelemente und Verankerungen in ÖNORM EN ISO 22477-5 (2018) beschreiben. Diese gibt drei Prüfverfahren an, welche für jede Art von Zugelementprüfung zulässig sind.

### 4.2.1 Prüfverfahren 1

Bei Prüfverfahren 1 wird das Zugelemente schrittweise von der Vorbelastung bis zur Prüflast belastet. Dies kann in einem oder mehreren Belastungszyklen

geschehen. Gemessen wird die Verschiebung des luftseitigen Endes des Zuggliedes während einer vordefinierten Beobachtungszeit für jede Laststufe. Somit ergibt sich die Verschiebung des Ankers als Funktion der aufgetragenen Last, siehe Abb. 8 bzw. (ÖNORM EN ISO 22477-5, 2018). In Österreich kommt nur dieses Verfahren zur Anwendung.

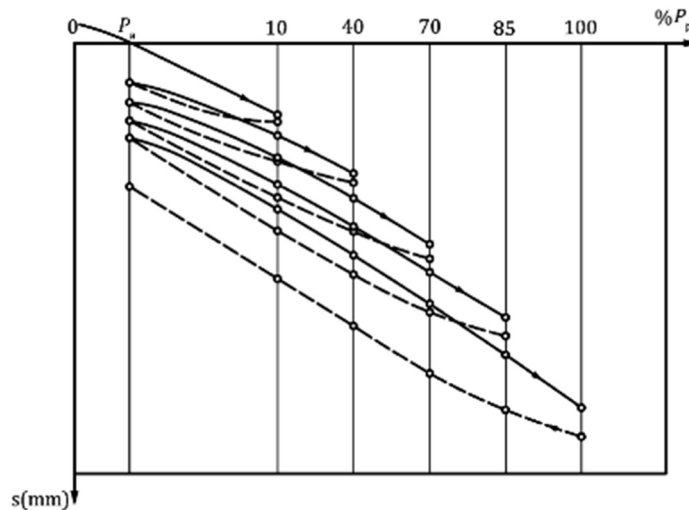


Abb. 8: Last-Verschiebungslinie am Beispiel einer Eignungsprüfung eines Dauerankers in einem nichtbindigen Boden (ÖNORM EN ISO 22477-5, 2018)

## 4.2.2 Prüfverfahren 2

Bei Prüfverfahren 2 wird das Zugelement schrittweise von der Vorbelastung bis zur Prüflast belastet. Dies kann in einem oder mehreren Belastungszyklen geschehen. Gemessen wird der Kraftabfall am Ankerkopf während einer vordefinierten Beobachtungszeit bei jeder Laststufe (ÖNORM EN ISO 22477-5, 2018).

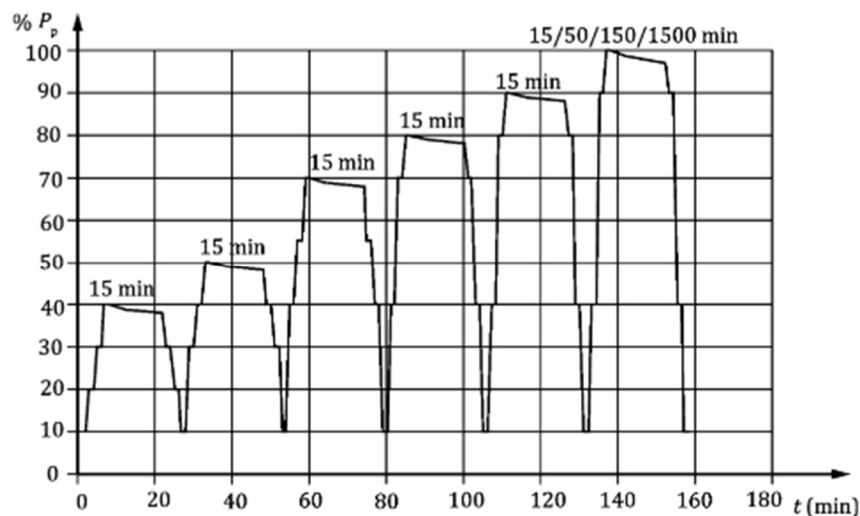


Abb. 9: Belastungsschema für eine Untersuchungsprüfung (ÖNORM EN ISO 22477-5, 2018)

### 4.2.3 Prüfverfahren 3

Bei Prüfverfahren 3 wird das Zugelement schrittweise von der Vorbelastung bis zur Prüflast belastet. Dies kann in einem oder mehreren Belastungszyklen geschehen. Gemessen wird die Verschiebung des luftseitigen Endes des Zuggliedes. Der Unterschied zu Prüfverfahren 1 (siehe Kapitel 4.2.1) liegt darin, dass die Last konstant gehalten werden muss (ÖNORM EN ISO 22477-5, 2018).

## 4.3 Untersuchungsmethoden für Mikropfähle

In ÖNORM EN 14199 (2015) ist definiert, dass: *„Versuche an Mikropfählen an Vorversuchs-Mikropfählen und/oder Bauwerks-Mikropfählen durchgeführt werden können“*. Ein Vorversuchs-Mikropfahl ist per Definition ein *„Mikropfahl, der vor Beginn der Herstellung der Bauwerks-Mikropfähle zu dem Zweck hergestellt wird, die Eignung der ausgewählten Pfahlbauart zu überprüfen und/oder den Entwurf, die Abmessungen und die Tragfähigkeit zu bestätigen“* (ÖNORM EN 14199, 2015). Wohingegen ein Bauwerks-Mikropfahl Teil des zukünftigen Bauwerks ist. Die Vorversuchs-Mikropfähle sollen, um plausible Ergebnisse zu liefern, den Bauwerks-Mikropfählen so ähnlich wie möglich sein. Daher muss für beide Typen die gleiche Pfahlart und das gleiche Herstellungsverfahren verwendet werden.

Mikropfähle können nach ÖNORM EN 14199 (2015) mit Hilfe der folgenden Vorgehensweisen getestet werden:

- Statische Probelastung,
- Dynamische Probelastung, und
- Integritätsprüfung.

### 4.3.1 Statische Probelastung

Sind statische Probelastungen erforderlich, können diese entweder last- oder weggesteuert durchgeführt werden. Werden statische Probelastungen an Vorversuchs-Mikropfählen durchgeführt, hat dies einen der folgenden Gründe:

- es kommen neue Techniken zur Herstellung von Mikropfählen zum Einsatz, für die es bis dato keine vergleichbaren Erfahrungen gibt;
- für die am Baufeld anstehenden in-situ Baugrundverhältnisse gibt es keine Erfahrungen aus früheren Probelastungen;
- die aufgebrachten Lasten sind höher, als bisher unter vergleichbaren Baugrundverhältnissen aufgebrachte Lasten;
- die Ergebnisse aus der statischen Probelastung werden zur Bemessung herangezogen.

Es sollte beachtet werden, dass statische Probelastungen an mindestens zwei Vorversuchs-Mikropfählen durchgeführt werden sollen (ÖNORM EN 14199, 2015). ÖNORM B 1997-1-1 (2013) sieht für auf Zug belastete Mikropfähle vor, dass mindestens an 3 % der zur Errichtung geplanten Pfähle, jedoch mindestens an drei Pfähle statische Probelastungen durchzuführen sind. Kommen statische Probelastungen an Bauwerks-Mikropfählen zum Einsatz *„sollten für die ersten 100 Mikropfähle mindestens an zwei Mikropfählen Probelastungen und für alle weiteren 100 Mikropfähle mindestens eine Probelastung durchgeführt werden“* (ÖNORM EN 14199, 2015). Werden die Bauwerks-Mikropfähle auf Zug belastet gilt mindestens zwei Probelastungen für die ersten 50 Mikropfähle durchzuführen plus eine weitere für alle weiteren 50 Mikropfähle.

Der Belastungsvorgang für statische Probelastungen wird in ÖNORM B 1997-1 (2013) geregelt. Wird eine solche bei Bauwerkspfählen durchgeführt, muss darauf geachtet werden, dass die maximale Prüflast die Gebrauchstauglichkeit nicht gefährdet – beispielsweise durch ein unzulässiges Reißen des Verpresskörpers und daraus folgend eine Beeinflussung des Korrosionsschutzes.

ÖNORM EN 14199 (2015) gibt weiters vor, dass horizontale Verschiebungen des Pfahlkopfes während des Prüfvorganges erfasst werden müssen. Außerdem muss die Probelastung die Belastungen des zukünftigen Bauwerks bestmöglich abbilden, was beispielsweise einer Be-, Ent- und Wiederbelastungs-Schleife entsprechen kann.

### 4.3.2 Dynamische Probelastung

Die ÖNORM EN 14199 (2015) beschränkt die Anwendung von dynamischen Probelastungen auf jene Situationen, *„in denen Erfahrungen oder Vergleiche mit statischen Probelastungen eine zuverlässige Auswertung und Interpretation erlauben“*. Die oben genannte Norm gibt weiters vor, dass nur erprobte Ausrüstung verwendet werden darf, und die Interpretation und Auswertung von qualifiziertem Personal durchgeführt werden muss. Zur besseren Interpretation sollten die gleichen Pfahltypen mit gleichen Längen und Dimensionen unter möglichst ähnlichen Baugrundverhältnissen unter statischen und dynamischen Probelastungen geprüft werden.

### 4.3.3 Integritätsprüfung

Ähnlich wie bei der dynamischen Probelastung gilt nach ÖNORM EN 14199 (2015) auch für die Integritätsprüfung, dass diese nur dann angewendet werden soll, wenn eine zuverlässige Auswertung und Interpretation möglich sind. Es sollte ausschließlich erprobtes Equipment von erfahrenen Personen verwendet werden, welche im Anschluss auch die Interpretation und Auswertung durchführen.

## 4.4 Ergebnisse von Zugelementuntersuchungen

Im folgenden Kapitel soll vorrangig aufgezeigt werden, dass bei Zugelementuntersuchungen genau darauf geachtet werden muss, welche Norm für den jeweiligen Anwendungsfall Gültigkeit hat, bzw. um welche Art des Zuggliedes es sich handelt. Tab. 2 zeigt eine Gegenüberstellung der Anforderungen zur Anzahl der zu prüfenden Pfähle bzw. zu den Abbruchkriterien – sofern diese in einer Norm erwähnt sind – bezogen auf die in Kapitel 4.1 erläuterten Prüfarten. Für die Erarbeitung dieser Tabelle wurden folgende Normen berücksichtigt:

- ÖNORM B 1997-1-1: (2013),
- ONR 24810: (2020), und
- ÖNORM EN 14199: (2015).

Die tabellarische Auflistung in Tab. 2 soll zeigen, dass es unerlässlich ist, vorab zu definieren, im Geltungsbereich welcher angeführten Norm sich ein Bauwerk befindet bzw. um welche Art von Zugelement es sich handelt. Anders formuliert bedeutet dies, dass beispielsweise ein Mikropfahl als solcher bemessen, ausgeführt und auch geprüft werden muss. Zusätzlich soll aufgezeigt werden, dass es auch Abweichungen bei den Abbruchkriterien wie beispielsweise dem maximal zulässigen Kriechmaß  $\alpha$  in Abhängigkeit der Nutzung und der Verwendung der Zugelemente gibt. Zur Prüfung von Zugelementen sieht die ONR 24810 (2020) zusätzlich Abhebekontrollen in regelmäßigen Abständen vor. Das Kontrollintervall hängt dabei stark von möglichen Überwachungseinrichtungen der Zugelemente ab. Sind keine derartigen Einrichtungen installiert, ist mindestens alle 8 Jahre eine Abhebekontrolle durchzuführen. Dieses Intervall verlängert sich auf 12 Jahre beim Vorhandensein von Überwachungseinrichtungen bzw. kann eine solche Kontrolle gänzlich entfallen, wenn es eine permanente Überwachung aller Zugelemente je Bauwerk gibt (ONR 24810, 2020). Als weiteres Abbruchkriterium, welches nicht in Tab. 2 berücksichtigt wurde, kann eine starke Kopfverformung angesehen werden. Diese Kriterium wird in ÖNORM EN 14490 (2010) definiert. Diese sagt aus, dass sich die Nagelverschiebung bei der Durchführung von Belastungsverfahren an Bodennägeln soweit stabilisieren muss, dass zwischen zwei Ablesezeiten nicht mehr als 0,5 mm an Verschiebung auftreten. Für den Fall, dass die Stabilisierung nicht eintritt, sieht die oben genannte Norm vor, auf die nächst höhere Laststufe zu wechseln, um so eine mögliche Stabilisierung zu erreichen. Der Gedanke hinter diesem Ansatz beruht auf der Tatsache, dass „zur Aktivierung der Last im passiven (stabilen) Bereich eine schrittweise Lösung der Einbindung während der Belastung des Nagels im aktiven Keilbereich hervorzurufen“ (ÖNORM EN 14490, 2010) ist. Außerdem würde es viele Tage dauern, wenn bei Haltedauern von bis zu 60 min die Lösung der Einbindung im aktiven Keilbereich angestrebt wird (ÖNORM EN 14490, 2010). In der Ausführungsnorm ÖNORM EN 14199 (2015) für Mikropfähle ist keine derartige Reglementierung für starke Kopfverformungen erwähnt.

Tab. 2: Gegenüberstellung der Anforderungen zu Mikropfahlprüfungen je Norm

Norm	Untersuchungsprüfung	Eignungsprüfung	Abnahmeprüfung
ÖNORM B 1997-1-1: (2013)	Anzahl der zu prüfenden Pfähle nur in Sonderfällen	auf Zug belastete Pfähle: min. 3% der vorgesehenen Pfähle min. n = 3	Keine Angabe über die Anzahl
	Abbruchkriterien Belastung bis zum Versagen	$k_s \leq 2$ mm bei zum Kriechen neigenden Böden	Nicht näher definiert
ONR 24810: (2020)	Anzahl der zu prüfenden Pfähle	Keine Angabe über die Anzahl	$n \geq 1$ je 25 Zugpfähle min. n $\geq 2$ je Verbauungsreihe
	Abbruchkriterien Nicht näher definiert	$k_s \leq 5$ mm bei zum Kriechen neigenden Böden	Prüfkraft muss erreicht werden Prüfkraft muss ausreichend lange gehalten werden – min. 5 Minuten $k_s \leq 5$ mm Prüfkraftabfall max. bis 1,1*Ea,k
ÖNORM EN 14199: (2015)	Anzahl der zu prüfenden Pfähle $n \geq 2$	Keine Angabe über die Anzahl	$n \geq 2$ für die ersten 100 Druckpfähle + min. 1 für alle weiteren 100 Druckpfähle $n \geq 2$ für die ersten 50 Zugpfähle + min 1 für alle weiteren 50 Zugpfähle
	Abbruchkriterien Belastung bis zum Versagen	Nicht näher definiert	Nicht näher definiert

## 4.5 Interpretation von Zugelementuntersuchungen

Im folgenden Kapitel wird über die Interpretation von Untersuchungsergebnissen diskutiert, solche Ergebnisse sind z.B. das Kriechmaß  $\alpha$  bei Prüfkraft  $P_p$ , die kritische Kriechkraft  $P_c$  oder die rechnerisch freie Stahllänge  $L_{app}$ .

### 4.5.1 Kriechmaß $\alpha$

Das Kriechmaß ergibt sich aus dem linearen Ende der Zeit-Verschiebungs-Linie bei konstant gehaltener Kraft. Die Berechnung erfolgt mittels untenstehender Formel (ÖNORM EN ISO 22477-5, 2018):

$$\alpha = \frac{(s_b - s_a)}{[\log(t_b) - \log(t_a)]} = \frac{(s_b - s_a)}{\log\left(\frac{t_b}{t_a}\right)} \quad (12)$$

mit

$s_a$  Verschiebung des Zuggliedes zum Zeitpunkt  $t_a$

$s_b$  Verschiebung des Zuggliedes zum Zeitpunkt  $t_b$

$t_a$  Beginn des betrachteten Zeitintervalls

$t_b$  Ende des betrachteten Zeitintervalls

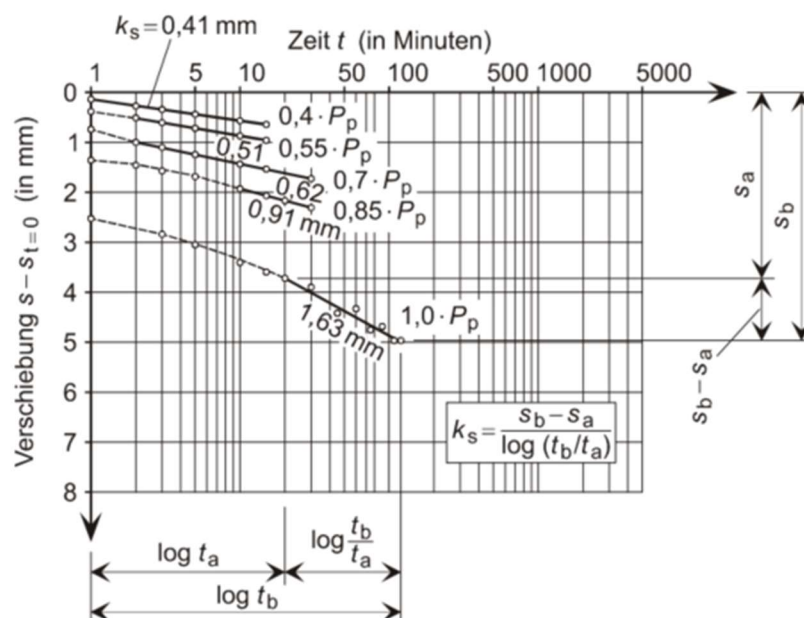


Abb. 10: Beispiel für Zeit-Verschiebungslinien zur Ermittlung der Kriechmaße  $k_s$  eines Dauerankers in nichtbindigem Boden (Möller, 2016)

Abb. 10 zeigt die Zeit-Verschiebungs-Linien für verschiedene Laststufen einer Prüfung mit den jeweiligen berechneten Kriechmaßen  $\alpha$ , in der Abbildung mit  $k_s$  bezeichnet. Die Kriechmaßgrenzwerte für Mikropfahlprüfungen aufgelistet je anzuwendender Norm sind Tab. 2 zu entnehmen.

### 4.5.2 Rechnerisch freie Stahllänge $L_{app}$

Mit der Ermittlung der rechnerisch freien Stahllänge  $L_{app}$  wird die Begrenzung der Kraftereinleitungsstrecke überprüft. Es beschreibt also jene Länge des Stahlzuggliedes die durch Freispülen völlig vom Verpresskörper getrennt ist. Berechnet wird dieser Wert „aus der elastischen Verschiebung des luftseitigen Endes des Zugglied bei der Entlastung von  $P_p$  auf  $P_a$ “ (ÖNORM EN ISO 22477-5, 2018). Die zugehörige Gleichung lautet nach ÖNORM EN ISO 22477 (2018) wie folgt:

$$L_{app} = \frac{A_t * E_t * \Delta s_{el}}{P_p - P_a} \quad (13)$$

Dabei ist

- $L_{app}$  die rechnerisch freie Stahllänge;
- $A_t$  die Querschnittsfläche des Zuggliedes;
- $E_t$  das Elastizitätsmodul des Ankerzuggliedes;
- $\Delta s_{el}$  die elastische Verschiebung des luftseitigen Endes des Zuggliedes;
- $P_p$  die Prüfkraft;
- $P_a$  die Vorbelastung.

Um eine eindeutige Zuordnung treffen zu können ist zu erwähnen, dass die rechnerisch freie Stahllänge ausschließlich bei Verpressankern als Prüfkriterium bzw. zur Abnahme der Bauwerke Anwendung findet.

### 4.5.3 Widerlagerverformung

Die Verformung, sowie die Anordnung der Widerlager kann bei der Durchführung von Prüfungen an Zugelementen einen großen Einfluss auf die gemessenen Ergebnisse haben. Daher gibt es in den bereits angeführten Normen diverse Hinweise zur Anordnung bzw. zur Berücksichtigung von Verformungen, welche nachfolgend erläutert werden.

Nach ÖNORM EN ISO 22477-5 (2018) ist darauf zu achten, dass die Kräfte, welche durch die Widerlagerkonstruktion in den Baugrund eingeleitet werden, keine nachteiligen Einflüsse auf die Messergebnisse, sowie Verformungen und Setzungen haben. Explizit erwähnt wird, dass die Widerlagerverformung während der Prüfung aufgezeichnet werden muss, wenn diese darauf ausgelegt ist den Kraftabfall im Zugglied zu messen. Die Norm sieht eine visuelle Begutachtung des Widerlagers nach jeder Laststufe vor, um etwaige Veränderungen frühzeitig zu erkennen (ÖNORM EN ISO 22477-5, 2018).



In ÖNORM EN 14490 (2010) wird ebenfalls festgehalten, dass das Reaktionssystem, welches einem Widerlager gleichzusetzen ist nach jeder Laststufe einer visuellen Prüfung zu unterziehen ist.

ONR 24810 (2020) geht davon aus, dass mindestens der fünffache Bohrdurchmesser als Abstand zwischen den Widerlagern und dem Mikropfahl gewählt werden muss, um die Einwirkungen so gering wie möglich zu halten. Für den Fall, dass der zu prüfende Mikropfahl in Festgestein (Fels) installiert ist, darf dieser Abstand verringert werden, sollte es das Trennflächengefüge erlauben. Weitere Ausführungen zu dieser Themenstellung sind in den Kapiteln 7.1 und 7.2 dieser Arbeit zu finden.

## 5 Zerstörungsfreie Prüfmethode

Zerstörungsfreie Prüfmethode, wie z.B. Ultraschallprüfungen oder Impuls-Echo-Methode werden oft fälschlicherweise als dynamische Prüfungen bezeichnet. Diese häufige Fehlinterpretation kann durch die Art der Untersuchung (in Form der Erfassung einer Wellenausbreitung) erklärt werden. Um die Unterschiede zu dynamischen bzw. schlag- und impulsartigen Methoden (vgl. Kapitel 6) zu erkennen werden nachfolgend die oben genannten zerstörungsfreien Prüfmethode erklärt.

### 5.1 Ultraschallprüfungen an Litzen- und Stabankern

Ultraschallprüfungen kommen seit Jahren im Bereich der zerstörungsfreien Prüfung, beispielsweise bei Betonbauten oder zur Qualitätskontrolle bei Schweißnähten zum Einsatz. Zur Erfassung von Korrosionsschäden an Ankern wurde zudem die Ultraschalluntersuchung als zerstörungsfreie Methode untersucht. Bei dieser Methode wird an einer frei gelegten, glatten Litze ein Prüfkopf aufgelegt, welcher Ultraschallwellen in diese einleitet. Diese Wellen werden von Oberflächen reflektiert, solche können z.B. Bauteiloberflächen, Risse und dergleichen sein. Der Prüfkopf nimmt die reflektierten Wellen auf und wertet diese aus. Die durchgeführten Prüfungen haben gezeigt, dass die Praxistauglichkeit noch nicht gegeben ist. Aufgetretene Probleme sind unter anderem, dass die eingebrachte Energie max. für 150 cm Länge reicht oder, dass die Verfügbarkeit von Prüfköpfen mit bestimmten Durchmessern nicht gegeben ist (Burtscher, et al., 2017).

### 5.2 Impuls-Echo-Methode (Low Strain)

Diese Methode wird auch häufig als Hammerschlagmethode, Pile Integrity Test (PIT) oder Low Strain Impact Integrity Testing of Deep Foundations bezeichnet. Es handelt sich dabei um eine Methode zur Beurteilung von Pfahlqualität und Pfahlintegrität. Mit dieser Methode kann die Länge von Pfählen oder Fundamenten, das Vorliegen von Querschnittsinhomogenitäten, sowie die Bauteilstärke abgeschätzt werden. Die Funktionsweise dieser Methode ist wie folgt, am Pfahlkopf wird meist durch einen Hammerschlag ein Impuls eingebracht. Diese Stoßwelle breitet sich entlang der Längsachse aus, wird vom Pfahlende (bzw. Unstetigkeiten) reflektiert und von einem Sensor am Pfahlkopf aufgezeichnet. Gibt es entlang des Pfahls Querschnittsänderungen oder Risse wird das Signal abgelenkt bzw. kann anhand der Zeit, die die Stoßwelle benötigt auf die Länge des Pfahles rückgeschlossen werden. Neben den Vorteilen dieser Methode was die rasche Ermittlung von Pfahlgeometrie und -kontinuität betrifft gibt es aber auch einige Einschränkungen. So kann beispielsweise über die Pfahltragfähigkeit keine Aussage getroffen werden oder im Fall, dass Risse den gesamten Querschnitt durchröhren, kann der Abschnitt darunter nicht untersucht werden (Hübner, 2019).

## 6 Dynamische Untersuchungen bei geotechnischen Elementen

In diesem Kapitel wird auf bereits etablierte und in der Praxis Anwendung findende, dynamische Prüfmethoden, sowie auf derartige Untersuchungsmethoden in der Geotechnik eingegangen. Es werden vorrangig Methoden vorgestellt, welche dynamische (schlagartige) Druckbeanspruchungen simulieren können.

### 6.1 Dynamische Untersuchungsmethoden

Dynamische Untersuchungsmethoden kommen häufig zur Anwendung, um „*das Schwingungsverhalten von bestehenden Bauwerken in-situ zu erfassen und um im Rahmen von Bahnprojekten Verkehrserschütterungen zu simulieren*“ (Austrian Institute of Technologie, 2021). Der Mobile Seismic Simulator, kurz MoSeS ist ein hydraulischer Schwingungserreger, welcher vom Austrian Institute of Technologie entwickelt wurde. Dabei handelt es sich um eine Hydraulikeinheit, welche mit einem Schwingerreger und der zugehörigen Messtechnik auf einem geeigneten Fahrzeug montiert ist, siehe Abb. 11. Die Krafterleitung in den Untergrund erfolgt über drei Punkte, gleichzeitig werden über diese drei Punkte Messungen durch eingebaute Piezometer in vertikaler Richtung durchgeführt.



Abb. 11: Gesamtaufbau des Mobile Seismic Simulator (Austrian Institute of Technologie, 2021)

Charakteristische Einsatzgebiete dieser Prüfmethode sind beispielsweise (Austrian Institute of Technologie, 2021):

- Simulation von schienengebunden Fahrzeugen,
- Feststellung der Dauerhaftigkeit, vorrangig bei Hochgeschwindigkeitsstrecken, oder
- Künstliche Bauwerksanregung zum Nachweis der Erdbebenbemessung.

## 6.2 Dynamische Prüfmethode für Pfähle

Die ersten dynamischen Prüfmethode beruhen auf der Annahme, dass es eine Korrelation zwischen der Pfahltragfähigkeit und dem Rammfortschritt gibt. Aus diesem Ansatz wurden zahlreiche, auf Energiebilanzierung basierende Rammformeln entwickelt, welche jedoch nicht ausreichend genau auf den Gesamtvorgang eingehen. Neuere dynamischen Prüfmethode funktionieren im Gegensatz zu den oben genannten Rammformeln auf Basis der Wellenausbreitung. Der Versuchsablauf ist im Allgemeinen so, dass der zu prüfende Pfahl durch eine fallende Masse, oder durch eine pneumatische Einrichtung stoßartig belastet wird. Während dieses Vorganges werden am Pfahlkopf „*Geschwindigkeits- und Dehnungszustände als Funktion der Zeit aufgezeichnet*“ (Kolymbas D., 1989). Um mit Hilfe dieser Signale auf die Tragfähigkeit zu schließen, gibt es unterschiedliche Auswertungsverfahren, wie beispielsweise das CAPWAP-Verfahren (Case Pile Wave Analysis Programm) (Kolymbas D., 1989).

## 6.3 Dynamische Pfahlprüfung

Dynamische Pfahlprüfungen haben im Vergleich zur statischen Variante einige Vorteile, so kann z.B. das verankerte Widerlager entfallen. Um weitere Vorteile zu erläutern, wird nachfolgend auf die Anwendungsmöglichkeiten von dynamischen Pfahlprüfungen anhand von Beispielen eingegangen.

### 6.3.1 Dynamic Load Testing (DLT)

Die Idee hinter der Entwicklung des Dynamic Load Testings war es, Informationen über das Verhalten von Großbohrpfählen während einer dynamischen Pfahlprüfung zu erhalten. Mit den Vorteilen einer schnelleren Durchführung der Prüfung und einem weniger aufwendigen Prüfaufbau als bei statischen Versuchen (vgl. APTS (2021)) wurde diese Variante während der späten 60er- bis in die 80er-Jahre etabliert (Allnatics, 2021).

Die Anwendungsgebiete beschränken sich dabei auf:

- Bohrpfähle, die eine sehr hohe Tragfähigkeit aufweisen, woraus folgt, dass es nicht (oder nur mit erheblichem Aufwand) möglich ist, eine ausreichende Beanspruchung über statische Versuche zu generieren, um den Pfahl bis zum Versagen zu testen (z.B. Pfähle für Bohrinseln oder Off-shore Windparks);
- Vorgefertigte Betonpfähle;
- Pfähle mit konstantem Querschnitt.

Bei Ortbetonpfählen ist dieses Prüfverfahren nicht empfohlen, da die hohe Aufprallenergie der Masse Schäden am Pfahl verursachen kann. Eine Reduktion der auftretenden Spannungen beim Aufprall durch eine Reduktion der Fallmasse würde jedoch die Genauigkeit der Untersuchung mindern (Allnatics, 2021).

Der Ablauf der Prüfung ist wie folgt, zu Beginn wird entweder über einen Bären/Hammer oder einem anderen Fallgewicht, wie beispielsweise in Abb. 12 dargestellt, eine impulsartige Last auf den zu prüfenden Pfahl aufgebracht. Die dadurch erzeugte Stoßwelle breitet sich entlang der Pfahlachse aus, wird am Pfahlfuß reflektiert und kommt zurück zum Pfahlkopf. (Allnamics, 2021)



Abb. 12: Beispiel eines Versuchsaufbaues für DLT mit einem Fallgewicht (Allnamics, 2021)

Diese Stoßwelle wird anschließend von den nahe am Pfahlkopf angebrachten Dehnungs- bzw. Beschleunigungsmessgeräten aufgenommen. Bei diesem Verfahren wird das Last-Verformungsverhalten mittels Signalüberlagerung bestimmt. Von besonderer Bedeutung ist hierbei die Spannungswellengeschwindigkeit  $c$ , mit welcher bei homogenen Pfählen der E-Modul rückgerechnet werden kann. Diese Geschwindigkeit wird anhand der Zeit bestimmt, die die Stoßwelle benötigt, um vom Pfahlkopf zum Pfahlfuß und zurück zum Pfahlkopf zu gelangen. Eine genauere Darstellung hierzu ist in Abb. 13 gegeben. Die am Pfahlkopf aufgebracht Last wird nach Gleichung (14) ermittelt. (Middendorp, et al., 2000)

$$F = E * A * \varepsilon \quad (14)$$

Dabei sind:

- F auf dem Pfahlkopf aufgebracht Kraft
- E Elastizitätsmodul des Betons
- A Pfahlquerschnittsfläche
- $\varepsilon$  gemessene Stauchung

Wie bereits erwähnt kann mit Hilfe der Spannungswellengeschwindigkeit  $c$  und Gleichung (15) auf den E-Modul rückgerechnet werden. Dies ist erforderlich, da es bei Bohrfählen nicht immer möglich ist, den E-Modul bzw. die Querschnittsfläche mit ausreichender Genauigkeit direkt zu bestimmen. (Middendorp, et al., 2000)

$$E = c^2 * \rho \quad (15)$$

Mit:

$$c \quad \text{Spannungswellengeschwindigkeit} = \frac{2L}{T}$$

$\rho$  Betondichte

Durch Einsetzen von Gleichung (15) in Gleichung (14) lässt sich somit die auf den Pfahl aufgebrachte Last bestimmen. (Middendorp, et al., 2000)

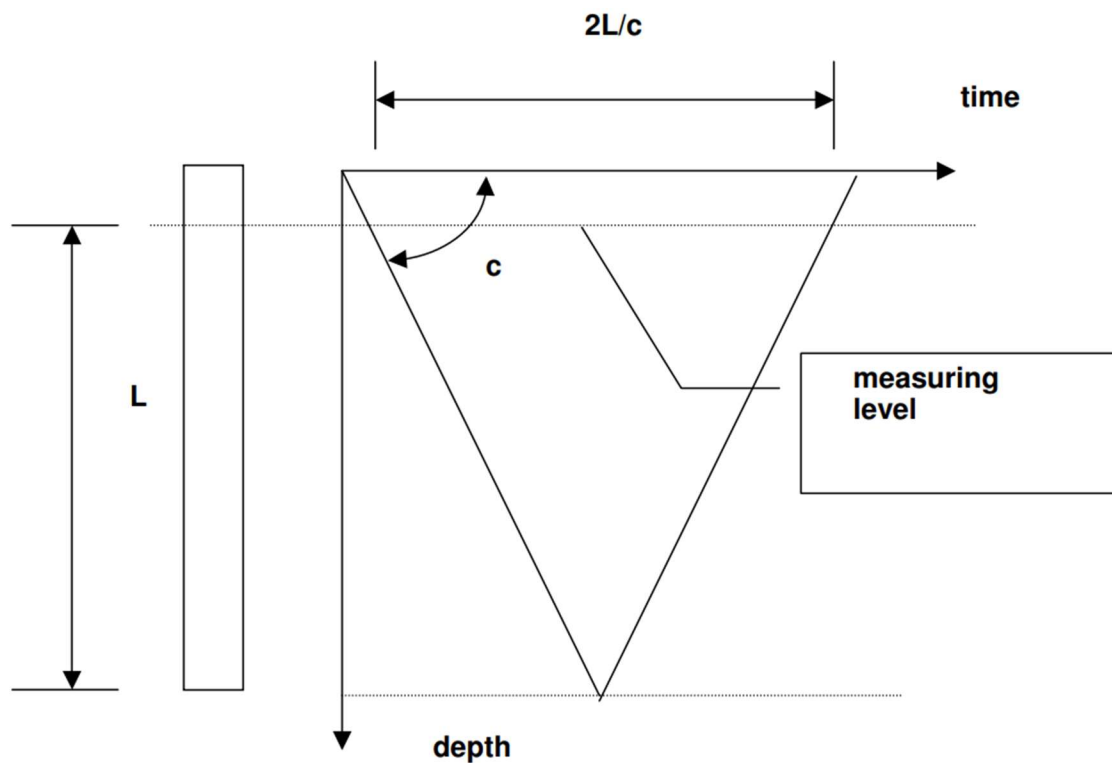


Abb. 13: Berechnung der Spannungswellengeschwindigkeit  $c$  (Middendorp, et al., 2000)

### 6.3.2 Dynamische Pfahlprobelastung an Holzpfählen

Für die Fundierung von zwei Durchlassbauwerken eines Rückhaltebeckens im Südburgenland, Bezirk Güssing, kamen Holzpfähle zur Anwendung. Aufgrund fehlender Vorgaben zur Bestimmung der Tragfähigkeit dieser Pfähle in der Normung kamen statische Probelastungen zur Anwendung, auf deren Ergebnissen die Bemessung aufgebaut wurde. Auf Basis der in Abb. 14 dargestellten Kraft-Setzungslinien wurde der Bemessungswert für die Tragfähigkeit  $R_{c,d,stat}$  nach ÖNORM B 1997-1 ermittelt und ergab sich zu 518 kN.

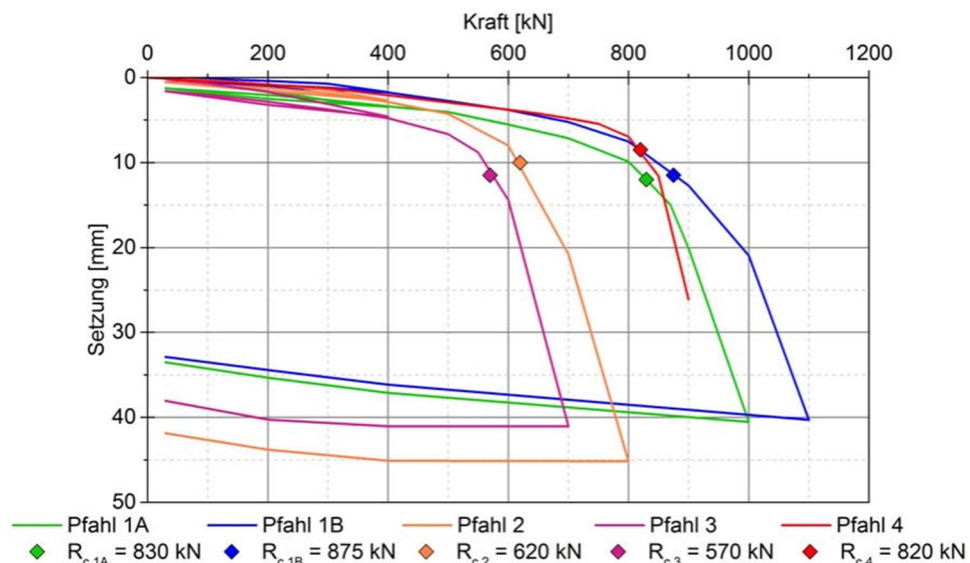


Abb. 14: Kraft-Setzungslinie je Pfahl (Steurer & Adam, 2012)

Zusätzlich wurden dynamische Probelastungen mit einer für diesen Zweck entworfenen Messramme (siehe Abb. 15) durchgeführt. Das Prüfgerät bestehend aus einem Rammbarren, den Führungsstangen und der Vorrichtung zur Befestigung am zu prüfenden Pfahl hat ein Gesamtgewicht von 12,5 kN. (Steurer & Adam, 2012)

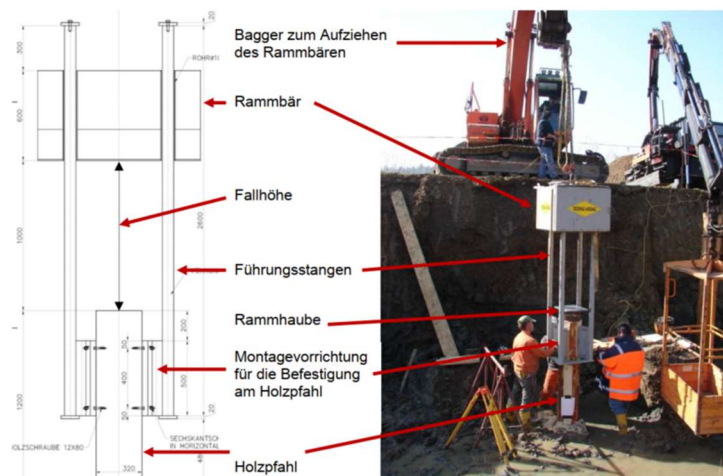


Abb. 15: Messramme bestehend aus Rammbar, Führungsstangen und Montagevorrichtung am Holzpfahl (Steurer & Adam, 2012)

Um einen Prüfvorgang durchzuführen muss das Fallgewicht, in diesem Fall mit einem Bagger, auf die Starthöhe gebracht werden. Im nächsten Schritt „*wird die Kette ausgeklinkt, der Rammbar fällt auf den Holzpfahl und der Rammbar prallt nach dem Stoß zurück*“ (Steurer & Adam, 2012).

Durch den Rückprall kommt es zu einem zweiten Stoß, somit besteht jede Prüfung aus mindestens einem Doppelstoß. Der Auswertung liegen einfache Rammformeln nach Schenk (1951) zu Grunde, auf welche nachfolgend kurz eingegangen wird. Mit Hilfe des Energieerhaltungssatzes und Abb. 16 kann nach Schenk (1951) die dynamische Eindringwiderstandskraft  $Q_{dyn}$  errechnet werden, siehe Gleichung (16). Dabei wird auch der Wirkungsgrad C des Stoßes berücksichtigt.

$$Q_{dyn} = \frac{C * m_{bär} * g * h}{s_{pl} + \frac{1}{2} * s_{el}} \quad (16)$$

Dabei ist

$Q_{dyn}$	dynamische Eindringwiderstandskraft
$C$	Wirkungsgrad des Stoßes
$m_{bär}$	Masse des Rammbaren
$g$	Erdbeschleunigung
$h$	Fallhöhe des Rammbaren
$s_{pl}$	plastische Pfahlbewegung zufolge des Stoßes
$s_{el}$	elastische Pfahlbewegung zufolge des Stoßes

Auf zusätzliche Herleitungen von beispielsweise des Wirkungsgrades C wird nicht weiter eingegangen.

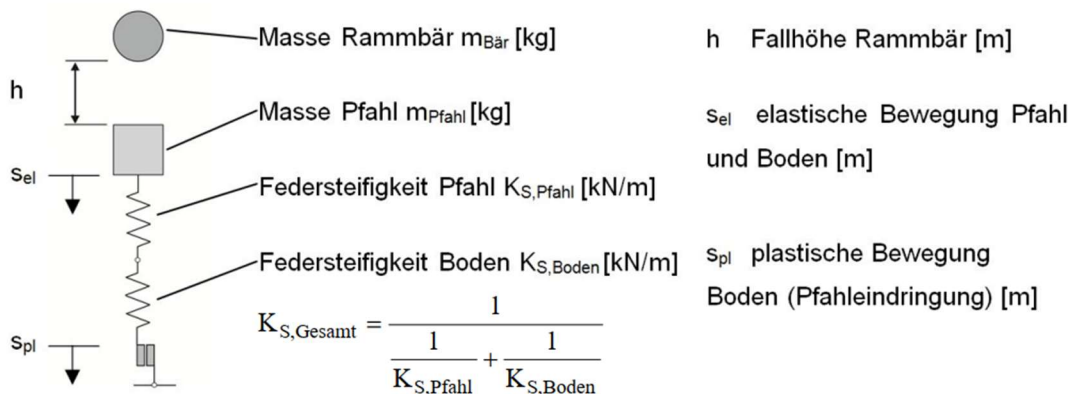


Abb. 16: Masse-Feder-Modell zur Herleitung der Rammformel (Steurer & Adam, 2012)



Während der Prüfung wurden die vertikalen elastischen und plastischen Pfahlbewegungen (siehe Abb. 17) mit der zugehörigen Zeitdauer gemessen. Um eine zusätzliche Kontrollmöglichkeit zu haben, wurden die Pfahlbewegungen auch händisch aufgezeichnet. Durch den Vergleich der Ergebnisse aus statischen und dynamischen Pfahlprobelastungen konnte die Funktionalität und Anwendbarkeit der Messramme für dynamische Prüfungen nachgewiesen werden. (Steurer & Adam, 2012)

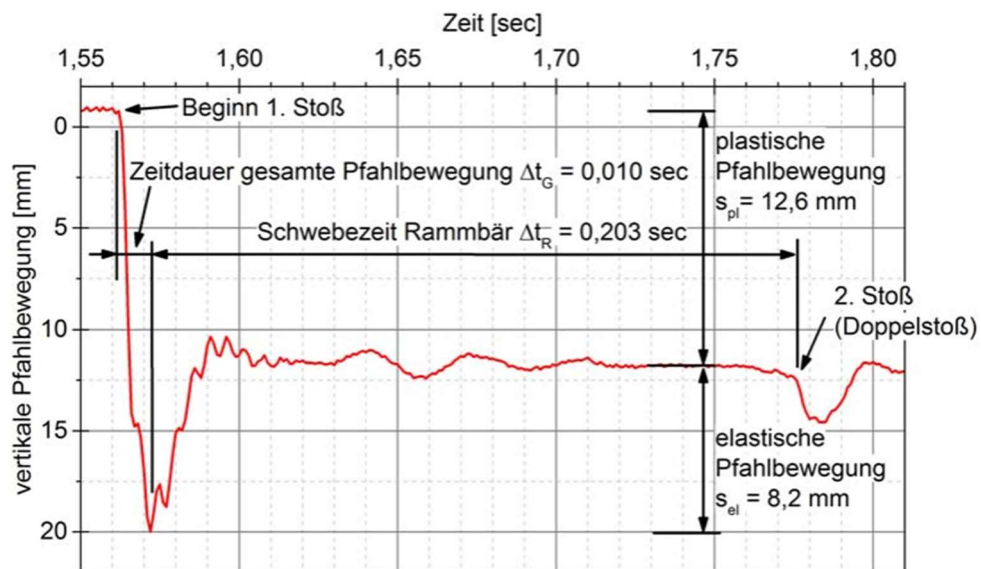


Abb. 17: Aufzeichnung des Wegaufnehmers für einen „Doppelstoß“ (Steurer & Adam, 2012)

## 6.4 Dynamische Prüfung von Zuelementen

Zum derzeitigen Stand der Technik zur Thematik der dynamischen Ankerprüfung muss gesagt werden, dass hauptsächlich zerstörungsfreie Methoden, siehe Kapitel 5, Anwendung finden. Des Weiteren muss erwähnt werden, dass im aktuellen Anwendungsfall einer dynamischen Prüfung, das zu untersuchende Element ausschließlich auf Druck belastet wird. Die Tatsache, dass noch keine geeigneten Prüfverfahren für dynamische Zugbeanspruchungen vorhanden sind, bzw. diese sich bisher nicht etabliert haben, ist einer Vielzahl von Faktoren geschuldet. Zum einen ist das Einsatzgebiet einer solchen Prüfung ein sehr kleines, da eines der Abbruchkriterien bei Zuelementen das Kriechen ist und daher eine zeitliche Beobachtung (und Beanspruchung) zur Bestimmung dieses erforderlich ist. D.h. die Anwendung von dynamischen Pfahlprüfungen für Zugpfähle findet im Idealfall für Zuelemente statt, welche hauptsächlich dynamisch belastet werden. In anderen Bereichen des Bauwesens hat es bereits Untersuchungen auf dynamische Beanspruchungen gegeben, siehe beispielsweise Brandes, et al (1986), um die Auswirkungen einer dynamischen Beanspruchung auf Betonbauteile zu erfassen. Versuche dieser Art wurden schon häufig für diverse Baustoffe durchgeführt, diese Methoden schaffen es jedoch kaum die komplexe Interaktion zwischen Boden und Verpresskörper zu beschreiben.

## 7 Problemstellungen der Prüfungen von Mikropfählen bei Schutzbauten

Wie in Kapitel 4 bzw. 6.4 angeführt, ist die Durchführung dynamischer (schlag- und impulsartiger) Prüfungen bei Mikropfählen (generell Zugelementen) mit einigen Randbedingungen verbunden. Daher soll in nachfolgendem Kapitel ein Verbesserungsvorschlag für den Stand der Technik im Bereich der statischen Prüfung von Mikropfählen bei Schutzbauten erarbeitet werden, ehe in Kapitel 8 auf die Möglichkeiten einer dynamischen Prüfung eingegangen wird.

### 7.1 Abbruchkriterien für die Prüfung von Mikropfählen bei Schutzbauten

Die ONR 24810 (2020) zum Technischen Steinschlagschutz definiert folgende Abbruchkriterien für die Abnahmeprüfung von Mikropfählen (vgl. Tab. 2):

- Die vorgegebene Prüfkraft muss erreicht werden;
- Die vorgegebene Prüfkraft muss ausreichend lange gehalten werden - mind. 5 Minuten;
- Ein Kriechmaß von  $k_s = 5 \text{ mm}$  darf nicht überschritten werden;
- Der Prüfkraftabfall im Beobachtungseitraum darf  $1,1 * E_{a,k}$  nicht überschreiten, wobei  $E_{a,k}$  die charakteristische Einwirkung ist.

Die beiden ersten Kriterien können hier sehr einfach durch die Anbringung einer Kraftmesszelle oder die Erfassung der Pressenkraft vorgenommen werden. Die Erfassung des Kriechmaßes wie in Kapitel 4.5.1 beschrieben gestaltet sich jedoch auf Grund der Umgebungsbedingungen und des meist unwegsamen Geländes (vgl. Abb. 18) entsprechend schwierig.

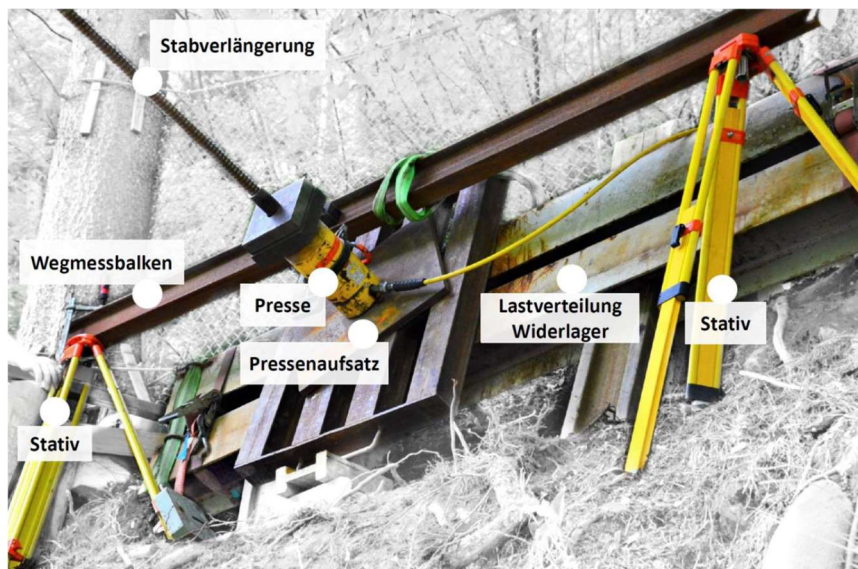


Abb. 18: Aufbau zur Erfassung des Kriechmaßes bei der Prüfung von Zugelementen bei Schutzbauten (Hübner, 2019)

Wird das zuletzt beschriebene Kriterium überschritten, muss zuerst geprüft werden, ob ein mögliches Einsinken der Widerlager der Grund für den Kraftabfall ist. Zur Berücksichtigung der Widerlagerverformung gibt es für Mikropfähle keine explizite Vorgehensweise, wohingegen es nach ÖNORM EN 14490 (2010) einen Vorschlag zur Berücksichtigung dieser Verformung für Bodenvernagelungen gibt. Wenn man die Wirkungsweise der Bodennägel mit jener der Mikropfähle vergleicht, erkennt man, dass das Einzeltragverhalten der schlaffen Zugglieder grundsätzlich sehr ähnlich ist. Dieser Sachverhalt stützt die Idee, die Abbruchkriterien für starke Kopfverformungen für Bodenvernagelungen nach ÖNORM EN 14199 (2015) auch auf Mikropfähle sinngemäß umzulegen.

## 7.2 Vorschläge für Prüfaufbau und Abläufe der Abnahmeprüfung von Mikropfählen bei Schutzbauten

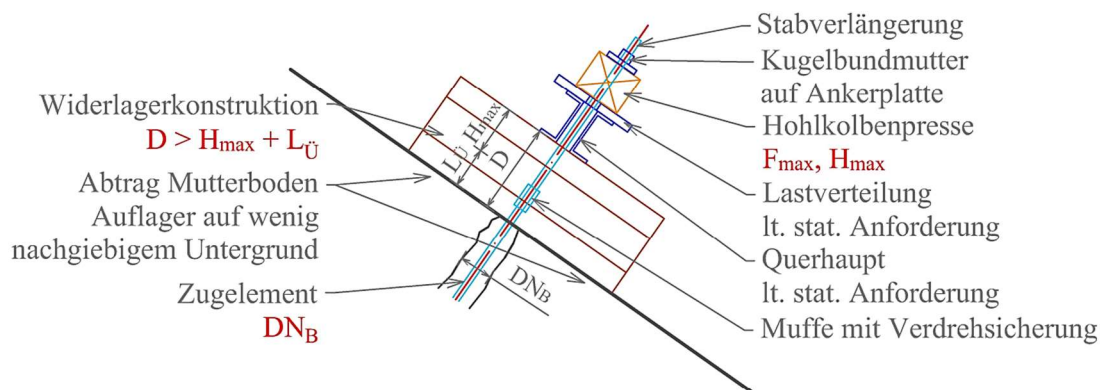
Dieses Kapitel soll Verbesserungsvorschläge für Prüfaufbauten und Abläufe aufzeigen, welche den aktuellen Stand der Technik aus Kapitel 7.1 anwendungsnäher bzw. praktikabler abbilden können.

### 7.2.1 Anforderungen an die Prüfung und das Prüfequipment

Bei der Durchführung von Abnahmeprüfungen an Mikropfählen wird im Regelfall eine statische Zuglast mittels Hohlkolbenpresse auf das zu untersuchende Zugelement aufgebracht, zu sehen in Abb. 19. Dabei muss die Hohlkolbenpresse eine ausreichende Hubkraft  $F_{max}$  und einen ausreichend großen Hub  $H_{max}$  aufbringen können. Die Presse kann manuell, elektrisch oder pneumatisch gesteuert werden. Bei der Ausbildung der Widerlager ist darauf zu achten, dass die an die Rahmenbedingungen angepassten Holz-, Stahl- oder Betonelemente zur Herstellung der Widerlagerkonstruktion mit einem Mindestabstand von  $> 5 * DN_B$  von der Stabachse eingebaut werden, siehe ONR 24810: (2020) - Kapitel 6.2.3.4.5. Der Untergrund ist für die Prüfung vorzubereiten, so sind beispielsweise im Bereich der Widerlager die Deckschichten und der Bewuchs zu entfernen, um eine vollflächige, tragfähige Aufstandsfläche der Widerlager zu gewährleisten. Die Höhe der Widerlager -  $D > H_{max} + L_{\ddot{u}}$  - ist so zu konstruieren, dass ein Verklemmen zwischen Muffe und Querhäupter nicht stattfinden kann.

Ein derartiger Versuchsaufbau kann im Regelfall von 3 – 4 Personen transportiert und aufgebaut werden. Unter den Bedingungen im geneigten und schwer zugänglichen Gelände ist dies jedoch oftmals eine herausfordernde Aufgabe. Zudem ist die Anpassung an den Untergrund, der Ausgleich von Neigungsunterschieden aber auch die Anpassung an die Randbedingungen der Prüfung oftmals schwierig und wird daher in der Praxis nur unzureichend umgesetzt.

## Ansicht



## Draufsicht

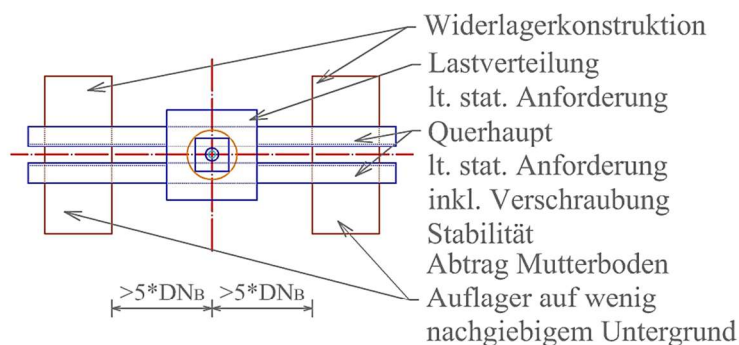


Abb. 19: Schematische Darstellung des Prüfaufbaues zur Abnahmeprüfung; Ansicht (oben); Draufsicht (unten)

## 7.2.2 Vorschlag zu einer Anpassung der Abbruchkriterien und des Prüfaufbaues

Aufbauend auf den in Kapitel 7.1 beschriebenen, aktuell anzuwendenden Abbruchkriterien nach ONR 24810 (2020) wird im folgenden Abschnitt auf eine mögliche Optimierung bzw. eine Anpassung des Prüfaufbaues hingewiesen.

Es sollte grundsätzlich überlegt werden, ob es im Bereich von Schutzbauten sinnvoll ist Mikropfähle, welche als Fundamentelemente dienen, durch das Abbruchkriterium des Kriechmaßes  $k_s$  zu reglementieren. Die Begründung für diese Annahme ist, dass es im Anwendungsfall äußerst unwahrscheinlich ist, dass dieses Kriterium maßgebend wird, da die Belastung schlag- bzw. impulsartig stattfindet und sich diese Mikropfähle zusätzlich häufig in Hangschutt und Blockhalden befinden welche nicht kriechgefährdet sind (vgl. Augustensen (2006)). Des Weiteren stellt die Messung der Verschiebung, welche als Eingangsparameter für die Berechnung des Kriechmaßes  $k_s$  dient, ein großes Problem dar. Wie bereits angeführt, ist die Erfassung der Kopfverschiebungen mit großen Unwägbarkeiten verbunden, da es vor allem im steilen Gelände schwierig ist, ein Messstativ in eine geeignete Position zu bringen (vgl. Abb. 18).

Als möglicher Ersatz für dieses Abbruchkriterium würde sich ein absoluter Wert für den Ausziehweg anbieten. Eine Obergrenze hierfür könnte eine Beschränkung des stabparallelen Ausziehweges (in Achse der Presse) auf 5 mm sein. Der Wert für den Ausziehweg sollte dabei mit jenem Wert korrelieren, welcher benötigt wird, um die Grenzmantelreibung zwischen Verpresskörper und dem angrenzenden Bodenmaterial zu überschreiten. Bei diesem Kriterium ist zu erwähnen, dass es ausschließlich das Ausziehen des Mikropfahls berücksichtigt und somit eine Relativverschiebung durch ein mögliches Einsinken des Widerlagers kompensiert werden muss, wie dies in Abb. 20 und Gleichung (17) vorgeschlagen wird.

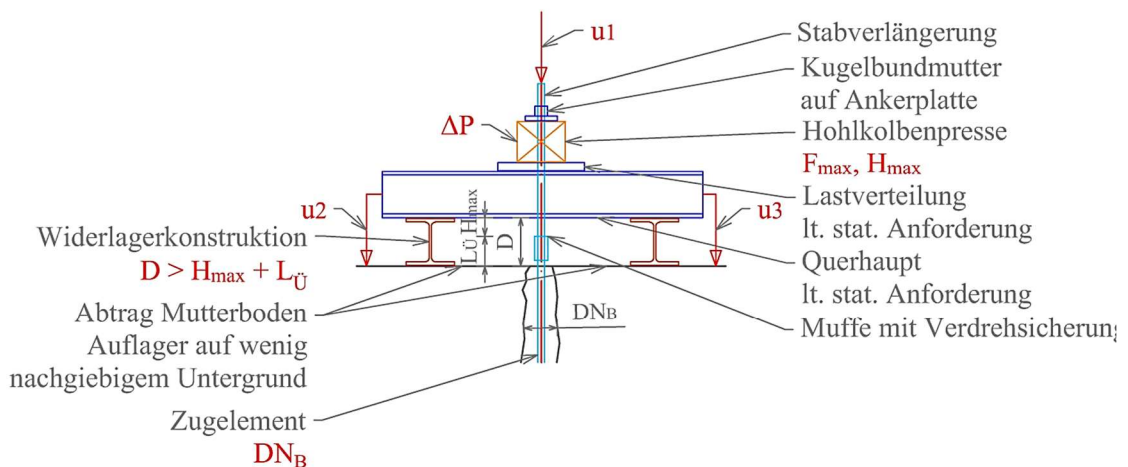


Abb. 20: Schematische Darstellung des Prüfaufbaues inkl. der zu messenden Kriterien. Unter der Annahme, dass sich die beiden Widerlagerkonstruktionen gleichermaßen verformen ( $u_2 = u_3$ ) und die Durchbiegung der Querhäupter vernachlässigbar klein ist, ergibt sich der Ausziehweg  $A_{MP}$  des Mikropfahles und damit ein mögliches Abbruchkriterium für die Abnahmeprüfung für Mikropfähle als Fundierung bei Schutzbauten zu:

$$A_{MP} = u_1 - u_2 < 5\text{mm} \quad (17)$$

Diese Vorgehensweise lässt sich bei Kompensation der Verformungen auch bei ungleichmäßigen Setzungen zwischen den beiden Widerlagerkonstruktionen anwenden, sofern eine Mittelwertbildung der Setzung vorgenommen wird. Zusammenfassend lassen sich hieraus folgende Abbruchkriterien für Abnahmeprüfungen von Mikropfählen bei Schutzbauten ableiten:

- Die vorgegebene Prüfkraft muss erreicht werden (ONR 24810, 2020);
- Die Widerlagerkonstruktion muss sich entsprechend gleichmäßig setzen;
- Der Prüfaufbau muss entsprechend massiv ausgeführt werden, um keine Verformungen aufzuweisen;
- Der absolute Ausziehweg  $A_{MP}$  als Differenz zwischen der Verschiebung des Zuggliedes und der Widerlagerkonstruktion darf 5 mm nicht überschreiten.

## 8 Impulsartige Prüfung von Zugelementen

In diesem Kapitel wird ein Konzept zur (dynamischen) impuls- bzw. schlagartigen Zugprüfung von Mikropfählen näher beschrieben. Hierzu wird einleitend auf das Konzept und die Grundlagen eines Prüfgerätes eingegangen um anschließend den hergestellten Versuchsaufbau näher zu betrachten und zu beschreiben.

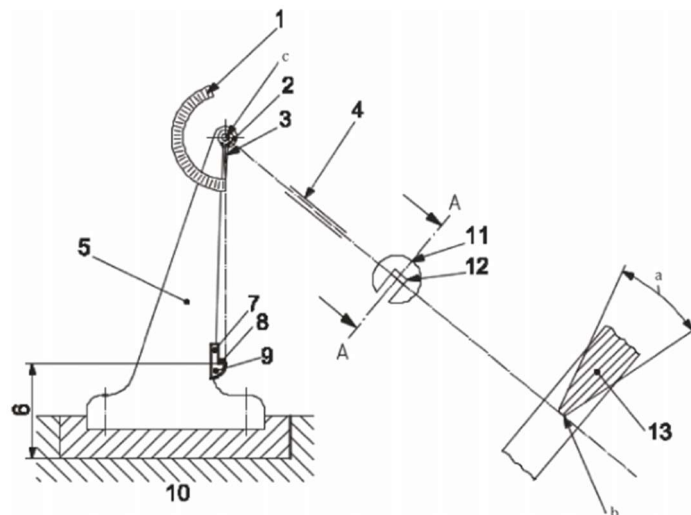
### 8.1 Konzept und Methode

Das Konzept hinter einer impulsartigen Prüfmethode für Mikropfähle ist es, eine dynamische bzw. schlagartige Zugbelastung auf das Zugelement aufzubringen. Der Hintergrund für eine impulsartige Prüfung auf Zug ist, dass passiv wirkende Zugelemente häufig im Bereich von Schutzbauten zum Einsatz kommen und beispielsweise als Verankerungen bzw. für die Fundierung von Steinschlagnetzen dienen. Werden diese Schutzbauten belastet, geschieht dies im Regelfall schlagartig – in Form eines Impulses durch beispielsweise ein Steinschlagereignis. Um diese Belastung bestmöglich zu simulieren, wurden einige Entwürfe für mögliche Prüfaufbauten skizziert, siehe Kapitel 8.2. Diese wurden auf ihre Vor- und Nachteile sowie ihre Umsetzbarkeit hin untersucht, wobei die Entscheidung auf jene Aufbau fiel, welcher auf dem Versuchsaufbau des Kerbschlagbiegeversuchs nach Charpy basiert. Dieses Prüfverfahren wird nachfolgend beschrieben.

#### 8.1.1 Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy

Der Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy ist ein Verfahren zur Prüfung von metallischen Werkstoffen, um deren Kerbzähigkeit zu bestimmen und wird durch ÖNORM EN ISO 148-1: (2016) geregelt.

Der Ablauf dieser metallischen Werkstoffprüfung geschieht wie folgt, eine gekerbte Probe wird in das Pendelschlagwerk, zu sehen in Abb. 21, eingelegt und soll „mit einem Schlag eines Pendelhammers durchgeschlagen“ (ÖNORM EN ISO 148-1, 2016) werden. Bei diesem Vorgang wird durch das Verformen bzw. Durchschlagen der metallischen Probe eine gewisse Schlagenergie verbraucht. Diese Reduktion der Energie wird wie die seitliche Ausdehnung der Probe, sowie das Bruchaussehen protokolliert. Da es sich bei dieser Prüfung um einen Laborversuch handelt, ist darauf zu achten, dass die definierte Prüftemperatur eingehalten wird, da metallische Werkstoffe ihr Verhalten mit wechselnder Temperatur ändern und somit auch die verbrauchte Schlagenergie variiert. Anwendung findet dieses Verfahren sowohl in Industrie und Konstruktionsbereichen als auch in der Forschung und im akademischen Bereich (ÖNORM EN ISO 148-1, 2016).



c) Pendelschlagwerk

**Legende**

1	Skala	8	Probe	a	Winkel des Finnenkeils
2	Pendellager	9	Auflager für die Probe	b	Radius der Finnenschnaide
3	Schleppzeiger	10	Fundament	c	Drehachse
4	Pendelstange	11	C-Form-Hammer		
5	Maschinengestell	12	Finnenschnaide		
6	Maschinensockel	13	Hammerfinne		
7	Widerlager				

Abb. 21: Pendelschlagwerk (ÖNORM EN ISO 148-2, 2016)

## 8.1.1.1 Ermittlung der verbrauchten Energie

Zur Berechnung der verbrauchten Energie eines Schlages wird nach ÖNROM EN ISO 148-2 (2016) Gleichung (18) verwendet. Zur besseren Verständlichkeit bietet Abb. 22 eine Darstellung der verwendeten Parameter.

$$KV = F * l_2 * (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (18)$$

Mit:

$KV$  berechnete verbrauchte Energie [J]

$F$  die vom Pendel im Abstand  $l_2$  in der waagrechten Position auf das Kraftanzeigergerät ausgeübte Kraft, in Newton;

$l_2$  Abstand zwischen dem Angriffspunkt der Kraft  $F$  und der Drehachse, in Meter;

$\alpha^b$  Fallwinkel, in Grad;

$\beta^a$  Steigwinkel, in Grad.

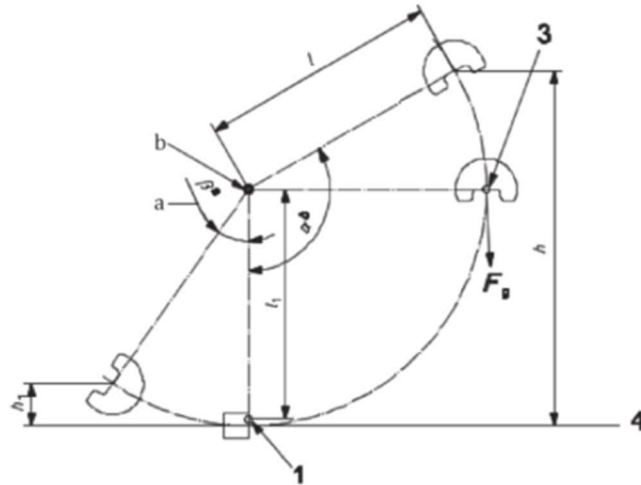


Abb. 22: Begriffe für die Energiebestimmung (ÖNORM EN ISO 148-2, 2016)

Es wird darauf hingewiesen, dass der Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy nur als Basis für einen später verwendeten Versuchsaufbau für die impulsartige Zugkraftprüfung dient. Es werden hierbei weder die verbrauchte Schlagenergie noch eine verformte oder zerstörte Probe analysiert. Da es sich bei der Mikropfahlprüfung um einen Feldversuch zur Überprüfung der äußeren Tragfähigkeit eines Zuggliedes handelt, spielen die Temperatur und die Systemreibung eine untergeordnete Rolle und werden bis auf Weiteres vernachlässigt.

Der oben dargestellte Kerbschlagversuch dient lediglich als Einführung, um die Grundlagen des Versuchsaufbaues und die damit verbundenen Energieeintragungsmöglichkeiten darzustellen.

## 8.2 Planung Versuchsaufbau

In diesem Kapitel wird auf die Entwicklung des Versuchsaufbaus für eine schlagartige Beanspruchung von Mikropfählen eingegangen. Hierbei wird einleitend auch auf die Genesis des Konzeptes, beginnend mit einer ersten Handskizze bis hin zum 3D-Modell eingegangen, ehe in Kapitel 8.2.3 auf die finale Version eingegangen wird.

### 8.2.1 Versuchsaufbau „Fallgewicht 1“

Der Versuchsaufbau „Fallgewicht 1“ basiert auf der Idee einen Prüfturm zu verwenden. Dieser Turm besteht aus der Tragkonstruktion mit vier Führungsstäben an den vier Eckpunkten, einer fallenden Masse und den Kraftumlenkungseinrichtungen, siehe Abb. 23.



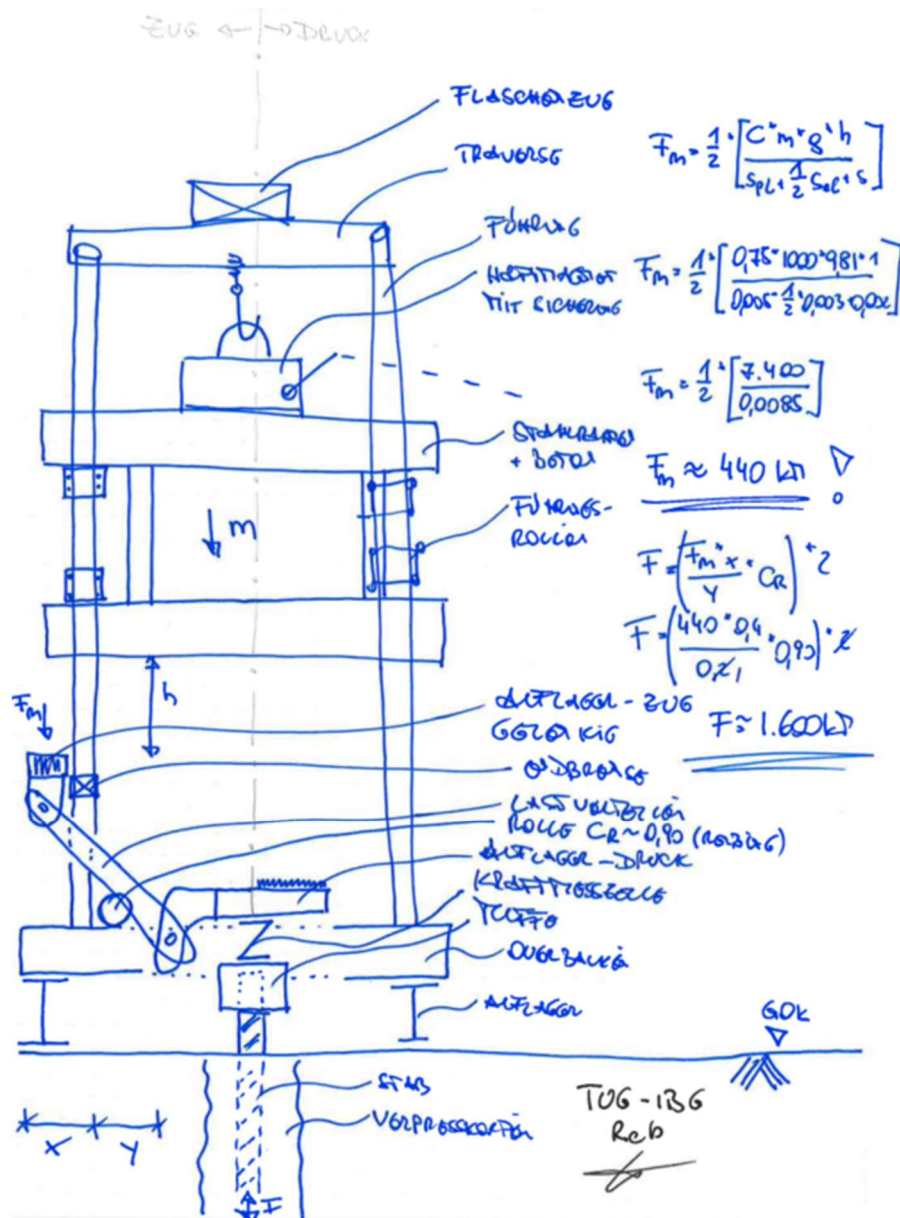


Abb. 23: Handskizze Versuchsaufbau „Fallgewicht 1“

Der Ablauf der Testung war wie folgt geplant:

Zu Beginn wird der Prüfturm aufgestellt und das Zuelement per Muffe mit der Kraftumlenkungseinrichtung und einer Kraftmessdose verbunden. Anschließend wird mit der Hilfe eines Baggers, oder LKW-Krans eine Masse von 1000 kg auf das Ausgangsniveau von 1,00 m über dem Aufschlagpunkt, siehe Abb. 24, gehoben und mit einem Schwerlastmagneten gesichert. Die Masse sollte aus einer mit Beton ausgegossenen Stahlwanne bestehen, die nach dem Aushärten des Betons mit einer Stahlplatte verschlossen wird, um die Sicherung mittels Schwerlastmagnet zu ermöglichen. Das Lösen des Magneten sollte per Seil aus sicherer Entfernung erfolgen.

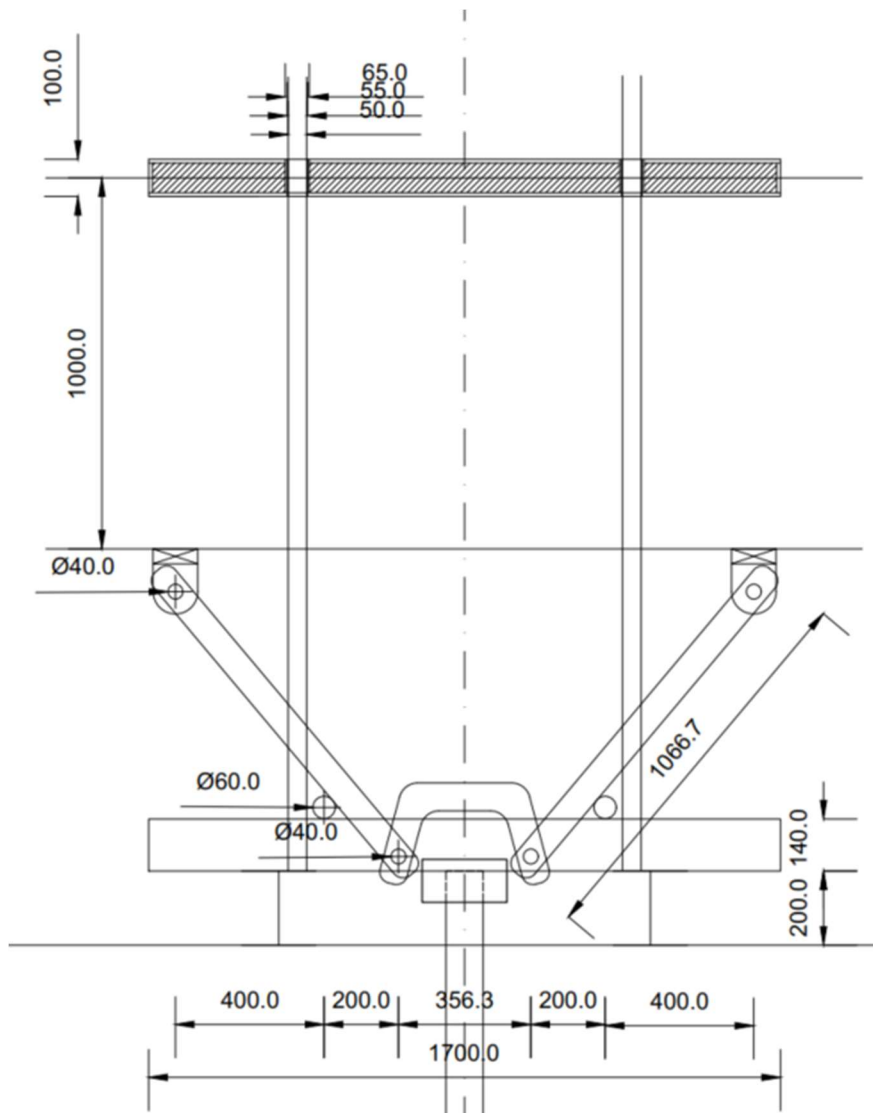


Abb. 24: Versuchsaufbau „Fallgewicht 1“

Aufgrund von Bedenken bzgl. der Kraftumlenkung und der Robustheit der Beton-Stahl-Masse wurde von dieser Variante abgesehen und eine Abänderung ausgearbeitet.

### 8.2.2 Versuchsaufbau „Fallgewicht 2“

Der Versuchsaufbau „Fallgewicht 2“ ist eine abgeänderte Version des im vorherigen Kapitel beschriebenen Aufbaues. Geändert hat sich, wie in Abb. 25 ersichtlich, die Konstruktion der Fallmasse. Diese besteht in diesem Aufbau ausschließlich aus Stahl, genauer gesagt aus HEA 300 und HEM 320 Stahlträgern. Zusätzlich wurde die Kraftumlenkung gänzlich neu konzipiert. Die Umlenkung der Druckbeanspruchung zufolge der fallenden Masse sollte über Hebel erfolgen und eine impuls- bzw. schlagartige Zugbeanspruchung am Kopf des Mikropfahls zu erwirken.

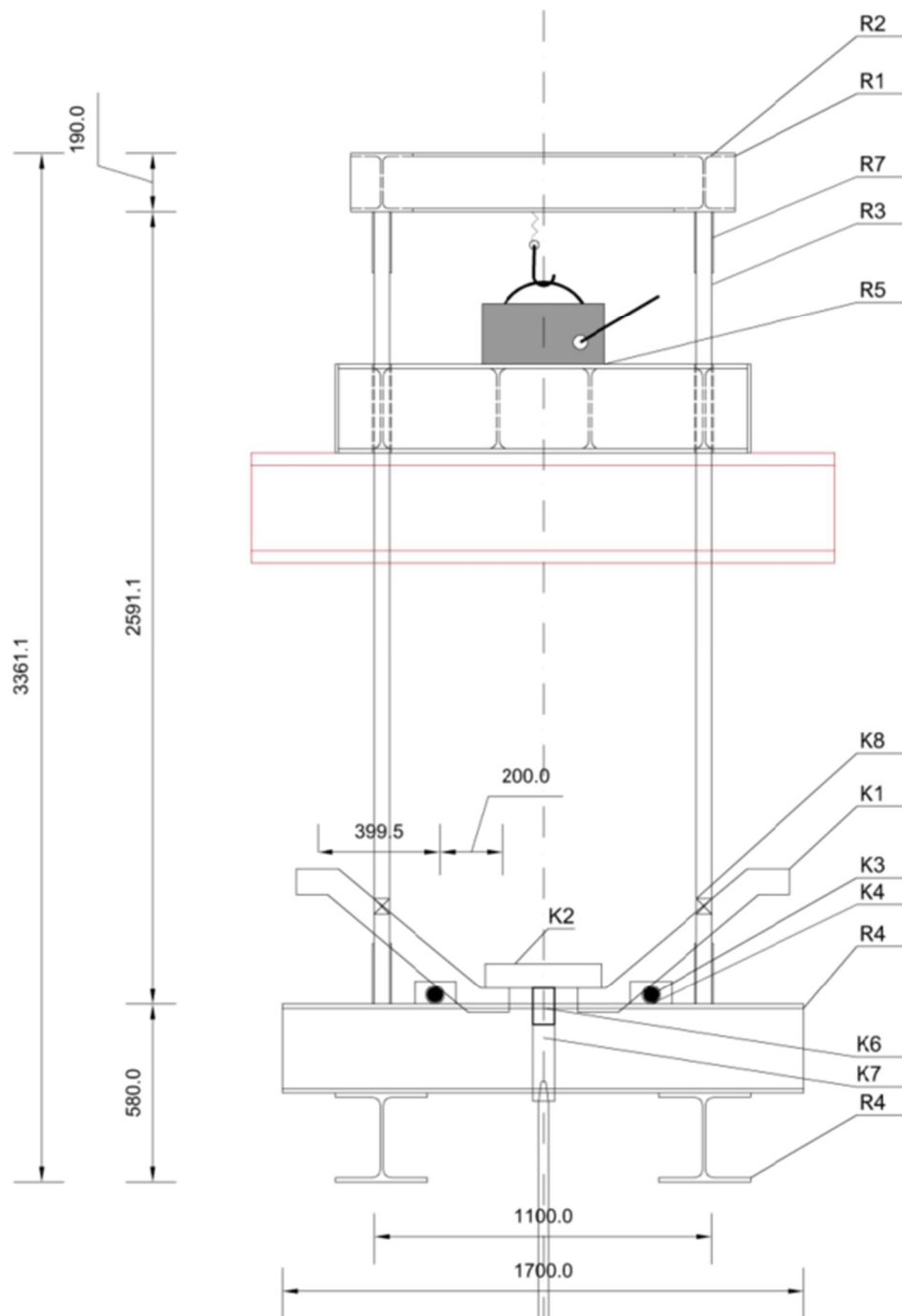


Abb. 25: Versuchsaufbau „Fallgewicht 2“

Trotz der Verbesserungen im Vergleich zur ersten Variante, entsprach der Versuchsaufbau „Fallgewicht 2“ nicht den gewünschten Anforderungen. Einer der größten Nachteile bei diesem Aufbau war, neben der Größe mit knapp 3,40 m die Kontrolle der freigesetzten Energie und vor allem das daraus resultierende Erfordernis einer ungehinderten und zwangungsfreien Führung der Fallmasse. Die Summe dieser Faktoren ergab, dass dieser Versuchsaufbau selbst mit einer erheblichen Weiterentwicklung und den hier geschilderten Randbedingungen nicht umsetzbar war und eine neue Variante konzipiert werden musste.

### 8.2.3 Versuchsaufbau „Kerbschlag“

Dieser neu konzeptionierte Versuchsaufbau basiert auf dem bereits einleitend in diesem Kapitel beschriebenen Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy. Es handelt sich um ein Pendelschlagwerk, siehe Abb. 26 und Abb. 27, welches mit einer variablen Fallmasse bestückt wird. Die Stahlkonstruktion wird per Hebeeinrichtung versetzt und eingerichtet. Im Anschluss wird die Fallmasse aufgezo-gen und ausgelöst.

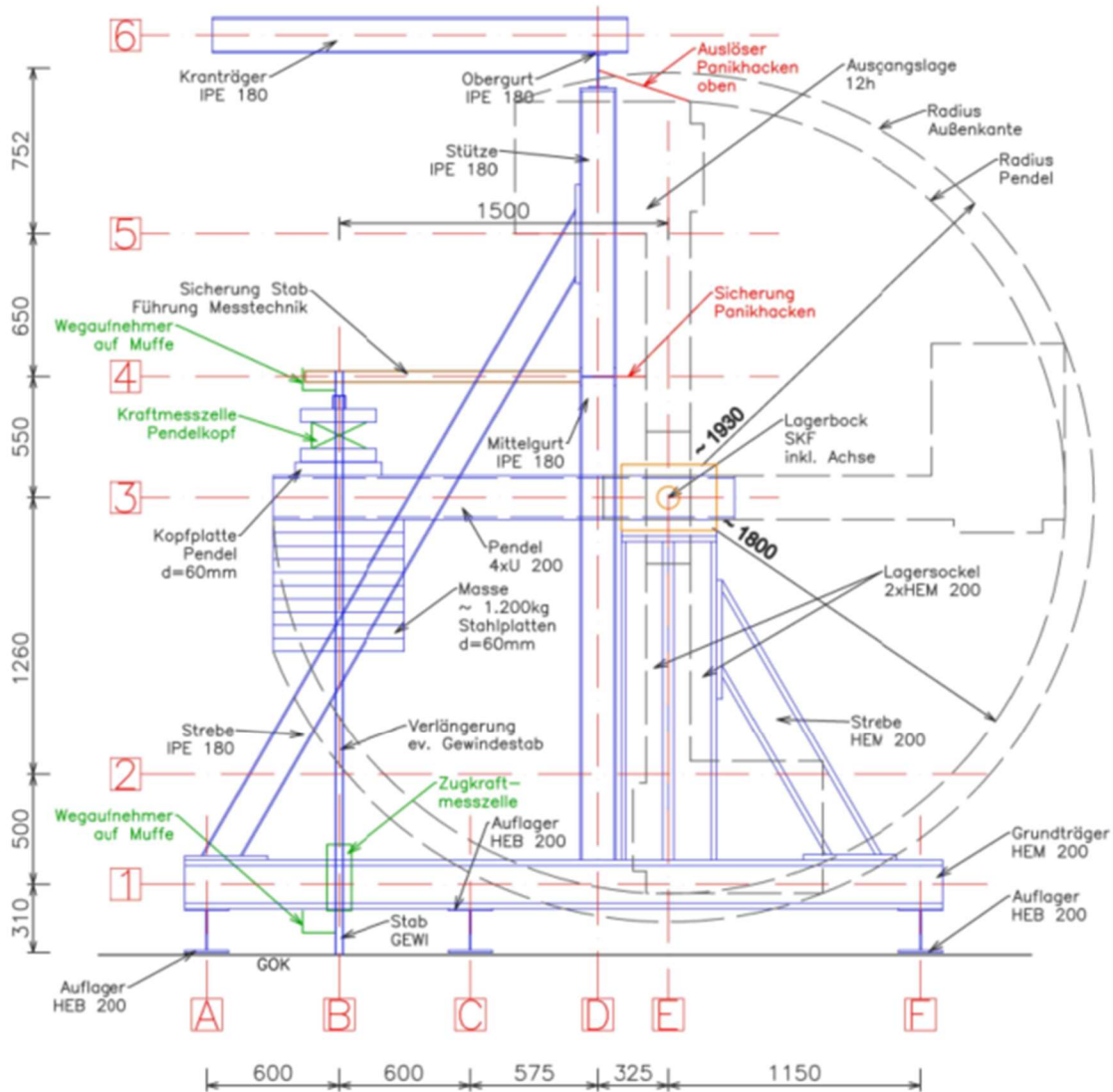


Abb. 26: Versuchsaufbau „Kerbschlag“ - Ansicht (DAT, 2021)

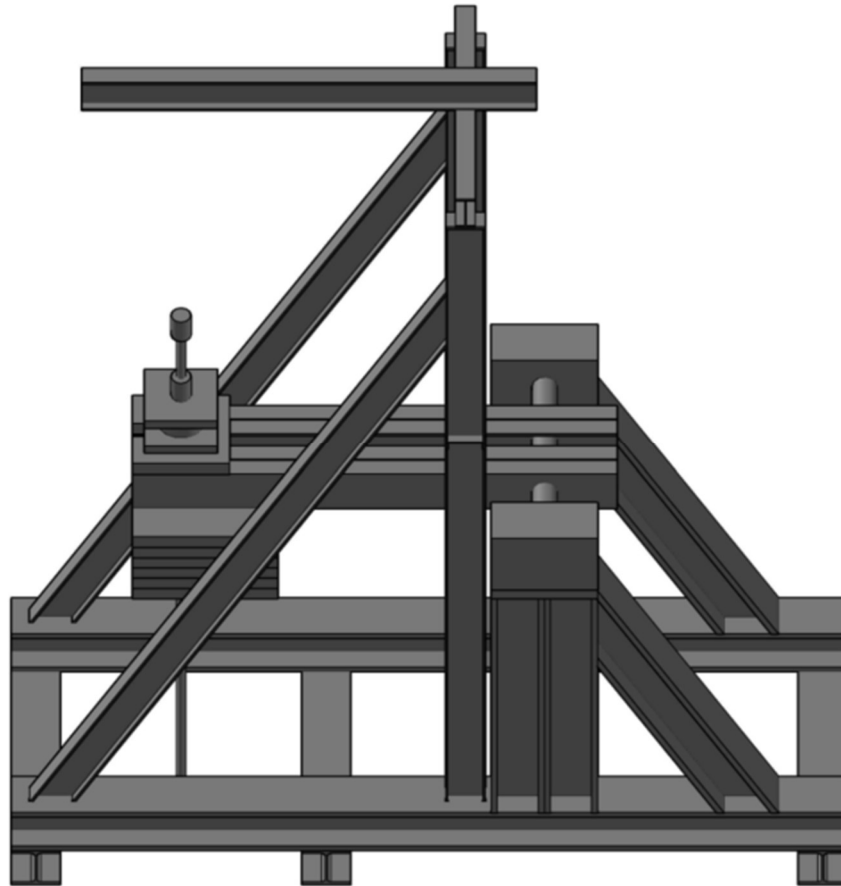


Abb. 27: Versuchsaufbau „Kerbschlag“ – 3D Modell (DAT, 2021)

Bau und Abnahme des Versuchsaufbaus „Kerbschlag“ wurde durch die Behensky Maschinenbau GesmbH. & Co. KG. aus Salzburg durchgeführt.

Im Zuge dieses Kapitels wird weiters auf erste Vorversuche zur Nutzung dieses Versuchsaufbaues eingegangen. Zudem wird der hier kurz dargestellte Versuchsaufbau in einer Reihe von Feldversuchen (vgl. Kapitel 9) mit einer ersten Validierungsreihe untersucht.

### 8.3 Herstellung der Probe-Mikropfähle

Um die angeführte Validierung des Versuchsaufbaues „Kerbschlag“ zu ermöglichen, wurden eine Reihe von Probe-Mikropfählen installiert. Diese wurden zudem zur Erprobung neuer Installationsmethoden für Mikropfähle und die Untersuchung der Herstellungsqualität bei Mikropfählen (vgl. (DAT, 2021)) verwendet. Die Installation dieser Probe-Mikropfähle fand am 28.04.2021 auf einem Versuchsgelände auf den Inffeldgründen in Graz statt. Wie in Abb. 28 ersichtlich, wurden insgesamt 16 Mikropfähle installiert. Für die Validierung des vorgestellten Prüfgerätes sind die Mikropfähle mit den Bezeichnungen „F\_DYN\_1“, „F\_DYN\_2“ und „F\_DYN\_3“ vorgesehen. Informationen zu den Untersuchungen, Erprobungen und Versuchen, welche an den nicht markierten Pfählen durchgeführt wurden, sind Hassler (noch nicht abgeschlossen) und Radinger (2021) zu entnehmen.

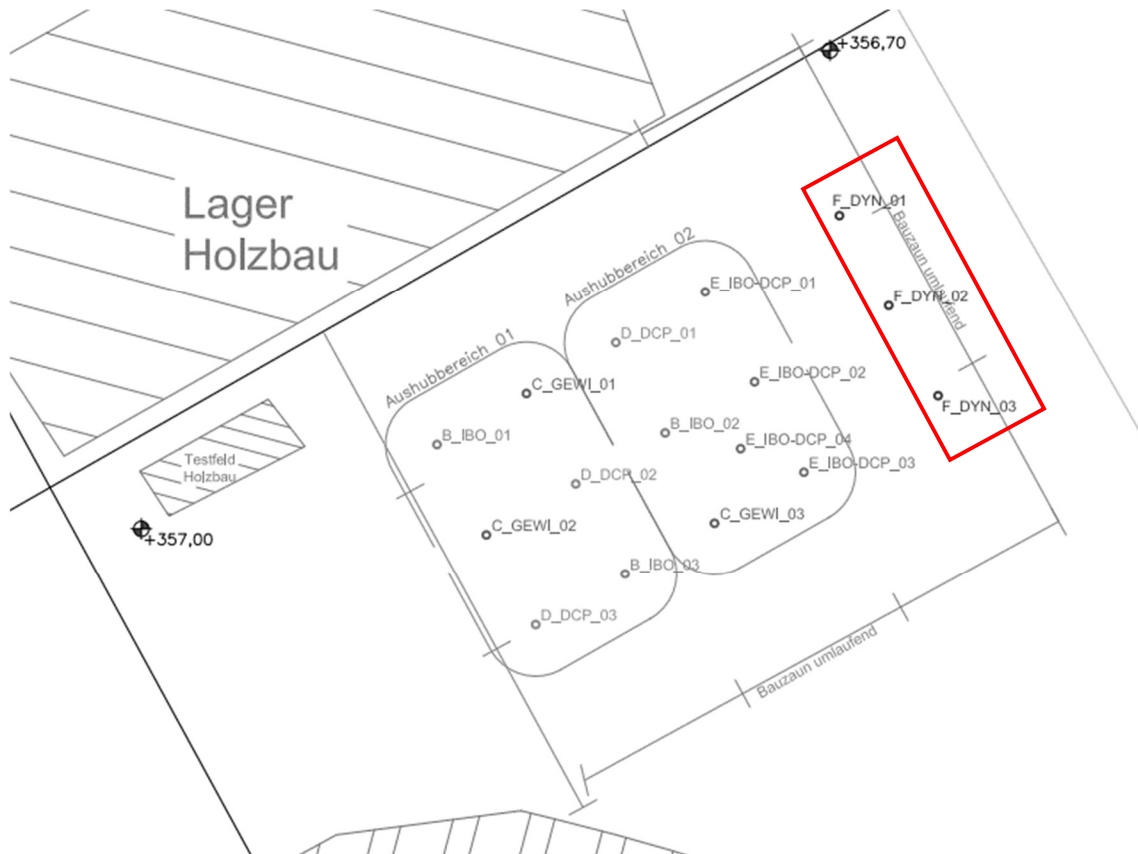


Abb. 28: Lage der Probe-Mikropfähle, (DAT, 2021)

Die drei für die gegenständlichen dynamischen Pfahlprüfungen relevanten Mikropfähle wurden in Form eines GEWI (Vollstab) hergestellt und hierzu in ein verrohrtes Bohrloch mit einem Innendurchmesser von 94 mm eingestellt. Die Verrohrung der Bohrlöcher wurde gerammt hergestellt, siehe Abb. 29 oben links, wobei der Außendurchmesser des Rammrohres 114 mm betrug. Eingebaut wurden Mikropfähle SAS 550 mit 32 mm Durchmesser des Herstellers ANP, mit der Zulassungsnummer BMVIT-327.120/0003-IV/IVVS2/2016. Die eingebaute Pfahlänge beläuft sich auf ca. 4,00 m unter GOK. Die Verfüllung des Bohrloches wurde mit Zementsuspension durchgeführt, eine Nachverpressung wurde nicht vorgenommen. Hergestellt wurden die Mikropfähle von der Firma Keller Grundbau GesmbH (als Partner des Forschungsprojektes DAT), das eingesetzte Bohrgerät, eine Klemm mit Doppelbohrkopf ist in Abb. 29 oben links zu erkennen. Die einzelnen Zuelemente der Mikropfähle wurden zuerst mit Muffen (Abb. 29 unten links) verbunden und mit Kunststoffabstandshaltern (Abb. 29 oben rechts) ausgestattet, bevor sie in das verrohrte Bohrloch eingestellt wurden. Nach dem Einbau wurde das Bohrloch mit einem Füllschlauch von unten nach oben mit Zementsuspension gefüllt, zu sehen in Abb. 29, unten rechts. Anschließend wurde die Verrohrung gezogen und der Kopfbereich der Mikropfähle aufgefüllt, um einen normgemäße Herstellung und Verfüllung der Mikropfähle sicherzustellen.



Abb. 29: Bilder der Herstellung der Probe-Mikropfähle; Bohrgerät Klemm (oben links); Zusammenbau Mikropfahl (oben rechts); Muffenverbindung (unten links); Verfüllen des Bohrloches mit Zementsuspension (unten rechts)

## 8.4 Vorversuche

An den Mikropfählen „F\_DYN\_2“ und „F\_DYN\_3“ (vgl. Abb. 28), welche für die dynamische Zugprüfung vorgesehen sind wurden keine Vorversuche durchgeführt. Als Referenz können die Ergebnisse aus den Prüfungen, der angrenzenden Mikropfähle, siehe Tab. 3 herangezogen werden. Die durchgeführten Prüfungen waren eine Mischung aus Eignungs- Abnahme- und Untersuchungsprüfung und können keiner der in Kapitel 4.1 beschriebenen

Prüfungsarten eindeutig zugeordnet werden. Diese statischen Zugversuche wurden am 19.05.2021 und 20.05.2021 durchgeführt, der Versuchsaufbau ist in Abb. 31 unten zu sehen. Die Prüfungen waren darauf ausgelegt die Mikropfähle auf ihre maximal zulässige Prüfkraft  $P_p$  zu testen, was im Anwendungsfall 80% der charakteristischen Bruchkraft  $F_{pk}$  entspricht. Wie die Ergebnisse in Tab. 3 zeigen, wurde die maximale Prüfkraft nicht immer erreicht. Einige Mikropfahlprüfungen wurden aufgrund des Überschreitens des Kriechkriteriums von 5 mm beendet und in Einzelfällen trat frühzeitiges Versagen ein. In Abb. 30 sind die Ergebnisse um einen besseren Vergleich zu schaffen grafisch dargestellt.

Tab. 3: Ergebnisse der Vorversuche (DAT, 2021)

Pfahl Nr.	Pfahltyp	max. Prüflast [kN]	aufgebr. Prüflast [kN]	$k_s$ [mm]
A1	ANP-SHS	336	336	0,90
A2	ANP-SAS	399	375	5,68
A3	ANP-SAS	399	250	5,42
A4	ANP-SHS	336	336	3,07
A6	ANP-SAS	399	-	-
B1	ANP-SAS	399	250	6,91
B2	ANP-SAS	399	300	5,32
B3	ANP-SHS	336	336	3,10
B4	ANP-SHS	336	336	0,96
B6	ANP-SAS	399	-	-
C1	ANP-SAS	399	350	5,18
C2	ANP-SHS	336	315	7,60
C3	ANP-SAS	399	Prüfung abgebrochen	
C4	ANP-SHS	336	150	5,55
C6	ANP-SAS	399	-	-

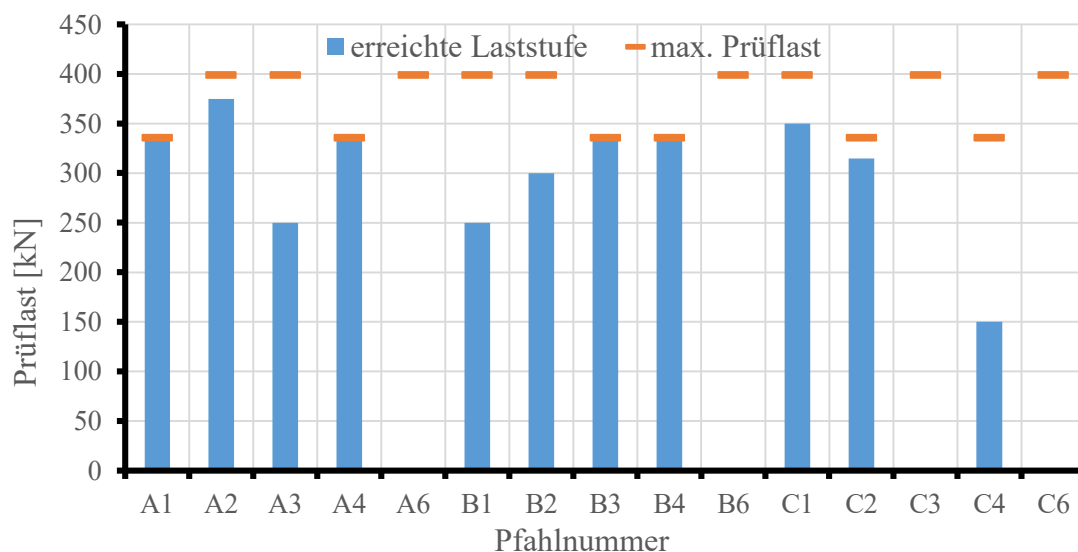


Abb. 30: Grafische Darstellung der Prüfergebnisse aus Tab. 3 (DAT, 2021)



Aufgrund des plötzlich eintretenden Versagens bei einigen Mikropfählen, wurde die Entscheidung getroffen, die für die impulsartige Prüfung vorgesehenen Mikropfähle „F\_DYN\_2“ und „F\_DYN\_3“ vorab nicht statisch zu testen. Dies soll es ermöglichen, neben den Auswirkungen einer impulsartigen und statischen Prüfung auf den Verpresskörper auch die Auswirkungen der Prüfung auf einen unbeanspruchten Mikropfahl sicherzustellen.



Abb. 31: Statische Zugversuche, (DAT, 2021); Aufbau Messuhr (oben); Prüfaufbau (unten)

Als weiterer Vorversuch kann der erste Test des Versuchsaufbaues am Mikropfahl „C\_GEWI\_03“, der am 08.07.2021 durchgeführt wurde, angesehen werden. Dies war die erste Anwendung des Versuchsaufbaues an einem Mikropfahl, daher wurde ein bereits statisch getesteter Mikropfahl, als Testobjekt ausgewählt. Der größte Vorteil dabei ist, dass bereits bekannt war, welche Prüfkraft beim statischen Zugversuch aufgebracht wurde. Da im Zuge der statischen Prüfung kein aussagekräftiges Ergebnis erreicht werden konnte, wurde dieser Prüfpfahl ausgewählt. Des Weiteren wurde dieser Vorversuch dafür genutzt, um ein Gefühl für die Justierung bzw. die Handhabung des Versuchsaufbaues sowie die Versuchsdurchführung zu bekommen, zu sehen in Abb. 32. Eine genaue Beschreibung der Versuchsdurchführung ist in Kapitel 9.2 enthalten. Ein weiteres heikles Detail, nämlich das Abbremsen des Pendels nach Versuchsdurchführung wurde ebenfalls im Zuge dieses Vorversuches getestet.



Abb. 32: Justierung für dynamischen Zugvorversuch an „C\_GEWI\_03“, (DAT, 2021)

Die Ergebnisse dieser Vorversuche zeigten, dass der Versuchsaufbau für die Aufbringung einer Zugkraft auf Mikropfähle geeignet ist, und dass sowohl der geplante Auslösemechanismus als auch das Abbremsen des Versuches funktionierten.

# 9 Versuche zur impulsartigen Prüfung von nicht vorgespannten Zugelementen

Im folgenden Kapitel werden die durchgeführten Versuche zur impulsartigen Prüfung von Mikropfählen, welche im Zuge dieser Diplomarbeit – als ein Teil des Forschungsprojekts DAT (2021) – durchgeführt wurden, beschrieben. Außerdem werden nachfolgend die Ergebnisse dieser aufbereitet, ausgewertet und interpretiert.

## 9.1 Parametervariation

Beim Versuchsaufbau „Kerbschlag“ ergeben sich grundsätzlich zwei Parameter, mit welchen man die Schlagenergie – bzw. die daraus folgende Prüfkraft – variieren kann. Diese sind zum einen die Fallmasse, welche durch das Montieren bzw. Demontieren von Stahlplatten am Pendel verändert werden kann. Zum anderen kann durch das Anheben bzw. Absenken der Fallmasse die Fallhöhe (vgl.  $h$  in Abb. 22) variiert werden und so bis zu einem gewissen Grad eine zusätzliche Streuung erzeugt werden. Dieses Kapitel dient der näheren Beschreibung der variablen Parameter und deren Bandbreiten.

### 9.1.1 Fallmasse

Die Fallmasse, welche auf dem Pendelarm befestigt wird, besteht aus zehn einzelnen Stahlplatten, zu je 120 kg. Diese Stahlelemente können durch vier Schrauben, die von Element zu Element in wechselnder Reihenfolge versetzt angeordnet sind, einzeln abgenommen werden. Somit ergeben sich zehn unterschiedliche Laststufen, bzw. gibt es noch eine elfte Laststufe, wenn das Pendel nur mit der angebrachten Kopfplatte verwendet wird.

### 9.1.2 Fallhöhe

Die Fallhöhe kann ganz simpel durch höheres Aufziehen (vgl. Winkel  $\alpha_B$  in Abb. 22) des Pendels gesteuert werden. Hierbei ist zu erwähnen, dass ein Aufziehen des Pendels ausschließlich zwischen 15:00 Uhr und 12:00 Uhr (vgl. Abb. 33) sinnvoll ist. Wobei 15:00 Uhr eine horizontale und 12:00 Uhr eine vertikale Ausrichtung des Pendelarms darstellen. Wenn man sich die „Uhrzeiten“ dazwischen vor Augen führt, würde eine Änderung von 30 Minuten eine Neigungsänderung des Pendels von  $15^\circ$  mit sich bringen, eine graphische Darstellung hierzu ist in Abb. 33 ersichtlich.

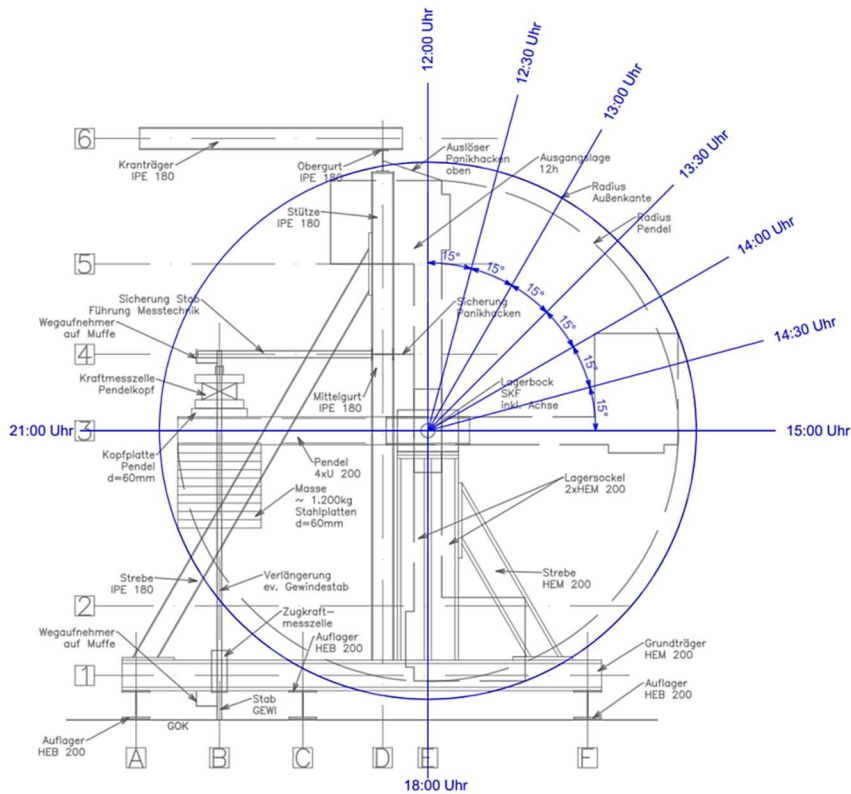


Abb. 33: Darstellung der „Aufziehwinkel“

Aus diesen beiden Parametern lassen sich unterschiedlichste Kombinationen ermitteln, mit welchen man den Versuch durchführen kann. Um vorab bestimmen zu können, welche Energie bei der Durchführung erzeugt wird, liefert Abb. 34 eine erste rein theoretische Aussage. Zu beachten ist, dass dieses Diagramm weder Luftwiderstand, Lagerreibung noch mögliche andere Verluste, wie beispielsweise die Reibung des Hebegurtes beim Lösen des Pendels berücksichtigt. Zu sehen ist in dieser Abbildung die berechnete Energie in Kilojule [kJ] (Ordinate) über die Fallhöhe. Die Fallhöhe ist gemäß Abb. 33 als „Uhrzeit“ dargestellt. Die Energiekurven wurden für alle zehn Laststufen ermittelt, während die Fallhöhe zwischen 12:00 Uhr und 15:00 Uhr limitiert ist. Eine ausführlichere Diskussion dieser Ergebnisse findet sich in Kapitel 11.

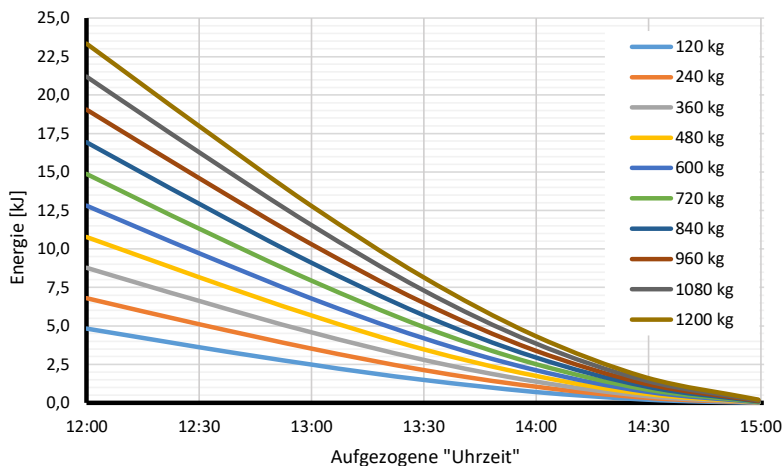


Abb. 34: Masse-Fallhöhe-Energie Diagramm

## 9.2 Versuchsdurchführung

Nachfolgend wird der Ablauf der Versuchsdurchführung, vom 08.07.2021 Schritt für Schritt aufgezeigt und beschrieben.

Zu Beginn ist das Fallgewicht auf die zu prüfenden Mikropfähle abzustimmen. Im aktuellen Fall wurde das maximale Fallgewicht von 1.200 kg, durch das Abmontieren von drei der zehn Stahlplatten auf 840 kg reduziert. Die einzelnen Stahlplatten sind in Kapitel 8.2.3, Abb. 26 zu erkennen und erfüllen den Zweck, in Kombination mit der Fallhöhe eine größere Bandbreite an Impulsen abzudecken, welche auf die zu prüfenden Mikropfähle aufgebracht werden können.

Nach den Vorbereitungsarbeiten am Versuchsaufbau und dem Einebnen der Aufstandsfläche wird der Versuchsaufbau mittels LKW-Kran an die vorgesehene Stelle gehoben, zu sehen in Abb. 35 links oben. Ist der Versuchsaufbau fertig eingerichtet, wird über eine Muffe ein Verlängerungsstab auf den zu prüfenden Mikropfahl geschraubt. Zwei mit einer Mutter verschweißte Stahlplatten, welche den Anschlag (vgl. Abb. 35 unten links) bilden, werden auf diesem Stab montiert und so eingerichtet, dass das Pendel diesen in horizontaler Lage trifft (Abb. 35 rechts oben), um eine impuls- bzw. schlagartige Zugbeanspruchung zu erwirken. Das Einrichten geschieht in dieser Weise, dass das Pendel in Richtung des Verlängerungsstabes aufgezogen wird, bis es sich in horizontaler Lage befindet. Danach wird der Anschlag bündig auf die Kopfplatte des Pendels eingerichtet und dieser zusätzlich mit Gewebband bzw. einer Verdrehsicherung in der Muffe gegen Verdrehen gesichert, besser ersichtlich ist der Anschlag in Abb. 35 unten links, innerhalb des rot markierten Bereichs. Zusätzlich muss der Verlängerungsstab fixiert werden, um ein genaues, zentrisches Auftreffen des Pendels sicherzustellen. Dies wurde in der Versuchsdurchführung mit zwei Spanngurten, welche zusätzlich zum Zentrieren des Stabes genutzt wurden, durchgeführt, ersichtlich in Abb. 35 unten links. Werden diese Schritte nicht ausreichend genau durchgeführt, kann es zu einer nicht ebenmäßigen Beanspruchung des Anschlages kommen, was eine ungleichmäßige Krafteinleitung bzw. eventuellen falls auch ein Knicken des Verlängerungsstabes zur Folge hätte. Den Abschluss der Versuchsvorbereitung bildet das Einbauen der Vorrichtung mit welcher das Pendel abgebremst werden soll. Für diesen Zweck wurde eine ca. 3,00 m lange, 60 cm breite und 10 cm starke KLH-Platte (Kreuzlagenholz) unter den Aufbau eingeschoben (siehe Abb. 35 unten rechts) und am Ende mit einem Hebegurt für das spätere Greifen mittels LKW-Kran vorbereitet.



Abb. 35: Aufstellen des Prüfaufbaues (oben links); Einrichten des „Anschlages“ (oben rechts); Fixieren des Verlängerungsstabes (unten links); Versuchsaufbau inkl. der eingebauten „Bremse“ (unten rechts)

Zum Heben des Pendels wurde ein Hebegurt an einem Ende mittels Schäkkel fix am Greifer des LKWs befestigt. Das andere Ende wurde durch die Öffnung des Pendelsarm geführt und anschließend vom Greifer durch Schließen der Schaufel gefasst, zu sehen in Abb. 36 oben links. Anschließend zieht der LKW-Kran das Pendel bis zum gewünschten Ausgangsniveau auf (Abb. 36 oben rechts). Ausgelöst wird der Versuch durch Öffnen des Greifers, wodurch sich die Fallmasse in Bewegung setzt. Dabei fädelt sich der Hebegurt aus und bleibt am Greifer hängen, während das Pendel in Richtung des Verlängerungsstabes schwingt, siehe Abb. 36 unten links. Anschließend trifft die Kopfplatte des Pendels in horizontaler Lage auf den zuvor montierten Anschlag des Verlängerungsstabes (Abb. 36 unten rechts) und erzeugt so eine impuls- bzw. schlagartige Zugbelastung.



Abb. 36: Aufziehen des Pendels (oben links); Pendel auf Ausgangsniveau (oben rechts); Schwingvorgang des Pendels (unten links); Auftreffen des Pendels auf den Mikropfahl (unten rechts)

Aufgrund des beinahe vollkommen elastischen Stoßes, bei geringen Verformungen des Mikropfahles und des Prüfaufbaues, sowie der sehr geringen Reibungsverluste durch beispielsweise Luftwiderstand bzw. Lagerreibung schlägt das Pendel in abgeschwächter Form ein zweites bzw. drittes Mal auf den Mikropfahl auf (vgl. Abb. 41).

Um das freie Schwingen des Pendels zeitlich zu verkürzen, wurde das Pendel mit der bereits erwähnten KLH-Platte und einem Hebegurt, zu sehen in Abb. 37, abgebremst.



Abb. 37: Abbremsvorgang

Sollte der gleiche Mikropfahl erneut beprobt werden ist vor der Durchführung zu kontrollieren, ob sich der Versuchsaufbau, und/oder der Verlängerungsstab in ihrer Lage verändert haben. So können Schäden zufolge exzentrischer Belastungen verhindert werden.

## 9.3 Messkonzept

Bei der erneuten Versuchsdurchführung, am 30.07.2021, wurden mehrere Messinstrumente und Sensoren am Versuchsaufbau bzw. am zu untersuchenden Mikropfahl installiert. Diese Messinstrumente hatten das Ziel, die vertikale Verschiebung des Mikropfahls, die horizontale Verschiebung des Versuchsaufbaues, sowie die im Zuge der Versuchsdurchführung auf den Mikropfahl aufgebrachte Belastung zu erfassen und zu messen. Um die impulsartige Beanspruchung bestmöglich zu erfassen, wurde eine Messfrequenz von 9.600 Hz verwendet.

### 9.3.1 Kraftmessung

Der Einbau der Kraftmesszelle (KMZ) HBM C6A (Abb. 38) erwies sich als nicht ganz einfach. So musste zusätzlich an den bereits am Verlängerungsstab montieren „Anschlag“ (siehe Abb. 35 links unten) ein Paket aus Stahlplatten und der KMZ mittels Gewindestäben befestigt werden, zu sehen in Abb. 38.



Hierzu wurden in eine Stahlplatte vier Gewinde geschnitten und in die Stahlplatte des Anschlages wurden deckungsgleich vier Löcher gebohrt. In der unteren Stahlplatte wurden anschließend vier Gewindestäbe befestigt, durch welche das Gesamtpaket aus Stahlplatten und KMZ lose mit dem Anschlag verbunden wurde.

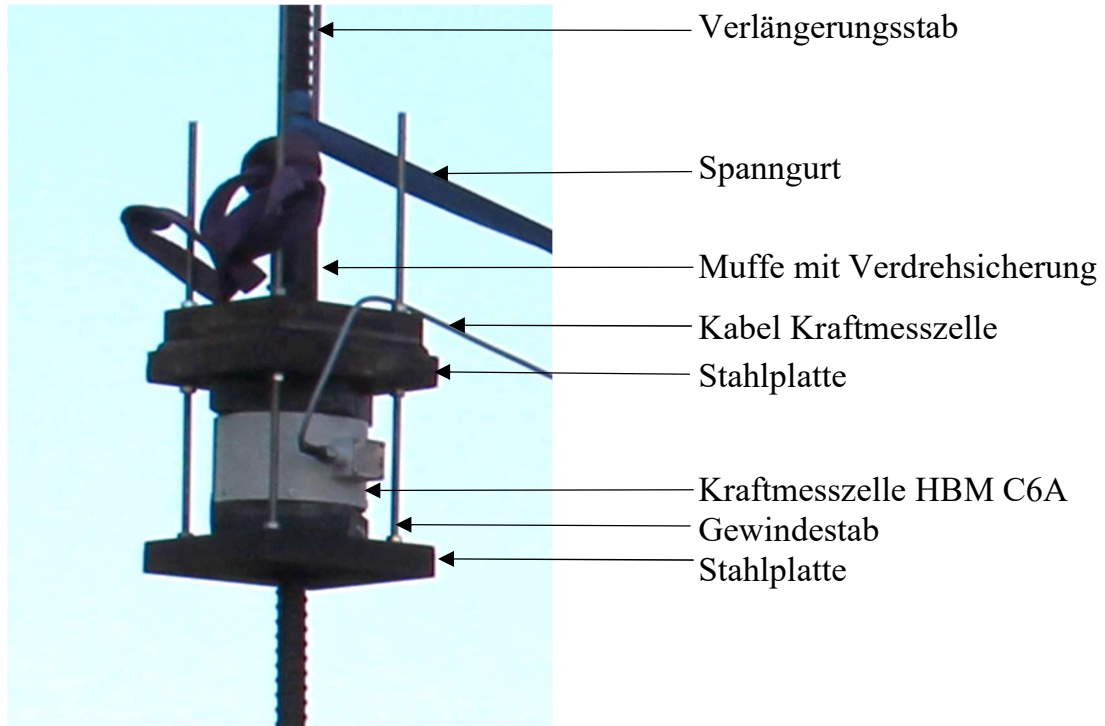


Abb. 38: Installierte Kraftmesszelle HBM C6A

Mit diesem Aufbau sollte sichergestellt werden, dass eine Positionierung der Kraftmesszelle bei gleichzeitiger vertikaler Beweglichkeit des Messaufbaues gegeben war. Somit konnte gewährleistet werden, dass das Pendel vollflächig auf den adaptierten Anschlag trifft und zudem eine Messung dieses Aufpralles ermöglicht wird.

### 9.3.2 Verschiebungsmessung

Für die Verschiebungsmessung wurden unterschiedliche Messinstrumente verwendet, um die vertikale Verschiebung des Mikropfahl am Pfahlkopf aufzunehmen wurden zwei HBM WA-T 50 Wegaufnehmer verwendet. Platziert wurden diese an der Muffe, welche den Mikropfahl mit dem Verlängerungsstab verband (Abb. 39 rot markierter Bereich). Die Fixierung erfolgte mit jeweils einem Magnetstativ, wobei diese im Grundriss betrachtet links und rechts der Stabachse mit einem Öffnungswinkel von ca.  $150^\circ$  angebracht wurden. Der Messkopf der Wegaufnehmer wurden auf einem Stahlprofil abgestellt. Dieses Profil wurde auf einem beschwerten Stahlträger befestigt, welcher außerhalb des Einflussbereiches abgelegt wurde. Die verwendete Bauart der Wegaufnehmer wies einen maximalen Nennmessbereich von 50 mm auf.

Um die horizontale Verschiebung des gesamten Versuchsaufbaus während des Versuches zu erfassen, wurde auf dem zuvor erwähnten Stahlträger ein Seilzugwegaufnehmer angebracht, zu sehen in Abb. 39 grün markierter Bereich. Verwendet wurde hier ein Seilzugsensor der Type Waycon SX50-1250. Dieser Sensor kann eine maximale Verschiebung von 1250 mm aufzeichnen. Die Befestigung am Stahlträger erfolgte mit einer Schraubzwinde und die Verbindung mit dem Stahlrahmen des Versuchsaufbaues wurde mit einem an einem Magneten montierten Haken hergestellt.

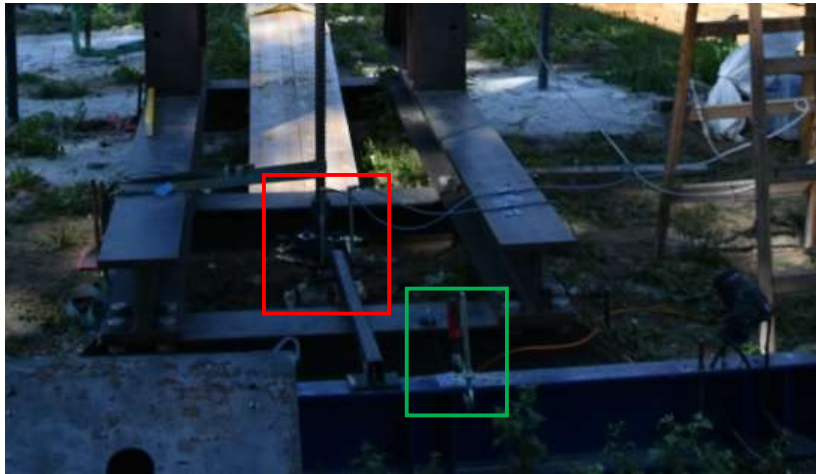


Abb. 39: Installierte Messinstrumente (roter Bereich HBM WA-T 50; grüner Bereich Waycon SX50-1250)

Für die Datenerfassung wurde ein HBM Quantum X verwendet, welcher die angeführte Messrate von 9.600 Hz ermöglichte und neben einer Datenaufzeichnung auch die Möglichkeit einer Datenvisualisierung und Auswertung vor Ort ermöglichte.

### 9.4 Versuchsauswertung

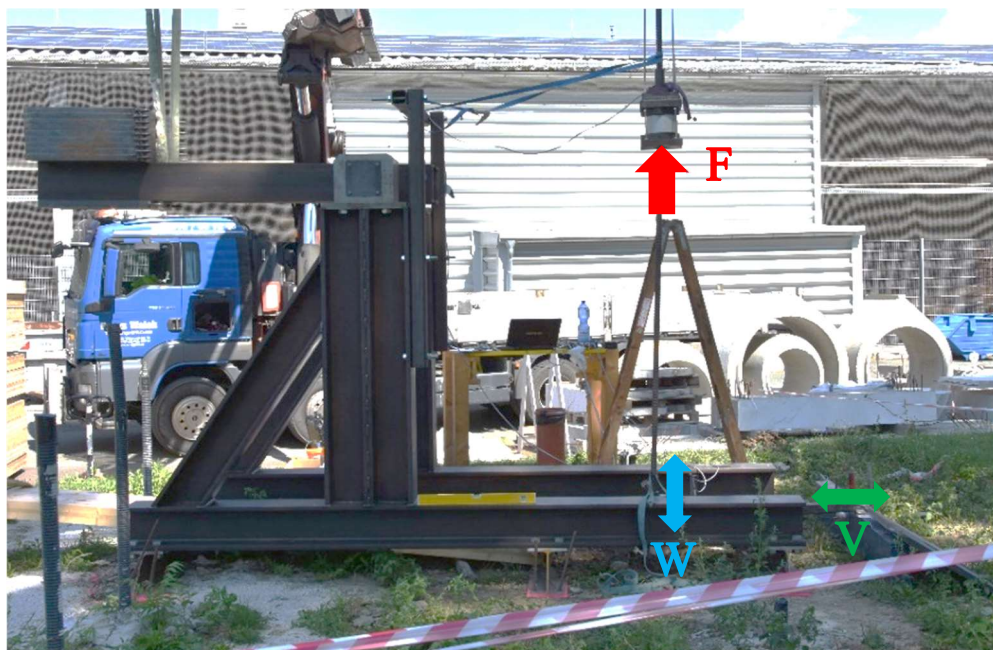
Bei den am 30.07.2021 durchgeführten Versuchen wurden wie in Kapitel 9.3 beschrieben, Kraft- und Weggrößen gemessen. Diese Messergebnisse werden nachfolgend dargestellt.

Insgesamt wurden hierzu sechs Versuche durchgeführt. Dabei wurden vier Versuche mit sieben und zwei Versuche mit neun der zehn Stahlplatten, welche als Masse des Pendels verwendbar sind (vgl. Abb. 33), durchgeführt. Die Versuche wurden mit „DAT\_Dyn\_01“ bis „DAT\_Dyn\_06“ bezeichnet, wobei die Versuche mit den Endungen „01“ bis „04“ jene mit sieben montierten Stahlplatten und „05“ und „06“ jene mit neun montierten Stahlplatten waren. Eine tabellarische Auflistung der Rahmenbedingungen und der maximal gemessenen Kräfte zu den durchgeführten Versuchen ist in Tab. 4 gegeben.

Tab. 4: Rahmenbedingungen zu den dynamischen Versuchen

A	B	C	D	E
Bezeichnung	Gemessene Kraft [kN]	Neigung [°]	Anzahl Stahlplatten [Stk.]	„Uhrzeit“
DAT Dyn 01	340,5	115	7	14:10
DAT Dyn 02	432,5	151	7	12:58
DAT Dyn 03	441,0	165	7	12:30
DAT Dyn 04	428,9	165	7	12:30
DAT Dyn 05	384,2	165	9	12:30
DAT Dyn 06	389,7	150	9	13:00

Die in Tab. 4 aufgelisteten Neigungen (Spalte C) beschreiben den Winkel zwischen dem vertikal stehenden Stahlrahmen des Versuchsaufbaues und dem bis zum Startniveau aufgezogenen Pendel (siehe Abb. 33). Die Spalte E „Uhrzeit“ stellt die gemessene Neigung entsprechend der Definition in Abb. 33 dar. Die maximal gemessenen Kräfte in Abhängigkeit zur Aufziehhöhe und der Fallmasse lagen zwischen 340 kN und 440 kN, die Richtung der Kraftmessung ist in Abb. 40 zu sehen.

Abb. 40: Darstellung der Messgrößen Kraft ( $F$ ), Weg ( $W$ ) und Verschiebung ( $V$ )

Die in Abb. 41 grafisch dargestellten Messergebnisse der KMZ zeigen alle sechs Versuche, wobei der Versuch „DAT\_Dyn\_05“ nicht weiter berücksichtigt wird. Der Grund liegt darin, dass sich der Hebegurt während des Lösens an der Masse des Pendels verfangen hat, was einen Stillstand bzw. eine kurze Unstetigkeit zur Folge hatte. Dadurch war es nicht mehr möglich den neuen Startpunkt zu bestimmen. Die Abbildung zeigt generell die gemessene Kraft über die Zeit, je Versuch. Abb. 43 zeigt ein Detail aus dem Kraft-Zeit-Diagramm, welches das Auftreffen des Pendels auf den Mikropfahl bzw. den Anschlag darstellt.

Auf dieses Detail wird in Kapitel 9.5 näher eingegangen. Abb. 42 zeigt die Verschiebungen, welche durch den Seilzugwegaufnehmer gemessen wurden. Diese Messergebnisse werden ebenfalls im folgenden Kapitel genauer beschrieben. Auf die Messungen der vertikalen Verschiebungsmessungen wird nur bedingt weiter eingegangen. Grund dafür ist, dass die Magnetstative auf denen die Wegaufnehmer fixiert waren, durch den Aufprall des Pendels verschoben wurden, oder in manchen Fällen vom Mikropfahl gefallen sind. Zusätzlich hierzu wurde bei einigen Versuchen die Messbasis der Wegaufnehmer durch die Verschiebung bzw. das Aufkippen des Versuchsaufbaus bewegt, wodurch diese Messungen ihre Aussagekraft zum größten Teil verloren haben.

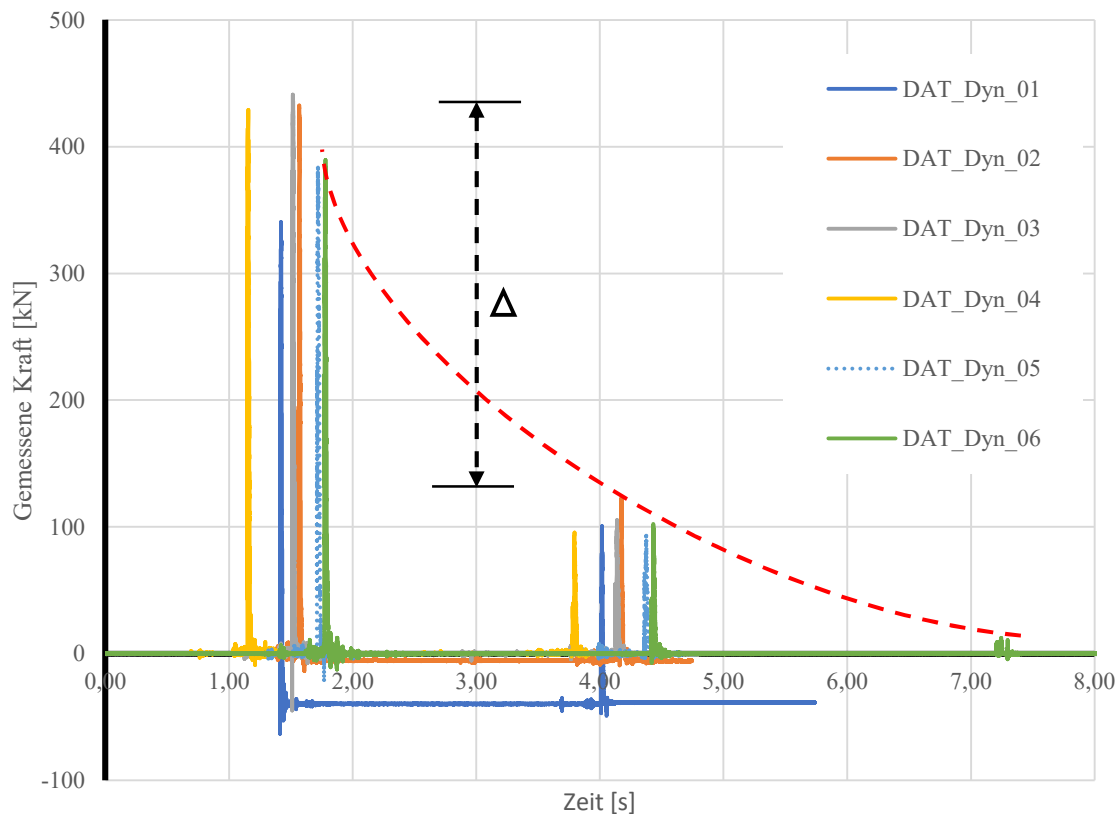


Abb. 41: Kraft-Zeit Diagramm alle Versuchsreihen

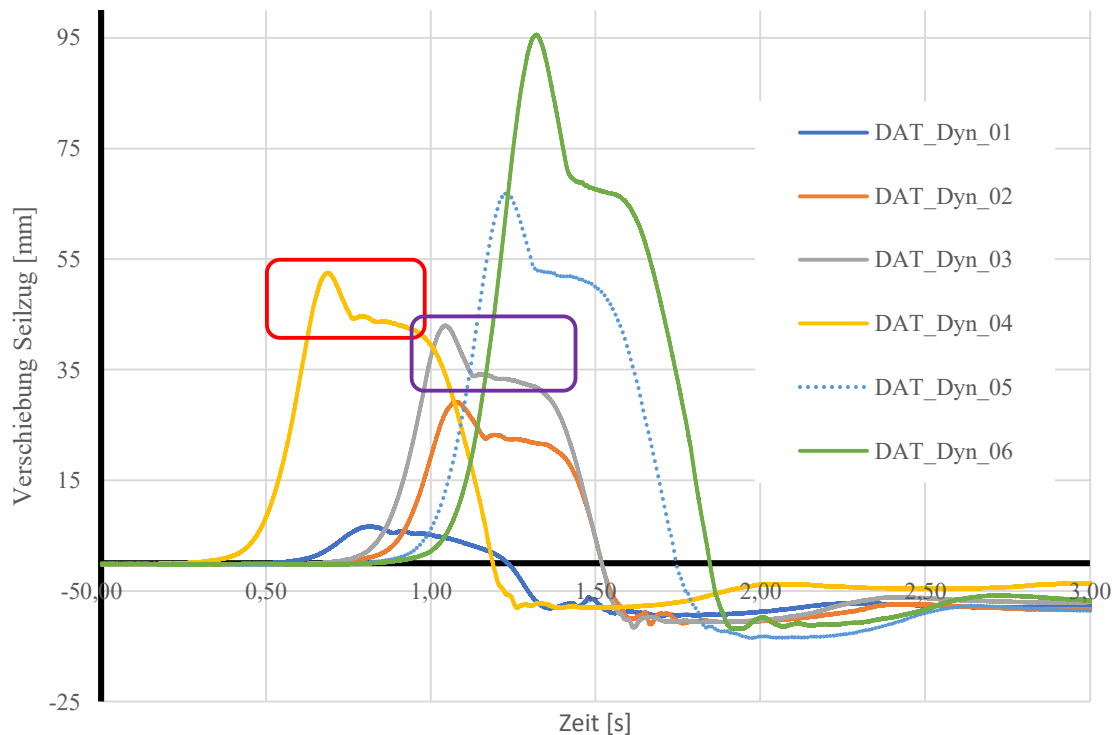


Abb. 42: Gemessene Verschiebung des Prüfaufbaues

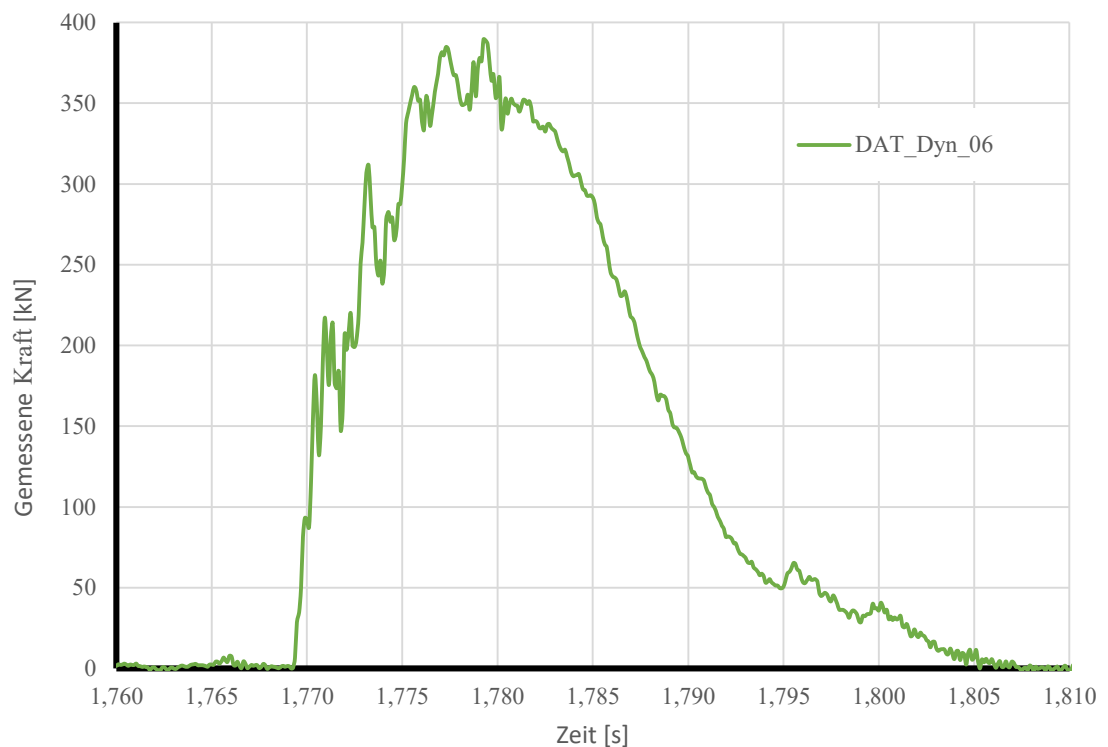


Abb. 43: Kraft-Zeit Diagramm Versuchsreihe DAT\_Dyn\_06

Beispielhaft für alle Versuche sind die gesamten Messergebnisse zweier Versuche in Abb. 44 und Abb. 45 dargestellt. Sie zeigen für die Versuche „DAT\_Dyn\_01“ bzw. „DAT\_Dyn\_04“ die jeweiligen Verschiebungsmessungen der beiden Wegaufnehmer („Weg1“ und „Weg2“) bzw. des Seilzugaufnehmers, sowie der gemessenen Kraft über die Zeit.

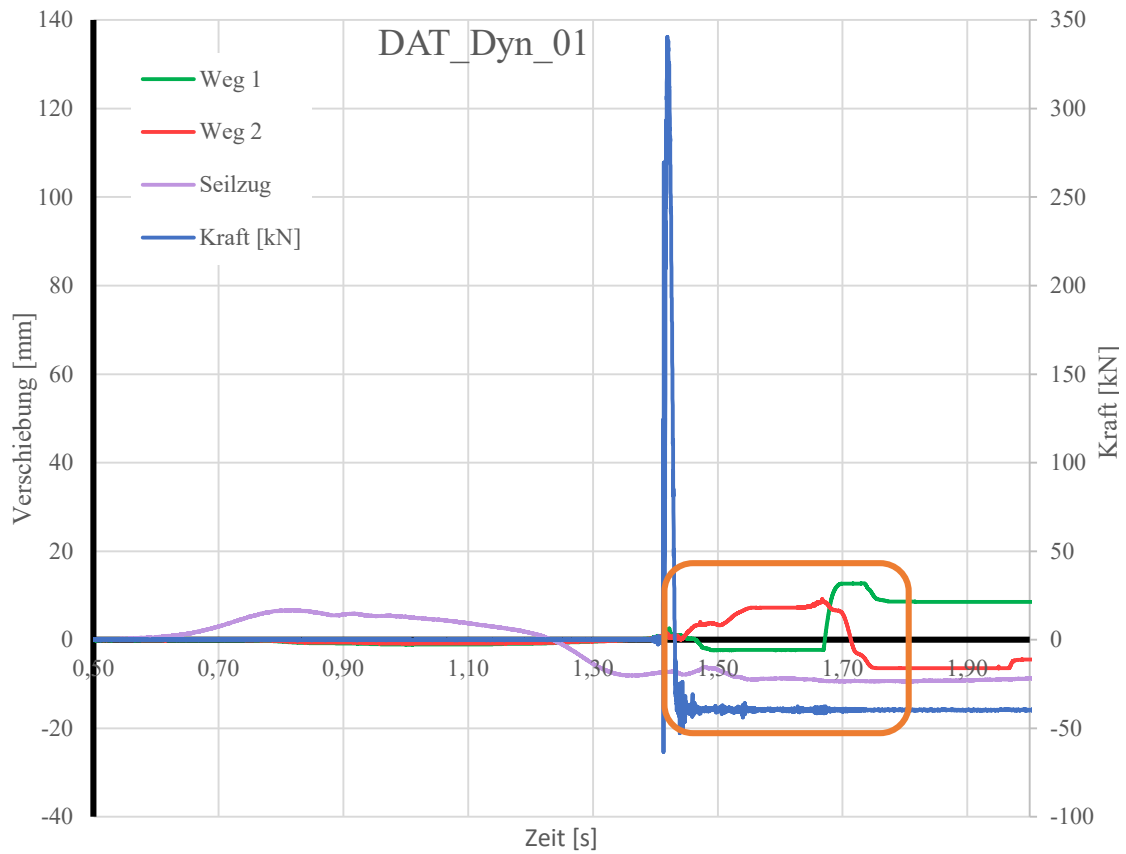


Abb. 44: Darstellung von Verschiebung und Kraft Versuchsreihe DAT\_Dyn\_01

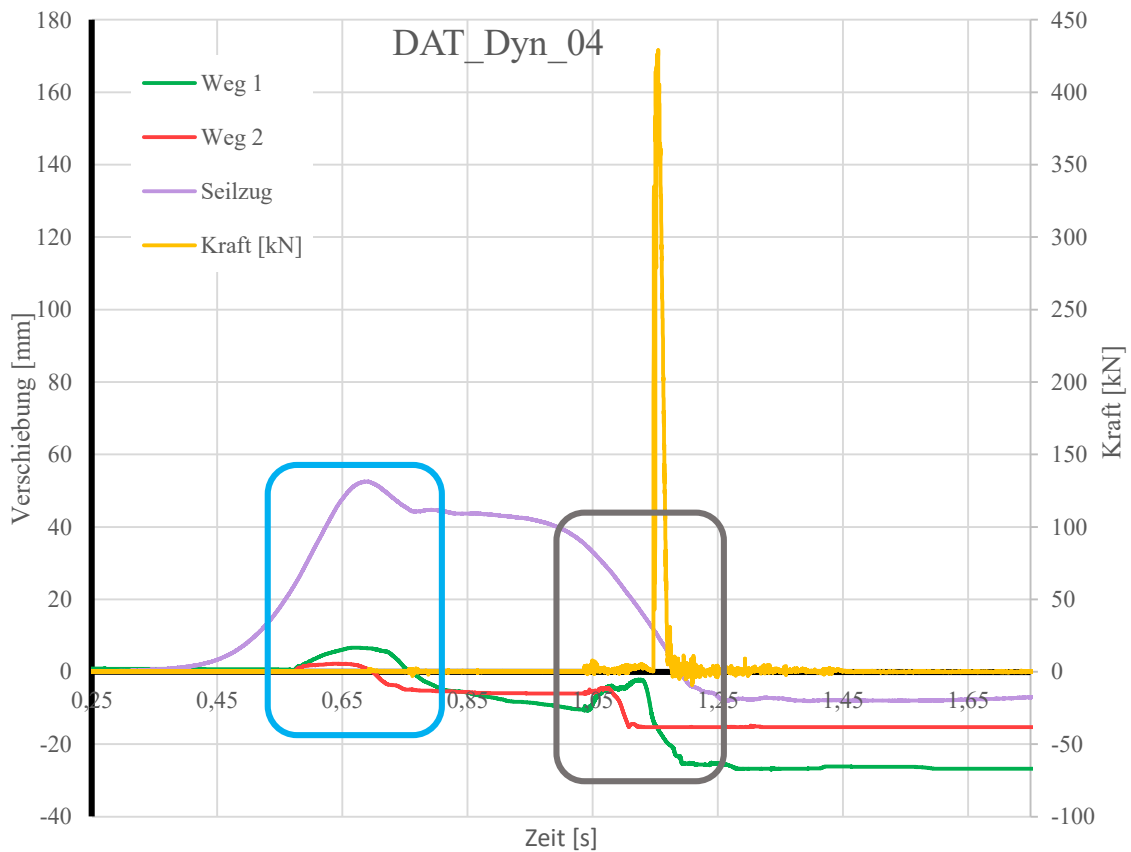


Abb. 45: Darstellung von Verschiebung und Kraft für Versuchsreihe DAT\_Dyn\_04

## 9.5 Interpretation der Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die im vorherigen Kapitel grafisch dargestellten Versuchsergebnisse interpretiert. Zusätzlich werden die während der Durchführung aufgetretenen Probleme erörtert, welche sich zum Teil nachteilig auf die Messergebnisse ausgewirkt haben oder haben könnten.

Die im Kraft-Zeit-Diagramm (Abb. 41) dargestellten Verläufe zeigen, dass sich der untersuchte Mikropfahl bei allen Versuchsreihen ähnlich verhalten hat. Den größten Unterschied in dieser Darstellung liefert der Versuch „DAT\_Dyn\_01“, da hier die KMZ nach dem Auftreffen des Pendels auf den Anschlag eine negative Kraft in der Größenordnung von -60 kN zeigt. Davon abgesehen lieferten alle Kraftmessungen plausible Ergebnisse, wie in Tab. 4 zusammengefasst. Zudem sei angemerkt, dass nach Durchführung der Versuche eine Probelastung der KMZ unter Vergleich einer weiteren Kraftmesszelle durchgeführt wurde, um die Funktionstüchtigkeit und Richtigkeit der gemessenen Ergebnisse zu validieren. Des Weiteren ist bei der Darstellung des Versuchs „DAT\_Dyn\_06“ (grüne Kurve in Abb. 41) der wiederkehrende Aufprall der Fallmasse durch die drei ersichtlichen Ausschläge eindeutig erkennbar, bei allen anderen Versuchen ist dieser ebenfalls zu erkennen, wurde auf Grund der großen Datenmengen jedoch nicht in die Darstellung mit übernommen. Anhand dieser Darstellung und des erfassten Verhaltens könnte postuliert werden, dass der zweite bzw. dritte Anprall einem Versuch mit jeweils niedrigerer Fallhöhe entsprechen. Dies wurde versucht, schematisch durch die rot strichlierte Kurve in Abb. 41 kenntlich zu machen.

Abb. 41 zeigt weiters die Differenz  $\Delta$  (in schwarz strichliert) der Kraftmessung zwischen dem ersten und zweiten Aufprall der Masse an den Anschlag. Diese Differenz  $\Delta$  kann als Resultat unterschiedlicher Einflussgrößen gesehen werden. Kinetische Energie dissipiert und wird dabei in elastische bzw. plastische Verformung (sowohl des Stabes als auch entlang des Verpresskörpers) umgewandelt. Neben dieser Energieumwandlung wird der Mikropfahl (bzw. dessen Verpresskörper) minimal aus dem Untergrund gezogen, was für den zweiten Schlag bedeutet, dass das Pendel weiter nach oben schwingen muss, da sich der Anschlagpunkt verschoben hat. Daraus folgend muss mehr kinetische Energie aufgebracht werden, um den Anschlag zu erreichen. Weiterführend könnte aus dieser Beobachtung ein Abbruchkriterium für diesen Versuch entwickelt werden, welches auf der Aussage basiert, dass grundsätzlich eine große Differenz zwischen dem ersten und dem zweiten Schlag mit einem hohen Energieverbrauch verbunden ist. Dieser wiederum lässt einen Rückschluss auf die Interaktion zwischen Untergrund und Mikropfahl bzw. das Mikropfahltragverhalten generell zu. Weitere Ausführungen hierzu werden in Kapitel 11 angeführt.

Wie bereits in Kapitel 9.3 erwähnt, wurde eine Messrate von 9600 Hz zur Aufzeichnung der Daten verwendet, um die auftretenden Spitzen der schlagartigen Belastung bestmöglich abzugreifen. Diese hohe Messrate ermöglicht es, neben den

Spitzenwerten der Messergebnisse auch deren zeitlichen Verlauf detailliert zu erfassen, wie dies am Detailausschnitt aus Versuch „DAT\_Dyn\_06“ in Abb. 43 zu erkennen ist. Dieses Detail stellt über einen Zeitabschnitt von fünf Hundertstelsekunden das Auftreffen des Pendels und somit die schlagartige Zugbeanspruchung auf den Mikropfahl dar. Der messbare Kraftanstieg beginnt kurz vor Sekunde 1,77 und steigert sich innerhalb einer Hundertstelsekunde bis zum Spitzenwert von ca. 390 kN bei ungefähr Sekunde 1,78. Vergleicht man den ansteigenden mit dem fallenden Ast, sind relativ große Unterschiede zwischen den qualitativen Verläufen erkennbar. Während sich der ansteigende Ast links des Spitzenwertes als sprunghaft beschreiben lässt, zeigt sich der Kraftabfall rechts des Spitzenwertes als deutlich kontinuierlicher. Eine Erklärung hierfür könnte auf der einen Seite sein, dass die Beschleunigung welche die Kraftmesszelle durch den Aufprall erfährt über der durch das Messinstrument aufnehmbaren Beschleunigung liegt und somit die Unstetigkeiten erzeugt. Auf der anderen Seite könnte dieser Verlauf jedoch auch durch ein minimales Verdrehen der Muffe bzw. des Anschlages durch die erzeugten Schwingungen und Vibrationen während der Versuchsdurchführung entstanden sein.

Dass eine Variation der Fallmasse einen großen Einfluss auf die Messergebnisse mit sich bringt, ist offensichtlich. Dies zeigte die Steigerung der Fallmasse von 840 kg (7 Stahlplatten) auf 1080 kg (9 Stahlplatten). Der Versuch „DAT\_Dyn\_06“, bei welchem das Pendel ebenfalls mit einer höheren Fallmasse bestückt war, lieferte jedoch entgegen der ersten Erwartungen geringere Messergebnisse bei der Kraftmessung. Was in erster Instanz als Messfehler interpretiert werden könnte kann jedoch das Resultat aus vergleichsweise großen Verschiebungen des Prüfaufbaues darstellen. Bei näherer Betrachtung der Abb. 42 zeigt sich, dass Versuch „DAT\_Dyn\_06“ im Vergleich zu „DAT\_Dyn\_02“, bei annähernd gleicher Fallhöhe, mehr als den dreifachen Wert in der vom Seilzugwegaufnehmer gemessenen Verschiebung aufweist. Diese räumliche Verschiebung setzt sich aus vertikalen und horizontalen Anteilen zusammen und ist daher nur sehr vorsichtig als Vergleich zu verwenden.

Eine weitere Erkenntnis, die Abb. 42 liefert ist, dass mit steigender Anzahl der Versuche die Verschiebung des Versuchsaufbaues zunimmt. Um die horizontale Verschiebung des Aufbaues generell zu begrenzen, wurden durch die am Boden aufstehenden Querträger Bewehrungsstäbe mit ca. 50 cm Länge in den Boden geschlagen. Es wurden in Summe zwölf Bewehrungsstäbe mit einem Durchmesser von 16 mm eingebaut. Vergleicht man Versuch „DAT\_Dyn\_03“ und „DAT\_Dyn\_04“ ist ersichtlich, dass bei gleichen Rahmenbedingungen, was Fallmasse und Fallhöhe betrifft, eine Differenz von ca. 10 mm in der vom Seilzugwegaufnehmer gemessenen Verschiebung auftrat. Mit dieser Begründung kann außerdem die Differenz in der gemessenen Kraft von ca. 12 kN zwischen den Versuchen „DAT\_Dyn\_03“ und „DAT\_Dyn\_04“ erklärt werden, da durch die zusätzliche Bewegung des Versuchsaufbaues Energie verbraucht wird.



Die beiden Gegenüberstellungen von gemessener Kraft und Verschiebung über die Zeit in Abb. 44 und Abb. 45 erlauben folgende Interpretationen.

Generell kann gesagt werden, dass die vom Seilzugwegaufnehmer gemessene Verschiebung bei Versuch „DAT\_Dyn\_01“ (Abb. 44), aufgrund der geringeren Fallhöhe und dadurch geringeren Energie mit ca. 9,5 mm einen kleineren Einfluss auf die restlichen Messergebnisse hat. Die graphische Darstellung der Verschiebungen in violett zeigt die Bewegung des Versuchsaufbaues. Hier ist erkennbar, dass sich der gesamte Aufbau durch die Schwungbewegung des Pendels zuerst vom Messstativ wegbewegt, bevor er sich wieder in Richtung des Statives verschiebt. Was es in dieser Darstellung zu vernachlässigen gilt, ist dass die Kraftmessung beim ersten Aufprall bzw. auch nach der Entlastung einen Messwert von ca. -60 kN wiedergibt. Ein Ansatz hierzu könnte sein, dass es zu einer Zwängung der Kraftmesszelle zwischen den beiden Stahlplatten des Anschlages kam und hierdurch eine Beeinflussung der Messung nach der Versuchsdurchführung stattfand – dies kann jedoch nicht ausreichend begründet werden.

Ein weiteres Detail in Abb. 44 liegt innerhalb des orangen Rechtecks. Die beiden Wegaufnehmer „Weg1“ und „Weg2“ zeigen eine Verschiebung des Mikropfahles nach oben an, was eine Kombination aus elastischer und plastischer Verschiebung sein sollte. Bei Sensor „Weg1“ ist ein steiler beinahe linearer Anstieg der vertikalen Verschiebung ersichtlich, bevor er sich nach einem kurzen Verharren auf einem konstanten Plateau wieder absenkt. Dieses Absenken am Ende des beschriebenen Vorganges könnte als elastische Dehnung interpretiert werden, welche nach Wegnahme der Belastung wieder in den Ausgangszustand zurückspringt. Die Differenz aus der maximalen Verschiebung (12,74 mm) und der Verschiebung am Ende (8,51 mm), was der plastischen Verformung entspricht, würde dementsprechend die elastische Verformung des Mikropfahles widerspiegeln. Nach dieser Herangehensweise würde das eine elastische Verformung von ca. 4 mm bedeuten. Dieser Wert ist jedoch kritisch zu betrachten, da er auch ein mögliches Spiel in der Muffenverbindung zwischen Mikropfahl und Verlängerungsstab beinhaltet. Der Wegaufnehmer „Weg2“ zeigt ebenfalls einen Anstieg der vertikalen Verschiebung, jedoch mit einer gänzlich anderen Charakteristik. Nebenbei springt der Messwert am Ende in den negativen Bereich, was möglicherweise bedeutet, dass der Kopf des Sensors vom Messstativ gerutscht sein könnte. Was bei beiden Wegsensoren kritisch beäugt werden muss ist, dass zwischen dem Auftreffen des Pendels auf den Anschlag und dem Ausschlag der Sensoren ca. zwei Zehntelsekunden an Zeit verstreichen.

Der in Abb. 45 dargestellte Versuch „DAT\_Dyn\_04“ weist aufgrund der größeren Fallhöhe eine wesentlich ausgeprägtere Verschiebung des Versuchsaufbaues auf. Dies ist anhand der Messung des Seilzugsensors erkennbar, der einen maximalen Wert von ca. 52 mm (als Vergleich, ca. 9,5 mm Verschiebung bei Versuch „DAT\_Dyn\_01“, Abb. 44) wiedergibt. Des Weiteren ist das Aufkippen des

Prüfaufbaues markanter in der Grafik ersichtlich. Mit einem blauen Rechteck in Abb. 45 ist dieses Verhalten durch den Ausschlag des Seilzugsensors (violette Linie) mit simultanen Ausschlägen der beiden Wegaufnehmer markiert. Dieses Aufkippen des Versuchsaufbaues hatte jedoch auch zur Folge, dass die Messwerte der Wegaufnehmer für den weiteren Versuch nicht mehr brauchbar waren. Es können lediglich die qualitativen Verläufe weiter betrachtet werden. Der Grund dafür ist, dass der Querträger des Versuchsaufbaues das Messstativ bewegt hat, wodurch die „negativen“ Verschiebungen im Diagramm zustande kommen. Im grau markierten Bereich erfährt der Sensor „Weg2“ kurz nach Sekunde 1,05 einen rapiden annähernd linearen Abfall mit einem konstanten Messwert im Anschluss. Die Erklärung dafür ergibt sich in Kombination mit dem beim Versuch mitgeschnittenen Video. Dort ist ersichtlich, dass das Magnetstativ und somit der Wegaufnehmer für „Weg 2“ vom Mikropfahl abfallen. Der Sensor „Weg1“ hingegen zeigt im gleichen Zeitbereich das erwartete und auch in Abb. 44 beobachtete Verhalten, nämlich einen Anstieg der vertikalen Verschiebung. Jedoch ist auch zu erkennen, dass im Bereich der maximalen Kraft die Messwerte von „Weg1“ schnell abfallen. Diese Tatsache resultiert erneut daraus, dass das Magnetstativ mit dem der Wegaufnehmer befestigt war, der Beschleunigung nicht standhalten konnte.

Die Ergebnisse aus den Kraftmessungen der impulsartigen Zugversuche, welche in Tab. 4 dargestellt sind können grundsätzlich mit jenen aus den statischen Zugversuchen in Tab. 3 verglichen werden. Es kann dabei jedoch nur die Aussage getroffen werden, dass die Kräfte bei beiden Versuchen die gleiche Größenordnung besitzen. Eine detailliertere Aussage ist aufgrund der verschiedenartigen Herangehensweisen nicht möglich.

# 10 Zusammenfassung

Nach der Erhebung des status quo, betreffend der geltenden Normen für Planung, Ausführung und Prüfung von Zugelementen in der Geotechnik – mit Fokus auf Schutzbauten – wurde ersichtlich, dass der Bereich der impuls- bzw. schlagartigen und auch der dynamischen Untersuchung bzw. Prüfung zwar in einigen Normen erwähnt wird, jedoch keine genaueren Angaben hierzu vorhanden sind. Da sich der Gedanke der anwendungsnahen Prüfung vorrangig auf Verankerungen bzw. Fundierungen von Schutzbauten beschränkt, entstand im Zuge dieser Arbeit ein Vorschlag, wie man die aktuell gängige statische Prüfung von Mikropfählen im Bereich von Schutzbauten adaptieren könnte (Kapitel 7).

Aufgrund der erkannten Notwendigkeit, Mikropfähle auf impuls- bzw. schlagartige Zugbeanspruchungen hin zu untersuchen, wurde der Versuchsaufbau „Kerbschlag“ konzipiert. Mit Hilfe dieses Pendels, welches auf dem Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy basiert, war es möglich die geforderte Zugbelastung in der gewünschten Größenordnung von 350-450 kN zu erzeugen. Die Messergebnisse zeigen, dass es durchaus Verbesserungspotential im Messkonzept gibt, vor allem in Hinblick auf die Wegmessungen. Nichtsdestotrotz konnte mit diesen Versuchen das Konzept einer impulsartigen Zugprüfung mittels Pendelschlag validiert werden. Mit dieser Arbeit konnte somit eine Grundlage geschaffen werden, auf welcher Weiterentwicklungen des Versuchsaufbaues aufgebaut werden können. Zusätzlich konnte ein potentiell Abbruchkriterium für diesen Versuch gefunden werden, welches in Kapitel 11 genauer angeführt wird, jedoch einer weiteren Validierungen bedarf.

Die Ergebnisse und Erkenntnisse dieser Arbeit zeigten, dass es mit dem entwickelten Kerbschlagversuch prinzipiell möglich ist, eine impuls- oder schlagartige Beanspruchung zur Prüfung von auf Zug beanspruchten Mikropfählen aufzubringen. Der Einfluss des Untergrundes bzw. eine umfassendere Validierung dieser Untersuchungen ist hierzu jedoch noch erforderlich. Die dabei zu berücksichtigen und erforderlichen Anpassungen finden sich im abschließenden Kapitel 11 dieser Arbeit.

Um zu ermitteln, wie sich eine impuls- oder schlagartige Beanspruchung auf den Verpresskörper auswirkt, werden die Mikropfähle in weiterer Folge freigelegt und auf Risse untersucht – dies war jedoch nicht Teil der gegenständlichen Arbeit. Dies könnte auch einen Hinweis auf die Dauerhaftigkeit von Mikropfählen bei Schutzbauten geben. Woraus eine weitere wichtige Erkenntnis getroffen werden könnte, da nach einem Schadereignis üblicherweise nur die visuell ersichtlichen Schäden an Bauteilen wie Netzen, Seilen, Stützen oder Bremsen beurteilt werden. Sollte es der Fall sein, dass durch die Belastung Risse im Verpresskörper entstanden sind, könnte dies auf potentielle Korrosionsschäden bzw. ein erhöhtes Korrosionspotential an den Zugelementen hinweisen und so deren Dauerhaftigkeit erheblich beeinträchtigen.

# 11 Ausblick

Dieser Ausblick soll einen Überblick darüber schaffen, welche Aspekte bei weiteren Forschungen und Untersuchungen bzw. einer Weiterentwicklung des Versuchsaufbaues „Kerbschlag“ verbesserungswürdig wären.

Die kurzen Ausführungen in der **Parametervariation** in Kapitel 9.1 bzw. die diesen zu Grunde liegenden Berechnungen zeigten einen ersten Versuch, eine analytische Betrachtung der Versuchsdurchführung vorzunehmen. Dies wurde lediglich als ein kleiner Teilschritt bei der Planung und als Grundlage für die Auswertung der Versuche durchgeführt, jedoch auf Grund des theoretischen und zeitlichen Aufwandes nicht weiter verfolgt. In zukünftigen Untersuchungen wäre hier neben einer umfassenden mechanischen Betrachtung des Versuchsaufbaues auch die Einbindung des Untergrundes bzw. des elastischen und plastischen Verformungsverhaltens des Mikropfahles erforderlich, um hier eine mögliche Aussage treffen zu können. Aufbauend auf diesen Untersuchungen könnte jedoch neben einer Validierung möglicher Abbruchkriterien auch eine Auslegung des Versuchsaufbaues bzw. auch eine rechnerische Vorabbetrachtung der Versuche vorgenommen werden. Weiters ließen sich hieraus eventuell auch Kennwerte zur Beurteilung des Untergrundes bzw. zur Herstellung und der Herstellungsqualität von Mikropfählen ableiten.

Wie bereits in Kapitel 10 erwähnt wurde, beeinflusst die **Verschiebung des Versuchsaufbaues** während der Versuchsdurchführung die Messergebnisse derart stark, dass diese nur bedingt auswert- bzw. interpretierbar waren. Daher sollte für weitere Studien überlegt werden, ob bzw. wie man diese Verschiebung bestmöglich in den Griff bekommen kann, um die Verschiebung einzugrenzen bzw. wie diese toleriert werden kann. Große Probleme brachten die **Messung der Verschiebung und des Weges** mit sich. Daher sollte das Konzept zur Messung der vertikalen Verschiebung erneut überdacht werden, da die Fixierung der Wegaufnehmer mittels Magnetstativen nicht widerstandsfähig genug war.

Abgesehen von der Messtechnik sollte der **Abbremsvorgang** des schwingenden Pendels sicherer gestaltet werden. Da die bei den durchgeführten Versuchen angewandte Methode als sicherheitstechnisches Risiko einzustufen ist.

Des Weiteren ist das **Aufziehen des Pendels** mittels Hebegurten kritisch anzusehen. Erfahrungen haben gezeigt, dass der Gurt durch scheuern an scharfen Metallkanten unter Spannung reißen kann, was einen unkontrollierten Pendelschlag mit sich bringt.

Unter Umständen wäre es mit einer noch höheren **Messfrequenz** möglich, den Spitzenwert genauer abzugreifen bzw. die Verläufe kontinuierlicher darzustellen. Wobei eine mögliche Verbesserung im unteren einstelligen Prozentbereich zu liegen kommen dürfte.

Ein mögliches **Abbruchkriterium** könnte sich, wie bereits angeführt, aus der Differenz  $\Delta$  in der Kraftmessung zwischen dem ersten und dem zweiten Auftreffen des Pendels auf den Anschlag ergeben. Neben den Ausführungen zu Abb. 41 in Kapitel 9.5 soll dies nachfolgend anhand der schematischen Darstellung in Abb. 46 kurz ausgeführt werden. Das Diagramm stellt drei schematische Versuche dar, wobei zwischen Versuch 1 (grau) und Versuch 2 (schwarz) eine Laststeigerung (1) vorgenommen wurde. Hierbei zeigte sich, dass zwischen den beiden Versuchen eine deutliche Differenz  $\Delta$  (zwischen Kurve A und B) zu erkennen ist. Wird nun erneut ein Versuch mit einer geringfügig höheren Beanspruchung (Versuch 3) durchgeführt, und es kommt zu einer weiteren Abnahme der Differenz  $\Delta$  (zwischen Kurve B und C). Ein derartiges Verhalten könnte ein Versagen des Mikropfähles (Verlust der äußeren Tragfähigkeit) andeuten und damit als Abbruchkriterium herangezogen werden.

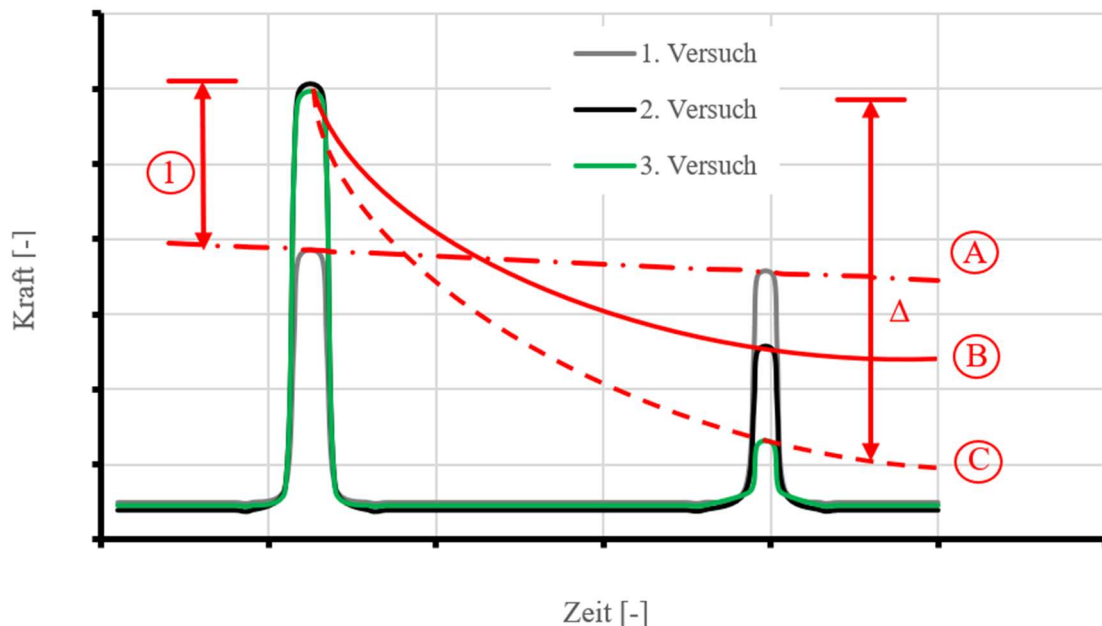


Abb. 46: Schematische Darstellung des Abbruchkriteriums

Hierzu sind jedoch weitere Entwicklungen erforderlich, welche zum einen das angesprochene mechanische Modell zur Parameterstudie des Versuchsaufbaues mit einbeziehen und zum anderen durch Versuche eine Validierung vorgenommen wird. Bei Letzteren wäre es erforderlich, unter möglichst konstanten und genau definierten Bedingungen einige Versuchsreihen durchzuführen. Ein erster Vorschlag wäre, dies auf einer Stahlbetonplatte durchzuführen, bei der ein Zugglied mittels Kontermutter und Stahlplatte auf der Unterseite befestigt wird, um den Einfluss des Bodens als Variable aus der Betrachtung zu nehmen und explizit das Verhalten des Versuchsaufbaues zu untersuchen.

Abgesehen von den oben erwähnten Verbesserungsoptionen hat der Versuchsaufbau durchaus großes Potential im Bereich der Untersuchungs- oder Prüfmethode bei Mikropfählen Fuß zu fassen. Daher sollte der Versuchsaufbau weiterentwickelt und für weitere Validierungsreihen herangezogen werden.

## 12 Literaturverzeichnis

Adam, 2016. *Grundbau und Bodenmechanik - 15. Baugrubensicherung*, Wien: TU Wien.

Allnamics, 2021. *Allnamics*. [Online]

Available at: <https://allnamics.com/en/pile-load-testing/>

[Zugriff am 15 April 2021].

ANP-Systems, 2016. *Zulassung ANP-Mikropfahl SAS 550*, Elsbethen: ANP-Systems GmbH.

APTS, 2021. *APTS (All Piles Testing Services)*. [Online]

Available at: [www.aptsbv.nl](http://www.aptsbv.nl)

[Zugriff am 4 August 2021].

Augustesen, A. H., 2006. *The Effects of Time on Soil Behaviour and Pile Capacity*, Aalborg: Aalborg University.

Austrian Institute of Technologie, 2021. *AIT-Austrian Institute of Technologie*. [Online]

Available at: <https://www.ait.ac.at/loesungen/reliable-transport-infrastructure/vibes/moses>

[Zugriff am 04 Mai 2021].

Brandes, K., Limberger, E., Herter, J. & Berner, K., 1986. *Forschungsbericht 129 - Kinetische Grenztragfähigkeit von stoßartig belasteten Stahlbetonbauteilen*, Berlin: Bundesamt für Materialprüfung (BAM).

Burtscher, S., Rebhan, M., Marte, R. & Scharinger, F., 2017. *Neue Methoden zur Korrosionsdetektion an Litzen- und Stabankersystemen*, Graz: 32. Christian Veder Kolloquium.

DAT, 2021. *Endbericht Forschungsprojekt DAT - Dauerhaftigkeit in der Ankertechnik*, Graz: Technische Universität Graz, Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik, vorläufige unveröffentlichte Fassung, 28.05.2021.

dywidag-systems, 2021. *dywidag-bodennagel*. [Online]

Available at: <https://www.dywidag-systems.de/produkte/geotechnik/dywidag-bodennagel/>

[Zugriff am 18 März 2021].

dywidag-systems, 2021. *dywidag-litzenanker*. [Online]

Available at: <https://www.dywidag-systems.de/produkte/geotechnik/dywidag-litzenanker/kurzzeitanker/>

[Zugriff am 13 März 2021].

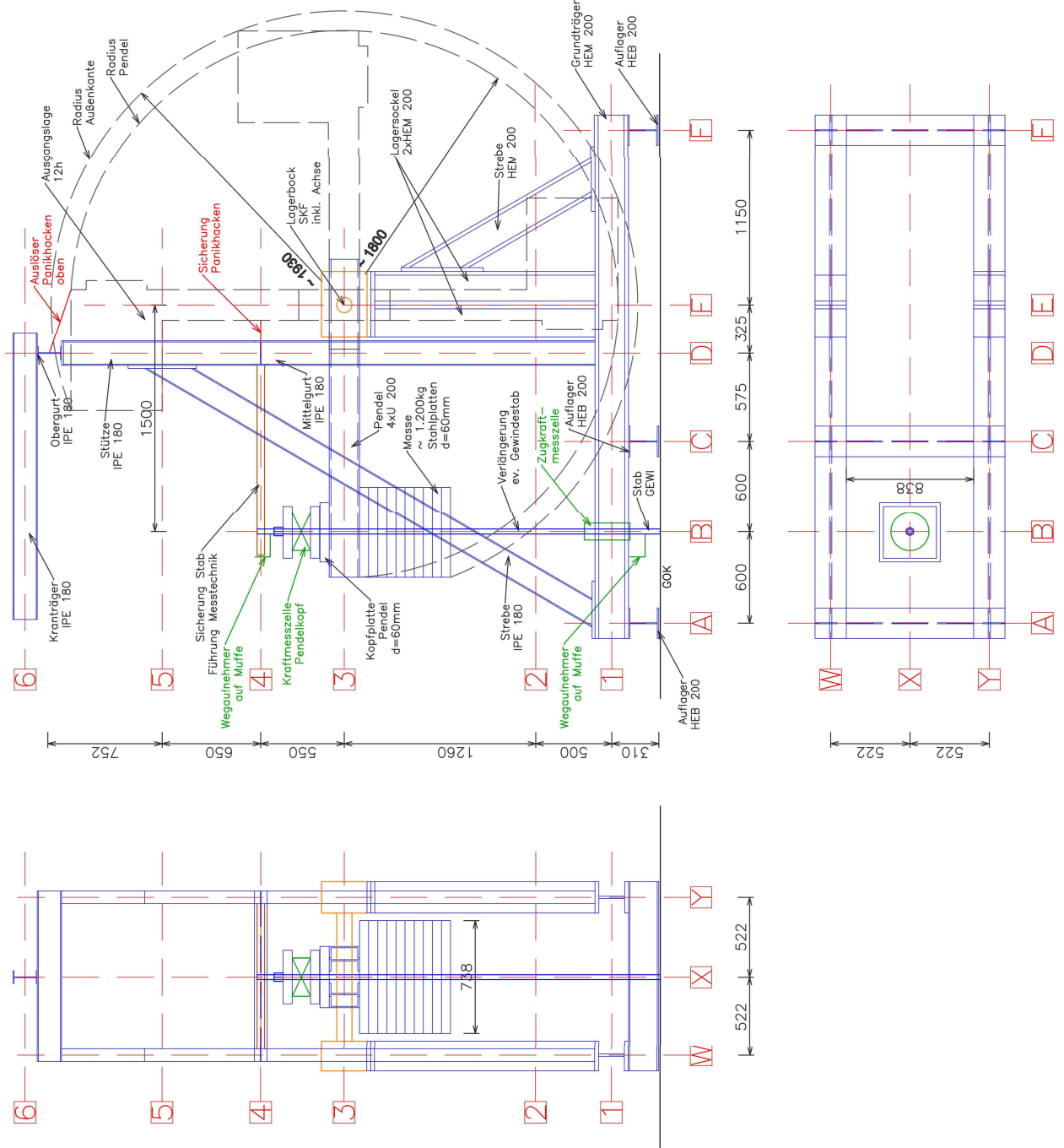
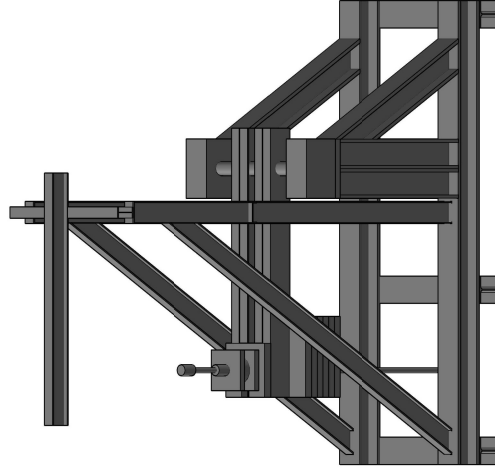
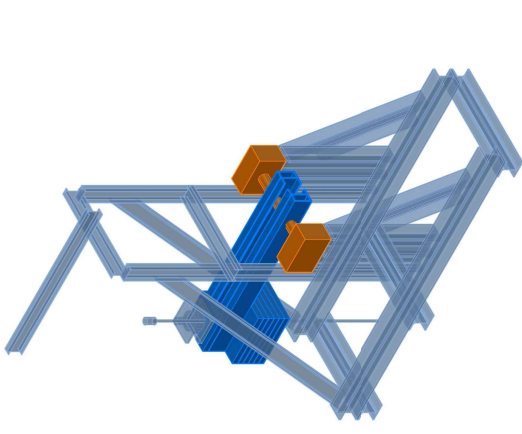
- Eidg. Forschungsanstalt für Wald Schnee und Landschaft WSL, 2021. *Eidg. Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL*,. [Online] Available at: <https://www.wsl.ch/de/naturgefahren/steinschlag-und-rutschung.html> [Zugriff am 28 Juni 2021].
- Hassler, F., noch nicht abgeschlossen. *Untersuchungen zur Verwendung von Kunststoffen für die Herstellung von kurzzeitbelasteten geankerten Konstruktionen, Masterarbeit*, Graz: Technische Universität Graz.
- Hehn, M., 2021. *Einfluss von Rissbreiten auf das Korrosionsverhalten von Mikropfählen*, Graz: Technische Universität Graz, Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik.
- Hübner, E., 2019. *Neue Methode zur Prüfung von Mikropfählen*, Darmstadt: Technische Universität Darmstadt.
- Hunkeler F., 2005. *Spannglieder, Schrägseile und Anker- Beschreibung der Systeme und Erkenntnisse aus Korrosionsschäden*, Wildeg: Eidgenössisches Department für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation / Bundesamt für Strassen.
- Kolymbas D., 1989. *Vereinfachte Abschätzung der Pfahltragfähigkeit aufgrund dynamischer Belastung. Geotechnik 2*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag .
- Middendorp, P., van Ginneken, G. & van Foeken, R., 2000. *The advantages and disadvantages of dynamic load testing and static load testing*, Sao Paulo: 6th International Conference on the Application of Stress Waves to Piles.
- Möller, G., 2016. *Geotechnik Grundbau*. 3. Hrsg. Berlin: Ernst & Sohn.
- ÖNORM B 1997-1-1, 2013. *Eurocode 7: Entwurf, Berechnung und Bemessung in der Geotechnik - Teil 1: Allgemeine Regeln*, Wien: Austrian Standards Institute.
- ÖNORM B 4456, 2021. *Geotechnik - Dauerhaftigkeit von Verankerungen*, Wien: Austrian Standards International.
- ÖNORM EN 14199, 2015. *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Mikropfähle*, Wien: Austrian Standards Institute.
- ÖNORM EN 14490, 2010. *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Bodenvernagelung*, Wien: Austrian Standards Institute.
- ÖNORM EN 1537, 2015. *Ausführung von Arbeiten im Spezialtiefbau - Verpressanker*, Wien: Austrian Standards Institute.

- ÖNORM EN ISO 148-2, 2016. *Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy: Teil 2 Überprüfung der Prüfmaschinen (Pendelschlagwerk)*, Wien: Austrian Standards Institute.
- ÖNORM EN ISO 22477-5, 2018. *Geotechnische Erkundung und Untersuchungen - Prüfung von geotechnischen Bauwerken und Bauwerksteilen*, Wien: Austrian Standards Institute.
- ONR 24810, 2020. *Technischer Steinschlagschutz*, Wien: Austrian Standards Institute.
- ÖNORM EN ISO 148-1, 2016. *Metallische Werkstoffe - Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy, Teil 1: Prüfverfahren*, Wien: Austrian Standard Institute.
- Ostermayer H., 2001. *Verpressanker. Grundbau-Taschenbuch, Teil 2, 6. Auflage, Kap. 2.5.*, Berlin: Ernst & Sohn.
- Radinger, S., 2021. *Studie zur Abnahmeprüfung von Mikropfählen, Masterprojekt*, Graz: Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik.
- RVS 13.03.21 - Geankerte Stützbauwerke, 2013. *RVS 13.03.21 - Geankerte Stützbauwerke*, Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Schenk, W., 1951. *Der Rammpfahl*. Berlin: Wilhelm Ernst & Sohn.
- Steurer, A. & Adam, D., 2012. *Statische und dynamische Pfahlprobelastungen zur Ermittlung der äußeren Tragfähigkeit von Holzpfählen*, Wien: Technische Universität Wien.



# 13 Anhang

Plan Versuchsaufbau	1 Seite A4
Plan Versuchsfeld	1 Seite A4



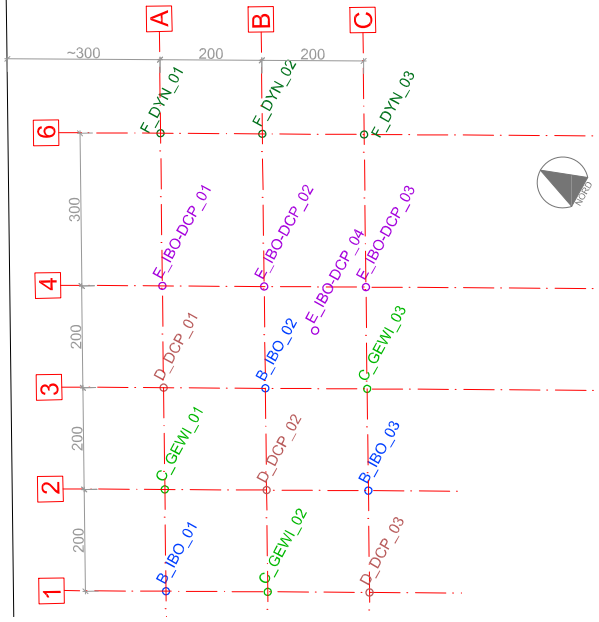
Forschungsprojekt DAT  
 Dauerhaftigkeit in der Ankerstechnik  
 Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik  
 Technische Universität Graz

### Dynamische Pfahlprüfung

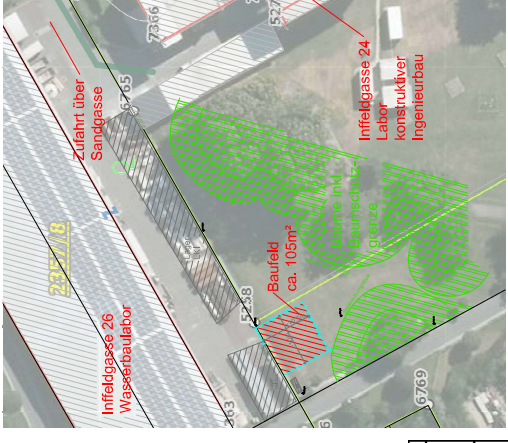
#### Schema Prüfanlage

Revision / Änderung		23.11.2020	
erste Ausarbeitung		23.11.2020	
Maßstab	Datum	Ersteller	Geprüft
	23.11.2020	Reb	
			Plan. Nr.
			DAT_GV_2000a

Lage Versuchsprüfhe M1:50



Übersicht und Lageplan M1:500



TU  
Graz

DAT - Dauerhaftigkeit in der Auerotechnik  
Großversuche

Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Neuartige Geotechnik  
Virtuelle Universität Graz

Revisions-Nr.	11.05.2021
Revisoren	Ersteller
Datum	11.05.2021
Malstab	MR
Plan-Nr.	192_10001

Großversuche

Planung Großversuche Gesamt

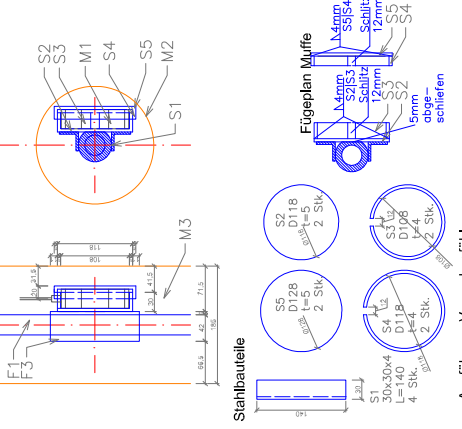
Revision / Änderung

10001 - aktuelle Ausarbeitung

Datum

Detail D-F1 M1:4

Ausführung 2x !!!



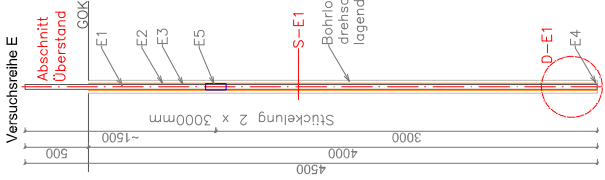
Ausführung Versuchsprüfhe

#	Bezeichnung	Stk.
B1	ISab SHS DN38 L = 3000mm	6
B2	Ausmantel SHS DN38	3
B3	Bohrkronen SHS DN38 (76)	3
B4	Muffe SHS DN38	3
C1	ISab SASS50 DN32 L = 3000mm	6
C2	Feederkondensierender SASS55 DN32	3
C3	Muffe SASS50 DN32	3
D1	ISab SASS50 DN32 L = 3000mm	3
D2	ISab SASS50 DN32 L = 1500mm	3
D3	Feederkondensierender SASS55 DN32	3
D4	Feederkondensierender SASS50 DN32	3
D5	Feederkondensierender SASS50 DN32	3
D6	Muffe SASS50 DN32	3
E1	ISab SHS DN38 L = 1500mm	1
E2	ISab SHS DN38 L = 1500mm	1
E3	Hülshen gerippt SASS50 DN32	16
E4	Kursierverfüllung waikseite	8
E5	Bohrkronen SHS DN38	4
E6	Muffe SHS DN38	4
F1	ISab SASS50 DN32 L = 3000mm	3
F2	Feederkondensierender SASS55 DN32	3
F3	Muffe SASS50 DN32	3
Mengen TPH		
#	Hohlraum [m³]	Länge [m]
E-IBO-DCP_01	0,0015	4,00
E-IBO-DCP_02	0,0015	4,00
E-IBO-DCP_03	0,0015	4,00
E-IBO-DCP_04	0,0015	6,00
E-IBO-DCP_05	0,0015	6,00
E-IBO-DCP_06	0,0015	12,00
Gesamtmenge TPH [m³]		52,02

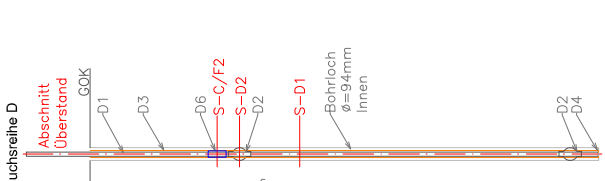
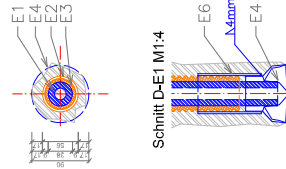
Versuchsaufstufung

#	Typ	Plan	Planotyp	Beschreibung	Herstellung	Prüfung
B-IBO-01	B	X	SHS MKP DN38	IBO-drehschlagend	drehschlagend	Status
B-IBO-02	B	X	SHS MKP DN38	IBO-drehschlagend hergestellt urd	drehschlagend	Status
B-IBO-03	B	X	SHS MKP DN38	IBO-drehschlagend hergestellt urd	drehschlagend	Status
C-GEWI-01	C	X	GEW SASS50 DN32	GEW/SCF-veront	veront	Status
C-GEWI-02	C	X	GEW SASS50 DN32	GEW/SCF-veront	veront	Status
C-GEWI-03	C	X	GEW SASS50 DN32	GEW/SCF-veront	veront	Status
D-DCP-01	D	X	GEW SASS50 DN32	GEW/DCP-veront	veront	Status
D-DCP-02	D	X	GEW SASS50 DN32	GEW/DCP-veront	veront	Status
E-IBO-DCP-01	E	X	SHS MKP DN38	IBO-DCP-drehschlagend hergestellt urd	drehschlagend	Status
E-IBO-DCP-02	E	X	SHS MKP DN38	IBO-DCP-drehschlagend hergestellt urd	drehschlagend	Status
E-IBO-DCP-03	E	X	SHS MKP DN38	IBO-DCP-drehschlagend hergestellt urd	drehschlagend	Status
E-IBO-DCP-04	E	X	SHS MKP DN38	IBO-DCP-drehschlagend hergestellt urd	drehschlagend	Status
E-IBO-DCP-05	E	X	SHS MKP DN38	IBO-DCP-drehschlagend hergestellt urd	drehschlagend	Status
E-IBO-DCP-06	E	X	SHS MKP DN38	IBO-DCP-drehschlagend hergestellt urd	drehschlagend	Status
F-DYN-01	F	X	GEW SASS50 DN32	GEW/DCP-veront	veront	Status
F-DYN-02	F	X	GEW SASS50 DN32	GEW/DCP-veront	veront	Status
F-DYN-03	F	X	GEW SASS50 DN32	GEW/DCP-veront	veront	Status

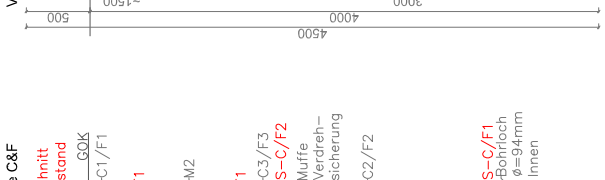
- B IBO - Herstelqualität
- C GEWI - Herstelqualität
- D DCP - Herstelqualität
- E IBO-DCP - Mechtankt
- F GEWI - Dynamische Prüfung



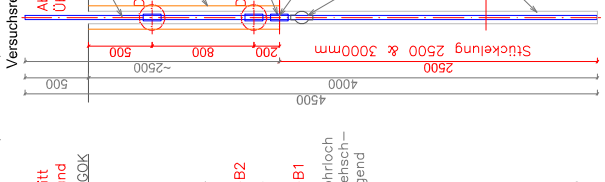
Schnitt S-E1 M1:4



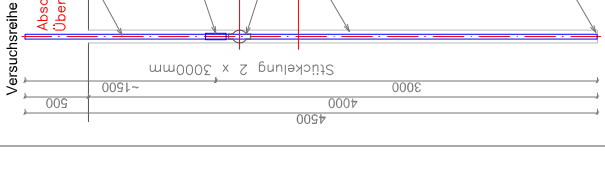
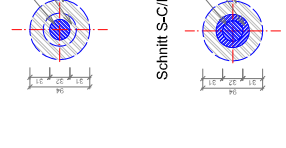
Schnitt S-D1 M1:4



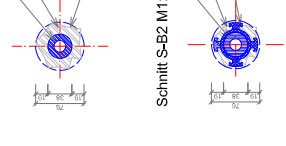
Schnitt S-C/F1 M1:4



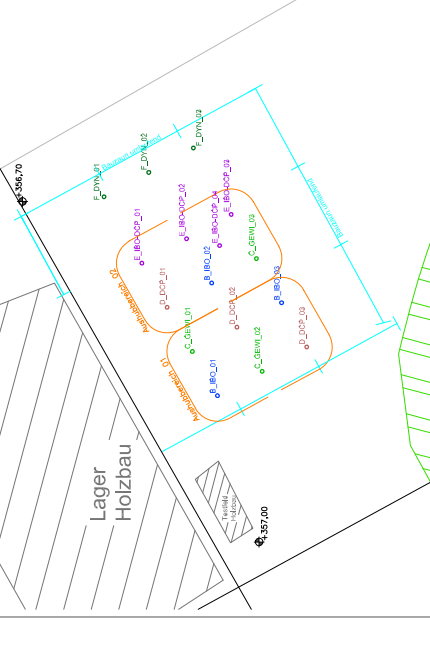
Schnitt S-B1 M1:4



Schnitt S-C/F2 M1:4



#	KW	Datum	Bearbeitung	Person
1	2	15.01.2021	Übermittlung Planunterlagen	Rehner
2	3	21.01.2021	Anfertigung Versuchsprotokolle	ALLE
3	5	05.02.2021	Anfertigung Feldversuche	Fuscheberger
4	15	13.04.2021	Anfertigung Versuchsprotokolle	Höller
5	16	22.04.2021	Anfertigung Versuchsprotokolle	Zöhrer
6	16	-	Anfertigung Versuchsprotokolle	ALLE
7	17	28.04.2021	Anfertigung Versuchsprotokolle	Rehner
8	17	30.04.2021	Anfertigung Versuchsprotokolle	ANP
9	19	-	Anfertigung Versuchsprotokolle	Rehner / Höller
10	21	-	Anfertigung Versuchsprotokolle	Zöhrer
11	22	-	Anfertigung Versuchsprotokolle	Zöhrer
12	22	-	Anfertigung Versuchsprotokolle	Rehner
13	22	-	Anfertigung Versuchsprotokolle	ALLE



Absperrung Baufeld & Aushubbereiche M1:100

