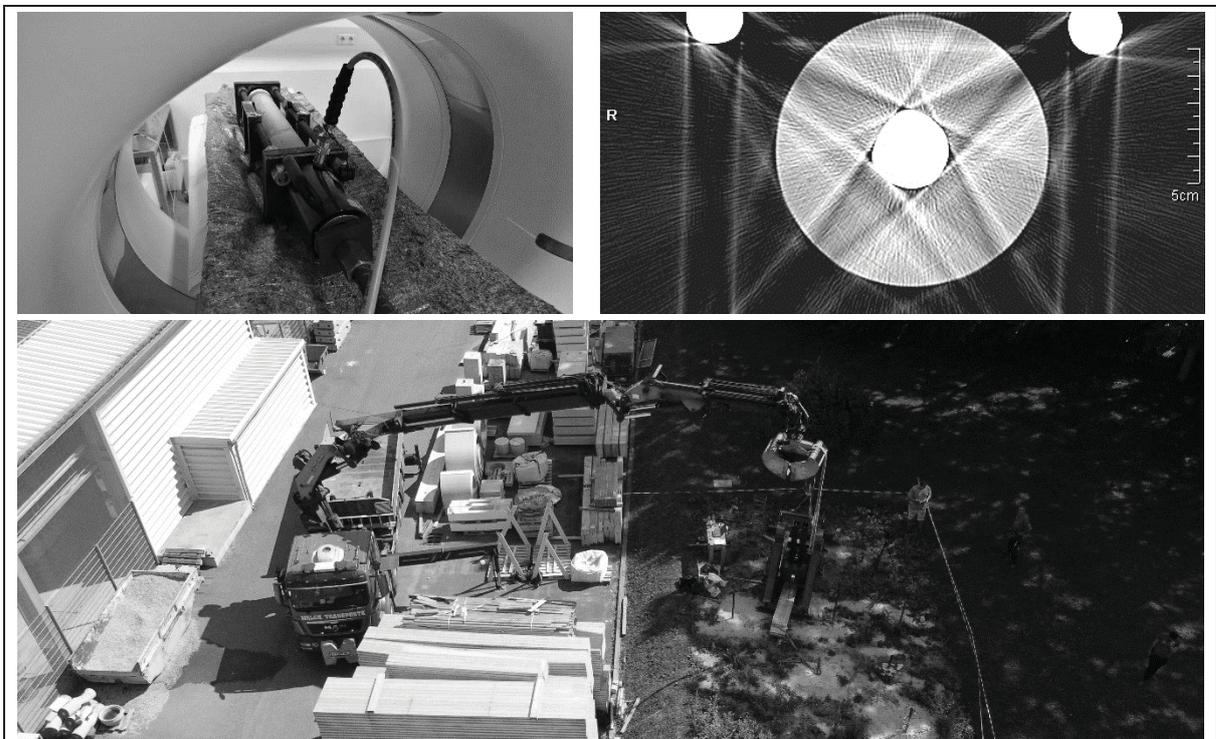


# Dauerhaftigkeit in der Ankertechnik DAT

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung 2018  
(VIF 2018)

Stand: Juli 2022



## Impressum:

### Herausgeber und Programmverantwortung:

Bundesministerium für Klimaschutz  
Abteilung Mobilitäts- und Verkehrstechnologien  
Radetzkystraße 2  
1030 Wien

 **Bundesministerium**  
Klimaschutz, Umwelt,  
Energie, Mobilität,  
Innovation und Technologie

ÖBB-Infrastruktur AG  
Praterstern 3  
1020 Wien



Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-  
Aktiengesellschaft  
Rotenturmstraße 5-9  
1010 Wien



### Für den Inhalt verantwortlich:

Technische Universität Graz  
Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Num. Geotechnik  
Rechbauerstraße 12  
8010 Graz



### Programmmanagement:

Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH  
Thematische Programme  
Sensengasse 1  
1090 Wien

 **FFG**  
Forschung wirkt.

# **Dauerhaftigkeit in der Ankertechnik DAT**

Ein Projekt finanziert im Rahmen der  
Verkehrsinfrastrukturforschung  
(VIF2018)

## **AutorInnen:**

**DDI Dr.techn. Matthias J. REBHAN**  
**Priv.Doiz. Stefan L. BURTSCHER**  
**DI Dr.techn. Florian SCHARINGER**  
**DI Dr.techn. Sebastian HIRSCHMÜLLER**  
**Ing. Thomas PIRKNER**  
**DI Dr.techn. Alexander ZÖHRER**  
**DI Harald FUSCHELBERGER**  
**Götz TINTELOT**

## **Auftraggeber:**

Bundesministerium für Klimaschutz

ÖBB-Infrastruktur AG

Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft

## **Auftragnehmer:**

Technische Universität Graz

Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik

BIEGE FP DAT



## KURZFASSUNG

Mikropfähle und andere Zugelemente kommen oftmals zur Errichtung von Schutzbauten gegen Naturgefahren wie Steinschlagschutznetze, Lawinen- oder Murensperren zum Einsatz. Mit Verwendung dieser Zugelemente werden Zuglasten aus dem System (Seilkräfte, Fundierungen) in den Untergrund eingeleitet. Auf Grund der eingeschränkten Zugänglichkeit, welche mit der örtlichen Lage dieser Konstruktionen einhergeht, ist neben den Anforderungen an die Tragfähigkeit auch die Dauerhaftigkeit dieser Elemente eine große Herausforderung.

Im Zuge des Projektes DAT wurde daher die Dauerhaftigkeit von auf Zug beanspruchten Mikropfählen näher untersucht. Zum einen wurden hier aktuelle Methoden des Korrosionsschutzes näher betrachtet und zum anderen wurde auch ein neuer Typ eines korrosionsgeschützten Mikropfahles entwickelt und durch Feldversuche validiert. Bei den Arten des Korrosionsschutzes wurde der einfache Korrosionsschutz in Form einer Zementsteineinkapselung und einer Verzinkung mit der Methode des doppelten Korrosionsschutzes verglichen. Hierbei zeigte sich, dass bereits kleine Risse im Verpresskörper zu einer Korrosion am metallischen Tragglied führen können, bzw. dass Schäden an der Verzinkung zu einer massiven Zunahme des Korrosionsprozesses führen können. Auf Grund der weit streuenden Randbedingungen des Untergrundes in Bezug auf die Korrosivität des Bodens ist eine Ableitung von Korrosionsgeschwindigkeiten – beispielsweise in Bezug auf eine Abrostrate – entsprechend schwierig. Eine Neuerung, welche innerhalb des Projektes untersucht wurde, stellt die Anwendung von Kunststoffen zur Herstellung eines werksseitigen Korrosionsschutzes dar. Dieses Konzept wurde in Labor- und Feldversuchen untersucht und auf seine Anwendbarkeit hin validiert. Vorteil dieses Systemes wäre es, dass bereits werksseitig ein Korrosionsschutz auf ein Selbstboherelement aufgebracht wird. Hieraus folgend kann eine einfache Installation – mit kleinem Geräte und Equipment – vorgenommen werden, während zudem ein umfassender Korrosionsschutz der metallischen Bauteile eines Mikropfahles gegeben ist.

Als ein weiterer Punkt wurde im Zuge des Projektes die Prüfung von Mikropfählen untersucht. Neben der Anwendung und dem Aufzeigen von Optimierungspotentialen bei aktuellen Prüfmethode(n) (statische Prüflasten mit Pressen) wurde ein Systemaufbau entwickelt, mit welchem eine impuls- bzw. schlagartige Beanspruchung auf einen Mikropfahl aufgebracht werden kann. Der Vergleich mit klassischen Prüfungen zeigte, dass dieses System in Bezug auf schlagartig beanspruchte Mikropfähle verwendet werden kann, um deren Tragfähigkeit und Funktionstüchtigkeit im Zuge von in-situ Untersuchungen zu erproben.



## ABSTRACT

Micropiles and other tensile elements are often used for the construction of protective structures against natural hazards such as rockfall protection, avalanche or mud barriers. With the use of such tensile elements, tensile loads are transferred from the system (cable forces, foundations) into the subsoil. Due to the limited accessibility associated with the location of these constructions, the durability of these elements is a major challenge in addition to the requirements regarding the load-bearing capacity.

In the course of the DAT project, the durability of micropiles subjected to tensile loads was therefore investigated more in detail. On the one hand, current methods of corrosion protection were examined more closely and, on the other hand, a new type of corrosion-protected micropile was developed and validated by field tests. With regard to the types of corrosion protection, single corrosion protection in the form of grout cover protection and zinc corrosion protection was compared with the method of double corrosion protection. It was shown, that even small cracks in the grout body can lead to corrosion on the metallic tensile element, or that damage to the galvanisation can lead to a massive increase of the corrosion process. Due to the widely varying boundary conditions of the subsoil with regard to the corrosiveness of the soil, it is correspondingly difficult to derive corrosion rates - for example with regard to a sacrificial thickness allowance. An innovation, which was investigated within the project, is the use of resin for the production of a factory-supplied corrosion protection. This concept was investigated in laboratory and field tests and validated for its applicability. The advantage of this system would be that the corrosion protection is already applied to a self-drilling element at the factory. As a result, a simple installation - with small drilling devices and equipment - can be carried out, while a comprehensive corrosion protection of the metallic components of a micropile is given.

As a further point, the testing of micropiles was investigated in the course of the project. In addition to the application and identification of optimisation potential in current testing methods (static test loads with hydraulic jacks), a system setup was developed with which an impulse or impact load can be applied to a micropile. The comparison with classical tests showed that this system can be used with regard to impact loaded micropiles in order to test their load-bearing capacity and functional capability in the course of in-situ investigations.



## INHALTSVERZEICHNIS

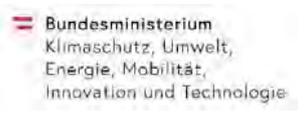
1.	Ausgangssituation .....	23
1.1.	Problemstellung.....	24
1.2.	Ziele des Forschungsprojektes DAT .....	25
1.2.1.	AP2 – Dauerhaftigkeit geankerter Konstruktionen .....	26
1.2.2.	AP3 – Kunststoffe in der Ankertechnik .....	26
1.2.3.	AP4 - Großversuche .....	26
1.2.4.	AP5 - Empfehlungen .....	26
1.3.	Schutzbauten und Schutzbauwerke .....	27
1.3.1.	Arten bzw. Einschränkungen .....	27
1.3.2.	Entwurf und Einwirkung .....	28
2.	Dauerhaftigkeit geankerter Konstruktionen.....	30
2.1.	Definition Dauerhaftigkeit .....	31
2.2.	Schäden an Bestandsbauwerken.....	31
2.2.1.	Grundlagen zur Korrosion.....	31
2.2.2.	Korrosion im Boden .....	33
2.2.3.	Korrosion bei Mikropfählen .....	36
2.2.4.	Korrosionserscheinungsformen.....	40
2.3.	Korrosionsschutzsysteme .....	44
2.3.1.	Passiver Korrosionsschutz.....	45
2.3.2.	Aktiver Korrosionsschutz.....	47
2.3.3.	Kosten von Korrosionsschäden .....	48
2.4.	Korrosionsschutzmethoden zu Zugelementen .....	49
2.4.1.	Notwendigkeit von Korrosionsschutz .....	49
2.4.2.	Arten von Korrosionsschutzmaßnahmen .....	52
2.5.	Zusammenfassung.....	60
3.	Kunststoffe in der Ankertechnik.....	61
3.1.	Anforderungen .....	61
3.2.	Neu konzeptioniert Fundierungslösung für Schutzbauten .....	63
3.3.	Untersuchungen Fundierungslösung DCP-SBZ .....	64
3.4.	Weiterentwicklungspotential.....	66
3.5.	Zusammenfassung.....	67

4.	Laborversuche.....	68
4.1.	Überprüfung der Dichtheit des Kopfbereiches bei Zugelementen.....	68
4.1.1.	Versuchsbeschreibung.....	68
4.2.	Überprüfung Funktionstüchtigkeit des Korrosionsschutzes bei Litzenankern .....	71
4.2.2.	Feldversuche.....	74
4.2.3.	Schlussfolgerungen.....	76
4.2.4.	Weiterentwicklung / Verbesserung .....	76
4.3.	Abdichtung des Kopfbereiches bei Litzenankern .....	77
4.4.	Kunststoffe zur nachträglichen Abdichtung des Kopfbereiches von PZ-Ankern ...	78
4.5.	Korrosionsversuche an stabförmigen Zugelementen .....	87
4.5.1.	Versuchsaufbau .....	87
4.5.2.	Versuchskörper.....	88
4.5.3.	Versuchsdurchführung .....	89
4.5.4.	Versuchsergebnisse .....	91
4.5.5.	Zusammenfassung der Versuche.....	98
4.5.6.	Interpretation der Versuchsergebnisse .....	99
4.6.	Erfassung der Rissbildung bei Mikropfahlssystemen.....	103
4.6.1.	Ziel des Laborversuchs.....	103
4.6.2.	Versuchskörper.....	104
4.6.3.	Prüfrahmen und Pressen.....	105
4.6.4.	Zusammenfassung des Prüfaufbaus .....	107
4.6.5.	Schnittgrößen des Versuchskörpers .....	109
4.6.6.	Ablauf der Voruntersuchung und CT-Parameter .....	110
4.6.7.	Voruntersuchung – Ergebnisse.....	111
4.6.8.	Allgemeine Ergebnisse.....	111
4.6.9.	Bildauswertung der Computertomographie .....	112
4.6.10.	Auswertung der CT-Scans.....	118
4.6.11.	Bildauswertung V2_DAT_GCP_01 .....	120
4.6.12.	Bildauswertung V2_DAT_DCP_01 .....	129
4.6.13.	Auswertung der Laborversuche.....	139
4.6.13.1.	Prüfmethoden und Prüfkörper.....	139
4.6.13.2.	Laborauswertung V2_DAT_GCP_02 .....	141

4.6.13.3.	Laborauswertung V2_DAT_DCP_02 .....	142
4.6.13.4.	Laborauswertung V2_DAT_GCP_01 .....	143
4.6.13.5.	Laborauswertung V2_DAT_DCP_01 .....	144
4.6.13.6.	Laborauswertung V3_DAT_GCP_01 .....	145
4.6.13.7.	Laborauswertung V3_DAT_DCP_01 .....	146
4.6.13.8.	Laborauswertung V3_DAT_GCP_02 .....	147
4.6.13.9.	Laborauswertung V3_DAT_DCP_02 .....	148
4.6.14.	Zusammenfassung der Prüfergebnisse .....	149
4.6.15.	Freilegung des inneren Verpresskörpers von V2_DAT_DCP_02 .....	151
4.7.	Zusammenfassung der durchgeführten Laborversuche.....	153
4.7.1.	Verwendung von Kunststoffen für den Kopfbereich von Ankern .....	153
4.7.2.	Dichtheit von Ankerköpfen .....	153
4.7.3.	Korrosionsnachbildung bei Mikropfählen.....	153
4.7.4.	CT-Untersuchungen von Mikropfählen .....	153
5.	Grossversuchsfeld .....	154
5.1.	Planung und Anordnung.....	154
5.1.1.	Anordnung.....	154
5.1.2.	Planung .....	155
5.1.2.1.	Versuchsreihe B.....	156
5.1.2.2.	Versuchsreihe C & F .....	156
5.1.2.3.	Versuchsreihe D .....	156
5.1.2.4.	Versuchsreihe E.....	156
5.1.3.	Untergrund.....	157
5.2.	Freilegen der Versuchskörper .....	157
5.2.1.	Verpresskörper der Probemikropfähle .....	158
5.2.2.	Zustand der impulsartig geprüften Zugelemente.....	159
5.2.3.	Herstellbarkeit des DCP-SBZ .....	159
5.3.	Zusammenfassung.....	160
6.	Prüfung von Mikropfählen.....	161
6.1.	Art der Prüfung.....	161
6.1.1.	Untersuchungsprüfung .....	161
6.1.2.	Eignungsprüfung .....	162

6.1.3.	Abnahmeprüfung.....	162
6.1.4.	Langzeitüberwachung.....	163
6.1.5.	Prüfverfahren.....	163
6.1.5.1.	Prüfverfahren 1.....	164
6.1.5.2.	Prüfverfahren 2.....	164
6.1.5.3.	Prüfverfahren 3.....	165
6.2.	Untersuchungsmethoden für Mikropfähle.....	165
6.2.1.	Statische Probelastung.....	165
6.2.1.1.	Dynamische Probelastung.....	166
6.2.1.2.	Integritätsprüfung.....	166
6.3.	Ergebnisse von Zugelementuntersuchungen.....	167
6.4.	Interpretation von Zugelementuntersuchungen.....	169
6.4.1.	Kriechmaß $\alpha$ .....	169
6.4.2.	Rechnerisch freie Stahllänge $L_{app}$ .....	170
6.4.3.	Widerlagerverformung.....	170
6.5.	Zerstörungsfreie Prüfmethoden.....	171
6.5.1.	Ultraschallprüfungen an Litzen- und Stabankern.....	171
6.5.2.	Impuls-Echo-Methode (Low Strain).....	171
6.6.	Dynamische Untersuchungen bei geotechnischen Elementen.....	172
6.6.1.	Dynamische Untersuchungsmethoden.....	172
6.6.2.	Dynamische Prüfmethoden für Pfähle.....	173
6.6.3.	Dynamische Pfahlprüfung.....	173
6.6.3.1.	Dynamic Load Testing (DLT).....	174
6.6.3.2.	Dynamische Pfahlprobelastung an Holzpfählen.....	176
6.7.	Dynamische Prüfung von Zugelementen.....	179
6.8.	Problemstellungen der Prüfungen von Mikropfählen bei Schutzbauten.....	179
6.8.1.	Abbruchkriterien für die Prüfung von Mikropfählen bei Schutzbauten 179	
6.8.2.	Vorschläge für Prüfaufbau und Abläufe der Abnahmeprüfung von Mikropfählen bei Schutzbauten.....	181
6.8.2.1.	Anforderungen an die Prüfung und das Prüfequipment.....	181
6.8.2.2.	Vorschlag zu einer Anpassung der Abbruchkriterien und des Prüfaufbaues.....	182

6.9.	Impulsartige Prüfung von Zugelementen .....	184
6.9.1.	Konzept und Methode .....	184
6.9.2.	Kerbschlagbiegeversuch nach Charpy .....	184
6.9.2.1.	Ermittlung der verbrauchten Energie .....	185
6.9.3.	Planung Versuchsaufbau .....	186
6.9.3.1.	Versuchsaufbau „Fallgewicht 1“ .....	186
6.9.3.2.	Versuchsaufbau „Fallgewicht 2“ .....	188
6.9.3.3.	Versuchsaufbau „Kerbschlag“ .....	190
6.9.4.	Herstellung der Probe-Mikropfähle.....	191
6.9.5.	Vorversuche.....	194
6.10.	Versuche zur impulsartigen Prüfung von nicht vorgespannten Zugelementen.....	198
6.10.1.1.	Parametervariation.....	198
6.10.1.2.	Fallmasse .....	198
6.10.1.3.	Fallhöhe .....	198
6.10.1.4.	Versuchsdurchführung .....	200
6.10.1.5.	Messkonzept .....	203
6.10.2.	Versuchsauswertung.....	206
6.10.3.	Interpretation der Versuchsergebnisse .....	211
6.11.	Zusammenfassung.....	215
7.	Versuchsfeld Frohnleiten .....	216
7.1.	Ziele des Feldversuches Frohnleiten .....	216
7.2.	Beschreibung des Versuchsfeldes .....	217
7.3.	Weiterentwicklung DCP-SBZ.....	217
7.4.	Verwendete Prüfaufbauten.....	218
7.4.1.	Prüfaufbau 1 - Widerlager.....	218
7.4.2.	Prüfaufbau 2 - Reaktionspfähle.....	219
7.4.3.	Weitere Anpassungen und messtechnische Ausstattung.....	220
7.5.	Zusammenfassung.....	221
8.	Projektergebnisse .....	222
9.	Ausblick und weitere Forschungen.....	224
10.	Publikationen und Veröffentlichungen.....	225
11.	Anhänge.....	227
12.	Literaturverzeichnis .....	233



## BESCHREIBUNG FORSCHUNGSPROJEKT DAT

*„Das Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie (BMVIT), die ÖBB Infrastruktur AG (ÖBB), die Autobahnen- und Schnellstraßen-Finanzierungs-Aktiengesellschaft (ASFINAG) und die Österreichische Forschungsförderungsgesellschaft mbH (FFG) haben sich zusammengeschlossen, um Forschung im Bereich der Verkehrsinfrastruktur zu beleben. Zweck der Initiative ist die gemeinsame öffentliche und wettbewerbliche Ausschreibung und Beauftragung von F&E-Projekten. Mit diesen F&E-Projekten sollen prioritär technische und organisatorische Fragestellungen, die sich aus den Herausforderungen für die Schieneninfrastruktur der ÖBB und dem Autobahnen- und Schnellstraßennetz der ASFINAG ergeben, behandelt werden.“ (bmvit 2018)*

Mit den Inhalten des Forschungsprojektes DAT – Dauerhaftigkeit in der Ankertechnik – wird auf den Ausschreibungsschwerpunkt 2.3.1 – Optimierung der Bauwerksfundierung bei Schutzbauten eingegangen. Dieser wurden in der Ausschreibung (siehe bmvit 2018, S. 35) wie folgt beschrieben:

### **Ausgangslage / Aktueller Entwicklungsstand:**

Zum Schutz der Infrastruktur vor geogenen Prozessen, wie Steinschlag, Vermurung und Lawinen, werden Verbauungen errichtet, welche vorwiegend mittels Mikropfählen im Untergrund verankert werden. Bei den ÖBB sind diese alpinen, schwer zugänglichen Schutzbauwerke einschließlich deren Fundierungen in Regelwerken beschrieben. Um die hohen Qualitätsanforderungen an Mikropfähle besser in der Praxis umzusetzen, sollen die Fundierungselemente, die Herstellung und die zugehörigen Prüfungen weiter optimiert werden. Dabei ergeben sich Fragestellungen zum qualitätsgesicherten Einbau von unterschiedlichen Pfahlsystemen, zu normgerechten Prüfungsverfahren im steilen bzw. exponierten Gelände und zur Sicherstellung der vorgesehenen Dauerhaftigkeit.

### **Ziel des Forschungsvorhabens:**

Bei der Herstellung von Mikropfählen können als Tragglied Vollstäbe und Hohlstäbe verwendet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Einbauverfahren der jeweiligen Tragglieder, sind der Korrosionsschutz und die Dauerhaftigkeit des gesamten Mikropfahls zu untersuchen. Zudem werden Tragglieder mit verschiedenen Stahlgüten angeboten und verwendet. Es ist zu untersuchen, wie sich unterschiedliche Tragglieder bei dynamischen oder schlagartigen Einwirkungen (Impuls) verhalten. In Bezug auf das Forschungsthema sind auch alternative Fundierungsmöglichkeiten für Schutzbauwerke zu erheben und zu bewerten.

Im Forschungsvorhaben sind folgende Fragestellungen zu bearbeiten:

- Literaturstudie und Zusammenstellung von Erfahrungen zur Fundierung von Schutzbauwerken, Schäden, Schadensursachen und Analysen
- Darstellung des Verhaltens unterschiedlicher Tragglieder (Vollstab, Hohlstab) und Pfahlsysteme hinsichtlich der Dauerhaftigkeit
- Verhalten von Traggliedern bei dynamischen und schlagartigen Einwirkungen
- Optimierung der Prüfungsverfahren im schwierigen Gelände
- Darstellung von Vor- und Nachteilen alternativer Fundierungsmöglichkeiten für Schutzbauwerke
- Empfehlungen für die normative Weiterentwicklung

#### **Inhalte des Forschungsprojektes DAT (vgl. Kons. DAT):**

Im gegenständlichen Projekt DAT werden aktuelle Fragestellungen der Dauerhaftigkeit bei der Fundierung von Schutzbauten und geankerten Konstruktionen untersucht, welche sich in die Teilbereiche Dauerhaftigkeit und alternative Lösungsansätze aufteilen. Mittels einer Literaturrecherche und der Erhebung vorhandener Unterlagen zu Schäden wird die Grundlage zu Korrosionsversuchen an stabförmigen Zugelementen gelegt. Ein Konzept einer alternativen Fundierungslösung wird durch Labor- und Großversuche weiterentwickelt und auf Praxistauglichkeit und mögliche Vorteile hin untersucht. Abschließend werden die Erkenntnisse des Projektes, neben der Einarbeitung in normative Vorgaben und technische Richtlinien, auch zur Weiterentwicklung und Verbesserung der Ankertechnik – mit Fokus auf Schutzbauten - herangezogen.

Die in der obigen Zusammenfassung der Projektziele angeführten Forschungstätigkeiten des Projektes DAT untergliedern sich in insgesamt fünf Arbeitspakete, wobei sich das AP1 lediglich mit den Aufgaben des Projektmanagements beschäftigt.

In AP2 wurden die **Grundlagen zur Dauerhaftigkeit geankerter Konstruktionen** mit speziellem Fokus auf Stabankersysteme bzw. die Zugelemente bei Schutzbauten aufbereitet. Hierzu kamen Literaturstudien und Datenerhebungen zu den Themenstellungen der Korrosionsschäden und der Dauerhaftigkeit zur Anwendung. Zusätzlich wurden Laborversuche zur künstlichen Nachbildung von Korrosionsschäden an Stabankersystem durchgeführt. Aufbauend auf den Erkenntnissen zur Dauerhaftigkeit wurde in AP3 die Anwendung von **Kunststoffen in der Ankertechnik** näher untersucht. Der Fokus in dieser Aufgabenstellung lag dabei auf der Erarbeitung eines Fundierungselementes für Schutzbauten unter der Anwendung von Kunststoffen und daraus folgend einer Reduktion der Korrosionsgefahr und einer Erhöhung der Dauerhaftigkeit. Die Anwendung dieser Materialien

wurde hierbei in Form von Kleinversuche und Versuchen im Labormaßstab validiert. Zur Überprüfung der Umsetzbarkeit der Laborversuche zu Kunststoffen in der Ankertechnik wurden zudem **Großversuche** durchgeführt. Hierbei wurde die praktische Anwendbarkeit von kunststoffbasierten Fundierungslösungen für Schutzbauten untersucht und durch statische und dynamische Belastungsversuche belegt. Zudem wurden bei der Herstellung unterschiedliche Mikropfahlsysteme eingebaut und durch ein Freilegen in ihrer Qualität beurteilt. Als letztes Arbeitspaket wurden die Ergebnisse und Erkenntnisse aus diesem Forschungsprojekt in Form von **Richtlinien und Regelwerken** zusammengefasst und somit auch der Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

Der hier vorliegende Bericht stellt eine Zusammenfassung der Projektergebnisse dar. Weitere Informationen sind den angeführten Quellen bzw. den in Kapitel 10 angeführten Publikationen und den Anhängen zu entnehmen.



## FORSCHUNGSKONSORTIUM

Das Konsortium hinter dem Forschungsprojekt DAT setzt sich aus universitären Forschungseinrichtungen und Wirtschaftspartner zusammen.

Technische Universität Graz Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik	<b>IBG</b>
TPH-Bausysteme	<b>TPH</b>
Keller Grundbau GmbH	<b>KELL</b>
ANP-Systems GmbH	<b>ANP</b>
Hirschmüller	<b>HIR</b>
Burtscher consulting GmbH	<b>BUR</b>
GDP ZT GmbH	<b>GDP</b>
Vereinigung Österreichischer Bohr-, Brunnenbau- und Spezialtiefbau-unternehmungen	<b>VÖBU</b>

Folgende MitarbeiterInnen waren an der Umsetzung des Forschungs-projektes DAT direkt beteiligt:

#	Vorname	Nachname	Mailadresse
1	Matthias J.	Rebhan	<a href="mailto:rebhan@tugraz.at">rebhan@tugraz.at</a>
2	Roman	Marte	<a href="mailto:roman.marte@tugraz.at">roman.marte@tugraz.at</a>
3	Sven	Hoiser	<a href="mailto:S.Hoiser@tph-bausysteme.com">S.Hoiser@tph-bausysteme.com</a>
4	Alexander	Zöhrer	<a href="mailto:A.Zoehrer@kellergrundbau.at">A.Zoehrer@kellergrundbau.at</a>
5	Harald	Fuschelberger	<a href="mailto:harald.fuschelberger@anp-systems.at">harald.fuschelberger@anp-systems.at</a>
6	Sebastian	Hirschmüller	<a href="mailto:Sh@hirschmueller.at">Sh@hirschmueller.at</a>
7	Stefan	Burtscher	<a href="mailto:slb@burtscher.consulting">slb@burtscher.consulting</a>
8	Florian	Scharinger	<a href="mailto:f.scharinger@gdp.at">f.scharinger@gdp.at</a>
9	Thomas	Pirkner	<a href="mailto:t.pirkner@voebu.at">t.pirkner@voebu.at</a>



## **ANERKENNUNG UND DANKSAGUNG**

Die Umsetzung dieses Projektes war nur dank der intensiven Zusammenarbeit aller Forschungspartner und auch zu Folge der Einbindung der Auftraggeber in der hier vorliegenden Form möglich. Da es sich bei hier vorliegendem Projekt um eine interdisziplinäre Fragestellung handelt, war zur Lösung der Problemstellungen und zur Erreichung der Ziele auch eine entsprechende Herangehensweise erforderlich.

Vor allem gilt ein Dank an die Wirtschaftspartner welche im Zuge des Projektes neben Material, Equipment und Personal auch ihre Fachexpertise in das Projekt einbrachten und somit zu einer umfassenden Betrachtung der Projektinhalte beitrugen. Dies ermöglichte die Umsetzung der in diesem Abschlussbericht angeführten Labor- und Feldversuche in der angeführten Form. Unter anderem konnte somit neben der wissenschaftlichen Betrachtung auch der praktische Fokus des Projektes berücksichtigt werden und die Umsetzung der Projekterkenntnisse in die Praxis kann sichergestellt werden.

Ein großer Dank gilt auch den Mitarbeitern und Ausschussmitglieder, welche im Zuge der Erarbeitung der ÖNORM B 4456, RVS 13.03.61 und der RVS 08.22.02 durch die dort stattfindenden Diskussionen mit in das Projekt eingebunden wurden.

Ein weiterer Dank geht auch an die Studierenden, welche im Zuge ihrer Abschlussarbeit an der Technischen Universität Graz zu den Forschungsfragen des Projektes und auch zur Ausarbeitung dieses Abschlussberichtes beigetragen haben. Besonders erwähnt seien hier Martin Hehn, Cornelius Dold, Florian Kainz sowie Stefanie Radinger.

Abschließend möchte sich die Konsortialführung für die intensive und interessante Zusammenarbeit im Zuge dieses Projektes bei den Konsortialpartnern und den Auftraggebern bedanken. Dank diesem Austausch an Informationen, Kenntnissen und Ergebnissen konnte neben einer Erarbeitung der Projektinhalte auch ein Beitrag zum Stand der Technik und der Entwicklung und Verbesserung von Regelwerken beigetragen werden.



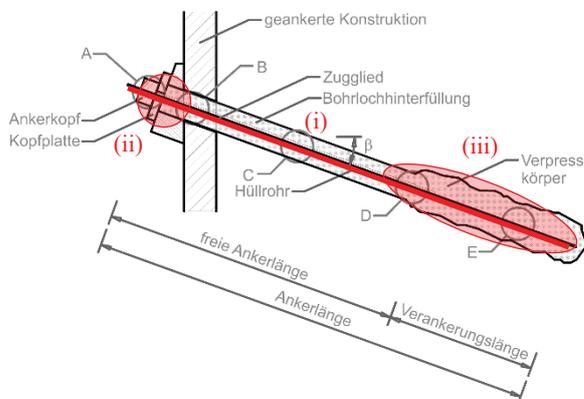
## 1. AUSGANGSSITUATION

Anker und Zugelemente in der Geotechnik werden dazu verwendet, um Zugkräfte (beispielsweise zur Sicherung von Bauwerken) in den Untergrund einzuleiten und Verformungen von Bauwerken zu minimieren. Beispiele für geankerte Konstruktionen sind verformungsarme Baugrubenverbauten (Abb. 1 Links), Stützkonstruktionen (Abb. 1 Mitte) und Baugrubensicherungen (Abb. 1 Rechts). Mit Hilfe derartiger Konstruktionen ist es möglich, „große Zugkräfte in nahezu jeden Baugrund einzuleiten und damit Ingenieurbauwerke zu errichten, die [...] völlig anders ausgefallen wären.“ (Grundbau-Taschenbuch Teil 2 2018)



**Abb. 1:** Anwendungsgebiete für Anker und Zugelemente in der Geotechnik; Links: Baugrubenverbau; Mitte: Stützbauwerk; Rechts: Nagelwand

Zur Erfüllung der an Anker gestellten Aufgaben sind im Allgemeinen drei Komponenten (vgl. Abb. 2 Links) erforderlich. Das Zugglied (i), welches meist aus hochfestem Stahl besteht und die Lastweiterleitung aus dem Ankerkopf in den Verpresskörper übernimmt. Der Ankerkopf (ii), welcher die Lasten aus dem Bauwerk oder aus dem gestützten Hangbereich aufnimmt und an das Zugglied weitergibt. Der Verpresskörper (iii) bildet das Bindeglied zwischen Zugglied und Boden, und leitet damit, die Lasten in tieferliegende (bzw. kompetentere) Bodenschichten ein.



**Abb. 2:** Links: Aufbau eines Ankers (Burtscher et al.); Rechts: Detail Kopfausbildung

Geotechnische Zugelemente können nach mehreren Gesichtspunkten untergliedert werden. Als erstes kann zwischen vorgespannten und schlaffen Zuggliedern unterschieden werden. Während vorgespannte Anker (vgl. Abb. 1 Links & Mitte) aufgrund ihrer Vorspannkraft eine volle Mobilisierung ihrer Tragfähigkeit bei gleichzeitig geringen Verformungen des zu stützenden Bauwerkes erlauben, erfordern schlaffe Zugelemente (vgl. Nagel in Abb. 1 Rechts) eine Bewegung der Konstruktion um den Ankerwiderstand zu mobilisieren. Weiters können die Zugglieder bei Ankern in Stabanker oder Litzenanker untergliedert werden. Bei Gründungen von Schutzbauten wie Steinschlagschutz- oder Lawinenverbauungen (vgl. ONR 24810 2017) kommen hauptsächlich stabförmige Zugelemente in Form eines Mikropfahles zum Einsatz. Unter Berücksichtigung der Untergrundverhältnisse, der Wassersituation und den örtlichen Verhältnissen kommen Bohrungen mit Durchmessern von ca. 80 – 200 mm zur Anwendung. Diese werden meist verrohrt ausgeführt, um eine Stützung des Bodenmaterials und einen gleichmäßig hergestellten Hinterfüllungskörper sicherzustellen. Zur Hinterfüllung bzw. dem Verpressen kommen klassischerweise zementhaltige Materialien zum Einsatz, welche entweder über das Innengestänge (Hohlstab) bzw. durch Injektionsschläuche (Vollstab) eingebracht werden. Auf Schutzbauten wirken sowohl statische als auch dynamische (meist außergewöhnliche) Lasten ein. Während das Eigengewicht der Konstruktion (inkl. Temperatur und Wind) einen sehr geringen Anteil an der Beanspruchung darstellen, wird die Hauptbeanspruchung durch dynamische Lasten (ONR 24810 2017) gebildet. Diese werden zufolge geogener Prozesse, wie Steinschlag, Vermurungen bzw. Lawinen ausgelöst und stellen eine kurzzeitige und meist sehr hohe Belastung sowohl des Zuggliedes als auch des Verpresskörpers dar.

Die Hauptfunktion der Fundierung von Schutzbauten beruht auf den angeführten, geogenen Einwirkungen und soll die Sicherheit, Benützbarkeit und Funktionstüchtigkeit der Infrastruktur bzw. von Siedlungsgebieten sicherstellen. Dementsprechend hohe Qualitätsanforderungen werden an Herstellung, Abnahme und Prüfung derartiger Konstruktionen gestellt. Diese Anforderungen werden in der Regel zusätzlich durch eine abgelegene und schwer zugängliche Lage der Bauwerke beeinflusst.

## **1.1. Problemstellung**

Ausschlaggebend für das vorliegende Projekt war eine Ausschreibung der FFG für die „Optimierung der Bauwerksfundierungen bei Schutzbauten“, welche im Zuge der Verkehrsinfrastrukturforschung 2018 (FFG) ausgeschrieben wurde. In diesem wurde die Ausgangslage wie folgt definiert:

*„Zum Schutz der Infrastruktur vor geogenen Prozessen, wie Steinschlag, Vermurung und Lawinen, werden Verbauungen errichtet, welche vorwiegend mittels Mikropfählen im Untergrund verankert werden. Bei den ÖBB sind diese alpinen, schwer zugänglichen Schutzbauwerke einschließlich deren Fundierungen in Regelwerken beschrieben. Um die hohen Qualitätsanforderungen an Mikropfähle besser in der Praxis umzusetzen, sollen die Fundierungselemente, die Herstellung und die zugehörigen Prüfungen weiter optimiert werden. Dabei ergeben sich Fragestellungen zum qualitätsgesicherten Einbau von unterschiedlichen Pfahlsystemen, zu normgerechten Prüfungsverfahren im steilen bzw. exponierten Gelände und zur Sicherstellung der vorgesehenen Dauerhaftigkeit.“*

## **1.2. Ziele des Forschungsprojektes DAT**

Neben der in Kapitel 1 angeführten Beschreibung der Ausgangslage wurden zudem die Ziele des geplanten Forschungsvorhabens wie folgt definiert:

*„Bei der Herstellung von Mikropfählen können als Tragglied Vollstäbe und Hohlstäbe verwendet werden. Aufgrund der unterschiedlichen Einbauverfahren der jeweiligen Tragglieder, sind der Korrosionsschutz und die Dauerhaftigkeit des gesamten Mikropfahls zu untersuchen. Zudem werden Tragglieder mit verschiedenen Stahlgüten angeboten und verwendet. Es ist zu untersuchen, wie sich unterschiedliche Tragglieder bei dynamischen oder schlagartigen Einwirkungen (Impuls) verhalten. In Bezug auf das Forschungsthema sind auch alternative Fundierungsmöglichkeiten für Schutzbauwerke zu erheben und zu bewerten. Im Forschungsvorhaben sind folgende Fragestellungen zu bearbeiten:*

- *Literaturstudie und Zusammenstellung von Erfahrungen zur Fundierung von Schutzbauwerken, Schäden, Schadensursachen und Analysen*
- *Darstellung des Verhaltens unterschiedlicher Tragglieder (Vollstab, Hohlstab) und Pfahlsysteme hinsichtlich der Dauerhaftigkeit*
- *Verhalten von Traggliedern bei dynamischen und schlagartigen Einwirkungen*
- *Optimierung der Prüfungsverfahren im schwierigen Gelände*
- *Darstellung von Vor- und Nachteilen alternativer Fundierungsmöglichkeiten für Schutzbauwerke*
- *Empfehlungen für die normative Weiterentwicklung“ (FFG)*

Diese wurden im Zuge der Angebotslegung für das Forschungsprojekt in mehrere Arbeitspakete unterteilt, welche die oben angeführten Ziele adressieren. Nachfolgend werden die einzelnen Arbeitspakete bzw. die im Antrag hierzu angeführten Punkte ausgeführt.

### **1.2.1. AP2 – Dauerhaftigkeit geankerter Konstruktionen**

In diesem Arbeitspaket werden zwei Bereiche der Dauerhaftigkeit bei geankerten Konstruktionen betrachtet. Zum einen findet eine Literaturstudie bzw. Datenerhebung zu Korrosionsschäden statt. Zum anderen werden in Form von Laborversuchen Korrosionsschäden an geankerten Konstruktionen und im Speziellen an Stabankersystemen nachgebildet. Die Ergebnisse dieses APs sind in Kapitel 2 dieses Endberichtes angeführt.

### **1.2.2. AP3 – Kunststoffe in der Ankertechnik**

Neben der Betrachtung von Schäden an Zugelementen in AP2 wird in diesem AP des Projektes die Anwendung und Entwicklung neuer Baustoffe bzw. anderer Baumethoden untersucht, um vor allem die Dauerhaftigkeit bei geankerten Konstruktionen zu erhöhen. Diese wurden nicht nur auf Stabanker beschränkt, sondern im Zuge der Mitarbeit bei Normen auch für den Kopfbereich von geankerten Konstruktionen (vgl. Kapitel 4.1 und 4.1.3) durch Versuche und Konzepte untersucht. Ergebnis dieses Paketes ist die Untersuchung von Zugelementen aus Kunststoff, welche in Laborversuchen (vgl. Kapitel 4) und Feldversuchen (vgl. Kapitel 3.3) untersucht wurden.

### **1.2.3. AP4 - Großversuche**

Die in AP3 entwickelten neuen Fundierungslösungen für Schutzbauten werden in diesem AP unter Feldbedingungen eingebaut und sowohl statisch als auch dynamisch geprüft und belastet. Zudem fand eine Freilegung der installierten Mikropfähle statt, um eine Aussage über die Qualität der hergestellten Systeme machen zu können.

### **1.2.4. AP5 - Empfehlungen**

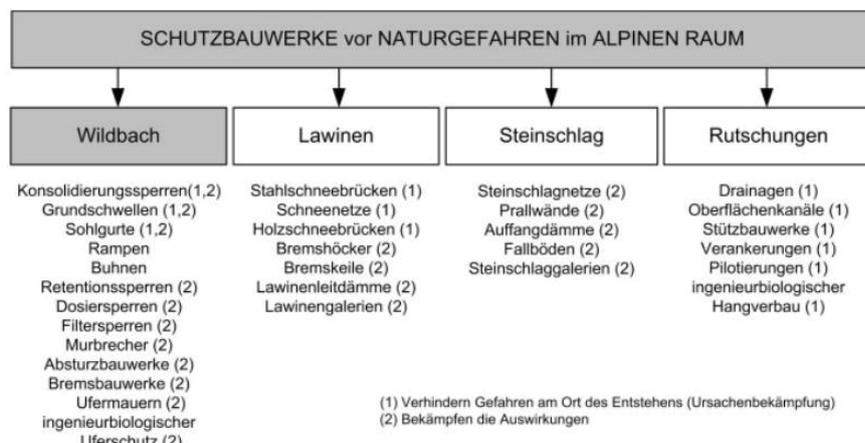
In diesem Arbeitspaket fand die Wissensdistribution der Ergebnisse des Forschungsprojektes statt. So sind hier neben der Präsentation der Forschungsergebnisse auf Tagungen und Konferenzen auch die Mitarbeit bei Normen und anderen Regelwerken vorgenommen worden.

### 1.3. Schutzbauten und Schutzbauwerke

Um einen Überblick zu den in den Arbeitspaketen (siehe Kapitel 1.2) angeführten Zielen, Aufgabenstellungen und Lösungsansätzen zu geben wird in diesem Unterkapitel einleitend auf die Randbedingungen und Anforderungen von Schutzbauten und Schutzbauwerken eingegangen. Generell handelt es sich bei Schutzbauten und Schutzbauwerken um Bauwerke, welche die Auswirkungen von Naturgefahren reduzieren bzw. verringern. Bei Naturgefahren handelt es sich um „Ereignisse in der Natur, die zu einer Bedrohung des Menschen, der Umwelt, von Sachwerten und Einkünften führen können“ (Bergmeister 2009).

#### 1.3.1. Arten bzw. Einschränkungen

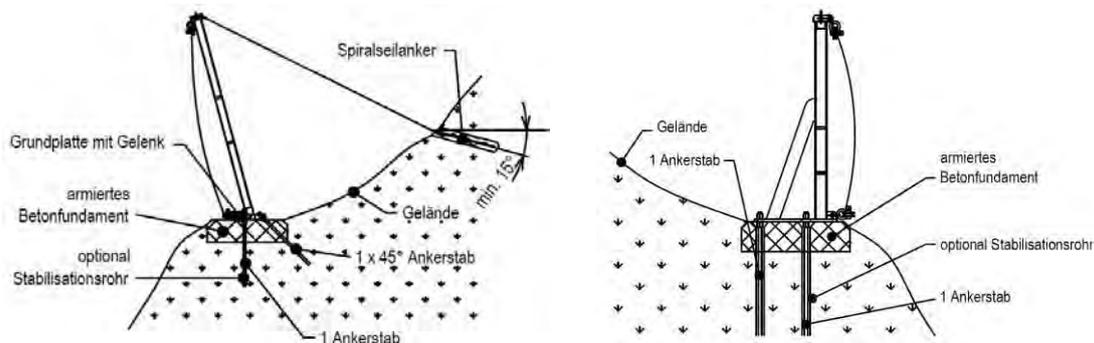
Schutzbauwerke gegen Alpine Naturgefahren können in unterschiedlichen Arten und Formen (vgl. Abb. 3) vorliegen, welche hauptsächlich durch ihre Funktion, ihren Aufstellungsort bzw. ihre Schutzwirkung definiert werden. Eine erste Hauptunterteilung kann hier nach den Arten der Naturgefahren (Wildbach, Lawine, Steinschlag oder Rutschung) vorgenommen werden. Diese Naturgefahren (vgl. Abb. 3) stehen meist in Verbindung mit definierten Versagensmechanismen (z.B. Massenbewegung) bzw. sich aus deren Eintreten ergebenden Schadensbildern (Steinschlag), welche es zu verhindern bzw. einzugrenzen gilt.



**Abb. 3: Übersicht über ausgewählte Schutzbauwerke gegen Alpine Naturgefahren (Bergmeister 2009)**

In dem hier vorliegenden Projekt werden jedoch lediglich „*Bauwerksfundierungen bei Schutzbauten*“ (FFG) untersucht. Daher findet bei den hier betrachteten Schutzbauten eine Einschränkung auf Bauwerke statt, welche eine Fundierung in Form von Mikropfählen benötigen. Beispiele hierfür sind die in Abb. 3 angeführten Steinschlagnetze, welche zur „(2) *Bekämpfung der Auswirkungen*“ (Bergmeister 2009), neben Steinschlagschutzdämmen (vgl. Bergmeister 2009, Mölk und Hofmann) bei einem Risiko bzw. der Gefahr von Steinschlägen angebracht werden.

Steinschlagschutznetze können in unterschiedlichen Ausführungs- und Ausbildungsvarianten vorliegen. Erforderlich ist es hierbei, dass diese Systeme die dynamischen Lasten zufolge eines Sturzereignisses in den Untergrund einleiten können. Hierbei werden im Regelfall vertikale (bzw. leicht geneigte) Stützen im Untergrund gegründet, zwischen welchen ein Netz gespannt wird. Um die erforderliche Spannung des Netzes sicherzustellen bzw. auch um die Lasten auf mehrere Felder (zwischen Stützen) aufteilen zu können, sind zudem parallel geführte Seile zwischen den Stützen vorhanden. Diese erfordern im Regelfall eine seitliche Abspannung, um die auftretenden Lasten in den Untergrund einzuleiten. Um die Verformungen zu reduzieren, bzw. auch um die Beanspruchungen gering zu halten, kann in Abhängigkeit des Systems auch eine bergseitige Abspannung (vgl. Abb. 4 Links) zur Ableitung der Beanspruchungen der Stützen erforderlich werden.



**Abb. 4: Beispiele für Steinschlagschutznetze; Links: Netz mit bergseitiger Abspannung (Geobrugg AG); Rechts: Netz mit Stützen und seitlicher Abspannung (Geobrugg AG)**

Zwei Systeme hierzu sind in Abb. 4 dargestellt. Das linke Bild zeigt eine Steinschlagschutzverbauung, bei welcher eine bergseitige Abspannung des Systems erforderlich ist, um die geforderte Energieklasse zu erreichen. Bei dem rechts dargestellten System wird dies durch eine biegebeanspruchte Stütze und eine seitliche Abspannung erreicht. Beiden Systemen ist gemein, dass für die Errichtung Fundierungen in Form von Zuelementen erforderlich sind, um die auftretenden Lasten in den Untergrund ableiten zu können. Die dabei anfallenden Belastungen werden in Kapitel 1.3.2 näher angeführt.

### 1.3.2. Entwurf und Einwirkung

Da es sich bei den hier betrachteten Schutzbauten im Sekundärschutzmaßnahmen handelt, ist bei der „Ermittlung der charakteristischen Parameter [...] auf den passierenden Block zu legen, [...] da diese hauptausschlaggebend für die Einwirkung auf den Bauwerksstandort sind“ (ONR 24810 2017). Dabei ist eine Untersuchung der Bemessungsblockgröße in Abhängigkeit der Schadensfolgeklasse und der Ereignisfrequenzklasse erforderlich, welche durch eine Modellierung des Steinschlagprozesses die einwirkende Energie und die Sprunghöhe ergibt.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen ist die Auswahl eines Schutzsystems vorzunehmen, welches diese lastbedingten Anforderungen und die Rahmenbedingungen der Dauerhaftigkeit und der Herstellung erfüllt, um die resultierenden Lasten aus der bergseitigen, seitlichen oder talseitigen Abspannung des Systems in den Untergrund abzuleiten.

### **1.3.3. Erhaltung**

Wie die kurze Darstellung in Kapitel 1.3.2 zeigt, wirken auf Schutzbauten größtenteils außergewöhnliche Belastungen wie Steinschläge oder andere hoch- oder niederenergetische Einwirkungen. Diese haben auf Grund ihrer teils zerstörenden Wirkung einen maßgebenden Einfluss auf die Erhaltung derartiger Konstruktionen. Zu Folge von impuls- oder schlagartigen Einwirkungen muss im Regelfall von einem Verlust der Funktion des Bauwerkes ausgegangen werden. Dem zu Folge ist auch die Erhaltung entsprechend angepasst.

Dies ist bei der geplanten Nutzungsdauer derartiger Konstruktionen – mit Abweichungen zu anderen Ingenieurbauwerken – zu erkennen. Vor allem bei den Zugelementen und den Fundierungen dieser Bauwerke stellt die Anforderungen an die geplante Nutzungsdauer, die Erhaltungszyklen, die Prüfung aber auch die Auslegung und den Entwurf einen der maßgebenden Einflüsse dar.

So müssen Mikropfähle nach einem, den Bemessungsfall überschreitenden Ereignis getauscht bzw. erneuert werden, woraus sich die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit ableiten lassen. Da es sich jedoch um eine außergewöhnliche Beanspruchung handelt, ist eine Festlegung eines entsprechenden Zeitraumes ersichtlicher Weise schwierig.

## 2. DAUERHAFTIGKEIT GEANKERTER KONSTRUKTIONEN

Für den Entwurf und die Bemessung einer Konstruktion gibt es grundlegenden Anforderungen. Nach ÖNORM B 1990 ist dies neben einer ausreichenden Tragfähigkeit und Gebrauchstauglichkeit auch die Dauerhaftigkeit. Diese ist neben den beiden anderen auch in der Zuverlässigkeit einer Konstruktion als „*Fähigkeit eines Tragwerks oder Bauteils die festgelegten Anforderungen innerhalb der geplanten Nutzungszeit zu erfüllen*“ (ÖNORM B 1990) enthalten und daher maßgebend mit dieser verbunden. Um dies sicherzustellen, sind einige Aspekte zu beachten, um ein angemessen dauerhaftes Tragwerk garantieren zu können. Diese sind nach ÖNORM EN 1990 (ÖNORM B 1990 Kapitel 2.4) wie folgt definiert:

- die vorgesehene oder vorhersehbare zukünftige Nutzung des Tragwerks;
- die geforderten Entwurfskriterien;
- die erwarteten Umweltbedingungen;
- die Zusammensetzung, Eigenschaften und Verhalten der Baustoffe und Bauprodukte;
- die Eigenschaften des Baugrundes;
- die Wahl des Tragsystems;
- die Gestaltung der Bauteile und Anschlüsse;
- die Qualität der Bauausführung und der Überwachungsaufwand;
- besondere Schutzmaßnahmen;
- die geplante Instandhaltung während der geplanten Nutzungszeit.

Wie aus dieser Auflistung zu erkennen, sind hier nicht nur aktuelle Einwirkung, sondern auch zukünftige Nutzungen zu betrachten, die Umweltbedingungen mit einzubeziehen und die Eigenschaften des Baugrundes zu berücksichtigen. Zudem fließt auch die Wahl des Tragsystems sowie die Qualität der Bauausführung mit ein. Bei Schutzbauwerken sind alle diese Aspekte zutreffend und benötigen auf Grund der von diesen Bauwerken ausgehende Gefahr bzw. deren Erfordernis einer uneingeschränkten Funktionstüchtigkeit größte Aufmerksamkeit.

Nachfolgend wird eine genauere Definition der Dauerhaftigkeit mit Fokus auf die Anker- und Zugelementtechnik vorgenommen und es werden einige Schäden an Bestandsbauwerken und Zugelementen aufgezeigt. Darauf aufbauend wird kurz auf den Einfluss einer Korrosionsschädigung auf die Tragfähigkeit eingegangen und es werden vorhandene und verwendete Korrosionsschutzsysteme – allgemein und mit Schwerpunkt Zugelemente – aufgearbeitet. Abschließend werden Versuche, welche im Zusammenhang mit diesem Projekt umgesetzt wurden, vorgestellt.

## 2.1. Definition Dauerhaftigkeit

Die Dauerhaftigkeit einer Konstruktion am Beispiel einer Verankerung ist jene „Anforderung an das Verankerungselement, dessen Ausbildung und Ausführung sowie an die bauliche Überwachung an der zu verankernden Konstruktion, um über die geplante Nutzungsdauer des Gesamtbauwerkes die Tragfähigkeit und die Gebrauchseigenschaften sicherzustellen“ (ÖNORM B 4456). Demzufolge ist die Dauerhaftigkeit gemeinsam mit der Tragfähigkeit und der Gebrauchstauglichkeit jene Eigenschaft eines Bauteiles, welche die Zuverlässigkeit einer Konstruktion maßgeblich beeinflusst.

Daher werden nachfolgend im Kapitel kurz Korrosion und Korrosionsschäden bei geankerten Konstruktionen dargestellt, ehe abschließend auf die unterschiedlichen Korrosionsschutzsysteme eingegangen wird.

## 2.2. Schäden an Bestandsbauwerken

Eines der umfassendsten Schadensbilder bei geankerten Konstruktionen sind Korrosionsschäden. Zum einen ist dies systembedingt durch die Lage der Konstruktionen gegeben und zum anderen auch durch Problemstellungen bzw. Schwierigkeiten aus der Herstellung vor Ort gegeben. Daher wird nachfolgend ein Überblick zur Korrosion von metallischen Bauteilen – Fokus auf Zugelemente - gegeben.

### 2.2.1. Grundlagen zur Korrosion

Das im Bauwesen und anderen Branchen eingesetzte Metall ( $Fe$  – siehe Abb. 5) ist ein Baustoff, welcher aus in der Umwelt vorkommenden Erzen gewonnen wird. Für die Aufbereitung der Erze zum Endprodukt Metall ist ein hoher Energieaufwand nötig. Das dadurch gewonnene Metall befindet sich anschließend in einem thermodynamisch instabilen Zustand und bestrebt mittels Energieabnahme wieder in einen stabilen Zustand zu gelangen. Somit kann eine Metall-Korrosion als Reaktion des Metalls mit seiner Umgebung zum Zweck jener Energieabnahme beschrieben werden. Dabei entsteht eine messbare Veränderung von Metall, welche die Funktion eines solchen, oder eben die Funktion eines Bauteiles in welchem das Metall ein Bestandteil ist, beeinträchtigen kann. Betrachtet man das entstehende Korrosionsprodukt ( $Fe(OH)_2$  – umgangssprachlich als Rost bezeichnet siehe Abb. 5), so entspricht es in vielerlei Hinsicht wieder den natürlich vorkommenden Erzen. Eben jenes Bestreben, die zugeführte Energie wieder abzugeben, um in den ursprünglichen Zustand des Metalls, also das Erz, zurückzukehren, wird meist durch eine elektrochemische Reaktion umgesetzt. Nur vereinzelt kann dafür auch eine rein chemische oder metallphysikalische Reaktion der Grund sein.

Als Auslöser einer solchen elektrochemischen Reaktion können verschiedene Medien, wie z.B. Gase, Salzschmelzen oder wässrige Lösungen ( $H_2O$  – siehe Abb. 5) genannt werden, wobei letztere überwiegender Auslöser für den Korrosionsprozess im Bauwesen sind. Vereinfacht dargestellt bedeutet diese elektrochemische Reaktion, dass an der Phasengrenze zwischen Elektrolyten und Metall einerseits ein Stoffaustausch (in Form von Ionen), andererseits ein Ladungsaustausch (in Form von Elektronen) stattfindet. Entscheidend ist, dass für solche elektrochemischen Reaktionen keine großen Mengen der wässrigen Lösung benötigt werden. Es genügt schon ein dünner Feuchtfilm, oder die Anwesenheit hygroskopischer Salze, welche auch aus einer relativ trockenen Umgebung eine gewisse Feuchtigkeit aufnehmen können. Für eine elektrochemische Reaktion muss diese Feuchtigkeit ionenleitend sein und wird als Elektrolyt bezeichnet. Eine, für den materialzerstörenden Prozess erforderliche Teilreaktion verlangt dabei das Vorhandensein eines Oxidationsmittels. Für die im Bauwesen üblichen Korrosionsfälle, wie Korrosion mit anderen Baustoffen, in Böden oder an der Atmosphäre, ist das dafür benötigte Oxidationsmittel Sauerstoff ( $O_2$  – siehe Abb. 5), welcher im Elektrolyt enthalten ist (vgl. Nürnberger 1995a, S. 11 ff; Rebhan 2019, S. 40–43). Für explizitere Erläuterungen zu den unterschiedlichen Korrosionsprozessen wird auf die eben genannte Literatur verwiesen.

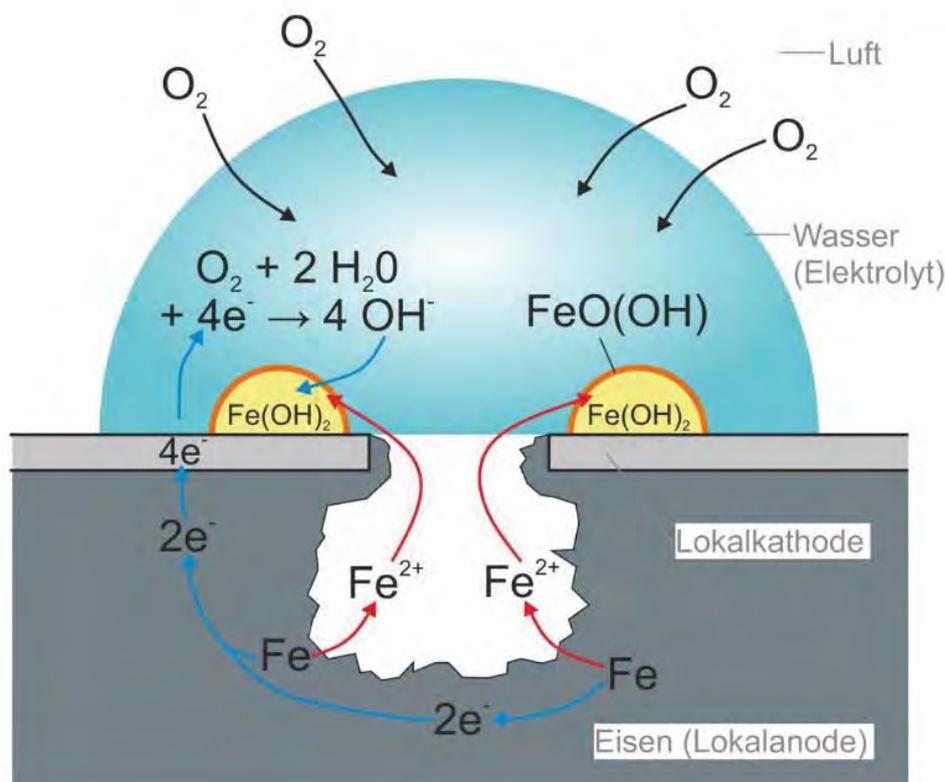


Abb. 5: Schematische Übersicht zur Sauerstoffkorrosion (Burtscher et al. 2017b)

Die Folge einer derartigen Korrosionsreaktion ist das Entstehen von Korrosionsprodukten, bzw. die Umwandlung des Metalls in Korrosionsprodukte, was in weiterer Folge einen Materialabtrag sowie Korrosionsrisse bedeuten kann. Diese Korrosionserscheinungen, welche das Metall nachteilig verändern, unterteilt Nürnberger (1995a) grob in lokale und gleichmäßige Korrosion sowie in rissartige Korrosionsprozesse. Hierbei ist unter gleichmäßiger Korrosion die Flächenkorrosion und unter lokaler Korrosion eine Mulden- oder Lochfraßkorrosion, wie in Abb. 6 dargestellt, zu verstehen. Rissartige Korrosion tritt meist unter mechanischer Beanspruchung, also in Form von Spannungsrisskorrosion, auf. *„In der Regel kann davon ausgegangen werden, dass eine gleichmäßig abtragende Korrosion weniger kritisch zu beurteilen ist als eine ungleichmäßige (Muldenkorrosion, Lochkorrosion), die als Folge von Korrosionselementen [...] stattfindet. Am schädlichsten sind Korrosionsrisse, die bei ausschließlich ruhend beanspruchten Konstruktionen meist die Folge von Spannungsrisskorrosion sind und bei nicht vorwiegend ruhend beanspruchten Bauteilen auch als Folge von Schwingungsrisskorrosion auftreten können.“* (Nürnberger 1995a, S. 15)

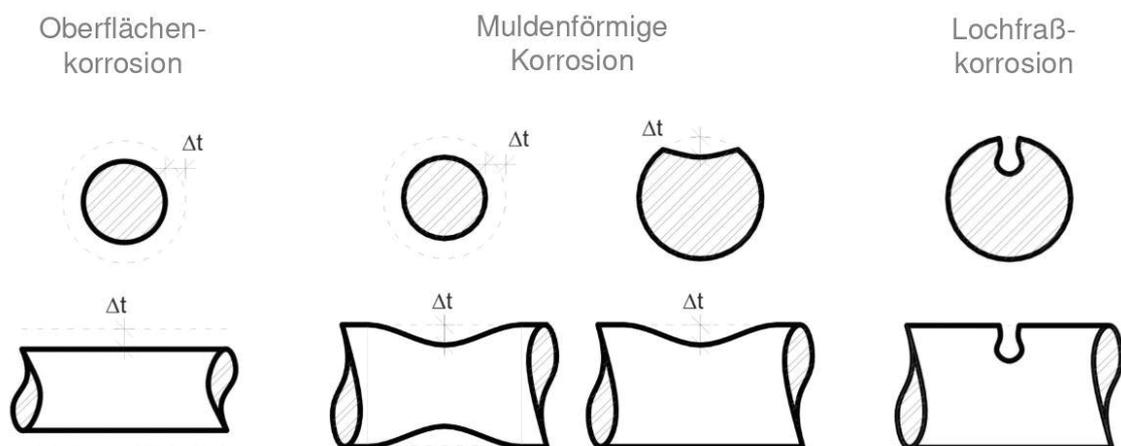


Abb. 6: Schematische Darstellung von Flächen-, Mulden- und Lochfraßkorrosion (Burtscher et al. 2017b)

### 2.2.2. Korrosion im Boden

Wird die Korrosionsthematik hinsichtlich des Zusammenspiels mit Böden betrachtet, ist das Korrosionsverhalten sehr breit gefächert. In Abhängigkeit vieler unterschiedlicher Parameter im Boden können dessen korrosionsrelevante Eigenschaften lokal sehr stark abweichen. Daher kann bei bautechnischen Konstruktionen, welche Kontakt mit dem Untergrund (Boden) aufweisen, auch bei der Annahme eines nicht aggressiven Bodens, eine Korrosionsproblematik nicht mit Sicherheit ausgeschlossen werden. Einige wichtige korrosionsbeeinflussende Parameter im Zusammenhang mit Korrosion im Boden werden nachfolgend kurz erläutert (vgl. Nürnberger 1995a, S. 250 ff):

## **Feuchtigkeit und Sauerstoff**

*„Wie bei der atmosphärischen Korrosion und bei Korrosion in Wasser, ist auch bei der Korrosion in Böden die gleichzeitige Anwesenheit von Wasser und Sauerstoff notwendig. In trockenen Böden liegt das für die elektrolytische Leitfähigkeit erforderliche Wasser und in wassergesättigten Böden der für die Depolarisation erforderliche Sauerstoff nicht vor. [...] In der Nähe eines sich ändernden Grundwasserspiegels kann die Metallkorrosion wegen wechselnder Durchfeuchtung und Austrocknung jedoch erheblich sein.“* (Nürnberger 1995a, S. 253–254). Des Weiteren merkt Nürnberger an, dass der Sauerstoffgehalt stark von Bodeneigenschaften wie Porosität, Wassergehalt, Tiefe u.a. abhängig ist. Hoch bindige Böden haben meist die Eigenschaft sehr undurchlässig zu sein, was auch die Bewegungsmöglichkeit von Wasser und Luft begrenzen kann.

## **Neutralsalze**

*„Böden enthalten i. allg. wenig leichtlösliche Salze wie z. B. Alkalisalze und Chloride [...], da diese im Wasserkreislauf schon weitgehend herausgelöst wurden. Chloride können jedoch über Streusalze und auch an der Meeresküste in nicht unerheblichen Mengen in Böden gelangen. [...] Gelöste Chlorid- und Sulfatsalze erhöhen merklich die Korrosion. Die Korrosionsverstärkung beruht in erster Linie auf der Verbesserung der Bodenleitfähigkeit“* (Nürnberger 1995a, S. 254). Dementgegen ist jedoch auch bekannt, dass neutralisierende Bodenbestandteile wie Kalk, die Anwesenheit von Säuren abschwächen.

## **pH-Wert**

*„Der übliche pH-Wert der Böden von 5 bis 9 ist kein die Korrosionsgeschwindigkeit beeinflussender Faktor. Nur in stark sauren Böden ist mit einer erhöhten Korrosion zu rechnen. [...] Sandböden weisen i. allg. eine niedrige Gesamtsäuremenge auf, Tonböden dagegen häufig eine höhere. In organischen Böden bilden sich bei der Fäulnis von Pflanzenresten eine Reihe organischer Säuren, welche die Gesamtsäuremenge erhöhen und den pH-Wert bis auf 4,5 herabsetzen. Hierdurch kann ein direktes Inlösungsgehen von Eisen und Zink bewirkt werden. Hohe Gehalte an diesen Säuren sind allerdings nur in Moor-, Wald- und Ackerböden zu erwarten.“* (Nürnberger 1995a, S. 255). Der pH-Wert kann mittels unterschiedlichster Methoden entweder elektrometrisch oder optisch bestimmt werden. Der Einsatz verschiedener Messeinrichtungen ist stark davon abhängig, ob eine Labormessung oder eine Messung vor Ort stattfindet, sowie ob kontinuierlich oder stichprobenweise gemessen wird. Kontinuierliche Messungen, z.B. mittels Sonden, können nur vor Ort durchgeführt werden (vgl. Degner 2009, S. 17–18).

## Spezifischer Bodenwiderstand

„Da in an Wasser ungesättigten Böden meist im ausreichenden Maße Sauerstoff für den kathodischen Teilprozess der Bodenkorrosion zur Verfügung steht, bestimmt die Bodenleitfähigkeit bzw. deren reziproker Wert, der spezifische Bodenwiderstand, die Korrosionsgeschwindigkeit.“ (Nürnberger 1995a, S. 256)

Vereinfacht dargestellt, beschreibt die Zahl der Bodenleitfähigkeit, wie gut ein zylindrischer Bodenkörper, mit einer Länge von einem Meter und dem Volumen von einem Kubikmeter, leitet. Daraus resultiert im Umkehrschluss der Bodenwiderstand, welcher den theoretischen elektrischen Widerstand dieses Bodenkörpers darstellt. Je höher die Bodenleitfähigkeit, desto geringer also der Bodenwiderstand. Die Größe des Bodenwiderstands ist jedoch, wie in Abb. 7, dargestellt von vielen Faktoren, wie z.B. Grundwasser, Temperatur, Bodenart und Tiefe, abhängig.

Mit Hilfe von geoelektrischen Messmethoden wie beispielsweise dem Wenner-Methode, oder auch dem Schlumberger-Verfahren, kann ein spezifischer Bodenwiderstand, bzw. die Bodenleitfähigkeit, gemessen werden. Grundlegend wird bei diesen Verfahren mit Hilfe von Erdspießen (Hilfserder) Prüfstrom in den Boden eingespeist und an anderen Stellen mittels Sonden gemessen. Ebenso kann über eine dauerhaft installierte Messschleife ein konstantes Monitoring des spezifischen Bodenwiderstandes erfolgen, da dieser starke Schwankungen aufweisen kann (siehe Abb. 7). Jedoch ist hierbei anzumerken, dass diese Messverfahren im Normalfall nicht für Bodenparameterbestimmungen im Zusammenhang mit der Korrosionsproblematik durchgeführt werden, sondern in der Regel eine Messmethode für die Erdung von Elektroinstallationen, beispielsweise im Wohnungs- oder auch im Industriebau, darstellen (vgl. Chauvin Arnoux Group 2010; Hans-Dieter Schüssele 2007).

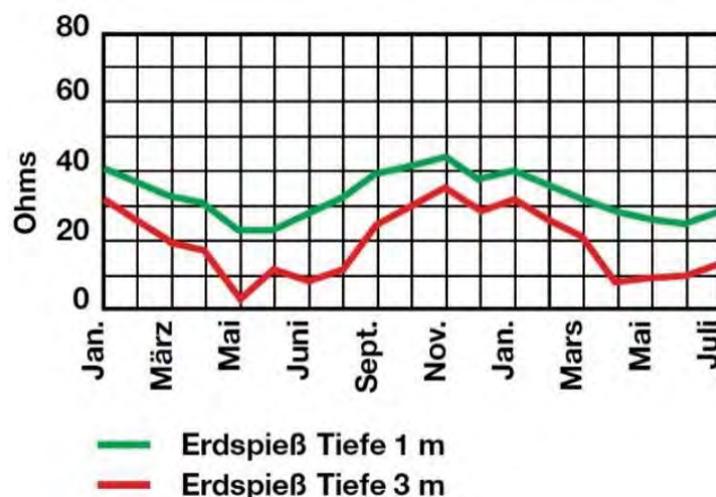


Abb. 7: Beispiel für Schwankungen des spez. Bodenwiderstands abhängig von der Jahreszeit und Tiefe (Chauvin Arnoux Group 2010, S. 3)

## Streustrom

„Unter Streustrom versteht man den aus einem stromführenden Leiter elektrischer Anlagen in das umgebende Medium (meist ein Erdboden) austretenden Strom. Dieser kehrt an einer anderen Stelle wieder aus dem Erdboden in die elektrischen Anlagen zurück, wobei bevorzugt im Boden vorhandene ausgedehnte elektrische Leiter benutzt werden. Gleichströme können bei erdverlegten Strukturen wie stählernen oder gusseisernen Rohrleitungen [...] oder Stahlbetonbauteilen [...] beim Austritt aus diesen Leitern in das Erdreich lokal die Korrosion verstärken.“ (Nürnberger 1995a, S. 65) Vor allem im Nahebereich zu Bahnanlagen oder erdverlegten Niederspannungsleitungen kann die Wirkung des Streustromes aus diesen Anlagen eine erhebliche Auswirkung auf den Korrosionsfortschritt bzw. das Eintreten von Korrosion haben.

Wie zu Beginn dieses Kapitels bereits angeführt, gibt es eine Vielzahl anderer Faktoren, welche die Korrosionsgeschwindigkeit, Intensität oder die Korrosionsart (wie z.B. Flächen-, Mulden- oder Lochkorrosion) abhängig von Bodenzusammensetzung beeinflussen. Detaillierte Beschreibungen zu diesen Thematiken werden beispielsweise von Nürnberger (1995a) gegeben.

### 2.2.3. Korrosion bei Mikropfählen

Korrosion bei Mikropfählen tritt vor allem an nicht ausreichend korrosionsgeschützten Bereichen des Traggliedes, an Verbindungsstellen (z.B. Muffenstoß) sowie dem Pfahlkopfbereich auf. Die relevanten Korrosionsvorgänge sind elektrochemische Reaktionen bei welchen sich sogenannte Anoden und Kathoden ausbilden. Es treten meist zwei Arten von Korrosionsvorgängen auf:

- Örtlich begrenzte Korrosion auch unter Einwirkung von Chloriden;
- Korrosion durch Depassivierung des Stahlzuggliedes.

Nachfolgend wird kurz auf die Arten der Korrosion eingegangen und im Anschluss hieran werden unterschiedliche Arten des Korrosionsschutzes näher erläutert. Die Korrosion in Böden und wichtige korrosionsbeeinflussende Parameter sind zudem in (Nürnberger 1995) und (Cornelius Dold 2021) vertiefter ausgeführt.

### Korrosion im Allgemeinen

Korrosion ist die Reaktion eines Metalls mit seinem Umgebungsmedium. Das Umgebungsmedium enthält das eigentliche Angriffsmittel. Die Reaktion des Metalls mit dem Umgebungsmedium führt zu einer Umwandlung des Werkstoffes in ein Korrosionsprodukt. Das entstehende Korrosionsprodukt kann löslich, haftend oder locker sein. Korrosion wird nach ÖNORM EN ISO 12944-1 wie folgend definiert: „*physikochemische Wechselwirkung*

*zwischen einem Metall und seiner Umgebung, die zu einer Veränderung der Eigenschaften des Metalls führt und häufig zu erheblichen Beeinträchtigungen der Funktion des Metalles, der Umgebung oder des technischen Systems, von dem diese einen Teil bilden, führen kann“.*

Korrosion kann nach Weißbach et. al. (2015) zu folgenden Auswirkungen führen:

- Querschnittsschwächung und daraus resultierende größere Spannungen und zunächst elastische, später plastische Dehnungen. Der Werkstoffabtrag betrifft vor allem die Randschichten des Werkstoffes. Dies vermindert den Querschnitt sowie daraus folgend die Flächenmomente des Bauteiles;
- Verletzung der Oberfläche und dadurch resultierende Kerbwirkung mit Abfall der Dauerfestigkeit bei dynamisch beanspruchten Bauteilen;
- Vergrößerung des Volumens und dadurch resultierendes Blockieren von beweglichen Bauteilen, Sprengen enger Spalten, „Festrostern“ von Verbindungen und Aufwölben von Punktschweißnähten oder Lackschichten.

Gemäß der obenstehenden Definition liegen Korrosionsschäden erst dann vor, wenn die Funktionalität des Bauteiles beeinträchtigt ist. Korrosion entsteht durch chemisch-physikalische Reaktionen und kann in drei Gruppen eingeteilt werden:

- Chemische Korrosion;
- Metallphysikalische Korrosion;
- Elektrochemische Korrosion,

wobei die elektrochemische Korrosion die am häufigsten auftretende Korrosionsart ist.

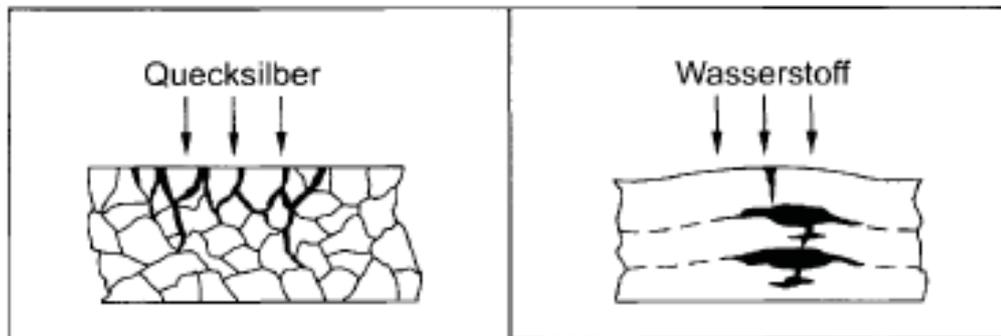
### **Chemische Korrosion**

Die chemische Korrosion ist selten und findet zwischen Flüssigkeiten oder oxidierenden Gasen und Metallen statt. Es bildet sich eine dem Metall ähnliche Deckschicht aus. Die Metalloberfläche wirkt als Anode und die Grenzfläche zwischen Deckschicht und Gas- oder Flüssigkeitsphase als Kathode. Es findet kein Elektronenfluss wie bei der elektrochemischen Korrosion statt. Die häufigsten Korrosionsmittel sind Säuren, Laugen, trockene Gase und Sauerstoff. Die Korrosionsprodukte lagern sich schichtweise auf dem Grundmetall ab, sind diffusionsoffen und können dadurch weiterwachsen.

### **Metallphysikalische Korrosion**

Die metallphysikalische Korrosion findet mit ausschließlich physikalischen Phänomenen statt. Die Korrosionsmittel bei dieser Form der Korrosion sind metallische Schmelzen oder Gase wie Wasserstoff. Bei metallischen Schmelzen versteht man das Eindiffundieren von Metallen in Korngrenzen, wenn sie in Kontakt mit leicht diffundierbaren Metallen oder flüssigem Quecksilber kommen. Die wasserstoffinduzierte Rissbildung und die Absorption von

Wasserstoff gehören ebenso zur metallphysikalischen Korrosion. Abb. 8 zeigt eine schematische Darstellung für metallphysikalisches Korrodieren.



**Abb. 8: Metallphysikalische Korrosion durch Metalle und Wasserstoff (Tostmann 2005)**

Die wasserstoffinduzierte Rissbildung kann durch verschiedene Medien verursacht werden. Dabei reagieren Metalle mit Medien, welche Wasserstoff in Form von gasförmigen Molekülen, Protonen oder Atomen enthalten, und den Werkstoff auf unterschiedliche Weisen schädigen. Die Korrosionsschäden können im Inneren wie auch im Äußeren des Werkstoffes auftreten. In nachfolgender Abb. 9 sind Ursachen, Mechanismen und Schäden durch wasserstoffinduzierte Korrosion abgebildet.

Reaktionen bei wasserstoffinduzierter Korrosion				
<b>Wasserstoffquelle</b>	Aus Gasphasen als H <sub>2</sub> (p <sub>H<sub>2</sub></sub> )	Elektrolytische Reaktion: 2 H <sup>+</sup> + 2e <sup>-</sup> = 2 H <sub>ad</sub>		
<b>Bedingungen für Absorption</b>	Drücke >700 bar Kerben kritische Dehnung	R <sub>m</sub> >1200 N/mm <sup>2</sup> Kerben kritische Dehnung Promotoren H <sub>2</sub> S, S, CO, usw.		
Mechanismus	Belastung	Vorgang	Schaden	
Physikalisch	Ohne äußere Spannung	Werkstofftrennungen >200°C	Blasen	
		Beizblasen		
	H-Rißkorrosion (HIC)	innere Längsrisse		
	Mit äußerer Spannung	H-Spannungsrißkorrosion (HSCC)	Risse senkrecht zur Spannung	
Chemisch	Ohne äußere Spannung	äußere Hydridbildung	Abtrag	
		innere Hydridbildung	Risse	
		Druckwasserstoffkorrosion >200°C (Reaktion mit Carbiden)	Risse	

**Abb. 9: Wasserstoffinduzierte Korrosion (Tostmann 2005)**

## Elektrochemische Korrosion

Bei der elektrochemischen Korrosion sind elektrische Ströme beteiligt, welche bei Kontakt von Metallen mit Elektrolyten entstehen. In den meisten Fällen ist dieser Elektrolyt ionisiertes Wasser. Zu den Elektrolyten zählen:

- Salzlösungen, Laugen, Säuren;
- Salzschnmelzen;
- Ionisierte Luft, beispielsweise durch elektrische Felder bei Blitzen;
- Gase mit hohen Temperaturen und hohem Unterdruck;
- Oxidkeramik bei Brennstoffzellen;
- Spezielle Polymere.

In Kombination mit Metallen ergeben diese galvanische Elemente. Bei galvanischen Elementen wird durch Oxidation eines unedlen Metalls elektrische Energie gewonnen. Das unedle Metall geht dabei in Form von Ionen in Lösung. Die Korrosionsgeschwindigkeit wird dabei durch die elektrischen Parameter Potenzial, Stromdichte und Widerstand bestimmt. In Abb. 10 ist die Galvanische Spannungsreihe abgebildet.

Metall	Normalpotential/V	Charakter
Gold, Au	1,42	Edel ↑
Silber, Ag	0,80	
Kupfer, Cu	0,34	
<b>Wasserstoff, H</b>	<b>0</b>	
Blei, Pb	-0,13	↓ Unedel
Zinn, Sn	-0,14	
Eisen, Fe (2 <sup>+</sup> )	-0,44	
Chrom, Cr (3 <sup>+</sup> )	-0,74	
Zink, Zn	-0,76	
Aluminium, Al	-1,66	
Magnesium, Mg	-2,38	

**Abb. 10: Galvanische Spannungsreihe (Tostmann 2005)**

Die galvanische Spannungsreihe stellt den Potenzialunterschied zwischen verschiedenen Metallen dar. Die Metalle sind dabei nach ihrem Ladungsunterschied gegenüber Wasserstoff geordnet. „Wegen der Häufigkeit von Kontakten vieler Bauteile mit Wasser (Regenwasser, Brauchwasser usw.) ist das die wichtigste Reaktionsart.“ (Weißbach et al. 2015) Weitere Ausführungen zu dieser Korrosionsform sind in Tostmann (2005), Nürnberger (1995) und Dold (2021) zu finden.

#### 2.2.4. Korrosionserscheinungsformen

Korrosion kann in einer großen Bandbreite an Erscheinungsformen an Bauteilen oder Bauwerken auftreten. Unter Erscheinungsform wird die Veränderung des Korrosionssystems verstanden, dabei entstehen verschiedene Korrosionsprodukte, wie beispielsweise Rost, welche sowohl in fester, flüssiger, aber auch gasförmiger Form auftreten können.

##### **Gleichmäßige Flächenkorrosion**

Bei der gleichmäßigen Flächenkorrosion wird ein etwa ebener, gleichmäßiger Abtrag bei größeren Flächen der Metalloberfläche beobachtet. Eine gleichmäßige Flächenkorrosion ist selten zu beobachten, da einzelne Flächenbereiche meist unterschiedliche Abtragungsgeschwindigkeiten in Folge von verschiedenen Deckschichten und Inhomogenität des Werkstoffes aufweisen. Durch die unterschiedlichen Korrosionsgeschwindigkeiten bilden sich meist mulden- oder narbenförmige Abtragungen aus. Der Begriff gleichmäßige Flächenkorrosion wird meist zur Abgrenzung von örtlich begrenzten Korrosionsformen verwendet. Aus technischer Sicht ist diese Art der Korrosion unproblematisch, da die Korrosionsrate gering ist und relativ genau ermittelt werden kann.

Die atmosphärische Korrosion ist ein Sonderfall der gleichmäßigen Flächenkorrosion. Da alle Bauteile dieser Korrosionsart ausgesetzt sind, ist sie die häufigste. *„Man schätzt, dass die Kosten für Schutzmaßnahmen allein für diesen Bereich etwa die Hälfte der Gesamtkosten für den präventiven Korrosionsschutz betragen.“* (Tostmann 2005) Die atmosphärische Korrosion ist eine Wechselwirkung zwischen metallischen Werkstoffen und der klimatischen Beanspruchung. Die klimatischen Beanspruchungen setzen sich dabei aus: Niederschlagsmenge, Temperatur, Wind sowie Staub und Schmutzanteile in der Luft zusammen. Kondensatbildung zufolge der Taupunktunterschreitung kann zu einer verstärkten Korrosion führen. Weitere Informationen zur gleichmäßigen Flächenkorrosion sind in (Tostmann 2005) zu finden.

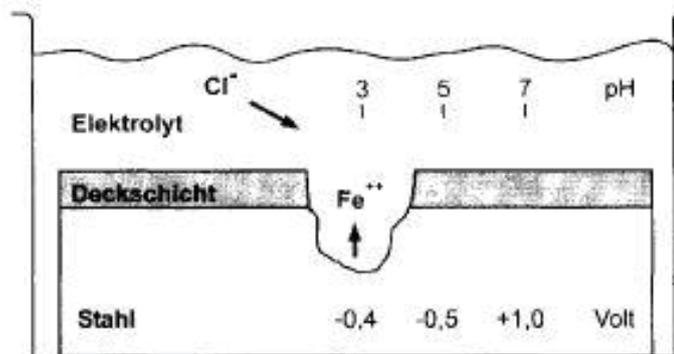
##### **Örtliche Korrosion**

Konzentrationsunterschiede des korrosiven Mediums erzeugen eine Potenzialdifferenz auf der Werkstoffoberfläche, wodurch charakteristische Korrosionsformen entstehen. Beispiele für diese Korrosionsform sind Mulden-, Lochfraß- und Spaltkorrosion.

##### **Muldenkorrosion**

Muldenfraß kann als örtlich begrenzter Abtrag auf einer sonst nicht oder kaum angegriffenen Oberfläche definiert werden. Nach Definition ist die Tiefe der Mulde geringer als ihr Durchmesser. Muldenfraßkorrosion unterscheidet sich von der Lochkorrosion in der Tiefe der auftretenden Löcher. Muldenkorrosion tritt meist bei porösen Oberflächenbelägen auf. *„Die*

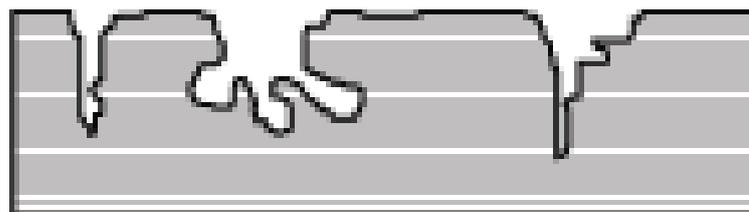
Bereiche mit überwiegend anodischen Strömen führen zu stärker lokalisiertem Abtrag bis zum Muldenfraß. Der örtlich begrenzte Korrosionsabtrag beruht darauf, daß der anodische Strom der Metallauflösung örtlich begrenzt und sehr hoch ist und der kathodische Strom sich über eine größere Fläche verteilt. Dieser Zustand kann sich dadurch einstellen, daß sich ein sogenanntes Belüftungselement ausbildet, wobei eine begrenzte anodische Fläche einer wesentlich größeren kathodischen Fläche mit guten Sauerstoffzutritt gegenüber steht.“ (Tostmann 2005) In Abb. 10 ist der schematische Ablauf einer Muldenkorrosion abgebildet.



**Abb. 11:** Schematische Darstellung der Muldenkorrosion (Tostmann 2005)

### Lochkorrosion

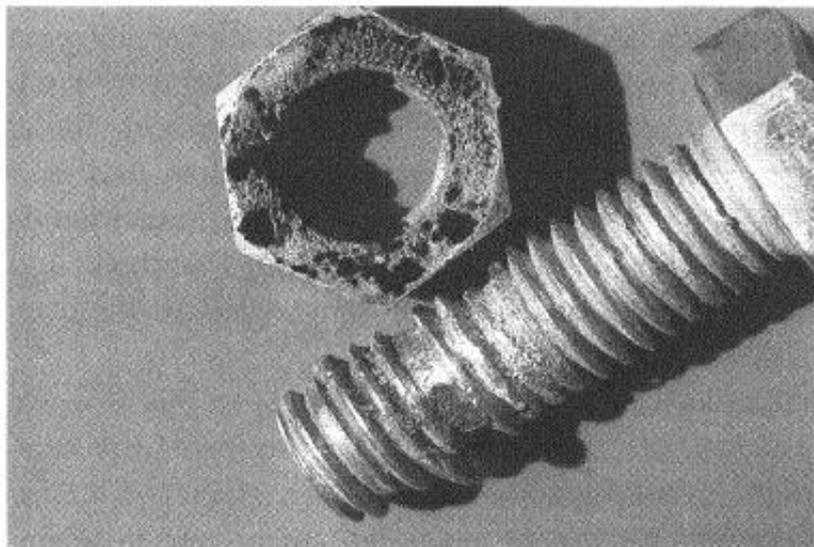
Die Lochkorrosion bildet meist kraterförmige Aushöhlungen sowie nadelstichartige Vertiefungen aus. Im Endzustand der Lochkorrosion steht die Durchlöcherung des Werkstoffes. Bei der Lochkorrosion sind Stör- oder Fehlstellen in der Passivschicht Voraussetzung. Diese Stellen können durch die Herstellung oder durch mechanische Bearbeitung entstehen. Adsorption oder der Einbau von Ionen in die Passivschicht aktiviert diese und ermöglicht so eine Auflösung des Metalls. Bei Aluminium und Stahl führen Chloride aufgrund ihrer hohen Adsorptionswirkung zu einem Durchbruch der Passivschicht und ermöglichen so Lochkorrosion. Lochfraß findet man vor allem in ruhenden Lösungen, da in strömenden Lösungen sich nur schwer stationäre Zustände einstellen können. Abb. 12 zeigt ein schematisches Beispiel für die Lochfraßkorrosion.



**Abb. 12:** Darstellung der Lochfraßkorrosion (Briehl 2008)

## Spaltkorrosion

Spaltkorrosion ist ein Korrosionsprozess, welcher in Spalten von einem oder mehreren metallischen Werkstücken stattfindet. Die Korrosion wird durch behinderte Diffusionsvorgänge induziert, wobei ein sogenanntes Belüftungselement (oder Konzentrationselement) entsteht. Die belüftete Seite des Spaltes bildet die Kathode, dort wird das Elektrolyt schwach alkalisch und der Sauerstoff reduziert sich. Durch die Sauerstoffreduktion findet an der Kathode Sauerstoffkorrosion statt. Im Inneren des Spalts ist die Sauerstoffzufuhr erschwert, wodurch sich die Anode ausbildet. An der Anode erfolgt die Oxidation des metallischen Werkstoffes. In Abb. 13 ist ein Beispiel für die Spaltkorrosion dargestellt.



**Abb. 13:** Darstellung der Spaltkorrosion (Tostmann 2005)

Weitere Informationen zur Spaltkorrosion sind in (Tostmann 2005) zu finden.

## Korrosion bei mechanischer Beanspruchung

Die Definition von Korrosionsarten unterscheidet zwischen Korrosion ohne und mit mechanischer Beanspruchung. Die bisher behandelten Korrosionserscheinungsformen können ohne und mit mechanischer Beanspruchung auftreten. In Abb. 14 ist ein Überblick der mechanischen und stofflichen Beanspruchung sowie der daraus resultierenden Schäden abgebildet. Die mechanische Beanspruchung ist nicht als zusätzliche Beanspruchung zu sehen, sondern die Korrosion entsteht durch das Zusammenwirken von Werkstoff, Medien und der mechanischen Beanspruchung. Dadurch wird die Beanspruchung zu einem Parameter des Korrosionssystems. Das bedeutet, dass Korrosionsschäden nur auftreten, wenn die kritische mechanische Beanspruchung überschritten wird. Für die hier angeführte Form der Korrosion reicht die alleinige korrosive Beanspruchung nicht aus, um Korrosionsschäden zu bewirken.

<b>Mechanische und chemische Einflüsse auf die Korrosion</b>				
<b>Mechanische Beanspruchung</b>		<b>Schaden</b>	<b>Chemische Beanspruchung</b>	<b>Korrosionsschaden</b>
<b>kontinuierlich</b>	statische und dynamische Zugspannungen	Gleitung Risse Bruch	spezifischer Elektrolyt Wasserstoff flüssige Metalle	<b>Spannungsrissskorrosion</b>
<b>schwingend</b>	wechselnd schwellend	Ermüdungsbruch	unspezifischer Elektrolyt	<b>Schwingungsrissskorrosion</b>
<b>reibend</b>	oszillierend	Verschleiß	Luft oxidierte Schmierstoffe	<b>Reibkorrosion Reibdauerbruch</b>
<b>schlagend</b>	periodisch	Erosion Tropfenschlag Kavitation	aggressiver Elektrolyt  jeder Elektrolyt	<b>Erosionskorrosion Kavitationskorrosion</b>

**Abb. 14: Überblick der mechanischen und stofflichen Einflüsse auf die Korrosion (Tostmann 2005)**

Die Spannungsrissskorrosion entsteht durch mechanische Zugspannungen auf einen Werkstoff. Diese Zugspannungen führen zu einer Dehnung des Werkstoffes. Die Zugspannungen können dabei äußere Lasten, innere Zugspannungen oder Eigenspannungen sein. Durch die Zugspannungen entstehen trans- oder interkristalline Risse. Bei der Schwingungsrissskorrosion wirken mechanische Wechselbeanspruchungen an einem Bauteil, wodurch bei diesen meist transkristalline, verformungsarme Risse entstehen. Die Schwingungsrissskorrosion benötigt im Unterschied zur Spannungsrissskorrosion keine spezielle Empfindlichkeit des Werkstoffes noch ist ein spezifisches Medium Voraussetzung für die Korrosionsschädigung. Wirkt zwischen Werkstoff und Medium eine Relativbewegung, so können Schäden durch eine strömungsinduzierte Erosions- und Kavitationskorrosion auftreten. Werden Werkstoffe zyklisch gegeneinander bewegt, sind Reibkorrosionsschäden möglich.

Nachfolgend wird detaillierter auf die Themenstellung der Spannungsrissskorrosion eingegangen, da diese im Zusammenhang mit Ankern und geankerten Konstruktionen (vgl. (Burtscher et al. 2017a) oftmals angeführt wird. Spannungsrissskorrosion bezeichnet eine Rissbildung in zugbeanspruchten Werkstoffen bei gleichzeitigem Einwirken von spezifischen Medien. Diese Medien sind bei Metallen meist wässrige Elektrolyte. Voraussetzung für die Spannungsrissskorrosion ist ein kritisches System aus Werkstoff, Medium sowie eine gleichzeitige Beanspruchung. Die Spannungsrissskorrosion tritt bei Metallen als Trennung mit inter- oder transkristallinen Rissverlauf und nur im passiven Zustand auf. Es ist kein Materialabtrag erkennbar, wodurch die Spannungsrissskorrosion ein besonderes

Sicherheitsrisiko darstellt. Die Korrosion setzt meist erst nach längerer Zeit spontan ein. Ein wesentlicher Faktor bei dieser Form der Korrosion ist die Größe und Art der mechanischen Beanspruchung. In Abb. 15 ist die Spannungsrisskorrosion bei Stählen überblicksmäßig dargestellt.

<b>Spannungsrisskorrosion der Stähle</b>			
<b>Schaden</b>	<b>Interkristalline SpRK</b>		<b>Transkristalline SpRK</b>
			
<b>Werkstoff</b>	Unlegierte Stähle Niedriglegierte Stähle	CrMn- CrNi-Stähle Ni-Basislegierungen	Austenitische Stähle Ni-Basislegierungen
<b>Belastung</b>	überwiegend dynamisch		statisch
<b>Mechanismus</b>	spannungsinduzierter Korngrenzenangriff		lochfraßinduzierte SpRK
<b>Medium</b>	alkalisch $\text{NO}_3^-$ , $\text{OH}^-$ , $\text{CO}_3^-$	neutral unspezifisch	sauer - neutral $\text{Cl}^-$ , $\text{Br}^-$
<b>Temperatur</b>	warm - heiß	Hochtemperaturwasser	hoch bei niedriger Konzentration niedrig bei hoher Konzentration
<b>Gefüge</b>	sensibilisiert		ohne Einfluß

Abb. 15: Spannungsrisskorrosion bei Stählen (Tostmann 2005)

Weitere Informationen zur Korrosion bei mechanischer Beanspruchung sind in (Tostmann 2005) zu finden.

### 2.3. Korrosionsschutzsysteme

Korrosionsschutz umfasst alle Maßnahmen, welche im Allgemeinen dabei behilflich sind, Korrosion zu vermeiden beziehungsweise das Eintreten eines Korrosionsschadens hinauszögern oder dessen Auswirkungen zu mindern. Durch die Vielzahl an korrosionsfördernden Randbedingungen und Korrosionsmedien welche miteinander in Kontakt treten können, bedarf es einer großen Bandbreite an Korrosionsschutzmaßnahmen. Hierbei dürfen jedoch nicht nur Korrosionsmedien allein betrachtet werden, sondern es muss

das Ganze als Korrosionssystem bewertet werden. Durch diese Bewertung können die verschiedenen Parameter, ihre Einflussgrößen sowie ihre Wechselwirkung veranschaulicht werden. Generell können Korrosionsschutzmaßnahmen in den aktiven und den passiven Korrosionsschutz gegliedert werden.

Nachfolgend wird nur ein Überblick über die verschiedenen Ansätze des Korrosionsschutzes gegeben. Detailliertere Informationen zu den verschiedenen Korrosionsschutzsystemen den einschlägigen Normen werden (vgl. Nürnberger (1995), Tostmann (2005) und Dold (2021) zu finden.

### **2.3.1. Passiver Korrosionsschutz**

Die Idee, welche dem passiven Korrosionsschutz zugrunde liegt, ist, dass eine räumliche Trennung des Werkstückes und des Korrosionsmediums durch einen schützenden Überzug bewerkstelligt wird. Dabei kann der passive Korrosionsschutz durch eine Vielzahl an unterschiedlichen Methoden wie Überzüge und Trennschichten realisiert werden. Überzüge und Schutzschichten müssen dabei korrosionsbeständiger als das eigentliche Werkstück sein, um dem Korrosionsmedium entgegenzuwirken. Es finden organische, metallische, nicht metallisch und anorganische Schutzschichten Verwendung, wobei die Haftfestigkeit der Schutzschicht auf der metallischen Oberfläche eine wichtige Voraussetzung für den Korrosionsschutz ist.

#### **Metallische Schutzschichten**

Es gibt eine Vielzahl an Metallisierungsverfahren, welche verwendet werden, um unedle und edle metallische Oberflächenschutzschichten aufzubringen. Es sind besonders die galvanischen Beschichtungstechniken hervorzuheben, bei welchen die Beschichtung mittels Metallabscheidung auf elektrolytischem Weg erfolgt. Die genaue Zusammensetzung sowie der Ablauf der galvanischen Beschichtung sind (Briehl 2008) zu entnehmen. Eine andere Form der Beschichtungstechnik ist die stromlose oder chemische Beschichtung. Bei dieser Form der Beschichtung werden gleichmäßige Schichtdicken erzielt. Die Werkstücke werden in eine wässrige Metalllösung eingetaucht, welche die abzuscheidenden Metallionen enthält. Es liegt hier im Gegensatz zur galvanischen Beschichtungstechnik überall die gleiche Spannung an. Neben dem stromlosen elektrolytischen und galvanischen Beschichten sind die Metallspritzverfahren und die Schmelztauchmethoden erwähnenswert. Beim Metallspritzverfahren wird die Korrosionsschutzschicht durch Pulver oder Draht einer Spritzpistole zugeführt, in der dieser geschmolzen, unter hohem Druck zerstäubt und auf dem Werkstoff aufgetragen wird. Beim Schmelztauchverfahren wird das Werkstück in die Schmelze des Überzugmaterials eingetaucht. Die nach der Entnahme erstarrende Schutzschicht ist in der

Regel dicker als jene bei galvanischen Verfahren. Dieses Verfahren wird aus Kostengründen nur bei Metallen eingesetzt, welche einen niedrigen Schmelzpunkt haben. Feuerverzinken ist das gebräuchlichste Verfahren und wird meist für Stahlwerkstoffe eingesetzt, welche im Außenbereich zur Anwendung kommen. Feuerverzinken kann durch Verfahren wie Stückverzinkung oder Durchlaufverfahren hergestellt werden. Es eignet sich besonders, da Zink im Laufe der Korrosionsvorgänge feste Deckschichten aus Korrosionsprodukten ausbildet. Diese behindern den weiteren Korrosionsverlauf erheblich. Detailliertere Informationen über das Korrosionsverhalten von Zinküberzügen finden sich in (Maaß und Peißker 2008).

### **Nicht metallische Schutzschichten**

Bei nichtmetallischen Schutzschichten lassen sich die organischen und anorganischen Beschichtungsmaterialien unterscheiden. Die natürlichen Oxidschichten zählen bei den anorganischen Schutzschichten zu den wichtigsten, da diese eine hervorragende Passivierung des Werkstoffes bewirken. In diesem passivierten Zustand weisen die unedlen Metalle wie Aluminium und Nickel eine chemische Resistenz auf, welche mit der von Edelmetallen vergleichbar ist. *„Die Passivierung wird hervorgerufen durch die Bildung einer äußerst dünnen, fest haftenden und zusammenhängenden Oxidschicht (teilweise auch Nitridschicht) auf der Metalloberfläche, die den darunter liegenden Werkstoff vor weiterer Korrosion schützt. Diese Oxidschicht ist in vielen Fällen transparent, so dass der metallische Glanz erhalten bleibt.“* (Briehl 2008) Aufgrund der Vielzahl an Möglichkeiten der Herstellung von nichtmetallischen Schutzschichten wird nachfolgend lediglich ein kurzer Überblick dieser gegeben. Weitere Verfahren sowie ihre chemische Zusammensetzung und der Herstellungsablauf sind (Briehl 2008) zu entnehmen.

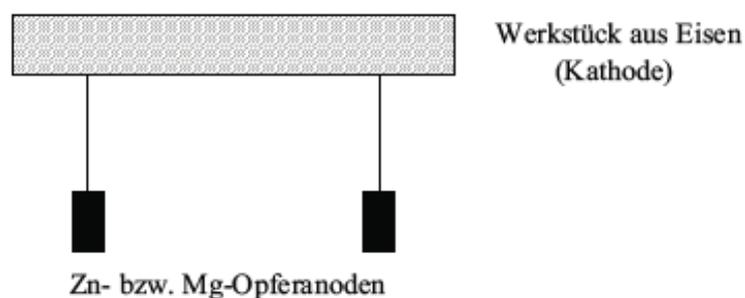
Um die Korrosionsbeständigkeit und die Verschleißfestigkeit zu erhöhen können insbesondere bei Leichtmetallen natürlich gebildete Oxidationsschichten durch anodische Oxidationsprozesse verstärkt werden. Zu den bedeutendsten Verfahren zählt das Eloxal-Verfahren, bei dem auf einem Aluminiumwerkstück eine zusätzliche Schutzschicht auf der vorhandenen Oxidschicht gebildet wird. Die genaue Zusammensetzung sowie der Ablauf sind (Briehl 2008) zu entnehmen. Bei Stahlwerkstoffen kann die Korrosionsbeständigkeit durch sogenanntes Brünieren oder auch Schwarzoxidieren wesentlich verbessert werden. Bei diesem Verfahren wird eine dünne, festhaftende und dunkelbraune bis schwarze Oxidschicht auf dem Werkstoff gebildet. Die genaue Zusammensetzung sowie der Ablauf sind Briehl, 2008 zu entnehmen. Nichtmetallische Schutzschichten werden bei Mikropfähle nicht verwendet. Sie wurden hier erwähnt, um auch diese Möglichkeit des Korrosionsschutzes aufzuzeigen.

### 2.3.2. Aktiver Korrosionsschutz

Der aktive Korrosionsschutz ist die Anwendung von Verfahren und Methoden auf die elektrochemische oder chemische Korrosionsreaktion um gezielt in das Korrosionssystem einzugreifen und seinen Zustand zu verändern. Zu den Anwendungen zählen beispielsweise das Zulegieren passivierender Metalle um die Korrosionsbeständigkeit zu erhöhen. Des Weiteren zählen konstruktive Ausbildungen und eine entsprechende Werkstoffwahl zur Vermeidung von Korrosion zu den aktiven Korrosionsschutzmaßnahmen.

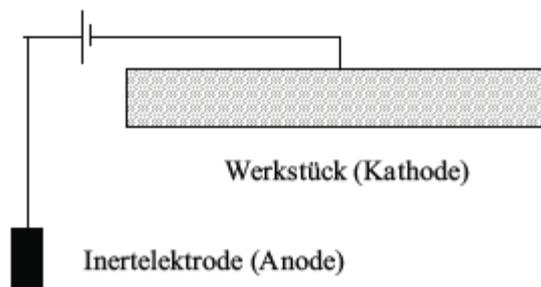
#### Kathodischer Korrosionsschutz

Beim Kathodischen Korrosionsschutz (KKS) wird durch den Aufbau eines künstlichen Lokalelementes der zu schützende Bauteil als Kathode geschaltet. Die Anode besteht aus einer sogenannten unangreifbaren Elektrode oder einem unedlen Metall. Für den Korrosionsschutz von Stahl- und Eisenwerkstoffen werden oft Anoden aus Magnesium oder Zink verwendet und mit dem Werkstoff kurzgeschlossen. Die im Untergrund vorhandene Bodenfeuchtigkeit ist im Regelfall ausreichend, um das erforderliche Elektrolyt zu bilden. Da Magnesium und Zink im Vergleich zu Eisen unedler sind, werden diese bevorzugt oxidiert. Man spricht daher von sogenannten „Opferanoden“. Das vorhandene Eisen- oder Stahlwerkstück ist dadurch vor Korrosion geschützt. Eine Systematische Darstellung des Systems ist in der nachfolgenden Abb. 16 dargestellt.



**Abb. 16:** Opferanodenschaltung (Briehl 2008)

Eine andere Variante des kathodischen Korrosionsschutzes ist die Verwendung von Fremdstrom. Hierbei wird der gleiche Effekt wie bei der Opferanode durch den Einsatz von Fremdstrom erzielt. Das Werkstück wird dabei an den Minuspol einer Gleichspannungsquelle angeschlossen. Der positive Pol besteht aus einer unangreifbaren oder unauflöslichen Elektrode. „Diese elektrische Schaltung bewirkt, dass das Werkstück über den Minuspol der Spannungsquelle Elektronen aufnimmt, wodurch sich der Primärschritt jeder metallischen Korrosion, nämlich die Abgabe von Elektronen durch Oxidation des betreffenden Metalls, unterdrücken lässt. Damit wird das Werkstück zur Kathode und die inerte Elektrode zur Anode.“ (Briehl 2008) Eine derartige elektrische Schaltung ist in Abb. 17 dargestellt.



**Abb. 17: Fremdstromschaltung (Briehl 2008)**

Die beiden angeführten Systeme des Kathodischen Korrosionsschutzes kommen vorrangig bei Parkdecks, Brücken und auch im Leitungsbau zum Einsatz. Für Zugelemente ist diese Art des Korrosionsschutzes eher unzureichend bzw. nur sehr aufwändig umsetzbar.

### **Inhibitoren**

Durch die Verwendung von Inhibitoren kann die Korrosion von Metallen gehemmt bzw. vollständig unterbunden werden. Diese Inhibitoren werden dem korrosiven Medium zugegeben, verändern dieses chemisch oder physikalisch und nehmen so direkt Einfluss auf den elektrochemischen Korrosionsvorgang. Physikalische Inhibitoren werden vom Werkstoff absorbiert und sind oberflächenaktive Substanzen. Sie bewirken eine räumliche Trennung vom korrosionsverursachenden Medium und dem Metall. Zu ihnen gehören beispielsweise Aminosäuren. Chemische Inhibitoren lassen sich anhand der ablaufenden Reaktion in Passivatoren, Destimulatoren und Deckschichtbildner unterteilen. Passivatoren bilden eine zusammenhängende, dünne und passivierende Oxidschicht auf der Metalloberfläche. Deckschichtbildner bilden im Idealfall auf der Werkstoffoberfläche eine gleichmäßig deckende Schutzschicht durch Ausfällen in eine schwerlösliche Verbindung. Destimulatoren machen die im korrosiven Medium vorhandenen Substanz unschädlich. Inhibitoren und ihre chemische Wirkungsweise sind in (Briehl 2008) detaillierter beschrieben.

Inhibitoren stellen eine Möglichkeit des Korrosionsschutzes dar, sie werden bei Mikropfähle allerdings nicht verwendet.

### **2.3.3. Kosten von Korrosionsschäden**

*„Jährlich fließen bis zu vier Prozent des Bruttoinlandprodukts von Industriestaaten in die Eindämmung beziehungsweise Behebung von Korrosionsschäden — Ausgaben, die mit einem effektiven Korrosionsschutz von Beginn an minimiert werden können.“ (Holzer 2018)*

Im Jahr 2008 wurden die Kosten durch Korrosionsschäden in Österreich auf rund 10 Mrd. Euro und in Deutschland auf etwa 50 Mrd. Euro jährlich geschätzt. Das ASCE (2009) hat die Kosten in Amerika für die Erneuerung, Instandhaltung und Ausbau der Infrastruktur im Jahr 2009 auf

2,2 Billionen US-Dollar geschätzt. Davon entfallen rund 930 Mrd. US-Dollar allein auf die Erneuerung und Instandhaltung von Brücken und Straßen.

Alleine in Deutschland wird geschätzt, dass man rund 15 Mrd. Euro einsparen könnte, wenn man den Korrosionsschutz konsequenter umsetzen würde. Das Ziel dabei ist, dass man den „Korrosionsschutz nicht so gut wie möglich, sondern so gut wie nötig durchzusetzen“ (Maaß und Peißker 2008)

## **2.4. Korrosionsschutzmethoden zu Zugelementen**

Um die im vorhergehenden Kapitel beschriebene, sich in Bezug auf die Tragfähigkeit und Dauerhaftigkeit negativ auswirkende Veränderung des Metalls durch eine Korrosionsreaktion in gewissem Maße kontrollieren bzw. verlangsamen zu können, ist der Einsatz unterschiedlicher Korrosionsschutzmethoden möglich.

### **2.4.1. Notwendigkeit von Korrosionsschutz**

Die verschiedenen Korrosionsschutzsysteme bzw. deren Notwendigkeit für ein geotechnisches Element sind vor allem von der geplanten Nutzungsdauer des Bauwerkes sowie der Aggressivität oder aber auch der Korrosionsbereitschaft eines Bodens gegenüber den Zugelementen abhängig. Die Aggressivität eines Bodens oder auch des umliegenden Grundwassers kann mittels unterschiedlicher Parameter, wie in Kapitel 2.2.2 beschrieben, klassifiziert werden. Werden österreichische Richtlinien für die behandelten geotechnischen Zugelemente hinsichtlich dieser Klassifizierung der Bodenaggressivität betrachtet, so verweisen sie alle auf eine Einstufung nach der Betonnorm ÖNORM EN 206. Zusätzlich dazu verweist die österreichische Norm für Bodenvernagelungen in Bezug auf Bodenaggressivität auf die Richtlinie Clouterre (Presses de l'ENPC 1991), welche eine ausführliche Klassifizierung beinhaltet.

Wird die Einstufung des Bauwerks hinsichtlich der Nutzungsdauer betrachtet, so unterscheiden sich die Definitionen je nach geotechnischem Element. Verpressanker werden in der Literatur beispielsweise sehr genau definiert. In der benachbarten Schweiz spricht man von einem Permanentanker wenn die geplante Nutzungsdauer länger als 2 Jahre beträgt (ungespannt länger als 5 Jahre). Geplante Nutzungsdauern unterhalb dieser Grenze sind als temporäre Anker bezeichnet (vgl. Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation - Bundesamt für Strassen 2009, S. 24). Ähnlich dazu ist die Thematik beispielsweise in Australien definiert, wo ebenso die Grenze von zwei Jahren als Unterscheidungsmerkmal für temporäre und permanente Anker ausschlaggebend ist. Jedoch wird dazu eine obere Grenze von ‚normalerweise 100 Jahren‘ beschrieben.

Criterion	Features	Weight A of Criterion
Type of Soil	• Texture	2
	- heavy, plastic, sticky impermeable	1
	- clayey-sand	
	- light, permeable, sandy, cohesionless soils	
	• Peat and bog/marshlands	0
	• Industrial waste	
	- clinker, cinders, coal	8
	- builders' waste (plaster, bricks)	8
	• Polluted liquids	4
	- waste water, industrial	
	- water containing de-icing salts	
		6
		8
Resistivity	$p < 1000 \Omega \text{ cm}$	5
	$1\ 000 < p < 2\ 000$	3
	$2\ 000 < p < 5\ 000$	2
	$5\ 000 < p$	0
Moisture Content	Water table - brackish water (variable or permanent)	8
	Water table - pure water (variable or permanent)	4
	Above water table moist soil (water content > 20%)	2
	Above water table - dry soil (water content < 20%)	0
pH	< 4	4
	4 à 5	3
	5 à 6	2
	> 6	0
	Global index	Sum of above: $\Sigma A$

Index $\Sigma A$	Soil Features	Classification
> 13	Highly corrosive	I
9 to 12	Corrosive	II
5 to 8	Average corrosiveness	III
< 4	Slightly corrosive	IV

Abb. 18: Korrosivitätsindex und Klassifizierung nach Clouterre (Presses de l'ENPC 1991, S. 230–233)

Auch die österreichische Norm ÖNORM EN 1537 verwendet die Zeitspanne von 2 Jahren um zwischen temporärer und dauerhafter Nutzung zu unterscheiden. So sind Verpressanker mit einer geplanten Nutzungsdauer kürzer 2 Jahren als Kurzzeitanker, mit einer längeren Lebensdauer als Daueranker definiert. Unterschiedliche Zulassungen oder auch Literaturen definieren zusätzlich noch semipermanente Anker, welche eine dazwischenliegende Nutzungsdauer anstreben können, wie beispielsweise von Wichter und Meiniger beschrieben wird: „In der Praxis kommt es vor, dass Verpressanker für temporäre Zwecke länger als 2 Jahre benötigt werden, z.B. bei großen Bauvorhaben. [...] Wenn Bauherr und Bauaufsicht einverstanden sind, können sog. Semipermanentanker eingesetzt werden, bei denen im Kopfbereich ein im Vergleich zu Temporärankern verbesserter Korrosionsschutz hergestellt wird.“ (Wichter und Meiniger 2009, S. 313). Bei Bodennägeln wiederum verweist die zugehörige österreichische Norm u.a. in Bezug auf die Lebensdauer auf die Richtlinie Clouterre (vgl. Presses de l'ENPC (1991)), welche eine internationale Empfehlung für Bodenvernagelungen darstellt und im Allgemeinen den ‚Grundstein‘ der heutigen Bodenvernagelungsnorm bildet. Diese teilt die Nutzungsdauer in drei Kategorien ein. Beginnend bei kurzzeitigen Strukturen, welche für eine Einsatzzeit von maximal 18 Monaten vorgesehen sind, über mittelzeitigen Strukturen, die eine Lebensdauer zwischen 18 Monaten und 30 Jahren aufweisen bis hin zu Langzeitstrukturen mit einer geplanten Nutzungsdauer zwischen 30 und 100 Jahren (vgl. Presses de l'ENPC 1991, S. 247).

Bei Verpresspfählen hingegen definiert die österreichische Norm keine Klassifizierung nach der geplanten Lebensdauer, verlangt jedoch, den Korrosionsschutz in Abhängigkeit der geplanten Nutzungsdauer der Struktur auszulegen.

Neben den gültigen Normen sind in Österreich in Bezug auf den Korrosionsschutz und die Dauerhaftigkeit von Zugelementen auch die Angaben und Anforderungen nach den Zulassungen dieser Systeme zu beachten. In diesen sind zum einen die systembedingten Korrosionsschutzmaßnahmen angeführt. Zum anderen werden darin auch die für eine sach- und zulassungskonforme Herstellung erforderlichen Bauteile und Elemente definiert. Auf Grund der weiten Bandbreite dieser Angaben wird jedoch nachfolgend nicht genauer auf die unterschiedlichen Systeme eingegangen. Stattdessen werden unterschiedliche Arten von Korrosionsschutzmaßnahmen beschrieben, welche als Stand der Technik zu definieren sind. Für eine explizite Auflistung der vorhandenen Systeme wird auf Hehn (2021b) verwiesen.

## 2.4.2. Arten von Korrosionsschutzmaßnahmen

Nach Nürnberger (1995a) kann generell zwischen aktivem und passivem Korrosionsschutz unterschieden werden. Vereinfacht dargestellt, liegt der Unterschied dabei in den verschiedenen Ansätzen zur Beeinflussung eines Korrosionsprozesses. Beim aktiven Korrosionsschutz wird direkt der Korrosionsprozess bzw. die Reaktionsfolge selbst beeinflusst, beispielsweise durch elektrochemische Potentialveränderung des Stahls. Bei passiven Schutzmaßnahmen hingegen liegt der Ansatz im Fernhalten korrosionsfördernder Stoffe vom metallischen Werkstoff. Da die Korrosionsschutzmaßnahmen für die beschriebenen Zuelemente in der Geotechnik aufgrund der praktischeren Anwendbarkeit meist passiver Art sind, werden diese im Folgenden detaillierter erläutert. Anwendbare Beispiele des aktiven Korrosionsschutzes werden zum Einfluss von Rissbreiten auf das Korrosionsverhalten von Mikropfählen (vgl. Hehn 2021b) ausgeführt.

Werden die in der Literatur sowie in den österreichischen Normen genannten passiven Korrosionsschutzmaßnahmen, unabhängig vom jeweiligen Zuelement, betrachtet, wird meist in zwei Kategorien, den einfachen und den doppelten Korrosionsschutz, unterschieden. Eine noch in Entwurf befindliche, österreichische Norm, welche sich der Thematik der Dauerhaftigkeit von Verankerungen und den dafür erforderlichen Korrosionsschutzsystemen annimmt, fügt den beiden eben genannten Kategorien noch eine dritte hinzu und unterteilt die Korrosionsschutzmethoden somit in die folgenden drei Korrosionsschutzsysteme:

- SCP - einfacher Korrosionsschutz (single corrosion protection)
- DCP - doppelter Korrosionsschutz (double corrosion protection)
- MCP - materialbedingter Korrosionsschutz (material related corrosion protection),

Letzteres Korrosionsschutzsystem (MCP) kann dabei nicht direkt dem passiven Korrosionsschutz zugeordnet werden. Nachfolgend werden diese drei Korrosionsschutzarten sowie deren weitere Differenzierung nach beschrieben.

### **SCP – Einfacher Korrosionsschutz**

Wie der Name es erwarten lässt, bedient sich der einfache Korrosionsschutz einer einzigen Schutzschicht, welche zum Ziel hat, den Korrosionsangriff entweder zu verhindern, zeitlich zu verzögern oder zumindest die statisch erforderliche Tragfähigkeit des Traggliedes zu gewährleisten. In der sich damit befassenden Norm werden im Kontext mit SCP wiederum vier Unterscheidungen definiert. So kann demzufolge ein einfacher Korrosionsschutz durch Korrosionszugabe (SCA), Beschichtung des Stahls (CCP), Verzinkung (ZCP) oder durch Einkapselung (GCP) erfolgen.

### SCA – Korrosionszugabe (sarcificital corrosion allowance)

Bei dieser Methode wird grundlegend nicht davon ausgegangen, dass das Tragglied durch eine Einkapselung o.Ä. vor einem Korrosionsangriff geschützt wird. Das Tragelement aus Stahl wird hingegen um einen gewissen Faktor, bzw. eine gewisse Querschnittsstärke, überdimensioniert. Der für die Überdimensionierung vorgegebene Zuschlag hängt einerseits von der Lebensdauer, andererseits von Faktoren wie sie in Kapitel 2.2.2 beschrieben wurden sowie der Bauwerksklasse ab (vgl. Presses de l'ENPC 1991; ÖNORM EN 14490, S. 51). Diese Art ‚Korrosionspuffer‘ verhindert weder den Korrosionsangriff noch wird er verzögert, es findet lediglich eine Vergrößerung des Stahlquerschnittes und somit eine Verzögerung der tragwerksrelevanten Querschnittsreduktion statt (vgl. ÖNORM B 4456).

Normativ erwähnt wird dieses Verfahren jedoch nicht für alle behandelten geotechnischen Elemente, lediglich für Mikropfähle und Vernagelungen (vgl. ; ÖNORM EN 14490). Während bei Bodenvernagelungen die Korrosionszugabe detaillierter behandelt sowie tabellarische Angaben zum Stahldickenverlust, mit weiteren Verweisen auf Clouterre (1991), gemacht werden, beschreibt die Norm für Mikropfähle nur die Möglichkeit, eine Abrostungsrate zu berücksichtigen, geht aber nicht genauer darauf ein. Zulassungen unterschiedlicher Anbieter hinsichtlich der jeweiligen Systeme hingegen, beinhalten strukturierte Angaben bzw. Richtwerte zur Abrostrate für Mikropfähle und Bodennägel, wie sie beispielsweise in Abb. 19 dargestellt sind.

Nutzungs- dauer in Jahren	Pfahl Typ	Richtwert Abrostrate in mm bei einer Korrosionsbelastung		
		niedrig	mittel	hoch
2 - 7	A	0,2	0,2	0,5
	B	0	0	0,4
	A+C	0	0	0
	B+C	0	0	0
7 - 30	A	0,4	0,6	DCP
	B	0	0	
	A+C	0,2	0,4	
	B+C	0	0	
30 - 50	A	0,5	1,0	DCP
	B	0,2	0,7	
	A+C	0,4	0,8	
	B+C	0	0,5	

- A blanker Stahl, unverpresst
- B verzinkter Stahl, Zinkschichtdicke  $\geq 85\mu\text{m}$ , unverpresst
- C Zementmörtelüberdeckung  $\geq 15\text{mm}$
- DCP Korrosionsschutz durch Verrohrung nach ÖNORM EN 1537

**Abb. 19: Beispiel für Richtwerte der Abrostrate lt. Zulassung (ANP - SYSTEMS GMBH 2016; Anlage 2)**

### **CCP – Beschichtung (coating corrosion protection)**

Beim Aufbringen von Korrosionsschutzschichten (früher als ‚Anstrich‘ bezeichnet) ist generell keine Begrenzung hinsichtlich einer bestimmten Dicke der Schicht oder an ein spezifisches Material gegeben, jedoch sind laut Nürnberger (1995b) die häufigsten Korrosionsschutzbeschichtungen organischer Natur. Trotz einer Vielzahl an unterschiedlichen Beschichtungen kann bei organischen Beschichtungen anhand deren Bindemittel zwischen Naturstoffen, welche ein Bindemittel aus Naturprodukten enthalten, rein synthetischen Kunststoffen oder einer Mischung dieser beiden unterschieden werden. Zur Klasse der Naturstoffe können beispielsweise Öle oder Bitumen gezählt werden. Die Klasse der Kunststoffe beinhaltet hingegen eine große Menge an Beschichtungsmitteln, wie beispielsweise Alkydharz, Polyurethan und Epoxidharz, um nur einige wenige zu nennen (vgl. Nürnberger 1995b, S. 647 ff). Neben den genannten Beschichtungsmitteln gibt es auch neuartige, teils vielversprechende Beschichtungen – wie beispielsweise die Enduro™ Beschichtung – welche mittels moderner Technik aufgetragen werden (vgl. Sainsbury et al. 2016).

Korrosionsschutzbeschichtungen können in einem oder mehreren Arbeitsschritten und, abhängig vom vorgesehenen Beschichtungsmittel, vor Ort oder im Werk aufgetragen werden. Ebenso kann in der Anwendungsart zwischen Nassbeschichtungen – also einem Aufbringen mittels z.B. Streichen oder Aufspritzen – Pulverbeschichtung, thermoplastifizierenden Umhüllungsrohren u.a. unterschieden werden. Detaillierte Aufzählungen und Anwendungsarten sind von Nürnberger 1995b, (S. 648–651) aufgelistet und beschrieben.

Im Zusammenhang mit den beschriebenen geotechnischen Elementen wird dieses Korrosionsschutzverfahren in allen vier Normen behandelt. Es sei jedoch anzumerken, dass bei einer Beschädigung der Beschichtung der gewünschte Korrosionsschutz nicht gewährleistet werden kann.

Der Einbau eines beschichteten Zugelements kann – unter Berücksichtigung der oberhalb erwähnten Aspekte – ähnlich dem eines nicht verzinkten Zugelements beschrieben werden (sh. Abb. 20, Nr.1).

### **ZCP – Verzinkung (zinc corrosion protection)**

Klar von der oben beschriebenen Korrosionsschutzmaßnahme einer Beschichtung ist zu unterscheiden, wenn die Korrosionsschutzschicht metallisch ist. In diesem Fall spricht man von metallischen Überzügen wie etwa einer Zinkschicht, welche durch Feuerverzinken hergestellt wird. Bei diesem Verfahren wird das zu verzinkende Metall nach entsprechender Aufbereitung der Metalloberfläche in geschmolzenes Zink getaucht. Durch das Anpassen der

Temperatur des kühleren Metalls an die des flüssigen Zinks bildet sich eine Zink-Eisen-Legierung an der Metalloberfläche. Abhängig von den angewandten Verfahren und Bedingungen können sich Aufbau, Farbe und Stärke der Verzinkung unterscheiden (vgl. Nürnberger 1995b, S. 784).

Eine große und daher nennenswerte Einschränkung verzinkter Bewehrung ist ein schlechteres Verbundverhalten zwischen Bewehrung und Beton im Gegensatz zu jenem mit üblicher, nicht verzinkter Bewehrung. Dieses schlechtere Verhalten ist im Allgemeinen auf eine Reaktion des Zinks mit dem Frischbeton, bzw. dem darin vorhandenen Zementleim, zurückzuführen. Dies hat eine aufgelockerte Verbundoberfläche und somit eine Reduktion der mechanischen Verbundeigenschaften zur Folge. Zusätzlich kann festgestellt werden, dass sich bei verschiedenen Längszugversuchen mit zentrisch betonierten Zugstäben, klare Unterscheidungen im Rissbild zwischen Zugstäben mit verzinkter und zwischen jenen mit üblicher Bewehrung erkennen lassen. So ist im Vergleich die Anzahl der auftretenden Risse bei einem Zugstab mit verzinkter Bewehrung tendenziell geringer, ebenso ist aber auch die ‚Verästelung‘ der entstehenden Risse geringer und daraus resultierend ein vermehrtes Entstehen von größeren und durchgehenden Trennrissen festzustellen (vgl. Neugebauer et al. 2015). Der oben angeführte Einfluss einer Verzinkung auf das Verbundverhalten ist jedoch bisher lediglich bei Betonstählen untersucht worden. In Bezug auf die Verwendung von verzinkten Stäben für Mikropfähle kann hier ebenfalls ein Einfluss erkannt werden, dieser hat jedoch durch die im Regelfall größeren Querschnitte der Bewehrungselemente einen weniger signifikanten Einfluss auf das Tragverhalten. (vgl. Burkert et al. 2010)

Bezugnehmend auf die beschriebenen geotechnischen Elemente wird eine Verzinkung nur in ÖNORM EN 14490 (ÖNORM EN 14490), also im Zusammenhang mit Bodenvernagelungen, als mögliche Beschichtung des Zugelements angeführt. In unterschiedlichen Zulassungen wird eine Verzinkung jedoch auch für Mikropfähle und andere Zugelemente genannt. Hier wird oftmals auf die Inhalte der ÖNORM EN ISO 1461 verwiesen. Daraus resultiert, dass eine Zinkschicht mit einer Dicke von mindestens 85 µm durch eine Stückverzinkung aufzubringen ist (vgl. ANP - SYSTEMS GMBH 2016). Ebenso wie im Zusammenhang mit einer Beschichtung angeführt, ist auch bei der Anwendung einer Zinkschicht, auf die Unversehrtheit nach der Herstellung zu achten. Vor allem bei drehschlagend eingebauten Traggliedern (z.B. Hohlbohrstäben) sollte dies bei der Installation bedacht werden. Aktuell sind hierzu keine Untersuchungen vorhanden, jedoch ist nach Nürnberger (1995b) bei Beschädigung der Zinkschicht davon auszugehen, dass es zu einer Lochfraßkorrosion – also zu einem lokalen Korrosionselement – kommt und somit ein rascheres Fortschreiten der Korrosion stattfindet.

Der Einbau eines verzinkten Zugelements kann – unter Berücksichtigung der oberhalb erwähnten Aspekte – ähnlich dem eines nicht verzinkten Zugelements beschrieben werden (sh. Abb. 20, Nr.1).

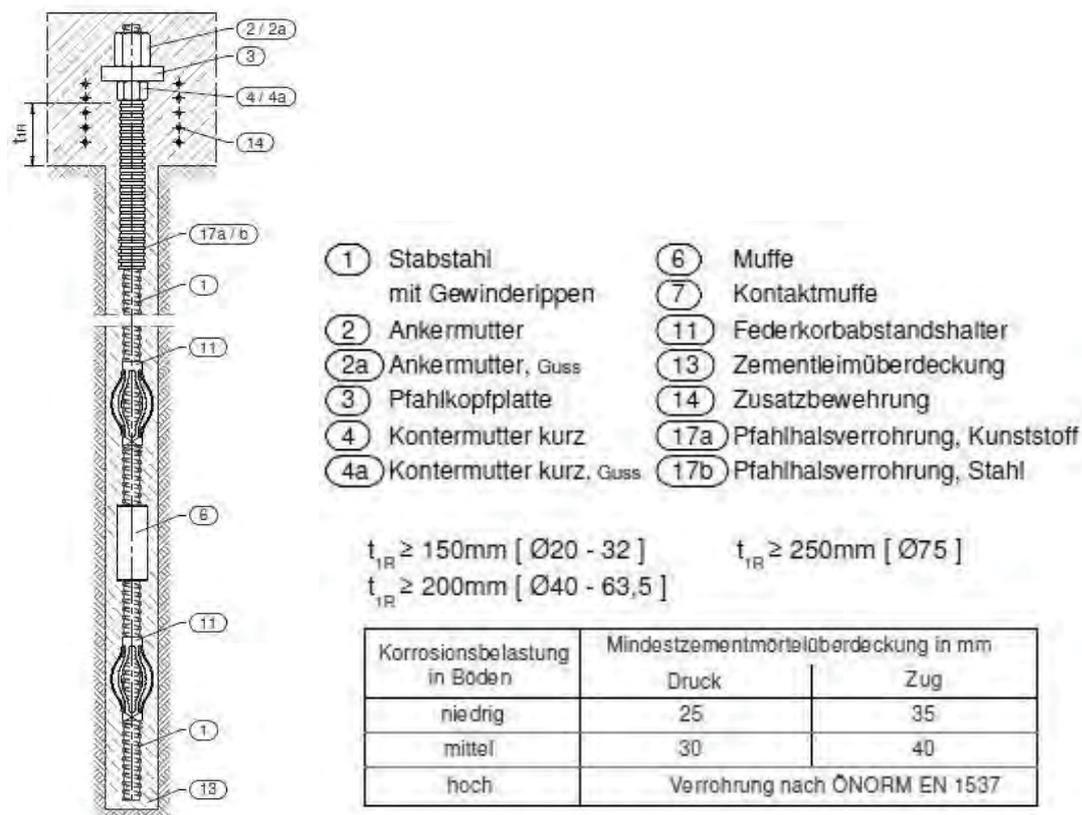
### **GCP – Einkapselung (grout cover protection)**

Wie bereits in vorhergehenden Kapiteln erwähnt, steht die Funktionsweise vieler im Spezialtiefbau, aber auch im konstruktiven Ingenieurbau, eingesetzten Baumaßnahmen mit dem Verbundverhalten von Stahl und Beton in Verbindung. Neben statischen Aspekten dieses Verbundes kommt dem das Bewehrungsglied (z.B. Stab- oder Mattenbewehrung im Betonbau, aber auch Tragglieder) umschließenden Beton auch eine Korrosionsschutzwirkung zu. Nürnberger (1995a) unterteilt den Korrosionsschutzmechanismus von Beton (als Überdeckung) in einen chemischen (aktiven) und einen physikalischen (passiven) Korrosionsschutz. Obwohl der umschließende Beton ein feinporiger – und damit ein mit bedingten Öffnungen und Wegbarkeiten versehener – Baustoff ist, kann bei korrekt gewählten Parametern, wie Betonüberdeckung, Gesamtporosität oder auch der Rissbreitenbegrenzung, das Stahlzugglied vor Korrosionsprozessen geschützt werden (vgl. Nürnberger 1995a, S. 327 f).

Einkapselungen mittels Beton bzw. Verfüllmörtel werden in den jeweiligen Normen mit unterschiedlicher Genauigkeit behandelt. Bodenvernagelungen beinhalten diesbezüglich eine Leitlinie, welche, in Abhängigkeit von der Bodenaggressivität und der geplanten Nutzungsdauer, eine Mindesteinkapselungsstärke vorgeben (vgl. ÖNORM EN 14490, S. 52). Des Weiteren wird dabei angemerkt: *„Die Forschung hat gezeigt, dass überprüfte Rissbreiten von weniger als 0,1 mm als selbstheilend betrachtet werden können. Deshalb wird Einpresszement als eine annehmbare, undurchlässige Schutz-einkapselung erachtet, vorausgesetzt, die Rissbreite im Einpressmittelkörper von 0,1 mm wird nachweislich nicht überschritten.“* (ÖNORM EN 14490, S. 52). Für Ortbeton-Mikropfähle und Verdrängungspfähle wird einerseits eine Mindestbetonüberdeckung für Bewehrungselemente sowie jeweils eine Mindestüberdeckung für Tragglieder, welche in Abhängigkeit von Zug- oder Druckbeanspruchung und Expositionsklassen steht, nicht aber in Abhängigkeit der geplanten Nutzungsdauer, empfohlen (vgl. S. 22 u. 53; S. 29 u. 63). Ebenso wird für beide angemerkt: *„Der Korrosionsschutz für ein in den Beton eingebettetes, auf Zug beanspruchtes Tragglied hängt nicht davon ab, ob das Tragglied zur Verankerung oder als Pfahl angewendet wird, sondern lediglich von der Größe der Zugspannungen im Tragglied“* (S. 22; ÖNORM EN 14490, S. 29). Bei Verpressankern hingegen muss der Korrosionsschutz für die jeweiligen Bereiche separiert betrachtet werden. Wird die Methode der reinen Einkapselung des Stahlzugglieds

über die gesamte Länge des Ankers angewandt, muss garantiert sein, dass die freie Länge des Stahlzugglieds ungezwungen ist. Normativ ist ein einfacher Korrosionsschutz mittels Einkapselung des Zugglieds nur dann zulässig, wenn dies für Kurzzeitanker bzw. vorübergehenden Korrosionsschutz angedacht und die Umgebung nicht aggressiv ist (vgl. ÖNORM EN 1537, S. 17).

Nachfolgend, in Abb. 20, dargestellt ist ein Mikropfahl (ANP – SAS550) mit einfachem Korrosionsschutz in Form einer Einkapselung (GCP) inklusive Aufbau, Bestandteilen und der Mindestzementmörtelüberdeckung laut Zulassung. Ebenso wird in der Zulassung angemerkt: „Der Korrosionsschutz des Dauerpfahles wird durch Einkapselung in einen Verpresskörper mit ausreichender Zementmörtelüberdeckung erreicht. In Abhängigkeit von den Bodenklassen wird auf der Grundlage einschlägiger europäischer geotechnischer Normen eine erforderliche Zementmörtelüberdeckung festgelegt. Die Rissbreiten unter Zugbeanspruchung sind dabei mit  $\leq 0,2 \text{ mm}$  begrenzt.“ (ANP - SYSTEMS GMBH 2016, S. 14)



**Abb. 20:** Schemazeichnung Dauerpfahl SAS 550 mit GCP lt. Zulassung (ANP - SYSTEMS GMBH 2016; Anlage 3)

Der in Abb. 20 dargestellte Aufbau eines Korrosionsschutzes mittels GCP ist dabei ident zu angeführten und beschriebenen Korrosionsschutzmaßnahmen.

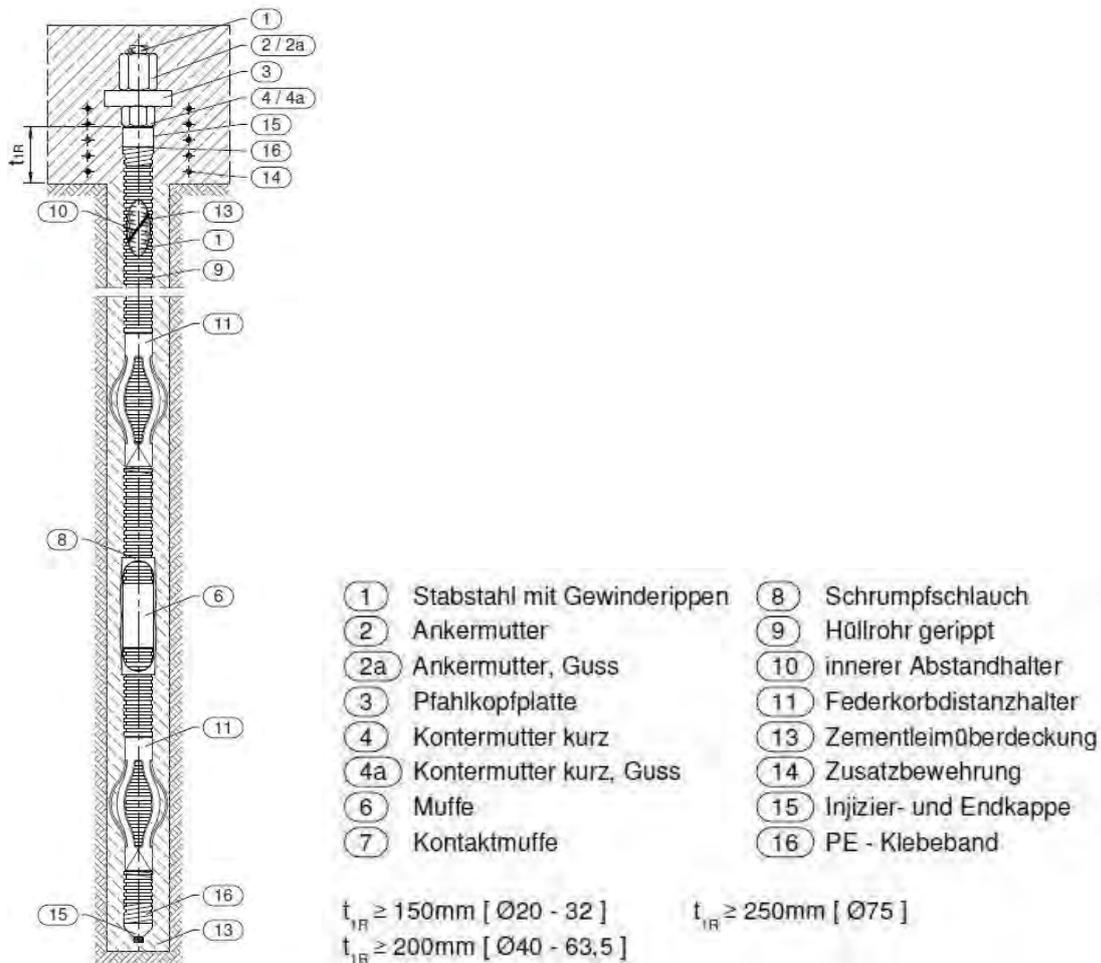
## **DCP – Doppelter Korrosionsschutz**

Doppelter Korrosionsschutz findet seine Anwendung meist bei Verpressankern, kann in seinem grundlegenden System aber auch für andere Zugelemente in der Geotechnik eingesetzt werden. Wie der Name dieser Korrosionsschutzmethode bereits andeutet, wird ein doppelter Korrosionsschutz einerseits durch eine Einkapselung, vergleichbar mit GCP erreicht, welche zusätzlich mit einer weiteren Umhüllung ergänzt wird.

*„Gemäß ÖNORM EN 1537:2015, Nationales Vorwort, ist der doppelte Korrosionsschutz für Spannstahl im Bereich von Verankerungsstrecken in der Regel durch Zementstein von mindestens 5 mm Dicke innerhalb eines Schutzmantels (Hüllrohr) aus korrosionsbeständigem, mechanisch widerstandfähigem und dichtem Material und einer Zementsteinüberdeckung außerhalb des Schutzmantels von mindestens 10 mm gegeben. Der Schutzmantel darf z.B. aus einem Kunststoff-Wellrohr mit einer Dicke von mindestens 1 mm oder Gleichwertigem bestehen. Sonstige tragende Stahlteile sind zusätzlich zur Zementsteinüberdeckung von 10 mm mit einem Korrosionsschutz zu versehen. Der Schutzmantel darf beim Spannen nicht beschädigt werden und muss geeignet sein, die Scherkräfte der Verankerungslänge zu übertragen.“*

Nicht derart explizit und nicht unter dem Namen ‚doppelter Korrosionsschutz‘ wird diese Korrosionsschutzmethode in anderen Normen beschrieben. ÖNORM EN 14490 (ÖNORM EN 14490, S. 40) zeigt einen möglichen Korrosionsschutz mit Hilfe eines Kunststoffhüllrohres, verfüllt mit Verpressmittel.

Nachfolgend, in Abb. 21, ist der Aufbau eines Mikropfahls (ANP – SAS 550) mit doppeltem Korrosionsschutz dargestellt.



**Abb. 21:** Schemazeichnung Dauerpfahl SAS 550 mit DCP lt. Zulassung (ANP - SYSTEMS GMBH 2016; Anlage 4)

### MCP – Materialbedingter Korrosionsschutz

Neben passiven Maßnahmen zum Korrosionsschutz welche entweder mittels Überdimensionierung eine gewisse Abrostung zulassen oder ein – zeitlich eingeschränktes oder dauerhaftes – Fernhalten von Korrosionsauslösern erzielen, bedient sich das Bauwesen immer öfter nichtrostender Materialien. Eine derartige Korrosionsschutzmaßnahme wird in der in Ausarbeitung befindlichen Norm B 4456 als materialbedingter Korrosionsschutz (MCP - material related corrosion protection) bezeichnet. Spezialstähle, welche durch Legierungsverfahren in manchen Eigenschaften optimiert werden können, eignen sich durch voranschreitende Materialtechnologie immer häufiger als Baustähle. So sind unterschiedliche Stähle verfügbar, welche durch erhöhte Chromanteile einen höheren Korrosionswiderstand und dadurch eine wesentlich längere Lebensdauer aufweisen. Der Einsatz dieser Bewehrungsstähle eignet sich laut Hersteller auch für die Geotechnik (vgl. SCHMOLZ + BICKENBACH AG - Swiss Steel AG 2020). Neben legierten Stählen entsprechen auch andere

Materialien, wie z.B. glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK), den Anforderungen an MCP und sind für den Einsatz in der Geotechnik verfügbar (vgl. Minova International Ltd 2020a). Bei der Verwendung dieser Materialien als Tragglied ist jedoch immer auf deren Anwendbarkeit zu achten. Zum einen betrifft dies das Verbundverhalten mit dem Verpresskörper und zum anderen müssen bestimmte Tragglieder (z.B. Nägel) auch Querkräfte aufnehmen können. Aus diesem Grund sind – sich spröde oder wenig duktil verhaltende – Baustoffe wie GFK oder CFK (kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe) im Regelfall auf rein zugbeanspruchte Bauteile beschränkt. Neben dem Einsatz von nicht korrodierenden Traggliedern wäre jedoch auch der Einsatz von dichten und dauerhaften Verpress- und Verfüllmitteln, wie beispielsweise Kunststoffen oder Polymeren, möglich. Beispiele hierfür sind Klebeanker, welche im Tunnelbau zum Einsatz kommen (vgl. Minova International Ltd 2020b). Diesen steht jedoch zum einen die Einbringbarkeit (z.B. Verarbeitungszeit, Erfordernis einer verrohrten Bohrung) und zum anderen der oftmals hohe Materialpreis mit den Anforderungen im Widerspruch.

#### Korrosionsschutz bei Zugelementen

Wie die obigen Ausführungen zur Korrosion und im Speziellen der Randbedingungen zur Korrosion bei Zugelementen zeigen, sind hier in der Planung und dem Entwurf einer geotechnischen Maßnahme eine Vielzahl an Effekten und Einflüssen zu beachten. Dies spiegelt sich auch in den unterschiedlichen, zur Verfügung stehenden und anwendbaren Korrosionsschutzmaßnahmen wider, welche neben den Anforderungen an die Korrosion zudem die baupraktischen Randbedingungen berücksichtigen müssen.

## **2.5. Zusammenfassung**

In diesem Kapitel wurden die Grundlagen der Korrosion vor allem mit Fokus auf Mikropfähle und Zugelemente aufgearbeitet. Im Anschluss hieran wurden die Methoden des Korrosionsschutzes gezeigt, um die Grundlagen für Korrosionsschutzsysteme bei Mikropfählen zu legen. Diese wurden abschließend in aller Tiefe erklärt. Die hier angeführten Passagen wurden auch teilweise in die bereits veröffentlichte ÖNORM B 4456 übernommen und durch aktuelle Beispiele aus der Praxis ergänzt.

### **3. KUNSTSTOFFE IN DER ANKERTECHNIK**

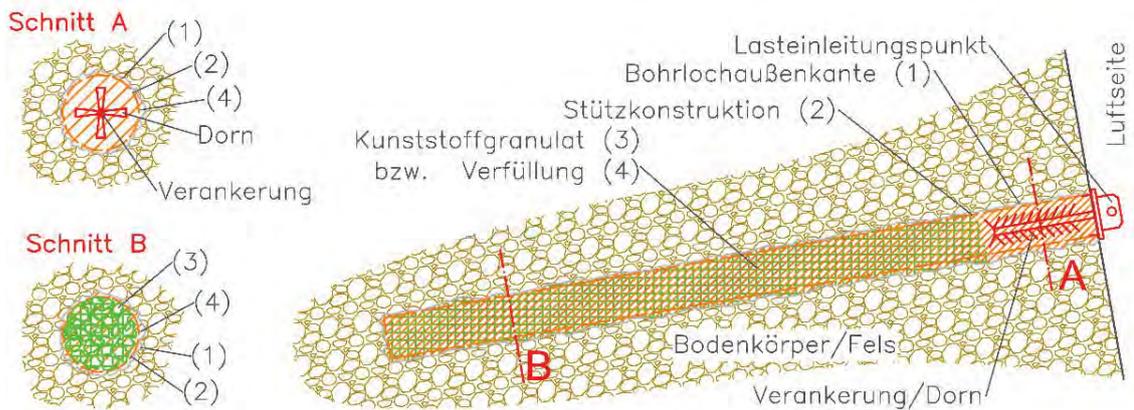
Wie in den Zielen des Forschungsprojektes angeführt, war es eine der Aufgabenstellungen, ein neues, korrosionsgeschütztes Zugelement zu entwickeln, welches die Anforderungen an die Dauerhaftigkeit und auch die Herstellbarkeit bei Schutzbauten berücksichtigt. Nachfolgend wird kurz auf die Entwicklungen eines neuen Mikropfahl- bzw. Zugelementtypen eingegangen, welcher eine Verbesserung der Dauerhaftigkeit ermöglichen soll und zudem ohne erheblichen Mehraufwand im Untergrund installiert werden kann. Hierzu wird zum einen kurz auf die Anforderungen an eine derartige Konstruktion eingegangen, ehe anschließend das entwickelte Konzept näher beschrieben wird. Abschließend werden erste Erkenntnisse aus einem Installationsversuch gezeigt und das mögliche Weiterentwicklungspotential wird schematisch aufgezeigt.

Einige der Untersuchungen zur Verwendung von Kunststoffen sind in Kapitel 4 dieses Abschlussberichtes angeführt, da diese vor allem in Zusammenhang mit anderen Laborversuchen zu geankerten Konstruktionen durchgeführt wurden.

#### **3.1. Anforderungen**

Wie aus den Ausführungen in Kapitel 2 ersichtlich wurde, kann Korrosion einen massiven Einfluss auf die Dauerhaftigkeit von Zugelementen haben. Die ist auf die Verwendung von metallischen Zugelementen zurückzuführen. Im Zuge des Projektes wurde daher nach einem neuen Konzept für Zugelemente gesucht, welches eine Korrosion der metallischen Zugglieder verhindert bzw. dessen Auswirkungen reduziert. Nachfolgend wird hierzu die Genesis dieser Entwicklung dargestellt, ehe die Anforderungen an das neu konzeptionierte System beschrieben werden.

Das in Abb. 14 dargestellte Konzept zeigt den ersten Ansatz, welcher hierzu verfolgt wurde. Der Hintergrund hierzu ist, dass sämtliche metallische Bauteile eines Mikropfahles kurz Kunststoff bzw. nicht korrodierende Materialien ersetzt wird. Im Detail beschrieben war geplant, eine verrohrte Bohrung (1) herzustellen, in welche eine Stützkonstruktion (2) in Form eines perforierten Rohres eingebaut wird. Diese wird zur Stützung des Bohrloches bei Lockergestein verwendet, um anschließend das Herstellen eines durchgehenden Kunststoffkörpers zu ermöglichen. Dieser bestand in der Konzeptphase aus einem Kunststoffgranulat, welches in die Stützkonstruktion eingebracht wird, um die anschließend entstehenden Zwischenräume mit einem flüssigen Kunststoff zu verfüllen. Als Kopfkonstruktion wurde ein Lasteinleitungspunkt konzipiert, welcher die auftretenden Lasten über Verbundwirkung in den Verpresskörper einleitet.



**Abb. 22: Eingereichtes Konzept zur Verwendung eines Verpresskörpers aus Kunststoff**

Dieses Konzept wurde zu Anfang des Projektes verfolgt, auf Grund der damit verbundenen Nachteile jedoch wieder verworfen. Die Nachteile dieses Systems waren:

- Es ist eine verrohrt hergestellte Bohrung erforderlich, um die Stützkonstruktion – vor allem bei Lockergesteinsböden – einbringen zu können;
- Derart große Mengen an Kunststoff stellen ein logistisches, aber auch technisches Problem dar;
- Aus technischer Sicht kann es zu einem massiven Erwärmen der großen Mengen an Kunststoff kommen, woraus folgend eine enorme Eigenspannung innerhalb des Verpresskörpers entstehen kann, woraus folgend eine Selbstzerstörung des Verpresskörpers stattfinden kann;
- Das hier dargestellte Konzept ist auf Grund des intensiven Einsatzes von Kunststoffen weder kosteneffizient noch umweltfreundlich.

Aus den oben angeführten Nachteilen resultierte, dass das dargestellte Konzept nicht weiterverfolgt wurde. Jedoch konnten aufbauend auf dieser Auflistung und den bisherigen Erkenntnissen eine Anforderungsliste an ein neu zu gestaltendes, korrosionsgeschütztes Zugelement erarbeitet werden.

Dieses sollte zum einen einfach in der Herstellung sein und zum anderen einen umfassenden, einfach herzustellenden und anpassbaren Korrosionsschutz aufweisen. Zudem sollte das System die eingeschränkte Zugänglichkeit bei der Herstellung von Schutzbauten (Lage, Geländeneigung, Equipment) berücksichtigen, um so universal für Zugelemente bei Schutzbauten eingesetzt werden zu können.

Das neue Konzept, welches basierend auf diesen Anforderungen und den bisherigen Erkenntnissen ist in Kapitel 3.2 näher angeführt.

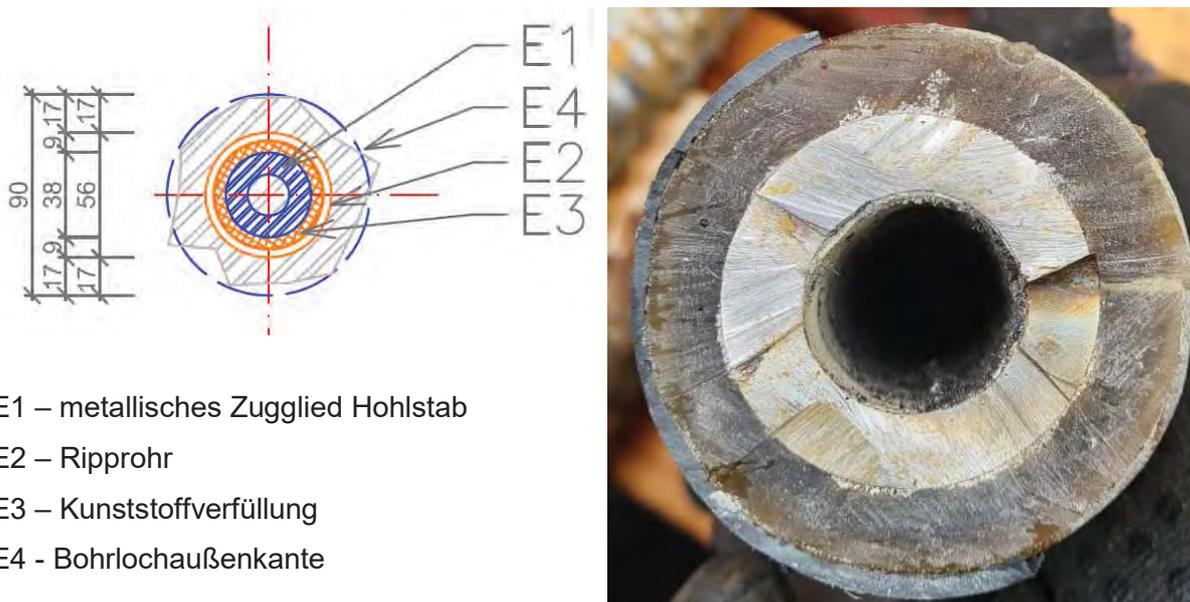
### 3.2. Neu konzeptioniert Fundierungslösung für Schutzbauten

Wie in Kapitel 3.1 beschrieben ist ein Konzept, welches aus reinem Kunststoff besteht, nicht anwendbar. Daher wurde ein weiteres Konzept, welches auf der Nutzung des Prinzipes des doppelten Korrosionsschutzes wie in Kapitel 2.4 beschriebene basiert. Dieser basiert aktuell darauf, dass zwischen dem metallischen Tragglied und einem Ripprohr ein Zementkörper angebracht ist, welcher gemeinsam mit der Dichtfunktion des (Kunststoff-) Ripprohres eine umfassende Korrosionsschutzwirkung aufweist.

Dieses System wurde um zwei folgende Punkte erweitert bzw. ergänzt:

- (1) Verwendung von Kunststoffen für die Herstellung der Korrosionsschutzschicht innerhalb des Ripprohres;
- (2) Verwendung eines selbstbohrenden Elementes als metallisches Zugglied.

Aus der Kombination dieser beiden Methoden ergibt sich die Möglichkeit, ein selbstbohrendes, dreh Schlagend eingebrachtes Zugglied zu erstellen, welches zudem durch einen umfassenden Korrosionsschutz entlang des Stabes vor Korrosion geschützt ist. Nachfolgende Abb. 23 zeigt dieses System in einem Querschnitt.



- E1 – metallisches Zugglied Hohlstab
- E2 – Ripprohr
- E3 – Kunststoffverfüllung
- E4 - Bohrlochaußenkante

**Abb. 23:** Fundierungslösung; Querschnitt schematisch (links); Querschnitt (rechts)

Wie bereits angeführt und in den obigen Abbildungen zu erkennen, besteht das System aus zwei Teilen, welche den Korrosionsschutz und die Tragfähigkeit abdecken. Die Tragfähigkeit wird dabei durch einen Hohlstab – als selbstbohrendes dreh Schlagend – eingebrachtes System erzielt. Dieses bietet den Vorteil, dass es in jeden Untergrund – sowohl Festgestein als auch Lockergestein – unter Spülung eingebracht werden kann. Damit kann bei technisch

richtiger Herstellung eine hohe Tragfähigkeit erreicht werden und zudem können hierzu sehr kleine und leicht an das Gelände anpassbare Bohrsysteme verwendet werden. Der letzte Punkt ist vor allem für die Herstellung von Mikropfählen in schwer zugänglichen Bereichen (beispielsweise für Schutzbauten gegen Naturgefahren) erforderlich.

Für die Dauerhaftigkeit des Zugelementes wird der metallische Hohlstab durch eine Kunststoffschicht umhüllt. Diese wird bereits werkseitig angebracht und kann zudem durch die Anpassungsmöglichkeiten bei Kunststoffen an die Herstellungs- und Umweltbedingungen entsprechend angepasst werden. Um diese herstellen zu können, ist jedoch eine Art verlorene Schalung erforderlich, welche bei dem hier vorliegenden Konzept durch ein Ripprohr bewerkstelligt wird. Neben dieser Funktion dient dieses Element auch dazu, mögliche Transportbeschädigungen zu verhindern und als Abnutzungsschicht im Zuge der Herstellung zu fungieren. Letzter Effekt ist in Kapitel 3.3 näher beschrieben.

Im Gegensatz zu klassischen, doppelt korrosionsgeschützten Elementen ermöglicht das hier vorgestellte Konzept, dass ein selbstbohrendes System verwendet werden kann, ohne dass dabei die Systemkomponenten des doppelten Korrosionsschutzes zerstört werden. Die möglichen zusätzlichen Entwicklungen und Anpassungen, um das hier beschriebene Konzept unter praktischen Bedingungen nutzen zu können, sind in Kapitel 3.4 dargestellt.

### **3.3. Untersuchungen Fundierungslösung DCP-SBZ**

Das in Kapitel 3.2 beschriebene Konzept eines korrosionsgeschützten Selbstbohrzugelementes wurde neben der Probeherstellung in Laborversuchen auch im Zuge der in Kapitel 5 angeführten Großversuche sowie den Feldversuchen Frohnleiten (siehe Kapitel 7) eingebaut. Nachfolgend wird die hierfür erforderliche Herstellung der Probemikropfähle beschrieben und anschließend der Einbau dieser dargestellt.

Um das beschriebene Konzept eines korrosionsgeschützten Selbstbohrzugelementes (DCP-SBZ) in Labor- und Feldversuchen zu ermöglichen war es einleitend erforderlich, den Herstellungsprozess hierzu zu planen. Neben einem einfachen und sowohl unter Labor- als auch Werksbedingungen umsetzbaren Konzept zur Herstellung des Korrosionsschutzes (vgl. Abb. 24) war auch eine Detaillösung für den Anschluss und die Zentrierung des Ripprohres an das metallische Zugglied erforderlich. Die Zentrierung wurde hier durch eine spezielle, zentrische Auflagerung der Hohlstäbe ermöglicht. Der Anschluss des Ripprohres an das metallische Zugglied wurde durch die Anbringung einer Dichtendkappe mit Schumpfschlauch ermöglicht. Da es sich hierbei um eine erste Konzeptstudie handelt, kamen Bauteile von unterschiedlichen Zugelementtypen zum Einsatz, welche entsprechend adaptiert wurden.



**Abb. 24:** Validierung DCP-SBZ; Herstellung Probekörper für Feldversuche (links); Detail Anschluss Ripprohr an metallisches Zugglied (rechts)

Wie in Abb. 25 zu erkennen ist, konnte das Konzept des DCP-SBZ im Zuge des Projektes entsprechend umgesetzt werden, um diese im Zuge der Feldversuche verwenden zu können. Der Fokus hierbei lag darauf im Zuge der Feldversuche eine praxistaugliche Nachbildung der Installation zu ermöglichen.



**Abb. 25:** Validierung DCP-SBZ; Einbau der Probekörper im Feldversuch (links); Detail Bohrkronen nach Einbau (rechts)

Die Probekörper des DCP-SBZ wurden im Zuge der Feldversuche vertikal drehschlagend eingebaut. Zum einen wurden hier Probekörper eingebaut, welche für Belastungs- und Freilege Zwecke verwendet wurden. Zum anderen wurde ein 9,00 m langes Zugelement eingebaut und vor dem Aushärten des Verpresskörpers wieder aus dem Bohrloch gezogen. Dieser Versuch hatte das Ziel, eine mögliche Beschädigung des Zuggliedes (bzw. der Ummantelung) zufolge der Einbringung zu erfassen. Die einzigen Schadensbilder, welche erkannt werden konnten, liegen im Fussbereich des Zugelementes. Wie Abb. 25 rechts zeigt, war im Übergangsbereich zwischen der Krone und dem Kunststoffkörper eine leichte Beschädigung zu erkennen, welche möglicherweise auf das Eindringen und Verkeilen von grobkörnigen Materialien im Zuge des Bohrprozesses zurückzuführen ist. Eine möglicher Lösungsansatz hierzu ist in Kapitel 3.4 angeführt. Da es sich bei den hier untersuchten Zugelementen jedoch um auf Zug beanspruchte Bauteile handelt, kann diese geringe Zone der Schädigung generell vernachlässigt werden, da dieser Bereich des Mikropfahles nicht zwingend für die Ableitung von Zuglasten herangezogen werden muss.

### **3.4. Weiterentwicklungspotential**

Wie bereits aus den Ergebnissen der Feldversuche zu erkennen, lag unter den bisherigen Bedingungen keine Beeinflussung des Korrosionsschutzes des DCP-SBZ vor. Lediglich leichte Schäden im Bereich der Krone und bei dem Wiedergewinnen der Zugelemente im Installationsversuch waren zu erkennen. Nachfolgend wird kurz auf drei Bereiche eingegangen, welche im Zuge einer Weiterentwicklung eines korrosionsgeschützten Selbstbohrzugelemente beachtet und weiter untersucht werden sollten.

#### **Bohrkrone**

Wie in Abb. 25 rechts zu erkennen, fand im Zuge der Herstellung eine Beschädigung des DCP-SBZ im unteren Bereich statt. Wie bereits angeführt, wird dies auf das Eindringen und Verkeilen von grobkörnigen Materialien in den Bereich zwischen Ripprohr und Bohrkrone zurückgeführt. Als Lösung hierfür könnte eine Ableitblech in Form eines Rohres hinter der Bohrkrone verwendet werden, um diesen neuralgischen Bereich zu schützen. Sofern es sich um auf Zug beanspruchte Mikropfähle handelt, kann hierauf jedoch auch verzichtet werden, sofern der beschädigte Bereich nicht für die Tragfähigkeit – zur Übertragung von Lasten aus dem Zugelement in den Untergrund – verwendet wird.

#### **Muffenverbindung**

Ein ähnliches Schadensbilder wie im Bereich der Bohrkrone zu erkennen ist, könnte auch im Bereich der Muffenverbindung – vor allem dem in diesem Bereich vorliegenden Spalt – anzutreffen sein. Zwar kann hier durch die Verwendung von Schrumpfschläuchen ein Verlust

dieses Zwischenraumes sichergestellt werden, jedoch muss dieser Bereich nicht nur in Bezug auf Schäden am Korrosionsschutz sondern auch als eine Schwachstellen dieses betrachtet werden. Während der gesamte Stab – das metallische Zugglied – durch einen umfassenden Schutz vor Korrosion geschützt ist, stellt der Übergangsbereich in der Muffe eine Schwachstelle dar. Lösungsvorschläge hierfür könnten ein Verfüllen des Muffenbereiches mit Kunststoff vor Ort oder die Verwendung nicht korrodierender Materialien für die Muffe beinhalten.

### **Nachverpressmöglichkeit**

Eine der Fragestellungen, welche im Zuge der Konzeptbearbeitung betrachtet wurde, ist das Durchführen eines Nachverpressens. Bei der Verwendung von Vollstäben kann hierdurch eine teils massive Erhöhung der Tragfähigkeit erreicht werden, welcher auch bei dem entwickelten Konzept des DCP-SBZ wünschenswert wäre. Zudem könnte hierfür ebenfalls Kunststoff verwendet werden, um dessen Eigenschaften (z.B. Expansion) zusätzlich berücksichtigen zu können. Beispielsweise könnte dies durch in Kombination mit einer speziellen Muffenverbindung erzielt werden.

### **Zusammenfassung**

Abschließend sein angemerkt, dass ein derartige Zugelement, wie hier dargestellt, neben der Anwendung bei Schutzbauten auch in anderen Bereichen der Geotechnik zum Einsatz kommen kann. Neben der Verwendung als Mikropfahl zur Ableitung von einzelnen Zuglasten oder der Sicherung von Kleinbereichen kann ein derartiges Zugelement zur Herstellung von Bodenvernagelungen – als Kollektiv – verwendet werden. Hierbei ist vor allem der Vorteil des bereits vorhandenen Korrosionsschutzes und der einfachen Installationsmöglichkeit bei einem drehschlagend eingebrachten System ein wesentlicher Punkt, welcher vor allem in Hinblick auf die neue Normenlage zur Korrosivität des Bodens betrachtet werden muss.

## **3.5. Zusammenfassung**

Mit dem hier vorliegenden Konzept des DCP-SBZ konnte ein erster Vorschlag für die Verwendung von Kunststoffen bei Mikropfählen aufgezeigt werden, welcher einfach zu installieren ist und dennoch einen umfassenden Korrosionsschutz bietet. Die Ausführungen der Weiterentwicklung zeigen auch, dass eine weitere umfassendere Betrachtung dieses Konstruktionstyps erforderlich ist, um diesen unter praktischen Bedingungen verwenden zu können.

Weitere Untersuchungen zur Anwendung und Nutzung von Kunststoffen in der Ankertechnik sind in Kapitel 4 dieses Abschlussberichtes angeführt.

## 4. LABORVERSUCHE

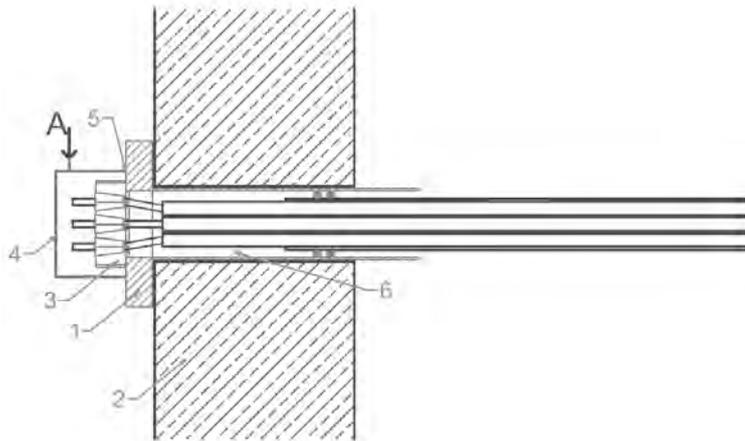
Nachfolgend werden Laborversuche in chronologischer Reihenfolge angeführt. Diese betreffen sowohl Untersuchungen zur Dauerhaftigkeit von Verankerungen, die Anwendung von Kunststoffen, als auch die Korrosionsschädigung bei Mikropfählen. In diesem Kapitel findet sowohl eine Aufbereitung der durchgeführten Untersuchungen als auch eine Aufarbeitung der Ergebnisse und Erkenntnisse zu den durchgeführten Untersuchungen statt.

### 4.1. Überprüfung der Dichtheit des Kopfbereiches bei Zugelementen

In Anlehnung an die im Zuge der Erarbeitung der ÖNORM B4456 angeführten Anforderungen zur Überprüfung der Dichtheit des Kopfbereiches bei Zugelementen wurde ein Versuchsaufbau konzipiert, welcher die Überprüfung der Dichtheit des Anschlussbereiches zwischen Ankerhüllrohr und Dichtrrohr ermöglichen soll.

#### 4.1.1. Versuchsbeschreibung

Der hierzu verwendete Versuchsaufbau ist in Abb. 26 schematisch dargestellt.



**Abb. 26: Schematischer Aufbau der Druckdichtheitsprüfung**

Zur Durchführung der Druckdichtheitsprüfung in Bauwerksankern ist ein wie in Abb. 26 dargestellter Prüfaufbau zu verwenden. Die Bauwerksanker müssen sich hierzu in einem gespannten Zustand befinden und die Herstellung der Verfüllung des Kopfbereiches (6) darf noch nicht durchgeführt worden sein. Der Prüfaufbau (4) besteht aus einer dicht an den Ankerkopf (3) bzw. die Ankerplatte (1) anschließenden Prüfhaube, welche beispielsweise auch durch die Verwendung einer geeigneten inneren Abdeckhaube bewerkstelligt werden kann. Der Prüfaufbau muss dabei sämtliche Durchführungen durch den Ankerkopf sowie die Ankerplatte, welche in den Dichtraum hinter den Ankerkopf führen (z.B. Inspektions- oder

Injektionsöffnungen) abschließen. Durch die Aufbringung eines Prüfdruckes (A) über einen geeigneten Prüfzeitraum ist dabei die Dichtigkeit des Systems zu erfassen.

Bei Verwendung eines Prüfaufbaues, welcher nicht durch eine geeignete innere Abdeckhaube gebildet wird, ist zudem die Dichtheit des Anschlussbereiches zwischen Prüfaufbau und Ankerplatte (5) sicherzustellen. Dies kann beispielsweise durch ein geeignetes, sich an die Unebenheiten der Ankerplatte anpassendes Dichtungselement, eine geeignete Dichtungsmaße oder durch ein sprühförmig aufbringbares Leckageortungsmittel sichergestellt werden. Zur Umsetzung der beschriebenen Versuche wurde ein derartiger Versuchsaufbau umgesetzt und sowohl unter Labor- als auch Feldbedingungen getestet.



**Abb. 27:** Links: Versuchsaufbau im Labor; Rechts: Versuchsaufbau im Feld

Die Ergebnisse der Laborversuche (Abb. 27 Links) zeigten, dass unter Verwendung eines verschweißten Dichtrohres Prüfdrücke bis zu 8 bar (im Bild 3 bar) unter Verwendung des Aufbaues möglich sind. Der identische Aufbau einer äußeren Abdeckhaube mit Luftdruckanschluss wurde auch für die in Abb. 27 rechts dargestellten Feldversuche verwendet. Zur Erzeugung des erforderlichen Luftdruckes kam jedoch keine Kompressoranlage sondern ein tragbares Luftdruckgerät zum Einsatz.



**Abb. 28:** Links: gespannter Anker; Rechts: Installiere Messhaube

Die Installation dieses Aufbaues an gespannten Bauwerksankern ist in Abb. 28 zu erkennen.

#### 4.1.2. Versuchsdurchführung

Die Durchführung der Feldversuche fand am 22.10.2019 an einer Ankerwand der S06 im Bereich Mitterdorf statt. Dabei konnte zwei Ankerköpfe auf ihre Dichtheit überprüft werden. In Abb. 29 ist die Lage der beiden untersuchten Ankerköpfe dargestellt.



**Abb. 29: Übersichtbild Lage der untersuchten Ankerköpfe**

##### Ankerkopf 1

Bei diesem Versuch (vgl. Abb. 27 Rechts) konnte kein Druckaufbau erzeugt bzw. erkannt werden. Es konnten keine Undichtigkeiten des Anschlussbereiches (Dichtung äußere Abdeckhaube) erkannt werden. Daher wurde der Versuch nach 10 min abgebrochen.

##### Ankerkopf 2

Bei Ankerkopf 2 war das Aufbauen eines Druckes im Kopfbereich des Ankers möglich. Die Ergebnisse hierzu sind in Abb. 30 dargestellt.



**Abb. 30: Ergebnisse Ankerkopf 2**

Die Ergebnisse in Abb. 30 zeigen folgendes Bild:

- (1) Eine Aufbringung eines Druckes von 0,25 bar war möglich;
- (2) Dieser konnte für einen Zeitraum von ca. 60 Sekunden (Bild rechts oben) gehalten werden;
- (3) Danach fand ein Abfall auf 0,20 bar statt;
- (4) Nach ca. 90 Sekunden (Bild unten) war kein messbarer Überdruck mehr im Ankerkopfbereich vorhanden.

#### **4.1.3. Schlussfolgerungen**

Diese Ergebnisse zeigen, dass prinzipiell die Aufbringung eines Überdruckes an Ankerköpfen möglich ist, dies sich jedoch entsprechend schwierig gestalten kann. Diese bzw. ähnliche Ergebnisse konnten am selben Ankerkopf in zwei weiteren Versuchsreihen beobachtet werden. Auf Grund einer daraus möglicherweise resultierenden Schädigung des Ankers wurde eine weitere Drucksteigerung im Zuge der durchgeführten Versuche nicht vorgenommen.

#### **4.1.4. Weiterentwicklung / Verbesserung**

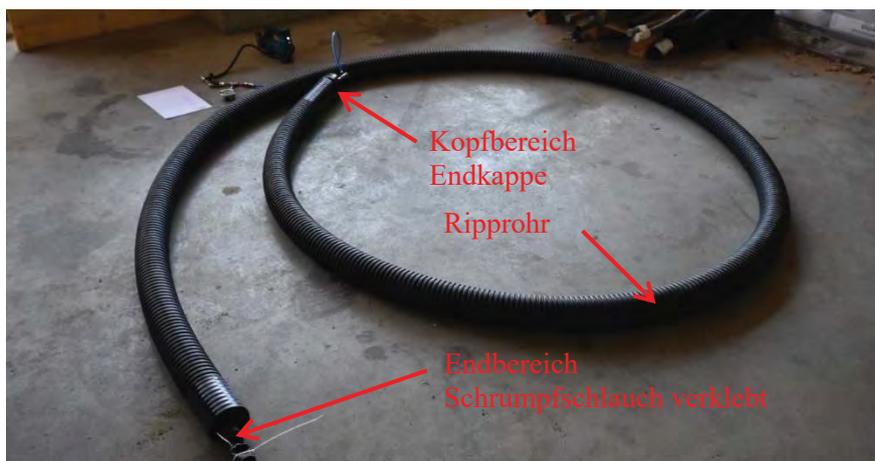
Bei der Umsetzung dieser Versuche konnte erkannt werden, dass die Montage prinzipiell möglich ist, diese jedoch zeitintensiv und fehleranfällig sein kann. Daher würde es sich empfehlen, hierzu ein selbstdichtendes System – ähnlich einer Käseglocke – zu verwenden, um eine rasche Prüfung auf der Baustelle zu ermöglichen. Des Weiteren sollte hier die Möglichkeit der Durchführung von Leitungen (Messtechnik für das Bauwerksmonitoring) oder ein eventuell vorhandener Litzenüberstand (z.B. nachspannbare Anker) mitbedacht werden.

## **4.2. Überprüfung Funktionstüchtigkeit des Korrosionsschutzes bei Litzenankern**

Ebenfalls im Zusammenhang mit einem Vorschlag aus dem Normenentwurf zur ÖNORM B4456 wurden Versuche zur Dichtheit des doppelten Korrosionsschutzes bei Litzenankern durchgeführt. Hierbei sollen etwaige Leckagen des Ripprohres durch das Aufbringen einer Druckluftbeaufschlagung festgestellt werden. Hierzu wurden mehrere Klein- und Feldversuche durchgeführt, welche nachfolgend abgebildet sind.

#### **4.2.1. Laborversuche**

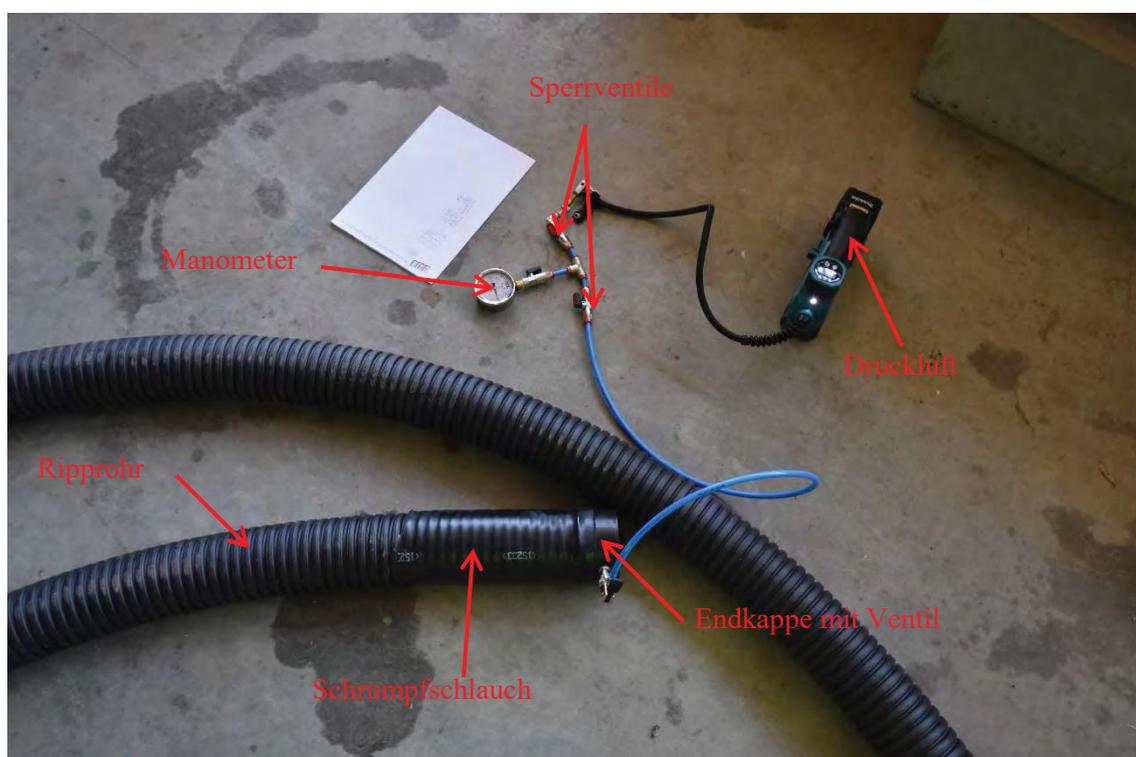
Für die Laborversuche wurden an unterschiedlichen Dimensionen von Ripprohren (DN63 & DN98) Dichtkappen (Endkappen) mittels Klebebandes bzw. Schrumpfschlauch befestigt, um einen dichten Abschluss des Ripprohres zu erzielen. Abb. 31 zeigt den Aufbau an einem 8,00 m langen Ripprohr DN98x1,5.



**Abb. 31: Versuchsaufbau zur Druckdichtigkeitsprüfung bei Ripprohren**

Wie Abb. 31 zeigt, wurde am Ende des Ripprohres lediglich ein Schrumpfschlauch angebracht, welcher durch Kabelbinder bzw. das Zusammendrücken der Klebmasse innerhalb des Schrumpfschlauches verschlossen wurde. Es konnte kein maßgeblicher Luftaustritt (Überprüfung in einem Wasserbad) an dieser Konstruktion festgestellt werden.

Am Kopfbereich (vgl. Abb. 32) wurde eine Endkappe mittel Schrumpfschlauch dicht mit dem Ripprohr verbunden. In die Endkappe wurde ein Ventil eingebaut, welches den Anschluss an ein Manometer und Sperrventile bzw. auch die Luftdruckbeaufschlagung mittels Pumpe ermöglichte.



**Abb. 32: Kopfbereich des Ripprohres mit Manometer- und Pumpenanschluss**

Dieser Versuchsaufbau wurde mit einem Innendruck von 0,50 bar beaufschlagt (vgl. Abb. 33 Links) und der zeitliche Abfall wurde erfasst. Dieser ist in Abb. 34 exemplarisch für eine Versuchsreihe dargestellt.

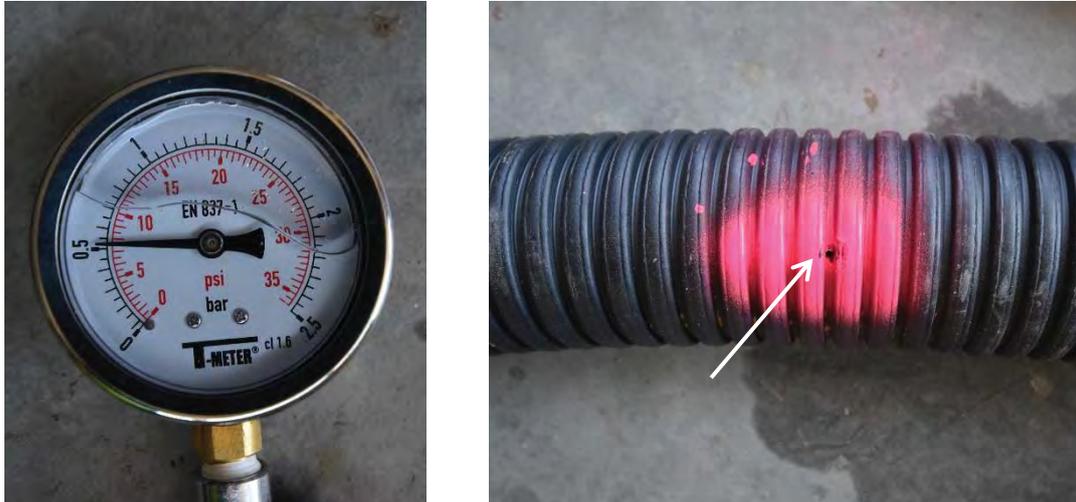


Abb. 33: Links: Manometer vor der Herstellung einer Bohrung; Rechts: Bohrung im Kopfbereich des Ripprohres

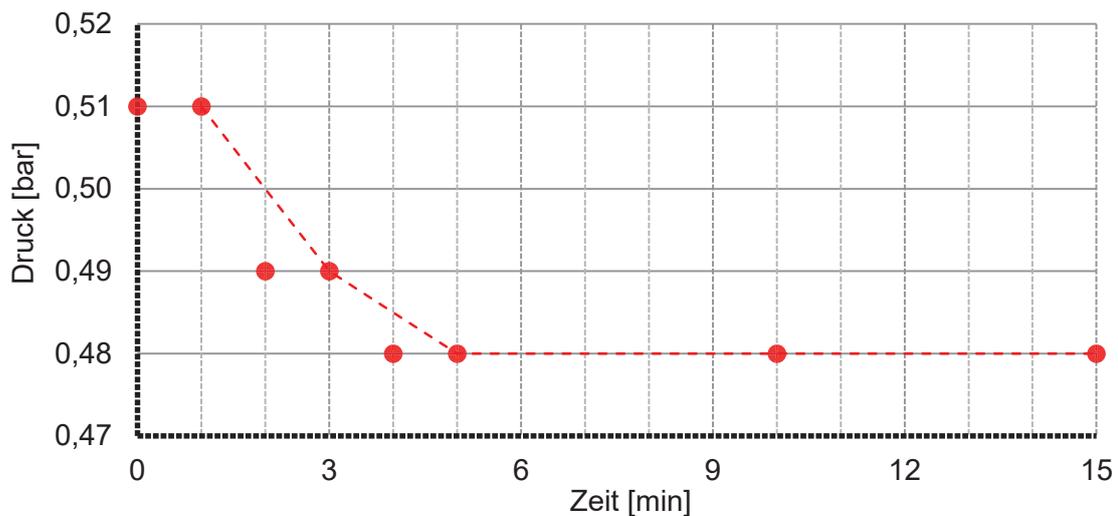


Abb. 34: Zeitlicher Abfall des Innendruckes in einem Ripprohr DN98

Der zeitliche Verlauf des Druckes in Abb. 34 zeigt, dass für einen Zeitraum von 15 Minuten lediglich ein Druckverlust von 0,02 bar (ca. 6 %) festgestellt werden konnte. Dieser lässt sich zu einem großen Teil auf die sicherlich nicht 100%ige Dichtheit der beiden Abdichtungen des Kopf- und Endbereiches und des Messsystems im Kopfbereich zurückführen. Leckagen bzw. Fehlstellen entlang des Ripprohres konnten nicht erfasst werden.

Um eine Schädigung des Ripprohres zu simulieren, wurde daher eine künstliche Fehlstelle in Form einer 3 mm starken Bohrung (vgl. Abb. 33 Rechts) hergestellt. Bereits bei einer sehr kleinen Schädigung des Ripprohres konnte ein merklicher Druckabfall erkannt werden. Zudem

war ein neuerliches Aufbringen des Prüfdruckes von 0,50 bar nicht mehr möglich. Nach dem Verschluss der Schadstelle durch einen Schrumpfschlauch konnte der Versuch jedoch einwandfrei wiederholt werden. Die Herstellung dieser künstlichen Schadstellen fand an drei Bereichen (Kopf, Mitte, Ende) des Ripprohres statt – mit einem identischen Ergebnis.

Das hier vorliegende System wurde kurzzeitig auch auf eine Druckbelastung von 1,50 bar Innendruck untersucht. Hierbei konnte weder ein Abfall des Druckes noch eine Undichtigkeit an den Anschlussbereichen erkannt werden. Hierzu wurde eine Kompressoranlage mit einem deutlich höheren Volumensstrom verwendet.

#### 4.2.2. Feldversuche

Neben den oben angeführten Laborversuchen konnte diese Methode zur Druckdichtigkeitsprüfung bei Ripprohren auch unter Feldbedingungen validiert werden. Hierzu konnte an eine Baustelle entlang der A2 – im Zuge der Sanierung einer Pfeilerfußsicherung (siehe Abb. 35 & Abb. 36) – die Dichtigkeit des Ripprohres sowohl vor als auch nach dem Einbau in das (verrohrte) Bohrloch untersucht werden.



Abb. 35: Übersicht Baustelle



Abb. 36: Übersicht Anker 2

An Anker 1 wurde die Dichtigkeitsprüfung durchgeführt, während sich dieser in der Transporteinrichtung (siehe Abb. 37) befand.



**Abb. 37: Vorabprüfung Anker 1 – im Anlieferzustand**

Diese Versuche konnten nur unter beengten Randbedingungen durchgeführt werden, da ansonsten der Anker aus der Transporteinrichtung entnommen werden hätte müssen. Es konnte ein Druck von 0,45 bar aufgebracht werden. Dieser konnte jedoch nur für einen kurzen Zeitraum aufrecht gehalten werden, da die Befestigung des Druckluftanschlusses auf Grund der beengten Raumverhältnisse nicht ausreichend hergestellt werden konnte.



**Abb. 38: Vorabprüfung Anker 2 – aufgebaut auf Spindel**

Anker 2 befand sich zum Zeitpunkt der Versuche bereits in einer Spindel und war für den Einbau in das Bohrloch vorbereitet. Hier wurde ebenfalls ein Druckluftanschluss (vgl. Abb. 32) angebracht. Es konnte ein Druck von 0,50 bar aufgebracht werden und dieser konnte über einen Zeitraum von mehr als 60 Sekunden gehalten werden. Zudem wurde kurzzeitig auch ein Druck von 0,60 bar aufgebracht.



**Abb. 39: Überprüfung Anker 2 nach dem Einbau**

Nach dem Einbau des Ankers in das Bohrloch konnte die Druckdichtigkeitsprüfung wiederholt werden. Hier war es ebenfalls möglich, den Druck für einen Zeitraum von mehr als 60 Sekunden aufrecht zu halten.

#### **4.2.3. Schlussfolgerungen**

Die Untersuchungen und Versuche zeigten, dass mit der Durchführung einer Druckdichtigkeitsprüfung die Unversehrtheit eines Ripprohres bei allen Phasen der Ankerherstellung durchgeführt werden kann. Diese kann den Zustand des Ripprohres bereits ab Werk aufzeigen und somit auch bei der Lieferkette, der Lagerung und dem Einbau als Prüfmethode verwendet werden.

#### **4.2.4. Weiterentwicklung / Verbesserung**

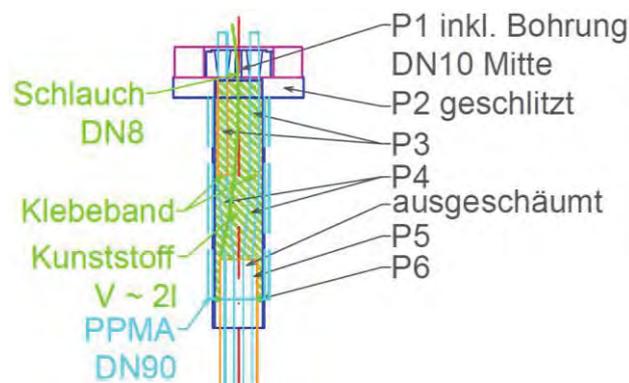
Um derartige Untersuchungen baustellentauglich umzusetzen, empfiehlt es sich einen Druckluftpacker zu verwenden, welcher mit einem Druck von mehr als 1,00 bar beaufschlagt werden kann. Der hierzu erforderliche Überstand des Ripprohres am Anker sollte bereits werkseitig berücksichtigt werden, um eine rasche und wiederholbare Durchführung dieser Untersuchungen zu ermöglichen.

Weiters sollte die Durchführung dieser Untersuchungen in Ankerabnahme- bzw. Injektions- und Spannprotokolle aufgenommen werden, um einen lückenlose Nachvollziehbarkeit sicherzustellen.

Bei der Reparatur von Schädstellen sei anzumerken, dass grobe Schäden am Ripprohr bereits vor dem Einbau in das Bohrloch erkannt werden müssten, da hier oftmals die großflächige Aufbringung von Schrumpfschläuchen oder eines Überschubrohres erforderlich ist. Kleine Riss- oder Druckstellen lassen sich sehr einfach durch die Aufbringung und luftdichte Verbindung eines Schrumpfschlauches beheben. Hierbei sei jedoch anzumerken, dass hier bereits vorab ein Schrumpfschlauch auf den abgewickelten Anker anzubringen ist – um dessen Verwendung an jeder Stelle des Ankers sicherzustellen. Zudem muss hier bei der baustellenseitigen Anbringung auf die ordnungsgemäße Durchführung (Entstehung von Lufteinschlüssen oder Temperaturwölbungen im Ripprohr zufolge zu hoher Temperaturen) geachtet werden. Die Verwendung von selbstklebenden Schrumpfschläuchen wird nur bei glatten Ripprohren empfohlen.

### 4.3. Abdichtung des Kopfbereiches bei Litzenankern

Eine der Problemstellung (und auch eine der häufigsten Korrosionsstellen vgl. Kapitel 2.2) bei Zugelementen ist der Kopfbereich. Vor allem bei vorgespannten Konstruktionen ist die Herstellung eines dichten und sachgemäßen Überganges zwischen der Freispielstrecke und dem Ankerkopf (Dichtrohr) erforderlich, um das Eindringen von Feuchtigkeit bzw. das Auslaufen der Korrosionsschutzmaße zu verhindern. Aktuell kommen hierzu Dichtringe (oder Lippen) zum Einsatz, welche zwischen dem Ripprohr (der Freispielstrecke) und dem Dichtrohr angebracht werden, um diesen Spalt zu verschließen. Neben den Einbautoleranzen ist auch die Dauerhaftigkeit dieser Elemente nicht immer gegeben, was vor allem bei Verwendung einer nicht aushärtenden Korrosionsschutzmasse im Kopfbereich zu erheblichen Problemen führen kann.



**Abb. 40:** Schematische Darstellung der Verfüllung des Kopfbereiches eines Litzenankers

Aus diesem Grund wurde in diesem Bereich des Ankerkopfes ebenfalls die Verwendung von Kunststoffen untersucht. Diese würden neben den Materialeigenschaften (Korrosionsbeständigkeit, Zugfestigkeit und Anpassung an Grundwasser) auch den Vorteil bringen, dass sie schnellerhärtend eingebracht werden könnten woraus folgend die angesprochenen Dichtringe (oder Lippen) entfallen könnten. Hieraus resultierend könnte eine Vereinfachung in der Ankerherstellung unter gleichzeitiger Verbesserung des Korrosionsschutzes des Kopfbereiches generiert werden.

Die hier dargestellten Versuche wurden nicht näher betrachtet, da wie angeführt ein ähnlicher Versuch vorgenommen wurde.

#### 4.4. Kunststoffe zur nachträglichen Abdichtung des Kopfbereiches von PZ-Ankern

Neben der Untersuchung von Kunststoffen für die planmäßige Verfüllung bei Ankerköpfen – im Zuge der Herstellung dieser – wurde auch die Anwendung von Kunststoffen bei Bestandsankern untersucht.

Hierzu wird nachfolgend die Verfüllung des Kopfbereiches bei PZ-Ankern untersucht. Dieses Ankersystem (vgl. Abb. 41) besteht im Kopfbereich aus einem Stab, an welchem mittels einer Kupplungsmuffe Einzeldrähte angeschlossen werden.

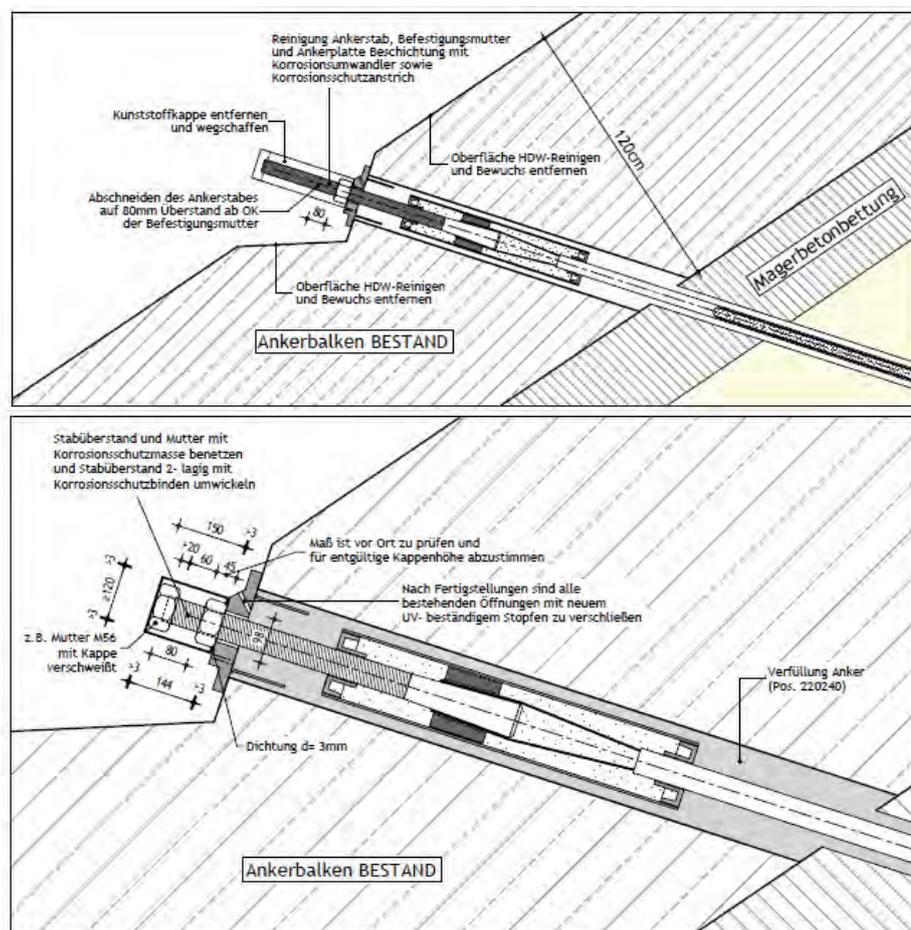
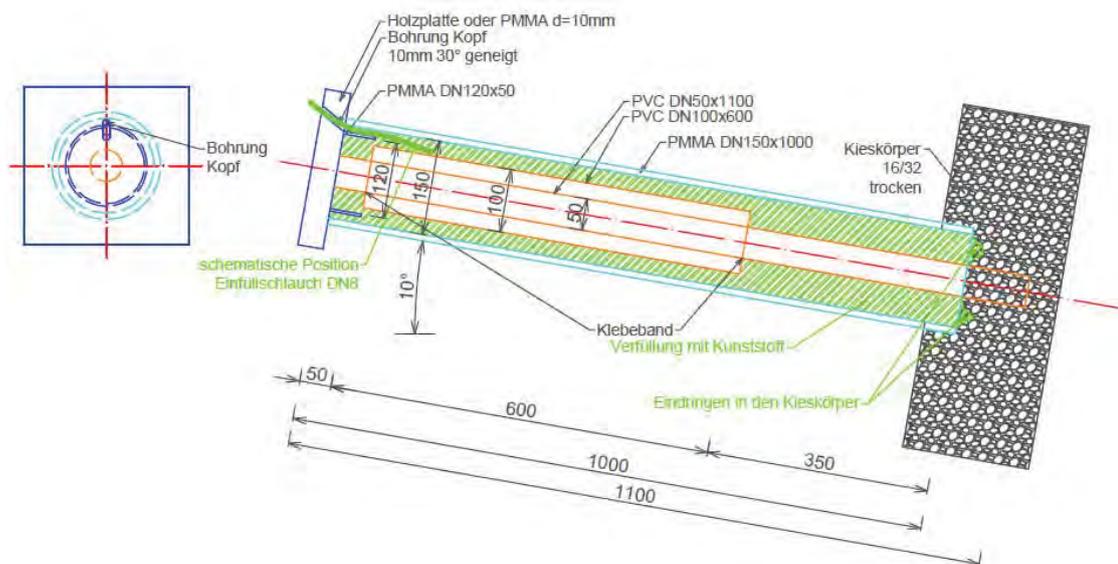


Abb. 41: Sanierungsvorschlag PZ-Anker; oben: Schematische Darstellung des Bestandes; unten: Sanierungsvorschlag durch Verfüllung des Ankers im Kopfbereich (Planung GDP ZT GmbH)

Zur Verfüllung des Kopfbereiches von PZ-Ankern wird im Regelfall Zement (siehe grauschraffierter Bereich in Abb. 41 unten) verwendet. Dieser wird durch eine Injektionsbohrung drucklos eingefüllt und führt zu einer dichten Verfüllung des Bereiches zwischen dem Ankerbalken (Bauwerk) und den Ankerbauteilen. Nachfolgend wird ein Versuchsaufbau

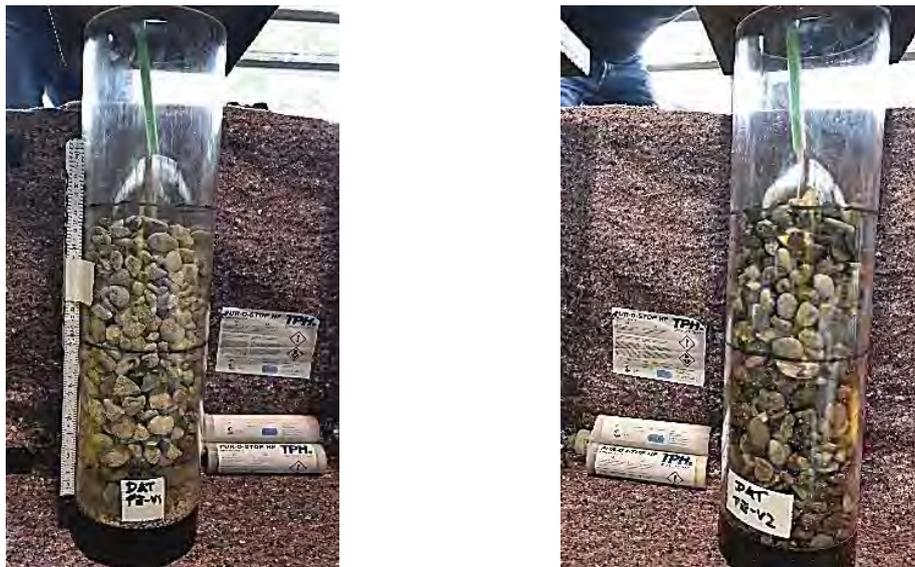
aufgezeigt, in welchem die Anwendung eines Kunststoffes (zweikomponentiges Polyurethanharz) zur Verfüllung des Ankerkopfes untersucht wird.

Um die Verfüllung zu untersuchen wurde der Ankerkopf eines PZ-Ankers (siehe schematische Darstellung in Abb. 41 unten) durch PVC-Rohre und Plexiglasэлеmente (PMMA) nachgebildet. Dabei wurden die in Abb. 42 dargestellten geometrischen Randbedingungen berücksichtigt. Zusätzlich wurde im hinteren Bereich der Versuchskörper eine Kiesschicht eingebaut, welche auch an den Bestandsankern vorliegt.



**Abb. 42: Planung des Versuchsaufbaues**

Eines der Hauptziele der Untersuchungen war es, das Eindringen des Verfüllmaterials in diese Schicht zu untersuchen. Hierzu wurden einleitend Kleinversuche vorgenommen, bei welchen das Verhalten des Verfüllmaterials bei Kontakt mit Kies erfasst wurde. In zwei transparente zylindrische Versuchskörper (vgl. Abb. 43), an deren Boden ein Kieskörper (Höhe ca. 40 cm) installiert war, wurden hierzu verwendet. Die Versuchskörper wurden dabei vertikal installiert – um ein größtmögliches Eindringen des verwendeten Verfüllmaterials abbilden zu können. Es wurden ein trockener (vgl. Abb. 43 Links) und ein feuchter Kieskörper (vgl. Abb. 43 Rechts) verwendet, um die unterschiedlichen Auswirkungen dieser beurteilen zu können.



**Abb. 43: Vorversuche; Links: trockener Kies; Rechts: feuchter Kies**

Als Verfüllmaterial wurde ein zweikomponentiges Polyurethanharz (TPH Pur-O-Stop HF) verwendet, welches in Doppelkartuschen (ca. 395 ml) abgefüllt war und durch ein Kartuschengerät (manuell und akkubetrieben) eingebracht werden konnte. Die Ergebnisse dieser beiden Vorversuche sind in Abb. 44 zu erkennen.



**Abb. 44: Ergebnisse der Vorversuche; Links: trockener Kieskörper – Eindringtiefe ~27 cm; Rechts: feuchter Kieskörper – Eindringtiefe ~20 cm**

Diese Vorversuche zeigten das Eindringverhalten des Kunststoffmaterials in einen Kieskörper. Dies wurde zusätzlich zu den Anforderungen bei Ankeren durch die vertikale Anordnung des Prüfaufbaues verstärkt. Dabei zeigten sich folgende Ergebnisse:

Die Eindringtiefe bei feuchtem Kies ist geringfügig niedriger als bei trockenem Kies. Dies wird durch die schnellere Reaktion des zweikomponentigen Materials bei Anwesenheit von Wasser begründet.

Generell lag die Eindringtiefe zwischen 20 und 30 cm.

Durch das Aufschäumen des zweikomponentigen Polyurethanharzes traten leichte Hebungen im oberen Bereich der Kieskörper auf, welche durch die ungehinderte Expansion des Verfüllmaterials begründet sind.

Im Anschluss an diese Vorversuche wurden an dem in Abb. 42 planlich dargestellten Versuchskörper Untersuchungen durchgeführt.

Dieser Versuch hatte folgende Untersuchungsziele:

- Findet ein Eindringen des Verfüllmaterials in den Kieskörper statt?
- Ist die geplante Einbringung des Verfüllmaterials über eine Bohrung in der Ankerplatte möglich?
- Findet eine dichte und vollflächige Umschließung der Einbauteile des PZ-Ankers statt?
- Welche Punkte sind bei der Umsetzung einer derartigen Lösung bei eingebauten Bestandsankern zu beachten?

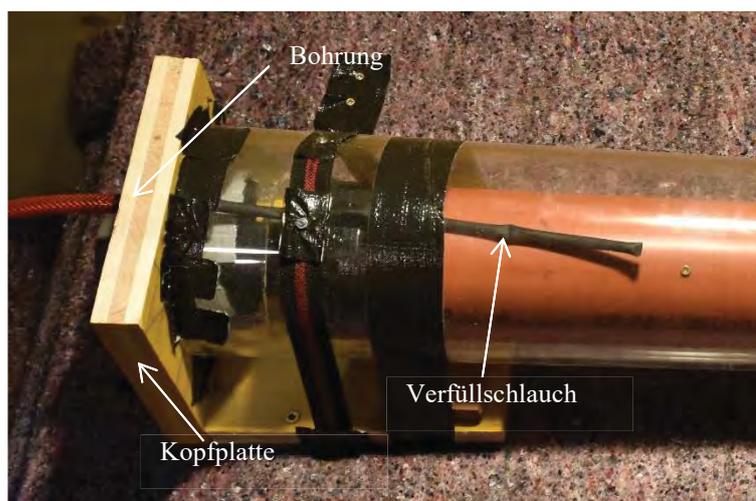
Das Untersuchungsziel (1) – das Eindringen des Verfüllmaterials in den Kieskörper – wurde bereits mit den Vorversuchen (vgl. Abb. 44) untersucht und aufgezeigt.

In Abb. 45 ist der Versuchskörper dargestellt, an dem die Versuche durchgeführt wurden. Dieser besteht aus einem transparenten PMMA Rohr mit einem Durchmesser von 150 mm, in welchem der Kopfbereich eines PZ-Ankers durch PVC-Rohre nachgebildet wurde. Die Abmessungen dieses Aufbaues sind in Abb. 42 zu erkennen. An der „Kopfplatte“, welche durch eine Schalttafel ausgebildet wurde, befindet sich eine Bohrung mit einem Durchmesser von 10 mm in welche ein Verfüllschlauch mit einer Länge von ca. 20 cm entlang der Oberseite des Aufbaues eingeführt wurde. An diesem konnte die Verfülleinrichtung für das zweikomponentige Polyurethanharz angeschlossen werden. Ein Detail zu dieser Ausführung ist in Abb. 46 dargestellt.



**Abb. 45: Versuchskörper vor Versuchsdurchführung**

Für die Verfüllung des Kopfbereiches (ca. 12,5 l) wurde eine Kartusche mit einem Inhalt von ca. 1.250 ml (Schaumfaktor ~ 10) des Materials TPH PUR-O-STOP HF verwendet. Auf den nachfolgenden Abb. 47 und Abb. 48 sind die Ergebnisse der Versuchsdurchführung dargestellt.

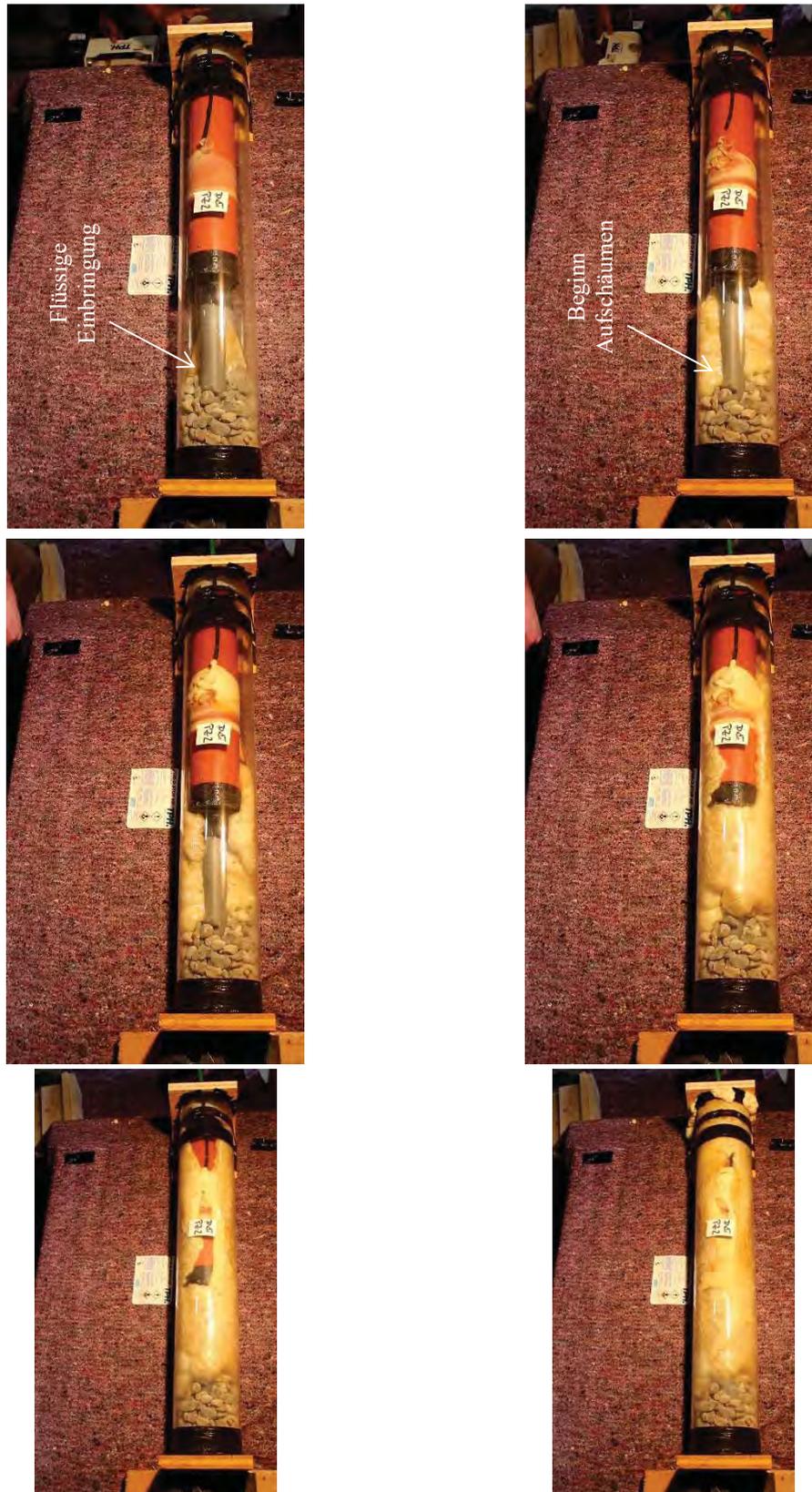


**Abb. 46: Detailansicht Versuchskörper – Kopfbereich**



**Abb. 47:** Bildreihe (quer) der Versuchsdurchführung; links oben: Beginn des Einfüllprozesses; rechts oben: Verfestigung im Fußbereich; links unten: Verdichten des Verfüllkörpers; rechts unten: nach der Versuchsdurchführung

Die Bildreihe in Abb. 47 zeigt, dass durch das Einbringen des zweikomponentigen Polyurethanharzes eine vollflächige und dichte Verfüllung des Ankerkopfes möglich war. Durch die Verarbeitungszeit des gewählten Materials (bis zu 20 sec.) konnte sichergestellt werden, dass ein Einfließen des Materials in den hinteren Kopfbereich (Anschluss an Kieskörper) stattfindet, ehe es zu einem Aufschäumen und damit einer Erhärtung des Materials kommt. Durch diese Eigenschaft des Kunststoffes konnten die beide oben angeführten Ziele (2) und (3) in dieser Versuchsreihe gezeigt und dokumentiert werden.



**Abb. 48:** Bildreihe (längs) der Versuchsdurchführung; links oben: Beginn des Einfüllprozesses; rechts oben: Verfestigung im Fußbereich; Mitte: Verdichtung des Verfüllkörpers; Unten: Verfüllung im Kopfbereich

In Abb. 48 sind die Ergebnisse des Versuches detaillierter zu erkennen. So kann hier das angesprochene Einfließen des Verfüllmaterials im linken oberen Bild erkannt werden, ehe es zum Aufschäumen (rechtes oberes Bild) kommt. Durch ein kontinuierliches Verfüllen konnte so sichergestellt werden, dass eine vollflächige und dichte Verfüllung des Ankerkopfes von unten nach oben stattfand. Dies ist auch in den beiden nachfolgenden Abbildungen des verfüllten Versuchskörpers (nach der Versuchsdurchführung) zu erkennen.

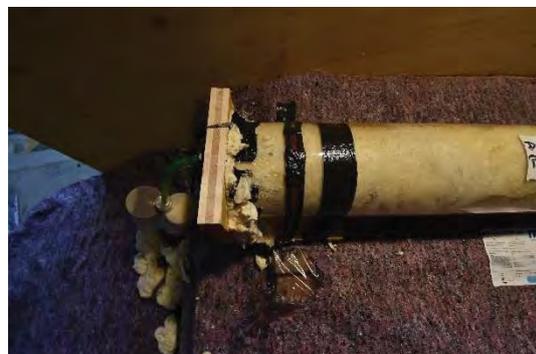


**Abb. 49: Versuchskörper nach Versuchsdurchführung – Vorderseite**



**Abb. 50: Versuchskörper nach Versuchsdurchführung – Unterseite**

Der in Abb. 49 (linker Bildbereich) zu erkennende Schaumüberstand trat auf, da keine ausreichende Abdichtung zwischen der „Kopfplatte“ und dem PMMA Rohr hergestellt wurde.



**Abb. 51: Versuchskörper nach Versuchsdurchführung – Kopfbereich (Überstand entfernt)**

Mit den hier durchgeführten Versuchen konnte gezeigt werden, dass die Verfüllung des Kopfbereiches von Ankern und im Speziellen der hier vorliegenden PZ-Anker mittels eines zweikomponentigen Polyurethanharzes möglich ist. Daraus ergebende Vorteile sind beispielsweise die einfachere Handhabung des Verfüllstoffes, da lediglich ein kartuschenweises Einfüllen des Materials erforderlich ist. Zudem kann durch die schäumende Wirkung des Materials auch ein tieferes Eindringen in Kieskörper (z.B. Drainageschichten) unterbunden werden. Weiters ist die Anwendung von Kunststoffen auch mit Vorteilen wie der Entwicklung einer Zugfestigkeit oder die Beständigkeit gegenüber Säuren bzw. anderen, ansonsten angreifend wirkenden Substanzen, gegeben.

Bei einer praktischen Umsetzung dieser Methode zur Verfüllung des Ankerkopfes bei PZ-Ankern sollten folgende Punkte beachtet werden:

- Die Einfüllbohrung muss im oberen Bereich der Kopfplatte angeordnet sein, um ein gleichmäßiges Einbringen des Verfüllstoffes sicherzustellen. Zudem sollte der Durchmesser dieser Bohrung an die Anforderungen des Verfüllschlauches, sowie die Möglichkeiten der Entlüftung angepasst sein;
- Als Verfüllschlauch sollte ein steifer PVC-Schlauch oder ein PVC-Rohr verwendet werden, um sicherzustellen, dass das Einfüllen des Verfüllmaterials von der Oberseite des Ringraumes aus stattfindet;
- Es sollten ausreichend große Kartuschen ( $\geq 500$  ml) verwendet werden, um ein vollflächiges Verfüllen des Kopfes sicherzustellen;
- Die hier verwendete Menge des Verfüllgutes von 1.250 ml reichte für die im Versuch nachgebildete Geometrie des Ankerkopfes aus;
- Das Einbringen des Verfüllmaterials sollte ohne Unterbrechung stattfinden – hier empfiehlt sich die Anwendung einer mechanisch betriebenen Kartuschenpresse;
- Der Effekte des Aufschäumens wird unter anderem durch die Behinderung des Einfließens des Verfüllgutes durch den angebrachten Kieskörper sichergestellt – bei abweichender Geometrie kann es hier zu einem erheblichen Mehrverbrauch an Verfüllgut kommen;
- Eine Schutzabdeckung auf den Ankerkopf (z.B. aufgeklebte Folie) sollte angebracht werden, um austretendes Material einfach aufzufangen und den Reinigungsaufwand zu reduzieren.

Diese Untersuchungen zeigen zudem, dass die Verwendung von Kunststoffen zur Verfüllung bei Ankern im Kopfbereich eine Möglichkeit darstellen, diesen Bereich dauerhaft und kontrolliert zu verfüllen.

## 4.5. Korrosionsversuche an stabförmigen Zugelementen

Es wurde aufgezeigt, dass Korrosionsschäden in unterschiedlichster Art und Ausprägung vorliegen können, und diese einen großen Einfluss auf das Tragverhalten und die Funktionstauglichkeit von metallischen Bauteilen haben können. Nachfolgend wird die Umsetzung und Durchführung von Versuchen zu Korrosion bei Mikropfählen näher beschrieben. Ziel der Korrosionsnachbildung ist es, den Einfluss von Rissen im Verpresskörper von Mikropfählen auf das Korrosionsverhalten der Stahzzugglieder nachzubilden. Die Versuche werden in den nachfolgenden Kapiteln näher beschrieben und ausgeführt, um als Grundlage für eine Interpretation zu dienen. Teile dieser Ausarbeitung wurden der Masterarbeit von Herrn Hehn (vgl. Hehn 2021a), welche im Zuge des Projektes DAT erstellt wurde, entnommen bzw. entsprechend adaptiert.

### 4.5.1. Versuchsaufbau

Der Versuchsaufbau im Allgemeinen sollte es ermöglichen, Mikropfähle zu spannen und unter Aufrechterhaltung der Last eine Korrosionsschädigung zu simulieren. Dazu wurde ein Ankerprüfrahmen (vgl. Fabian Mikulik 2019) verwendet, welcher als Spannrahmen zur Aufbringung der Last diente. Die hierzu erforderliche Spannpresse wurde am Kopfende (Achse 7 in Abb. 52) des Ankerprüfrahmens positioniert und in ihrer Position gehalten. Der zu prüfende Mikropfahl wurde mit Muffen und Ankerstangen verlängert, sodass er im Fußbereich des Rahmens (Achse 1 in Abb. 52) und nach der Spannpresse mittels Unterlagscheiben und Muttern fixiert werden konnte. Vor dem Verlängern des Mikropfahles wurde eine Korrosionswanne, bestehend aus PVC-Formstücken (Achse 2-6 in Abb. 52) übergeschoben.

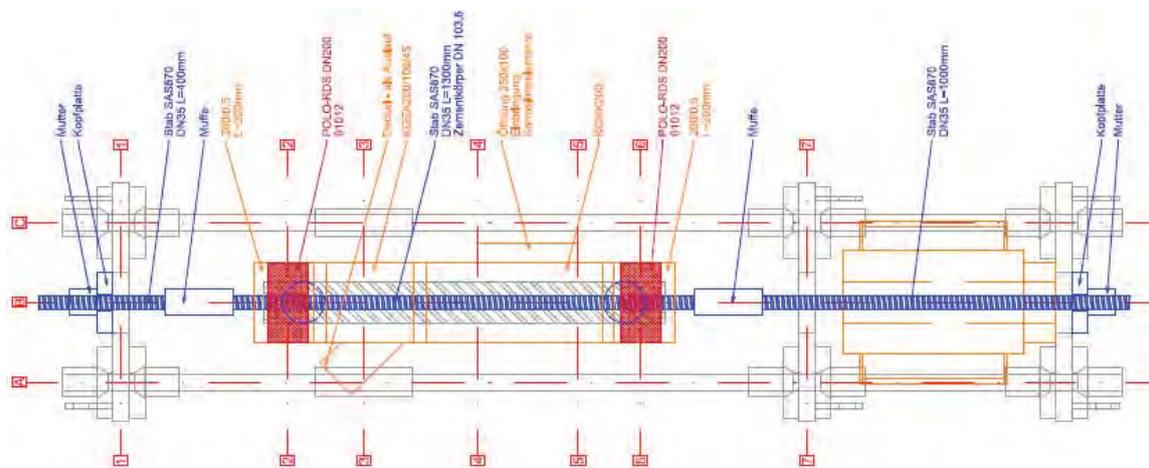


Abb. 52: Darstellung des Versuchsaufbau im Längsschnitt

Nachdem der Mikropfahl im Ankerrahmen fixiert und vorgespannt worden ist, wurden RDS-Abdichtungen an den Achsen 2 und 6 eingesetzt und die Korrosionswanne in der gewünschten Position fixiert. Nachdem die RDS-Abdichtungen angezogen wurden und somit die Korrosionswanne den Prüfkörper dicht abschloss, konnte das Elektrolyt in Form von Salzwasser eingefüllt werden. Anschließend wurden die Opferanoden in Form von zwei Kupferstäbe in die Korrosionswanne gestellt und mit einer Blitzschutzklemme verbunden. Abschließend wurde ein Batterieladegerät auf dem Ankerprüfrahmen angebracht und der Pluspol mit der Opferanode (Kupferstangen), der Minuspol mit der Bewehrung (in Form des Stabes), verbunden.

Der hier dargestellte Versuchsaufbau ähnelt anderen Aufbauten, welche bereits zur künstlichen Nachbildung von Korrosionsschäden an Bewehrungselementen oder anderen metallischen Bauteilen verwendet wurden. Vertiefte Ausführungen zu diesen sind in Rebhan (2019), Rebhan et. al. (2019) und Wöls (2020) zu finden.

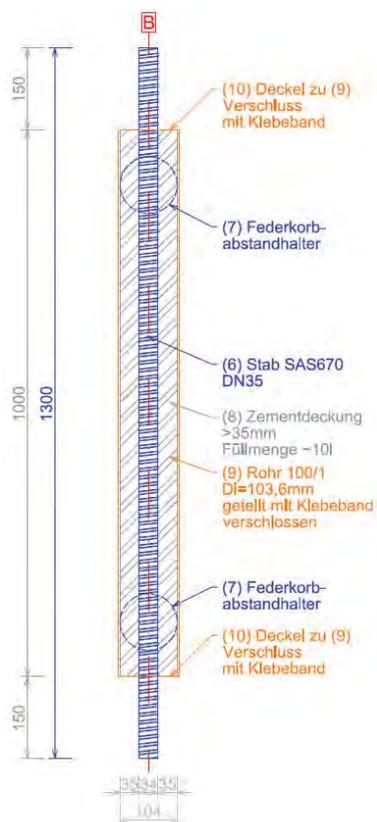
#### **4.5.2. Versuchskörper**

Zur Durchführung der in Kapitel 4.5.1 beschriebenen Versuche wurde eine Reihe an Versuchskörpern hergestellt. Diese bestanden jeweils aus einem Stab mit einem Durchmesser von 35 mm, welcher von einem Verpresskörper mit einem Durchmesser von 100 mm ummantelt war. Um unterschiedliche Korrosionsschutzsysteme in diesem Versuchsaufbau untersuchen zu können, wurden blanken Stäbe, verzinkte Stäbe und doppelte korrosionsgeschützte Stäbe für die Herstellung der Versuchskörper verwendet.

Für alle Versuchskörper wurden die folgenden Baustoffe verwendet:

- Schalung PVC-Rohr DN100,
- Bewehrung ANP SAS 670 DM35
- flächige Abstandhalter aus Plastik,
- Ankermörtel RÖFIX Creteo Inject CC795

Die Herstellung der Versuche wurde stehend vorgenommen, um ein einfacheres Einfüllen des Verpressgutes (Ankermörtel) zu ermöglichen und eine einfache Lagerung der Versuchskörper (vgl. Abb. 53) sicherzustellen. Nach dem Aushärten der Versuchskörper wurden die Schalung (PVC-Rohr) entfernt, überstehende Zementreste wurden entfernt und die Versuchskörper wurden in den Versuchsrahmen eingebaut. Bei einigen Versuchskörpern wurde zudem eine künstliche Schädigung – der Zementsteinüberdeckung bzw. der Korrosionsschutzmechanismen am Stab (Verzinkung) – hergestellt, um deren Einfluss auf die künstliche Korrosionsschädigung zeigen zu können.



**Abb. 53:** Herstellung der Versuchskörper; Links: Skizze; Rechts: Betonage der Versuchskörper

Eine genaue Darstellung und Aufbereitung der verwendeten Versuchskörper sind im nachfolgenden Kapitel angeführt.

#### 4.5.3. Versuchsdurchführung

Zur Versuchsdurchführung kamen drei Chargen zum Einsatz. Charge 1 (DAT\_VK\_01 bis DAT\_VK\_03) und Charge 2 (DAT\_VK\_04 bis DAT\_VK\_07) wurden im Labor hergestellt. Die Charge 3 (DAT\_VK\_08 und DAT\_VK\_09) wurde durch die ANP-Systems GmbH unter Verwendung eines Verpressgutes (und nicht dem unter Kapitel 4.5.2 angeführten Anker Mörtel) hergestellt. Nachfolgend werden die Randbedingungen der einzelnen Chargen und der dazugehörigen Versuchskörper angeführt.

##### Charge 1

Die Versuchskörper der Charge 1 wurden mit der gleichen Masse Anker Mörtel (eine Mischung) hergestellt. Sie konnten mindestens 14 Tage im Stehen aushärten und wurden dabei nicht weiter nachbehandelt. Nach dem Aushärten wurden sie aus den Schalrohren geschnitten. Vor dem Einbau der Versuchskörper wurden die Zementsteinummantelungen der

Versuchskörper entsprechend behandelt. Hierbei wurden bestimmte Schädigungen innerhalb des Verpresskörpers künstlich hergestellt.

DAT\_VK\_01 wurde nicht weiter behandelt und verblieb als Vollstab ohne künstliche Schwächungen der Zementsteinummantelung;

DAT\_VK\_02 (siehe Abb. 54 links) wurde mit zwei parallelen horizontalen Schnitten geschädigt. Die Distanz der Schnitte zueinander betrug etwa 10 cm, die verbleibende Betondeckung in den Schnitten circa 5 mm. Die Schnitte wurden mittig im Stab platziert, um einen Abstand zu den Abstandhaltern zu haben;

DAT\_VK\_03 (siehe Abb. 54 rechts) wurde mit einem keilartigen Einschnitt geschädigt. Der Einschnitt hatte an der Oberfläche eine Stärke von etwa 15 mm und im Körper von etwa 5 mm. Er wurde etwa in Stabmitte platziert, um einem Abstand zu den Abstandhaltern zu haben.



**Abb. 54:** Künstliche Schädigungen an der Zementsteinüberdeckung; Links: DAT\_VK\_02 – zwei parallele Schnitte; Rechts: DAT\_VK\_03 – keilartiger Einschnitt

## Charge 2

Die Versuchskörper DAT\_VK\_04 bis DAT\_VK\_07 der zweiten Charge wurden ebenfalls aus einer Masse hergestellt und konnten mindestens 5 Tage aushärten. An diesen Versuchskörpern wurde keine Schädigung der Zementsteinummantelung hergestellt, sondern es wurden neben blanken Stäben auch verzinkte Stäbe verwendet.

DAT\_VK\_04 wurde nicht weiter behandelt und verblieb als verzinkter Vollstab ohne künstlich Schwächungen, ähnlich zu Versuchskörper DAT\_VK\_01;

DAT\_VK\_05 wurde außen nicht weiter behandelt. Es erfolgte aber ein Abschleifen der Verzinkung des Bewehrungsstabes im Bereich zwischen den Rippen auf einer Seite;

DAT\_VK\_06 wurde nicht weiter behandelt und verblieb als Vollstab ohne künstliche Schwächungen. Der Versuchskörper wurde durch Umsetzen der Korrosionswanne in zwei Abschnitten korrodiert. Dabei wurde die Korrosionswanne zuerst am unteren Ende des Versuchskörpers angebracht und nach 12 h um die Hälfte nach oben verschoben. Der zweite Abschnitt befand sich ebenfalls 12 h in der Korrosionswanne;

DAT\_VK\_07 wurde zentrisch ohne Abstandhalter hergestellt.

### Charge 3

Die Versuchskörper DAT\_VK\_08 und DAT\_VK\_09 wurden durch die ANP – Systems GMBH hergestellt und geliefert.

DAT\_VK\_08 wurde mit Ripprohr hergestellt und wurde ohne Schädigung als Vollstab eingebaut. Dieser VK verblieb ca. 8 h in der Korrosionswanne;

DAT\_VK\_09 wurde ohne Ripprohr hergestellt und ohne Schädigung als Vollstab eingebaut.

### Zusammenfassung der Versuchskörper

Nachfolgend werden die angeführten Chargen bzw. Versuchskörper in dieser Übersicht dargestellt.

**Tab. 1: Übersichtstabelle der Versuchskörper**

Bez.	Vollstab Blank	Vollstab Verzinkt	Schädigung Zementstein	Schädigung Verzinkung	Ripprohr	Anmerkung
DAT_VK_01	X					-
DAT_VK_02	X		X			2 Schnitte
DAT_VK_03	X		X			Keil
DAT_VK_04		X				-
DAT_VK_05		X		X		Abschleifen
DAT_VK_06	X					Wanne
DAT_VK_07	X					Abstandhalter
DAT_VK_08	X				X	-
DAT_VK_09	X					-

#### 4.5.4. Versuchsergebnisse

Bei der Versuchsauswertung wurden die gleichen Schritte für alle Versuchskörper wiederholt und werden hier anhand der Versuchskörper DAT\_VK\_01 und DAT\_VK\_03 kurz erläutert. Bei der Versuchsauswertung wurde darauf geachtet, ob die Risse im Betonkörper beim oder während des Spannens entstanden sind, oder erst während dem Entspannen bzw. dem Ausbau der Versuchskörper. In Abb. 55 werden zwei Risse des Versuchskörpers DAT\_VK\_01 dargestellt.



**Abb. 55:** Links: Riss entstanden während dem Entspannen; Rechts: Risse welche während dem Spannen entstanden sind und daher auch Korrosionsablagerungen aufwiesen

Alle Risse wurden mit einem Rissbreitenlineal vermessen und dokumentiert. Dabei wurden den Querrissen Buchstaben und den Längsrissen Buchstaben mit Nummern vergeben. Ab Versuchskörper DAT\_VK\_04 wurde auf eine Bestimmung der Rissbreite verzichtet. Nach der Aufnahme der Risse wurden Stellen mit einem besonders hohen Grad an Rost bzw. Korrosionsprodukten an der Oberfläche oder wie bei den Versuchskörpern DAT\_VK\_02 und DAT\_VK\_03 freigelegt. Abb. 56 zeigt die Stellen der Versuchskörper, welche freigelegt wurden.



**Abb. 56:** Links: DAT\_VK\_01; Mitte: DAT\_VK\_02; Rechts: DAT\_VK\_03

Das Freilegen erfolgte durch das Einschneiden rund um den genauer betrachteten Bereich und dem Entfernen des Verpressgutes mit Hand. In Abb. 57 werden die Schritte anhand von DAT\_VK\_02 dargestellt.



**Abb. 57:** Links: nach dem Ausbau und vor der Querschnittsfreilegung; Mitte: nach dem Einschneiden des Betonkörpers; Rechts: nach dem händischen freilegen des Querschnittes

Nach der Dokumentation derartiger Korrosionsstellen, wurde der restliche Verpresskörper händisch von der Bewehrung getrennt. In der nachfolgenden Abb. 58 wird der DAT\_VK\_01 vor und nach der Versuchsauswertung dargestellt.



**Abb. 58:** DAT\_VK\_01; Oben: vor der Versuchsauswertung; Unten: Teilausschnitt nach der Versuchsauswertung

### DAT\_VK\_01

Bei DAT\_VK\_01 sind während des Entspannens teilweise sehr große Längsrisse (vgl. Abb. 55) entstanden. Die Breite der Längsrisse ging dabei von 0,10 mm bis 1,00 mm. Querrisse wurden in einer Breite von 0,10 mm bis 0,30 mm gemessen. Der Versuchskörper wirkte auf den ersten Blick nicht bis schwach korrodiert (vgl. Abb. 58 oben). Aufgrund der starken Ansammlung von Rost im Bereich der Risse D, P und A1 wurde dieser Bereich freigelegt. Dabei wurde ein Abstandhalter angeschnitten. Nach der Entfernung des Mörtels in diesem Bereich wurde ersichtlich, dass sich der Riss A1 entlang des Abstandhalters fortgepflanzt hatte und es zu einer Elektrolyt-Einlagerung unter dem Abstandhalter gekommen ist. Nach Dokumentation dieser Stelle wurde der restliche Mörtel vom Stab getrennt. Dabei kam zum Vorschein, dass es am Stahlstab über die ganze Länge des Betonkörpers zu Korrosion gekommen ist. In Abb. 59 und Abb. 60 ist die Versuchsauswertung ersichtlich.



**Abb. 59:** Links: Angeschnittene Abstandhalter und leicht lösbarer Mörtel, Mitte: Elektrolyteinlagerung unter dem Abstandhalter, Rechts: Fortpflanzung des Risses A1 entlang des Abstandhalters



**Abb. 60:** Links: Korrosion und Rissbild im Bereich eines Abstandhalters, Mitte: Korrosion durch Einlagerung des Elektrolytes in den Versuchskörper, Rechts: Korrosionserscheinungen in der Auflagefläche des Abstandhalters

## DAT\_VK\_02

Bei DAT\_VK\_02 konnten schon während des Korrosionsprozesses eine Ansammlung von Korrosionsprodukten im Bereich der Querschnittsschwächungen beobachtet werden. Bei den Rissen im Betonkörper konnte beobachtet werden, dass manche Risse, unabhängig von der Breite zu einer stärkeren Korrosion beigetragen haben (vgl. Abb. 61). Die Längsrissbreite betrug 0,10 mm bis 0,90 mm, bei den Querrissen 0,10 mm bis 1,00 mm. Der Längsriss B1 (vgl. Abb. 61) wies eine Breite von 0,20 mm bis 0,30 mm auf. Nach dem Einschneiden des Betonkörper, ließ sich der Mörtel händisch entfernen. Dadurch wurde die Korrosion, welche durch den Riss B1 entstanden war, freigelegt (vgl. Abb. 61). Nach dem Entfernen des Mörtels im kompletten Schädigungsbereich wurde ersichtlich, dass es im Bereich der Querschnittsschwächungen zu einer verstärkten Korrosion gekommen war (vgl. Abb. 62). Nach Dokumentation dieser Bereiche wurde der restliche Mörtel, mit Ausnahme des oberen Abstandhalters, welcher nicht im Bereich der Korrosionswanne war, vom Stab getrennt. Dieser Bereich konnte aufgrund der geringen Rissbreiten nicht vom Stab getrennt werden. Die Risse in diesem Bereich wiesen keine Korrosion an der Oberfläche auf und hatten sich entlang der Oberfläche des Abstandhalters fortgepflanzt (vgl. Abb. 62). Der untere Abstandhalter ließ sich per Hand entfernen (vgl. Abb. 62). Beim Freilegen des restlichen Bewehrungsstabes kam zum Vorschein, dass er über die gesamte Länge des Verpresskörpers korrodiert war. In Abb. 61 und Abb. 62 ist die Versuchsauswertung ersichtlich.



**Abb. 61:** Links: Rissbild des Versuchskörpers, Mitte: Längsriß B1, Rechts: Korrosion durch Längsriß B1



**Abb. 62:** Links: Einfluss der Querschnittsschwächung auf die Korrosion, Mitte: Oberer Abstandhalter, Rechts: Unterer Abstandhalter

### DAT\_VK\_03

Bei DAT\_VK\_03 konnte schon während des Korrosionsvorganges eine Ablagerung von Korrosionsprodukten im keilartigen Einschnitt beobachtet werden (vgl. Abb. 63). Der Einschnitt wurde von den Längsrissen A1 und in Fortsetzung B1 rechtwinklig geschnitten. Der Querriss E durchtrennte umlaufend den Betonkörper. Der Versuchskörper wirkte von außen schwach korrodiert (vgl. Abb. 63). Die Längsrisbreite betrug 0,10 mm bis 0,40 mm, bei den Querrissen 0,10 mm bis 1,10 mm im Bereich des oberen Abstandhalters. Nach der Dokumentation der Risse wurde ein Querschnitt im Bereich des Einschnittes freigelegt. In diesem Bereich lag der Längsriß A1 und B1 (vgl. Abb. 63) mit einer Breite von 0,10 mm bis 0,40 mm. Nach dem Einschneiden des Betonkörper, ließ sich der Verpresskörper händisch entfernen. Dabei wurde ersichtlich, dass der Bereich des Einschnittes stärker korrodiert hatte (vgl. Abb. 64), als die danebenliegenden Bereiche. Anschließend wurde auch hier wieder der Verpresskörper vom Stab entfernt, mit Ausnahme des Bereiches des oberen Abstandhalters, welcher außerhalb der Korrosionswanne war. Dieser Bereich konnte aufgrund der geringen Rissbreiten nicht vom Stab getrennt werden. Die Risse in diesem Bereich wiesen keine Korrosion an der Oberfläche auf und hatten sich entlang der Oberfläche des Abstandhalters fortgepflanzt (vgl. Abb. 64). Der untere Abstandhalter ließ sich per Hand entfernen (vgl. Abb. 64). Beim Freilegen des restlichen Bewehrungsstabes kam zum Vorschein, dass er über die gesamte Länge des Betonkörpers korrodiert hatte.



**Abb. 63:** Links: Ablagerungen im Bereich des Einschnittes, Mitte: DAT\_VK\_03 nach der Korrosion, Rechts: Einschnitt während des Freilegens



**Abb. 64:** Links: Korrosion im Bereich der Schwächung, Mitte: Rissbild beim oberen Abstandhalter, Rechts: Unterer Abstandhalter

#### DAT\_VK\_04

Bei DAT\_VK\_04 konnte von außen kaum Korrosion beobachtet werden. Es konnten auch keine „besonderen“ Stellen definiert werden. Der Versuchskörper wies zudem kaum Risse auf. Daher wurde entschieden den Betonkörper abzustemmen um den verzinkten Bewehrungsstab freizulegen. Dabei wurden mehrere korrodierte Stellen freigelegt. Diese korrodierten Stellen sind in Abb. 65 ersichtlich. Der Bewehrungsstab hatte außer an diesen Stellen nicht korrodiert.



**Abb. 65:** Links: Ganzer Bewehrungsstab mit Meterstab, Mitte: Korrosion mittig im Stab, Rechts: Einfluss Abstandhalter

#### DAT\_VK\_05

DAT\_VK\_05 wies von außen eine deutlich stärkere Korrosion auf als DAT\_VK\_04. Es waren wie bei DAT\_VK\_04 kaum Risse ersichtlich und es hat sich nicht bei jedem Riss Korrosionsprodukt abgelagert. Es wurde daher entschieden, den Betonkörper abzustemmen um den Bewehrungsstab freizulegen. Dabei wurden vor allem im Bereich des Querrisses B Korrosionsschäden am Bewehrungsstab festgestellt, wie in Abb. 66 ersichtlich. Des Weiteren wurde festgestellt, dass durch das Aufschrauben der Muffe die Verzinkung beschädigt wurde wie in Abb. 67 ersichtlich.



**Abb. 66:** Links: kompletter Versuchskörper mit Meterstab; Mitte: Querriss B mit Korrosionsablagerung; Rechts: Korrosion am Bewehrungsstab



**Abb. 67:** Beschädigung der Verzinkung im Bereich der Muffe

#### DAT\_VK\_06

DAT\_VK\_06 wirkte von außen stark korrodiert. Beim Entspannen sind teils sehr große Längsrisse entstanden. Dadurch, dass die Korrosionsablagerungen über den gesamten Verpresskörper verteilt waren, wurde entschieden den Bewehrungsstab frei zu stemmen. Dabei wurde ersichtlich, dass es durch das Umsetzen der Korrosionswanne zu keiner wesentlich verstärkten oder verminderten Korrosion in den Bereichen gekommen ist. Der Bewehrungsstab hat allerdings fast über die gesamte Länge korrodiert, auch in Bereichen wo keine Korrosionswanne im Einsatz war. In Abb. 68 sind die Korrosionsabschnitte nach dem Ausbau und der freigelegte Bewehrungsstab dargestellt.



**Abb. 68:** Links: Zweiter Korrosionsabschnitt; Mitte: DAT\_VK\_06 nach dem Ausbau; Rechts: Freigelegter Bewehrungsstab

### DAT\_VK\_07

Bei diesem Versuchskörper konnten starke Korrosionsablagerungen beobachtet werden. DAT\_VK\_07 wurde während des Ausbaues aus der Korrosionswanne komplett zerstört. Dadurch konnten keine Dokumentation der Rissbreiten bzw. der äußeren Erscheinungsformen vorgenommen werden. Der Bewehrungsstab hat über die gesamte Länge mit verschiedener Intensität korrodiert. Ein Zusammenhang mit der Rissbreite kann allerdings nicht rekonstruiert werden. Das Ergebnis der Korrosionsnachbildung ist in Abb. 69 ersichtlich.



**Abb. 69:** Links: Unteres Ende mit verbleibenden Betonkörper; Mitte: Mitte Stab mit Korrosionsschäden; Rechts: Oberes Stabende

### DAT\_VK\_08

Bei DAT\_VK\_08 wurde nach acht Stunden der Versuch abgebrochen. Grund dafür war, dass sich die Spannung über die Dauer nicht verändert hat und bei 0 Ampere verharrete. In der äußeren sichtbaren Schicht des Verpresskörpers konnten mehrere Querrisse während des Spannens beobachtet werden. Der Austritt von Korrosionsprodukten oder ähnlichem konnte nicht festgestellt werden.

### DAT\_VK\_09

Bei diesem Versuchskörper konnte ein identisches Verhalten zu DAT\_VK\_01 erkannt werden. Auf eine Dokumentation dieser wurde daher verzichtet.

#### 4.5.5. Zusammenfassung der Versuche

Mit den gezeigten Versuchsergebnissen wurde versucht, Erkenntnisse aus der Durchführung bzw. der Dokumentation einer künstlichen Korrosionsnachbildung bei Mikropfählen zu zeigen. Dabei wurden unterschiedliche Arten des Korrosionsschutzes sowie eine Schwächung der Korrosionsschutzmaßnahmen simuliert und durch eine künstliche Beaufschlagung mit einer Korrosionsbeanspruchung untersucht. In nachfolgendem Kapitel findet nun eine gesammelte Auswertung und darauf aufbauende Interpretation dieser Versuchsergebnisse statt.

#### 4.5.6. Interpretation der Versuchsergebnisse

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Versuche zur künstlichen Korrosion gesammelt betrachtet und interpretiert. Die Interpretation der Versuchsergebnisse unterteilt sich in die Bereiche der Risse, der Korrosionsschutzmaßnahmen und sonstigen Anmerkungen zu den durchgeführten Versuchen. Dies soll zum einen dazu dienen, eine gesamtheitliche Aussage zu Korrosionsschutzmaßnahmen bei Mikropfählen sowie den dafür verwendeten Systemen zu ermöglichen. Zum anderen sollen dabei auch Effekte aus den Untersuchungen und der Versuchsdurchführung eingearbeitet werden, welche eine Weiterverwendung der Ergebnisse und eine Weiterentwicklung dieser Versuchsmethode ermöglichen sollen.

##### **Einfluss der Rissbildung**

Beim Spannen der Versuchskörper konnte beobachtet werden, dass Querrisse (orthogonal auf die Stabachse) entlang des gesamten Verpresskörpers entstanden. Im Bereich von Querschnittsschwächungen, lagen diese gehäuft vor. Auch im Nahbereich der Abstandhalter sind umlaufende Querrisse aufgetreten. Diese haben sich entlang der Abstandhalter bis zur Bewehrung (dem Stab) fortgepflanzt. Längsrisse hingegen sind meist im Zuge des Entspannens – und den damit verbundenen mechanischen Einwirkungen auf den Stab - entstanden. Während des Spannvorgangs konnten diese nicht wahrgenommen bzw. erkannt werden. Die beim Entspannen entstandenen Längsrisse dürften auf die Vergrößerung des Volumens, welches durch die Korrosion eines Metalls stattfindet und auf die Stauchung durch die Entspannung zurückzuführen ist. Diese Längsrisse waren meist deutlich größer als die beim Spannen entstandenen Querrisse. Auch die flächige Korrosion des Bewehrungsstabes (vgl. Abb. 70) dürfte die Haftkraft zwischen Mörtel und Bewehrung verringert haben.



**Abb. 70: Korrosion über die gesamte Länge der Korrosionswanne**

In Abb. 71 sind Querrisse beim Spannen und ein Längsriß nach dem Entspannen schematisch abgebildet.



**Abb. 71:** Links: Querrisse beim Spannen; Rechts: Längsriss nach dem Ausbau

Durch diese Erkenntnisse kann darauf geschlossen werden, dass Querrisse im Verpresskörper zur Korrosion bei zentrisch belasteten Mikropfählen beitragen, Längsrisse durch Korrosion und Belastungswechsel entstehen und somit bei häufigerem Lastwechsel ebenfalls zur verstärkten Korrosion beitragen.

Generell konnte im Zuge der Versuchsdurchführung erkannt werden, dass bei allen Rissen bzw. Querschnittsschwächungen, welche bis zur Oberkante des Stabes reichten, Korrosionsprodukte zufolge der künstlichen Korrosionseinwirkung zu erkennen waren. Wie in Abb. 72 dargestellt, lagen diese in Abhängigkeit der Rissbreite – und damit der freiliegenden Metalloberfläche in unterschiedlichen Ausprägungen vor.



**Abb. 72:** Beispiele für Korrosionsprodukte

### **Einfluss von Korrosionsschutzmaßnahmen**

Der Einfluss von Korrosionsschutzmaßnahmen kann durch einen Vergleich der Chargen deutlich gemacht werden. Bei Charge 1, blanke Stäbe (ohne Verzinkung) waren an jedem Riss Korrosionsprodukte zu erkennen. Im direkten Einflussbereich der Risse war zudem eine verstärkte lokale Korrosion – in Form einer Lochfraßkorrosion bzw. einer Korrosionsmulde (vgl. Abb. 64 Links) zu erkennen. Des Weiteren hat sich die Korrosion, ausgehend von diesen

Rissen, entlang des Bewehrungsstabes ausgebreitet und führte zu einer Korrosion des ganzen Stabes, welcher sich in der Korrosionswanne befand, wie in Abb. 70 ersichtlich. Bei Charge 2 wurde der Versuch auch mit zwei Versuchskörpern mit Verzinkung durchgeführt. Bei diesen Versuchskörpern konnte fast keine Korrosion an der Oberfläche des Stabes beobachtet werden. Die wenigen korrodierten Bereiche bei DAT\_VK\_04 (vgl. Abb. 65) und DAT\_VK\_03 (vgl. Abb. 66) sind auf Beschädigungen der Verzinkung zurückzuführen. Bei diesen Stellen kam es zu einer lokal tieferen Korrosion, wie in Abb. 73 ersichtlich.



**Abb. 73** Lochfraßkorrosion bei DAT\_VK\_04

### **Sonstige Anmerkungen zu den Versuchen**

Ein weiteres Ergebnis dieser Versuchsreihe ist, dass flächige Abstandhalter zwei Problematiken aufweisen. Erstens pflanzen sich Risse an ihrer glatten Oberfläche sehr gut bis zur Bewehrung fort. Zweitens kann es beim Ausinjizieren oder Betonieren dazu kommen, dass sich Luftporen zwischen Abstandhalter und Bewehrung und/oder an der Unterseite des Abstandhalters bilden. Beide Problematiken bieten die Möglichkeit, dass sich ein Elektrolyt im Verpresskörper sammeln kann.

Die Problematik der Lufteinschlüsse sowie der Blasenbildung konnte generell bei der Herstellung der Versuchskörper erkannt werden. Trotz der vertikalen Herstellung der Verpresskörper, sowie einer ausreichenden Verdichtung, mittels Hammerschlägen auf das Schalrohr, konnten einzelne Luftporen oder Verdichtungsnerster (vgl. Abb. 74) nicht beseitigt werden. Wenn diese oberflächennahe auftraten, ermöglichten diese eine rasche und tiefreichendere Rissbildung, wohingegen stabnahe Luftporen eine Ansammlung von Korrosionsprodukten ermöglichten.



**Abb. 74:** Beispiele für Korrosionsprodukte in Luftporen bzw. Verdichtungsnestern

### **Zusammenfassende Interpretation der Versuche**

Mit dem beschriebenen Versuchsaufbau war es möglich, die Effekte einer Korrosionsschädigung bei unterschiedlichen Korrosionsschutzmaßnahmen – genauere Ausführungen hierzu sind in der Arbeit von Dold (2021) zu finden – nachzubilden und deren Einfluss auf das Tragelement (Zugglied) zu simulieren. Ein Rückschluss auf die tatsächliche korrosionsbedingte Schädigung eines Mikropfahles ist hiermit jedoch nur bedingt möglich. Wie bereits angeführt, gibt es eine Vielzahl an Einwirkungen, Ursachen und Einflussgrößen, welche das Fortschreiten einer Korrosion beeinflussen bzw. diese beschleunigen oder abschwächen. Generell konnte jedoch die Korrosionsschutzeigenschaft der drei betrachteten Korrosionsschutzmaßnahmen Zementsteinüberdeckung, Verzinkung und doppelter Korrosionsschutz gezeigt werden. Zudem konnten einige Effekte bei der Versuchsdurchführung (z.B. Abstandhalter, Längsrisse zufolge des Ausbaues) beobachtet werden, welche einer weiteren Untersuchung und Betrachtung erfordern.

## 4.6. Erfassung der Rissbildung bei Mikropfahlsystemen

Nachfolgend wird ein Versuchsaufbau für die Erfassung der Rissbildung bei zementummantelten Mikropfählen näher erläutert. Dafür wird einleitend das Ziel der Laborversuche beschrieben sowie die dafür verwendeten Versuchskörper und die Prüfkonstruktion detailliert erklärt. Darauffolgend werden Ergebnisse einer durchgeführten Voruntersuchung dargestellt und aufbereitet. Abschließend werden die Ergebnisse der Versuchsdurchführung veranschaulicht. Teile dieser Ausarbeitung wurden der Masterarbeit von Herrn Dold (vgl. Dold 2021), welche im Zuge des Projektes DAT erstellt wurde, entnommen bzw. entsprechend adaptiert.

### 4.6.1. Ziel des Laborversuchs

Der Grundgedanke dieser Versuche ist es, mit Hilfe eines Laborversuches eine Aussage über das Rissbild sowie das Rissverhalten von Verpresskörpern bei geotechnischen Zugelementen treffen zu können. Die Laborversuche erfolgten mittels Versuchskörpern, welche in einem Prüfraumen eingebaut wurden. Der Rahmen ermöglichte eine zentrische Zugbeanspruchung sowie die Beaufschlagung der Versuchskörper durch eine Biegebeanspruchung mittels Querkrafteinleitung. Durch die Testung dieser Prüfkörper werden die Risse, welche sich nach den Grundlagen des Betonbaus, zuerst an einzelnen Stellen entlang des Prüfkörpers ausbilden und nach der abgeschlossenen Rissbildung mit zunehmender Kraft vergrößern, unter zwei verschiedenen Gesichtspunkten betrachtet. So werden einerseits die an der Oberfläche erkennbaren Risse (bzw. deren Rissbreite) dokumentiert und fotografisch festgehalten, andererseits werden computertomographische Scans der Prüfkörper unter unterschiedlichen Beanspruchungsniveaus vorgenommen und dabei die im Inneren des Verpresskörpers stattfindende Rissentwicklung analysiert.

Dies soll neben der Bestimmung der Anwendbarkeit einer Computertomographie zur Rissbeobachtung, vor allem die Frage beantworten, ob mittels einfachen analytischen Methoden eine maximale Rissbreite bestimmt werden kann und inwiefern sich die Rissbilder für verschiedene Korrosionsschutzmaßnahmen unterscheiden. Dafür werden im Zuge der Versuche normativ definierte Festigkeitsprüfungen von Rückstellproben zu sämtlichen Probekörpern durchgeführt, um mit Hilfe der Festigkeitswerte des Verpressguts, des Stahlzugglieds und den Erkenntnissen der oberflächennahen Rissbreite sowie der Rissentwicklung im Inneren des Verpresskörpers die eben formulierte Fragestellungen bestmöglich beantworten zu können.

#### 4.6.2. Versuchskörper

Die für diese Untersuchungen verwendeten Versuchskörper wurden unter Laborbedingungen hergestellt und ähneln somit, vor allem hinsichtlich ihrer Geometrie und Oberfläche, nur bedingt einem real im Baugrund hergestellten, mit einem mehr oder weniger unregelmäßig mittels Mörtel umhüllten Zugelement. Wobei bei den hier vorliegenden Versuchskörpern von einer höheren und gleichmäßigeren Qualität des Verpressguts und auch einer gleichmäßigeren Überdeckung der Zugelemente ausgegangen werden kann, als dies unter baupraktischen Bedingungen der Fall ist. Die für die Laborversuche herangezogenen Prüfkörper können in drei unterschiedliche Chargen (V1, V2 und V3) mit unterschiedlichen Herstellungsdaten unterteilt werden, wobei die erste Charge lediglich die Herstellung eines einzelnen Prüfkörpers mit der Prüfkörperbezeichnung V1\_DAT\_GCP\_01 beinhaltet, welcher ausschließlich für Voruntersuchungen und zur Überprüfung der Funktionstüchtigkeit des Prüfrahmens herangezogen wurde. Dadurch konnte in weiterer Folge ein reibungsloser Ablauf der darauffolgenden Untersuchungen garantiert werden. Daher werden in den nachfolgenden Kapiteln nur zwei der Chargen (V2\_DAT\_XXX\_Y & V3\_DAT\_XXX\_Y) für eine qualitative Untersuchung herangezogen.

Untersucht und getestet wurden zwei unterschiedliche Arten von Korrosionsschutzmaßnahmen bei Mikropfählen. Hierbei wurden zum einen Mikropfähle mit einfachem Korrosionsschutz (SCP – GCP) und zum anderen Mikropfähle mit doppeltem Korrosionsschutz, in Form eines DCP untersucht. Quer- und Längsschnitte beider Varianten sind in Abb. 75 dargestellt. Für den Prüfkörperaufbau wurde das grundlegende System ANP – Mikropfahl SAS 550 nach der Zulassung der Firma ANP-SYSTEMS gewählt (vgl. ANP - SYSTEMS GMBH 2016). Als Tragglied des Versuchskörpers wurde ein Betonstahl SAS 550 (Vollstab) mit Gewinderippen (kurz: GEWI) und einem Nenndurchmesser von 28 mm eingesetzt. Das Verpressgut wurde in die stehende Schalung mit einem Innendurchmesser DN100 eingepresst. Die Zentrierung der Schalung zum Tragglied ohne innere Abstandhalter. Resultierend aus der Schalform ergibt sich, wie in Abb. 75 ersichtlich, ein kreisförmiger Verpresskörper mit einer Stärke von 36 mm um das Tragglied. Die Länge des Verpresskörpers war mit 600 mm gewählt, um das Gewicht sowie die Gesamtabmessungen des Prüfkörpers und somit der gesamten Prüfkonstruktion niedrig zu halten. Dieser Faktor war, wie auch im nachfolgenden Kapitel beschrieben, im Sinne der Prüfbarkeit in einem Computertomographen ein grundlegender Aspekt bei der Versuchsplanung.

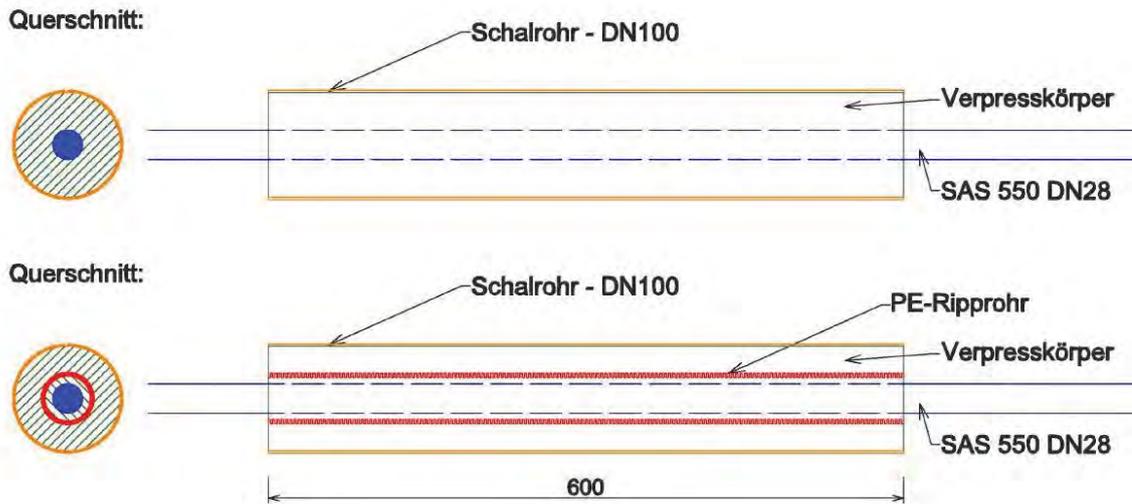


Abb. 75: Schematische Prüfkörper für Laborversuche GCP (oben) – DCP (unten)

#### 4.6.3. Prüfraumen und Pressen

Neben dem Versuchskörper wurde auch ein eigens geplanter und angefertigter Prüfraumen (Abb. 76) eingesetzt, welcher einerseits die entstehenden Belastungen durch die Spannvorgänge bei den Laborprüfungen aufnehmen konnte, aber auch in Dimension und Gewicht den an die Konstruktion gestellten Anforderungen entsprach. Eine Voraussetzung für den Scanvorgang in einem Computertomographen war eine unkomplizierte Mobilität der gesamten Apparatur sowie die Möglichkeit des Anhebens und lagegenauen Positionierens des Versuchsaufbaus auf der CT-Liege.

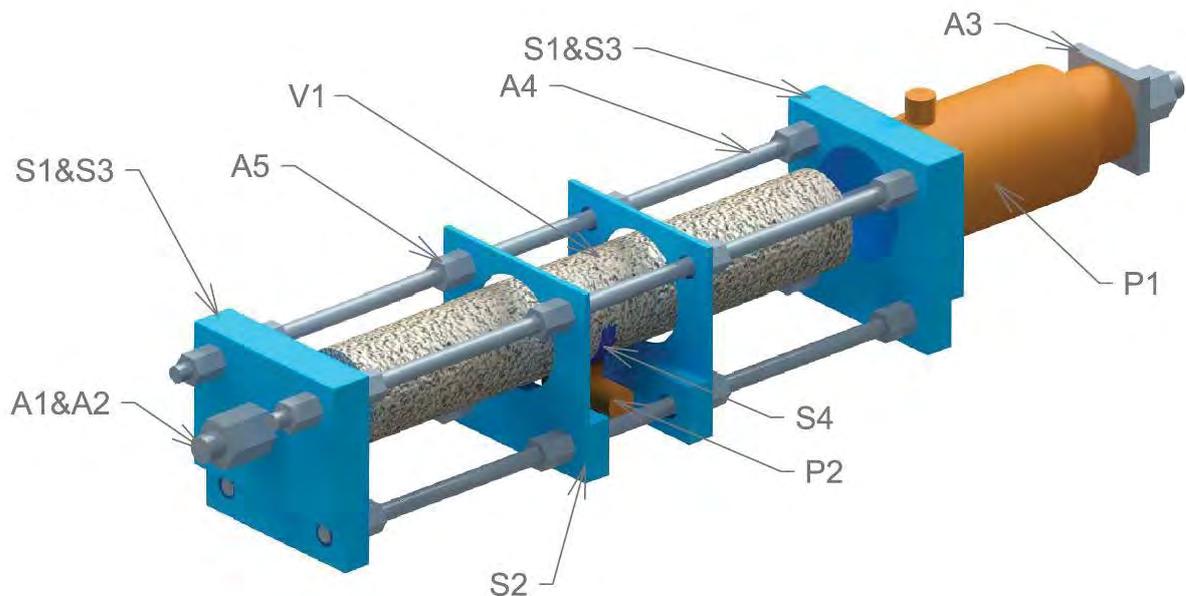


Abb. 76: 3D Darstellung des Prüfraumens inkl. Verpresskörper und Pressen

Der Stahlrahmen der Prüfkonstruktion (in Abb. 76 blau dargestellt) setzt sich aus zwei annähernd quadratischen Endlagern (Abb. 76 - S1&S3) sowie einem Mittellager (Abb. 76 - S2) zusammen, welches die Knicklänge der vier Druckstäbe DN20 (Abb. 76 – A4) verkürzt und zusätzlich eine Auflagefläche der mittig am Verpresskörper angebrachten Querkraftpresse (Abb. 76 – P2) darstellt.

Zusätzlich zur bereits erwähnten Querkraftpresse wurde an der Rückseite des Prüfrahmens eine Axialpresse ( Abb. 76 – P1), welche der Einleitung der Normalkraft in den Versuchskörper diente, angebracht. Beide Pressen wurden über ein Hydrauliksystem und einen Ventilregler mit der Hydraulikpumpe verbunden und konnten getrennt voneinander angesteuert werden. Nachfolgend werden die beiden Pressen und deren Spezifikationen ausführlicher beschrieben.

### Axialpresse Enerpac RACH302 (Enerpac Tool Group 2020(a))

Als Axialpresse wurde eine Hohlkolbenpresse mit einem maximal möglichen Betriebsdruck von 700 bar eingesetzt. Da der gewählte Versuchskörper mit einer Streckgrenze von 340 kN limitiert ist (vgl. ANP - SYSTEMS GMBH 2016), begrenzt sich dahingehend auch der maximal aufzubringende Betriebsdruck der RACH302 auf 34 Tonnen bzw. 665 bar. Aufgrund der passgenauen Einspannmöglichkeit des Versuchskörpers durch die Kopfplatte (sh. Abb. 76 – A3) und Anker Mutter, ist die maximal mögliche Hubhöhe der RACH302 von 50 mm ausreichend. Um von der jeweilig resultierenden Kraft der einzelnen Laststufen eines Spannvorganges auf den erforderlichen Öldruck schließen zu können, musste der Öldruck über die wirksame Zylinderfläche der jeweiligen Presse in eine Kraft umgerechnet werden. Diese Umrechnungstabelle zwischen Kraft [kN] und zwei Druckeinheiten [bar] bzw. [psi] ist nachfolgend dargestellt.

**Tab. 2: Umrechnung zwischen [kN], [bar] und [psi] für die Axialpresse**

ENERPAC - RACH 302 (Axial)									
	25%								
[kN]	1	5	10	20	50	85	100	125	150
[bar]	2	10	20	39	98	166	196	245	294
[psi]	28	142	284	568	1419	2413	2838	3548	4257
	50%			75%			100%		
[kN]	170	200	225	255	275	300	325	340	
[bar]	333	391	440	499	538	587	636	665	
[psi]	4825	5677	6386	7238	7805	8515	9225	9650	

### Querkraftpresse RC50 (Enerpac Tool Group 2020(b))

Eine wichtige Voraussetzung der Querkraftpresse war der unkomplizierte Einbau in den klein gehaltenen Prüfraumen. Dies, sowie die benötigte geringe Querkraftbelastung auf den Probekörper, ermöglichten den Einsatz einer sehr kleinen Presse mit einer eingefahrenen Gesamthöhe von 41 mm und einer maximalen Hubhöhe von 16 mm. Der bei den Versuchen aufgebrauchte Betriebsdruck entsprach bei dieser Presse nur einem Bruchteil des maximal möglichen Betriebsdrucks von 700 bar. Wie bereits für die Axialpresse beschrieben, wird nachfolgend die Umrechnungstabelle zwischen Kraft [kN] und zwei Druckeinheiten [bar] bzw. [psi] für die Querkraftpresse RC50 dargestellt.

**Tab. 3: Umrechnung zwischen [kN], [bar] und [psi] für die Querkraftpresse**

<b>ENERPAC - RC 50 (Quer)</b>									
<b>[kN]</b>	1	1,5	2	2,5	3	4	5	6	7
<b>[bar]</b>	15	23	31	39	46	62	77	93	108
<b>[psi]</b>	224	336	448	560	673	897	1121	1345	1569
<b>[kN]</b>	8	9	10	15	20	25	30	35	40
<b>[bar]</b>	124	139	155	232	309	386	464	541	618
<b>[psi]</b>	1794	2018	2242	3363	4484	5605	6726	7847	8968

#### 4.6.4. Zusammenfassung des Prüfaufbaus

Um den gesamten Umfang der Prüfapparatur deutlich darzustellen, wird in diesem Unterpunkt eine zusammenfassende Übersicht über die Prüfkonstruktion, wie sie in Abb. 77 abgebildet ist, gegeben.

Der Prüfraum aus Stahl misst in Breite und Höhe rund 200 mm, in der Länge rund 850 mm. In diesen Rahmen wird der Prüfkörper eingespannt, einseitig mit einer Anker Mutter befestigt und auf der anderen Seite in die in Kapitel 4.6.3 beschriebene axiale Hohlkolbenpresse eingespannt. Zusätzlich dazu kann in der Mitte des Verpresskörpers eine Querkraftpresse angebracht werden, um den Versuchskörper zusätzlich zu einer Normalkraft auch durch eine Querkraft belasten zu können.

Der Prüfkörper selbst ist ein Verpresskörper bzw. ein Mikropfahl mit einem Außendurchmesser (Verpresskörper) von 100 mm, welcher zentrisch einen Gewindestab ummantelt. Der Verpresskörper misst eine Länge von 600 mm, wobei der GEWI-Stab aufgrund der Einbaubedingungen in den Prüfraum und die Axialpresse eine Länge von 1250 mm besitzt.



**Abb. 77: Aufgebaute Prüfkonstruktion im Labor**

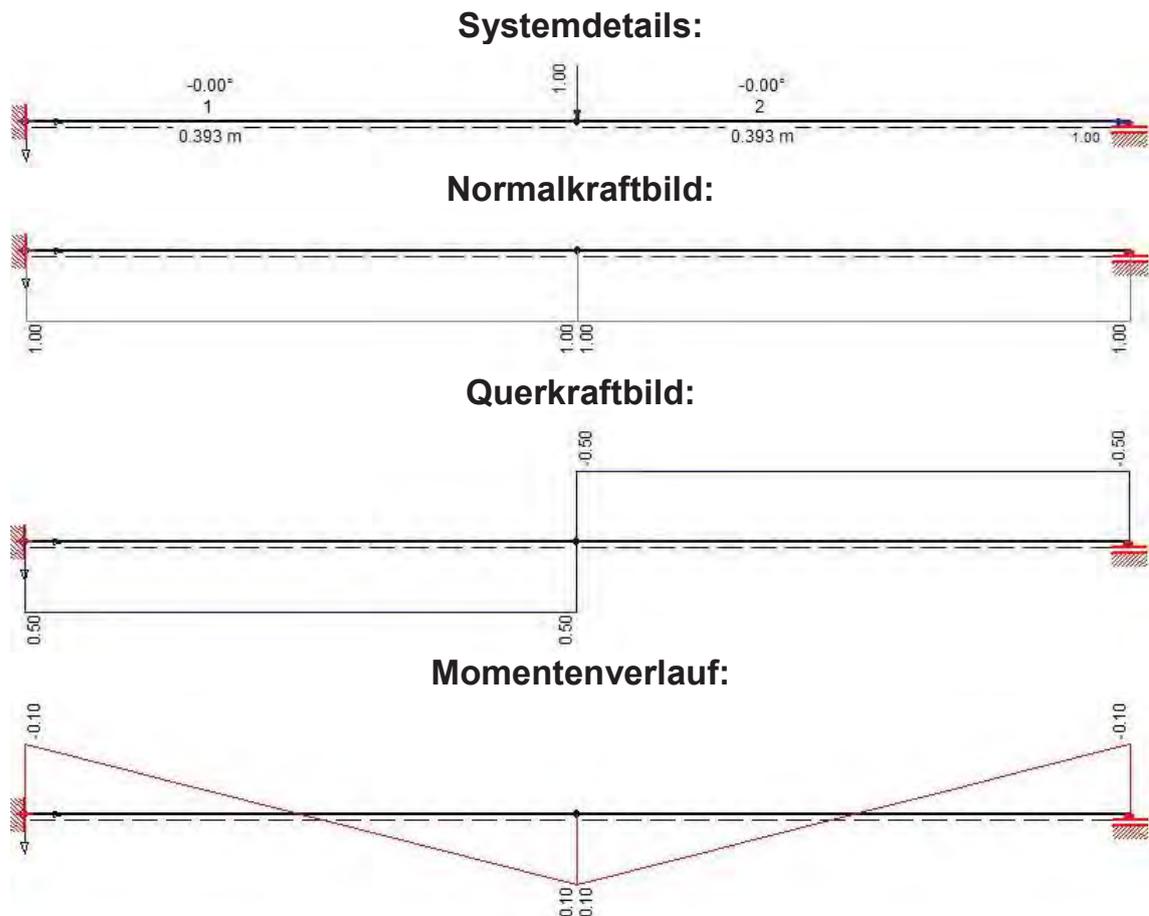
Zusätzlich zu den zwei verbauten Pressen wurden rund sieben Meter Hydraulikschlauch, ein Hydraulikverteiler inkl. zwei Manometer zum Steuern der jeweiligen Presse sowie eine Hydraulikpumpe – alle Komponenten mit entsprechendem maximalen Betriebsdruck – der Firma Enerpac verbaut. Die Gesamtdimensionen des zusammengebauten und eingespannten Prüfaufbaus belaufen sich folglich auf rund 20 cm in Breite und Höhe sowie 125 cm in der Länge. Abschließend kann das Gewicht der Gesamtkonstruktion inkl. Prüfkörper wie folgt aufgeteilt werden:

**Tab. 4: Auflistung des Gewichts der Prüfkonstruktion**

Bauteil	[kg]
Prüfkörper	17
Prüfrahmen (inkl. Ankermuttern)	43
RACH302	8
RC50	1
Hydraulikbauteile	6
<b>Gesamtgewicht</b>	<b>75</b>

#### 4.6.5. Schnittgrößen des Versuchskörpers

Nachfolgend dargestellt werden die Schnittgrößen für den Lastfall "1" unter Vernachlässigung des Eigengewichts. Für eine entsprechende Schnittkraft ist nach dem Superpositionsprinzip der Wert der in Abb. 78 dargestellten Schnittgröße mit der tatsächlich aufgetragenen Normal- bzw. Querkraft zu multiplizieren. Als statisches System wurde ein beidseitig eingespannter, auf Seite der Axialpresse horizontal frei gelagerter Stab mit einer Länge von 0,785 m gewählt. Diese Länge entspricht dem Abstand zwischen der Mitte beider Endlager.



**Abb. 78: Schnittgrößendarstellung für "1"-System in [kN] durch RuckZuck®**

Aufgrund der Anzeigeeinstellungen des Statikprogramms sind Längenwerte, aber auch die exakte Größe der Schnittkräfte, teils nicht exakt dargestellt und werden aus diesem Grund noch tabellarisch angeführt.

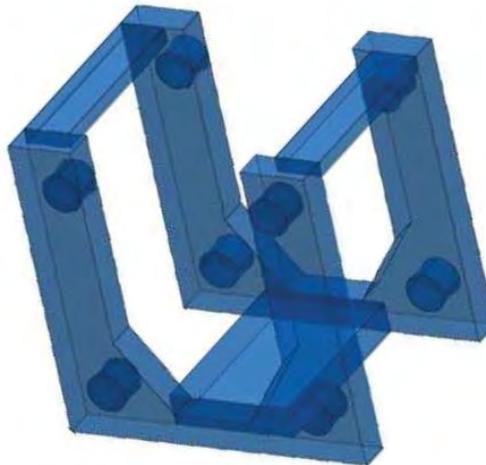
**Tab. 5: Tabellarische Übersicht der Schnittgrößen für “1“-System**

Länge Stab 1 / Länge Stab 2 [m]	Normalkraft Systemmitte [kN]	Querkraft Systemmitte [kN]	Moment Systemmitte [kNm]
0,3925 / 0,3925	+1,0	+/- 0,5	+0,0981

#### 4.6.6. Ablauf der Voruntersuchung und CT-Parameter

Um einen reibungslosen Ablauf der Testungen garantieren zu können, wurde vorab ein Versuchskörper mit denselben geometrischen Eigenschaften in einem ähnlichen Verfahren wie beschrieben hergestellt. Der eingefüllte Zementmörtel wurde keiner Festigkeitsbestimmung unterzogen.

Zu Beginn wurde der Versuchskörper der ersten Charge (V1\_DAT\_GCP\_01) in den in Kapitel 4.6.3 beschriebenen Versuchsrahmen eingebaut und mit den Laststufen  $25\% \cdot F_{\max}$ ,  $50\% \cdot F_{\max}$ ,  $75\% \cdot F_{\max}$  und  $F_{\max}$  belastet und beobachtet. In diesem Zuge wurde die Stabilität des Prüfrahmens bestätigt, jedoch, um die Einbaubarkeit und das Beobachten sowie Ablesen des Rissbildes bzw. der Rissbreite zu erleichtern, das Mittellager des Prüfrahmens (sh. Abb. 76 – S2) überarbeitet und durch ein neues Mittellager, wie in Abb. 79 dargestellt, getauscht.


**Abb. 79: Ausgetauschtes Mittellager für den Prüfrahmen**

Des Weiteren konnten bei diesem ersten Schritt der Voruntersuchung die Dichtigkeit des Hydrauliksystems überprüft und etwaige undichte Anschlüsse nachgebessert werden.

Als zweiten Schritt wurde ein computertomographischer Scan in der *Privatklinik der Kreuzschwestern GmbH* in Graz, Österreich, durchgeführt. Bei diesem ersten Scan wurde die Machbarkeit sowie sämtliche mit dem Scan verbundenen Randbedingungen des Versuches überprüft. Ebenso wurde eine Feinabstimmung der CT-Parameter vorgenommen. Die für die weiteren Scans verwendeten Daten des Computertomographen werden nachfolgend angeführt:

Verwendeter Computertomograph: Siemens Somaton Definition AS

Verwendete Scan-Parameter:

- |  |                 |
|--|-----------------|
| - Eff. mAs (effektive Milliamperesekunden):            | 500 mAs         |
| - kV (Kilovolt):                                       | 140 kV          |
| - Slice (Schichtdicke):                                | 0,6 mm          |
| - CTDI <sub>vol</sub> (Energiedosis vgl. Böning 2018): | 50,91 mGy       |
| - DLP (Dosislängenprodukt vgl. Böning 2018):           | 3783 mGy*cm     |
| - Tilt (Neigung):                                      | 0,0°            |
| - Rotation Time (Umdrehungszeit):                      | 1,0 s           |
| - Scan-Größe:  | 367 * 823 mm    |
| - Kernel (convolution algorithm):                      | B70s very sharp |

Jeder in weiterer Folge durchgeführte CT-Scan lieferte Bilder der folgenden Schnittführungen in 0,6 mm Abständen:

- Längsschnittführung horizontal (Coronal), rund 200 Bilder
- Längsschnittführung vertikal (Sagittal), rund 200 Bilder
- Querschnittführung (Transverse), rund 1000 Bilder

#### 4.6.7. Voruntersuchung – Ergebnisse

Die im Zuge der Voruntersuchung erhaltenen Ergebnisse beziehen sich ausschließlich auf den Versuchskörper V1\_DAT\_GCP\_01, welcher im Gesamtbild nicht als repräsentativ erachtet wird. Dieser soll lediglich einen Überblick über die Bewertungsmethode und die zu erwartenden Ergebnisse geben. Die Ergebnisse der Voruntersuchung lassen sich wiederum in zwei Teilergebnisse, wie nachfolgend aufgelistet, unterteilen.

- Allgemeine bzw. augenscheinliche Ergebnisse durch Belastung des Versuchskörpers mit Normalkraft oder mit Normalkraft und Querkraftbeaufschlagung, sowie eine
- Bildauswertung der Computertomographie.

Beide Punkte werden nachfolgend präsentiert.

#### 4.6.8. Allgemeine Ergebnisse

Die Erstrissbildung des Versuchskörpers bei Erstbelastung entstand bei etwa 70 kN Axialbelastung. Nach abgeschlossener Rissbildung konnte eine adäquate Zunahme der Rissbreiten in den entstandenen Rissen, jedoch keine bzw. quasi keine erneute Rissbildung festgestellt werden. An zwei Stellen traten in höheren Belastungsstufen Haarrissverästelungen zwischen den Rissen auf. Ein für diesen Versuchskörper repräsentativer Ausschnitt, inkl. der Haarrissverästelung, unter der Belastungsstufe  $50\% \cdot F_{\max}$  ist in Abb. 80 dargestellt.



**Abb. 80: Voruntersuchung – Rissentwicklung unter  $50\% \cdot F_{max}$**

Für den Belastungsfall unter Zugkraft und Biegebeanspruchung ist bereits bei einer geringen Querkraft von rund 4 kN, welche einem Biegemoment von 0,39 kNm (vgl. Abb. 78) entspricht, ein – augenscheinlich – absoluter Risschluss in der Betondruckzone des Verpresskörpers festzustellen. Die Rissbreite in der Betonzugzone hingegen vergrößert sich merklich.

Ebenso musste beim Ausbau des Versuchskörpers festgestellt werden, dass bereits kleinere dynamische Belastungen, wie leichte Hammerschläge auf die Anker Mutter zum Lösen dieser, negative Folgen, wie das Sprengen des Zementkörpers bzw. das segmentierte Ablösen von Verpresskörperelementen, mit sich führte.

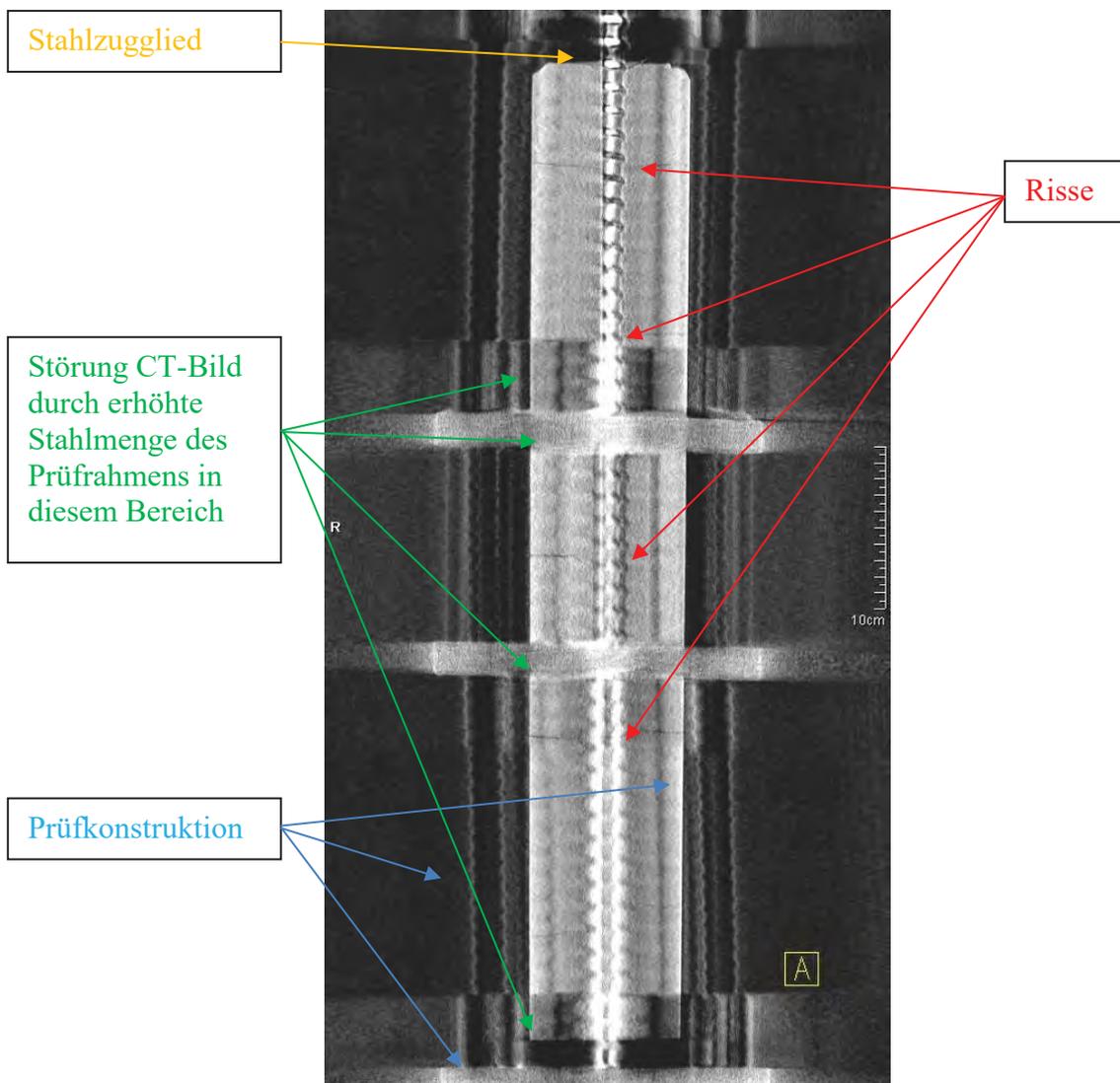
#### **4.6.9. Bildauswertung der Computertomographie**

Im Anschluss an die in Kapitel 4.6.6 beschriebene Prüfung wurde derselbe Prüfkörper (V1\_DAT\_GCP\_01) eingebaut und mit zwei Laststufen unter reiner Zugbelastung gespannt und gescannt.

- Scan: 100 kN, maximale oberflächliche Rissbreite  $w_o=0,35$  mm
- Scan: 200 kN, maximale oberflächliche Rissbreite  $w_o=0,45$  mm

Aufgrund der großen Anzahl der aus den Scans erhaltenen Bildern, werden in diesem Kapitel nur einzelne Bilder dargestellt. Weitere, für die Auswertung verwendete Bilder sind der Arbeit

von Dold (2021) zu entnehmen. Um für den Lesenden eine gute Verständlichkeit der sichtbaren Merkmale in den jeweiligen Fotos zu erzielen, werden nachfolgend noch wesentliche Punkte eines Bildes veranschaulicht:

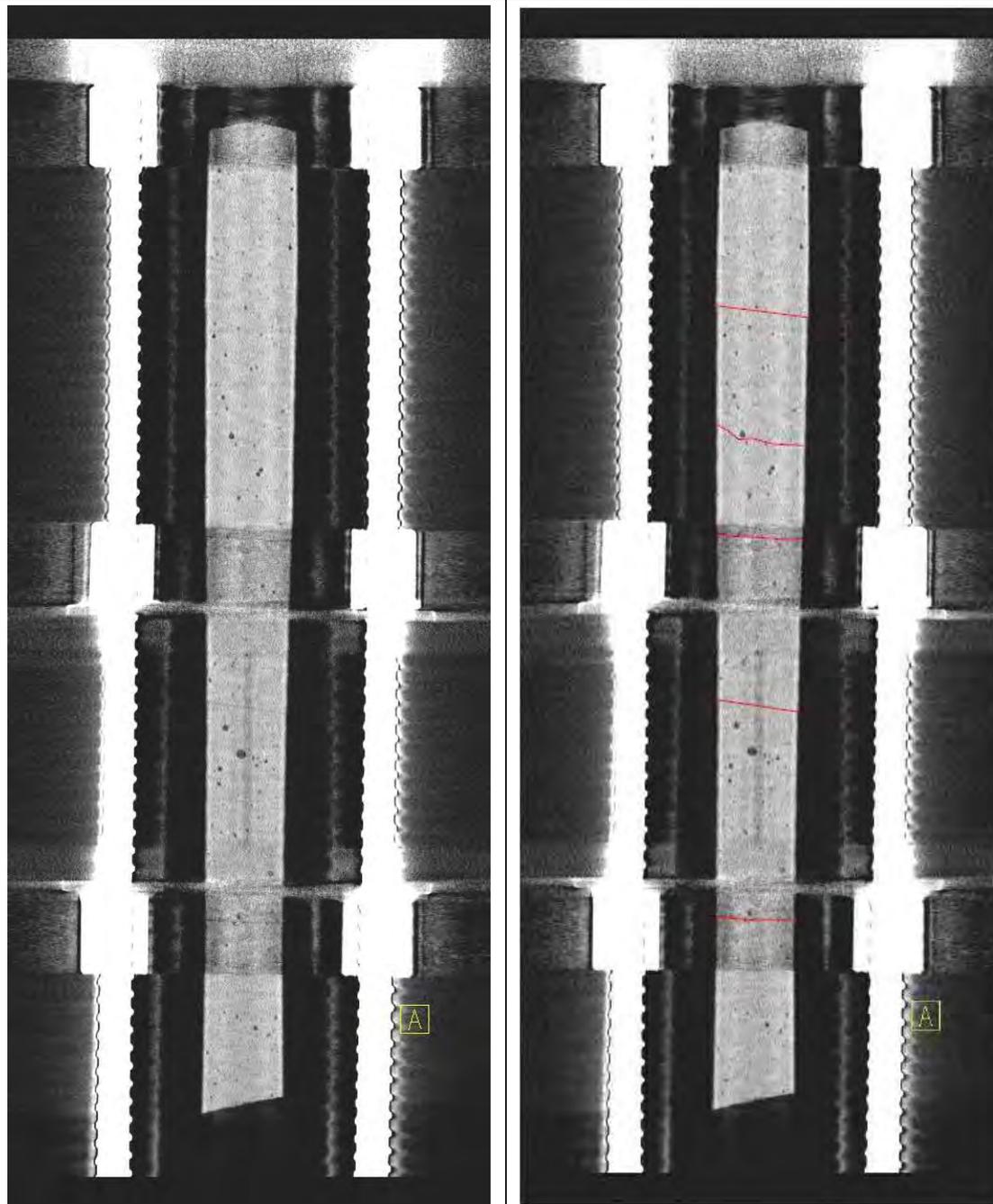


**Abb. 81: Beispielbild zur Veranschaulichung einer CT-Aufnahme**

In den nachfolgenden Tabellen sind jeweils zwei idente Bilder dargestellt, wobei im rechten Bild die Risse zur Veranschaulichung deutlich gekennzeichnet wurden.

Tab. 6: Auswertung CT-Bild V1\_DAT\_GCP\_01\_COR(30) – 100 kN

Bildname/Prüflast	Schnittrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V1_DAT_GCP_01_COR (30) – 100kN	Coronal (von oben nach unten)	6,6 mm	29.10.2020

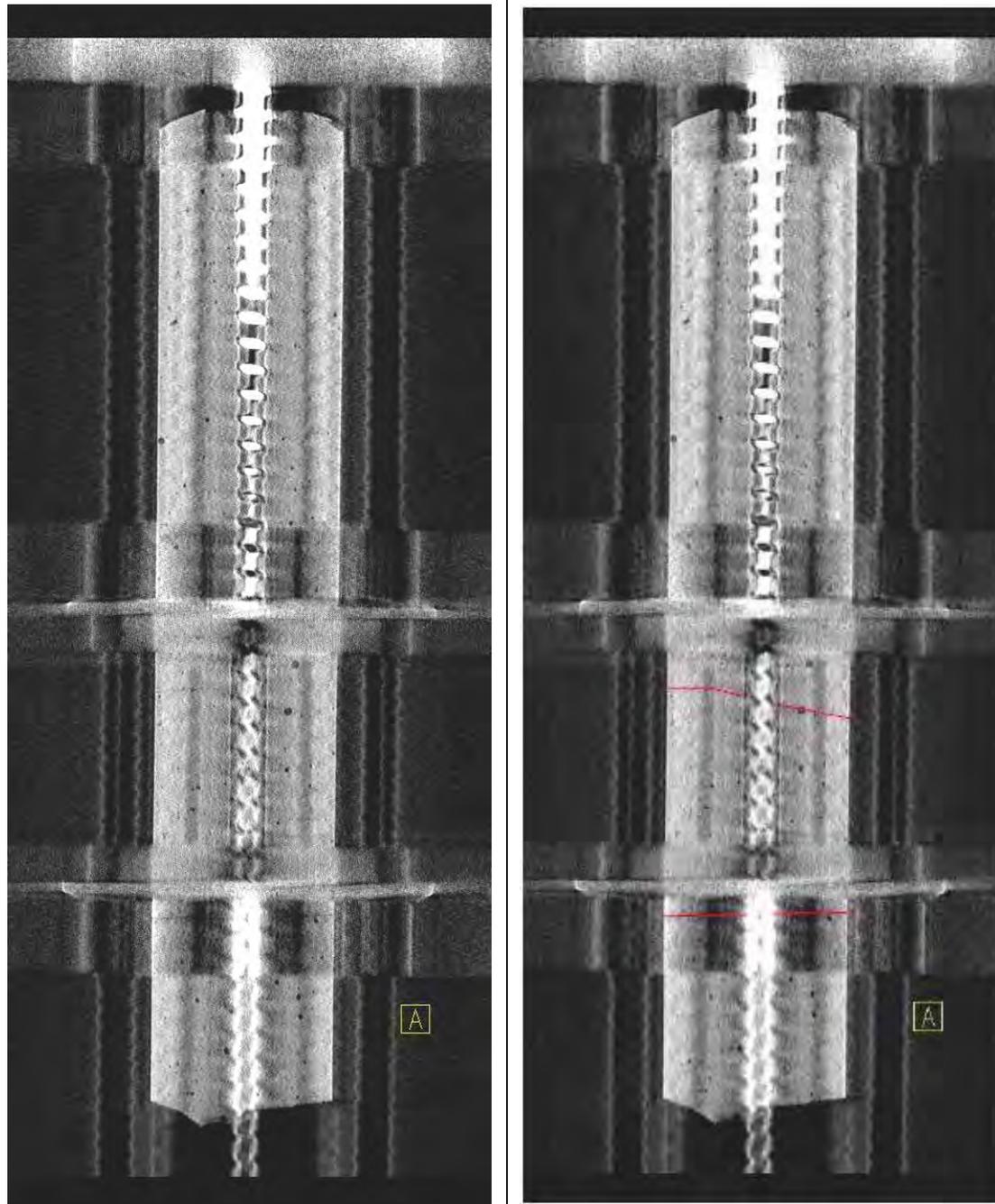


**Bewertung:**

Risse bei genauer Betrachtung erkennbar, exakte Rissverfolgung nicht möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich.

Tab. 7: Auswertung CT-Bild V1\_DAT\_GCP\_01\_COR(30) – 100 kN

Bildname/Prüflast	Schnittrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V1_DAT_GCP_01_COR (80) – 100kN	Coronal (von oben nach unten)	36,6 mm	29.10.2020

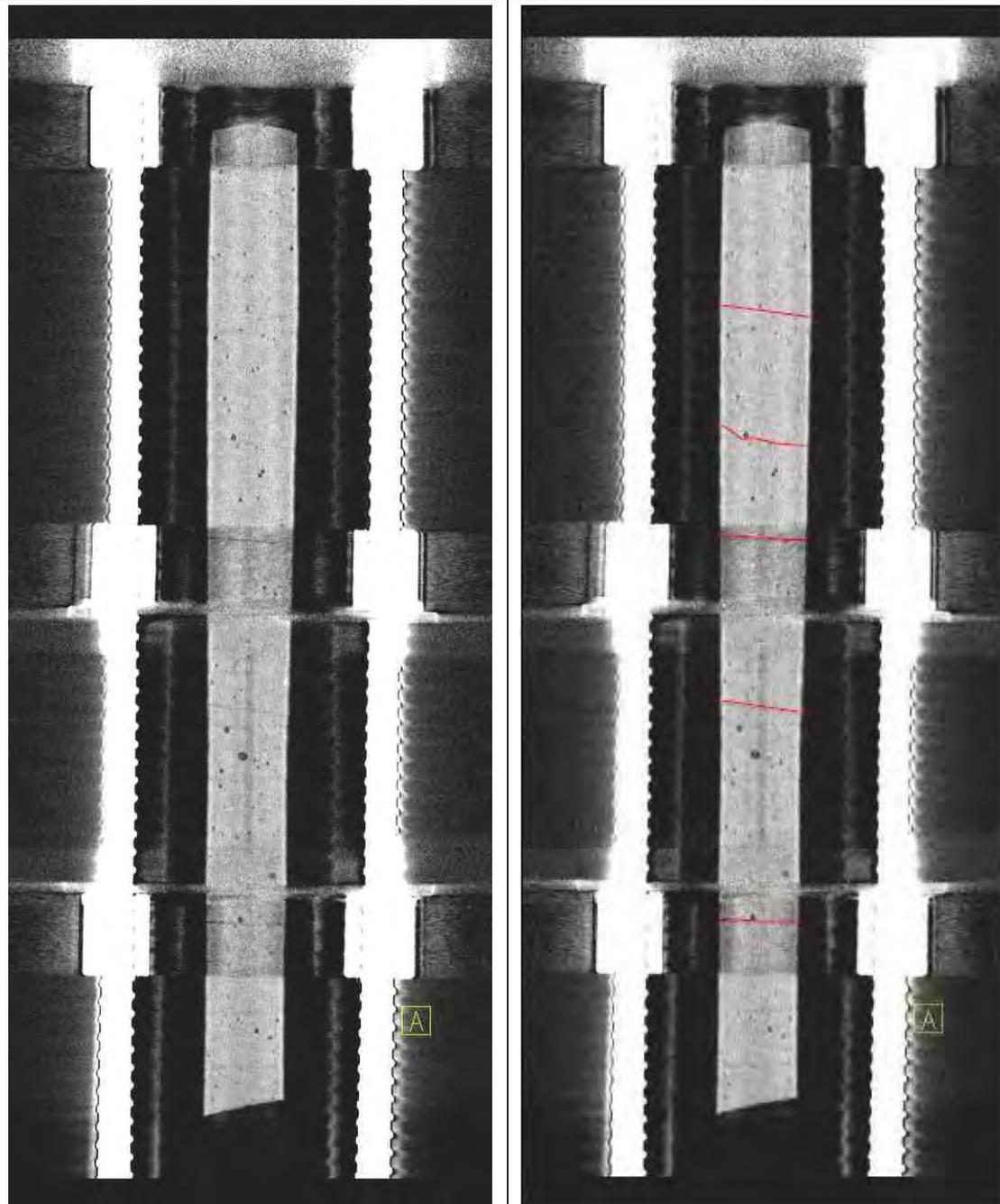


**Bewertung:**

Nur 2 Risse erkennbar, exakte Rissverfolgung nicht möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich.

Tab. 8: Auswertung CT-Bild V1\_DAT\_GCP\_01\_COR(29) – 200 kN

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung:	Schnitttiefe	Scan-Datum
V1_DAT_GCP_01_COR (29) – 200kN	Coronal (von oben nach unten)	6,6 mm	29.10.2020

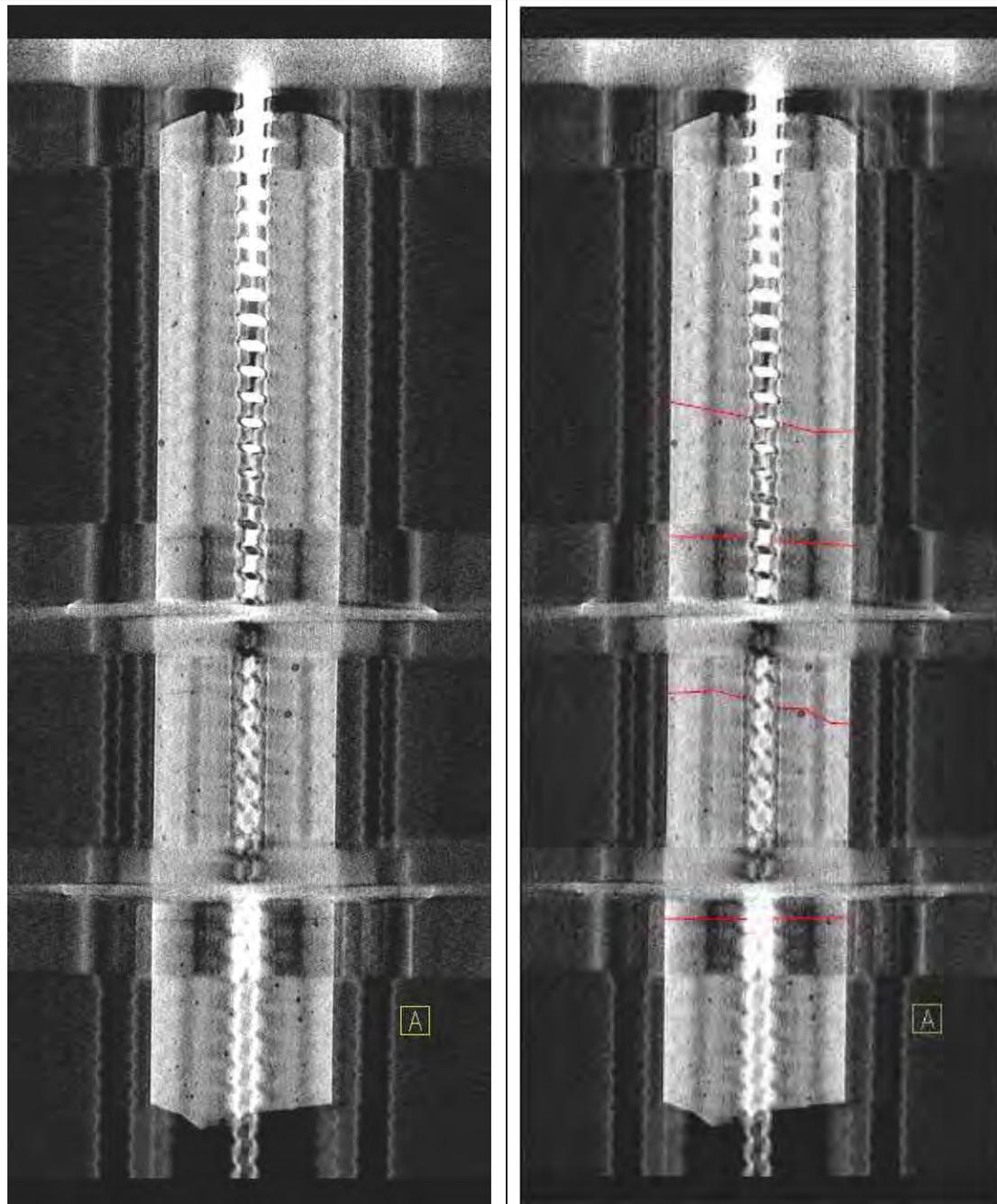


**Bewertung:**

Risse teils besser erkennbar als bei 100 kN Zugkraft, da breiter. Exakte Rissverfolgung teils möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich.

Tab. 9: Auswertung CT-Bild V1\_DAT\_GCP\_01\_COR(79) – 200 kN

Bildname/Prüflast	Schnittrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V1_DAT_GCP_01_COR (79) – 200kN	Coronal (von oben nach unten)	36,6 mm	29.10.2020



**Bewertung:**

Nur 4 Risse erkennbar, diese teils besser erkennbar als bei 100 kN Zugkraft, da breiter. Exakte Rissverfolgung teils möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich.

#### 4.6.10. Auswertung der CT-Scans

Dieses Kapitel beinhaltet die Ergebnisse der computertomographischen Scans der Prüfkörper der zweiten Charge. Zu Beginn werden die Prüfkörper sowie Prüfbedingungen kurz angeführt, bevor anschließend die Bildauswertung der einzelnen Prüfkörper mit den jeweiligen Laststufen erfolgt.

##### Prüfkörper und Randbedingungen

Die Scans der beiden Prüfkörper erfolgten in der *Privatklinik der Kreuzschwestern GmbH* in Graz. Vor der Versuchsdurchführung wurde die Prüfkonstruktion, wie in Abb. 82 dargestellt, auf der CT-Liege installiert und deren Funktionstüchtigkeit überprüft.



**Abb. 82:** Prüfaufbau im Computertomographen

Getestet wurden die beiden Versuchskörper

- V2\_DAT\_GCP\_01 und
- V2\_DAT\_DCP\_01

der zweiten Charge. Bei Versuchskörper V2\_DAT\_GCP\_01 handelte es sich um eine Ausführung mit einfachem Korrosionsschutz mittels Einkapselung, der Versuchskörper V2\_DAT\_DCP\_01 war in doppeltem Korrosionsschutz mittels Ripprohr ausgeführt. Der exakte Aufbau der Versuchskörper sowie der Prüfapparatur ist in 4.6.3 beschrieben. Die gewählten CT-Parameter für beide Versuchskörper sind in Kapitel 4.6.6 aufgelistet.

Die Versuchskörper wurden jeweils in den folgenden Schritten belastet und gescannt:

- Scan: 0 kN Axial; 0 kN Querkraft  
zur Dokumentation des Ausgangszustandes, keine oberflächlichen Risse
- Scan: 170 kN Axial ( $50\% \cdot F_{\max}$ ); 0 kN Querkraft  
maximale oberflächliche Rissbreite  $w_{0,GCP}=0,20$  mm,  $w_{0,DCP} \leq 0,10$  mm
- Scan: 340 kN Axial ( $100\% \cdot F_{\max}$ ); 0 kN Querkraft  
maximale oberflächliche Rissbreite  $w_{0,GCP}=0,45$  mm,  $w_{0,DCP}=0,20$  mm
- Scan: 170 kN Axial ( $50\% \cdot F_{\max}$ ); 4 kN Querkraft  
maximale oberflächliche Rissbreite oben  $w_{0,GCP}=0,35$  mm,  $w_{0,DCP}=0,2$  mm

$F_{\max}$  maximale Prüflast des Prüfkörpers auf Zug (340 kN)

$w_{0,GCP}$  maximale oberflächliche Rissbreite der GCP-Versuchskörper

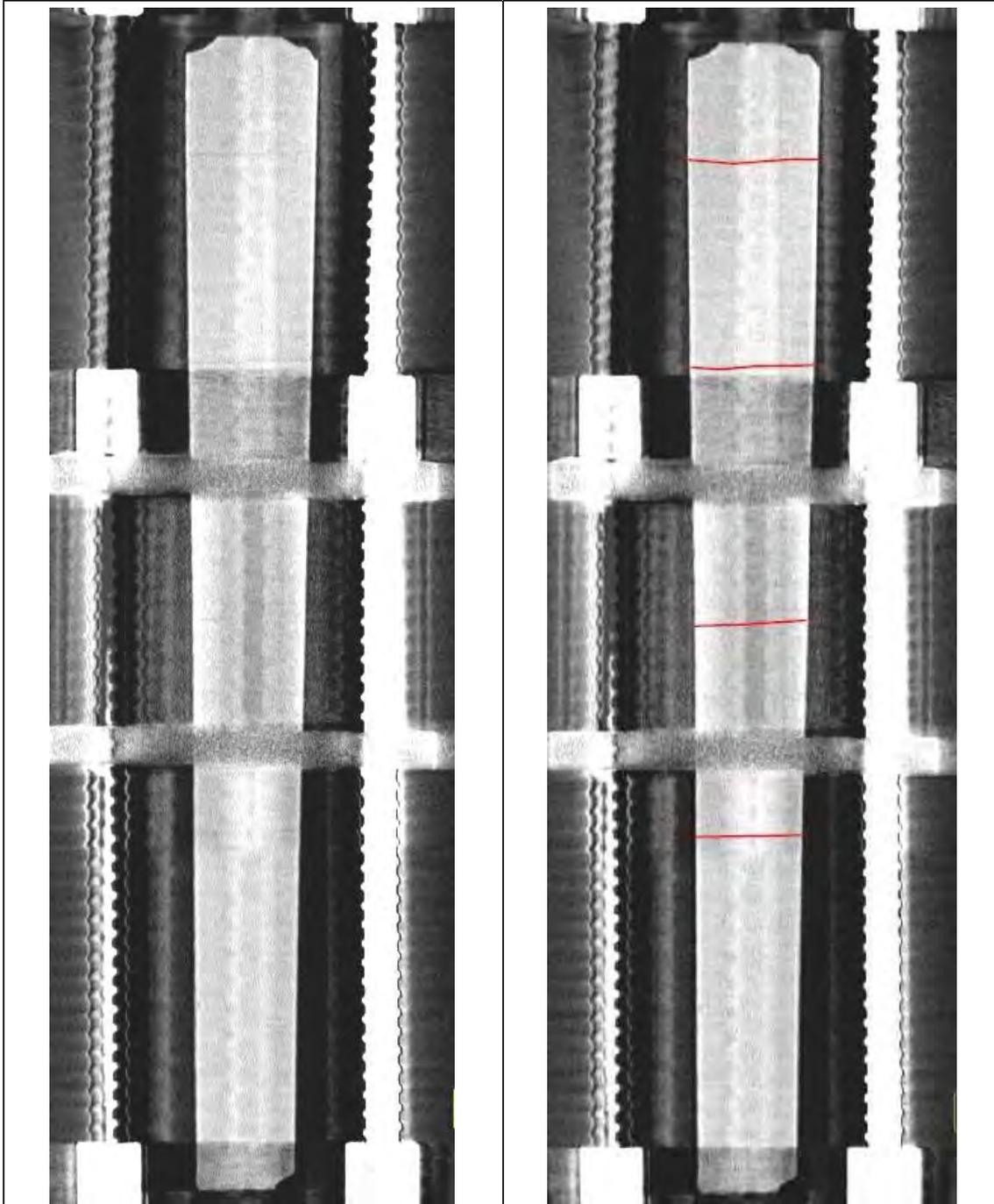
$w_{0,DCP}$  maximale oberflächliche Rissbreite der DCP-Versuchskörper

Nachfolgend werden nun – nach identem Schema wie in Kapitel 4.6.9 – die Bildauswertungen der sechs relevanten CT-Scans dargestellt und bewertet. Weitere für die Auswertung verwendete Bilder, sowie die Bilder des ,0'-Scans und die Fotodokumentation der CT-Untersuchung sind in Dold (2021) gegeben.

#### 4.6.11. Bildauswertung V2\_DAT\_GCP\_01

Tab. 10: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_GCP\_01A\_COR(29) - 170kN Axial, 0kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_GCP_01A_COR (29) – 170kN Axial, 0kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	12,0 mm	27.11.2020

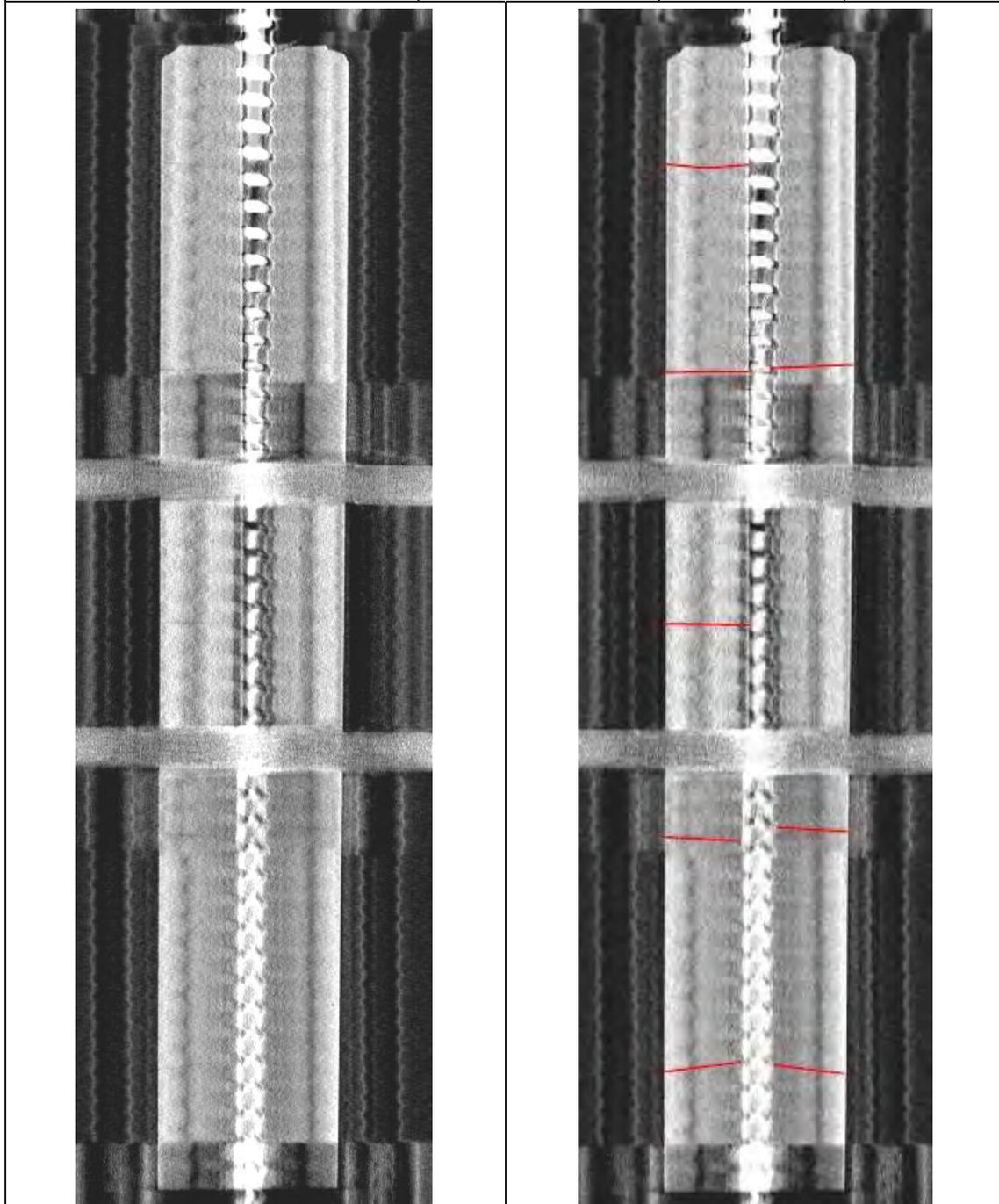


**Bewertung:**

4 Risse bei genauer Betrachtung erkennbar, exakte Rissverfolgung teils möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich.

Tab. 11: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_GCP\_01A\_COR(69) - 170kN Axial, 0kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnittrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_GCP_01A_COR (69) – 170kN Axial, 0kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	36,0 mm	27.11.2020

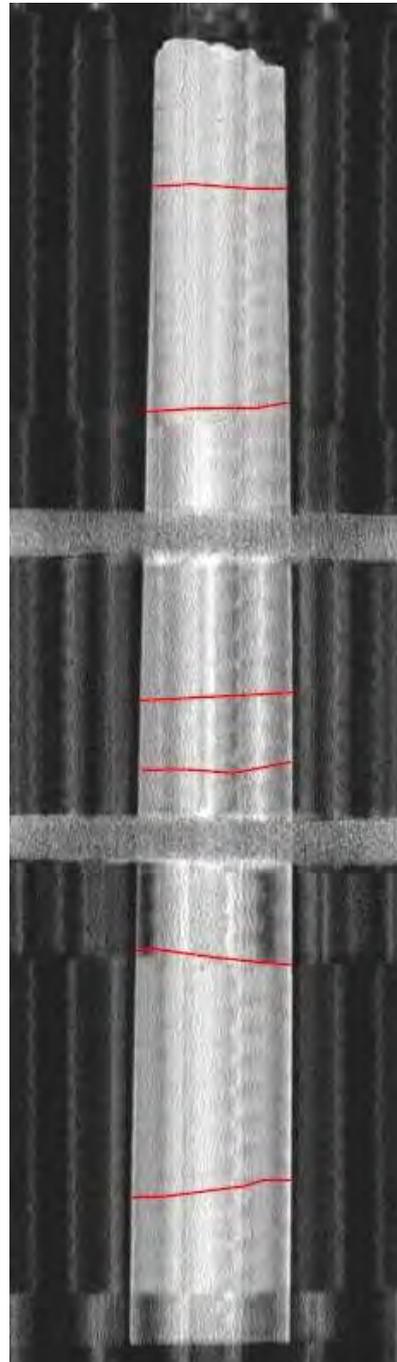
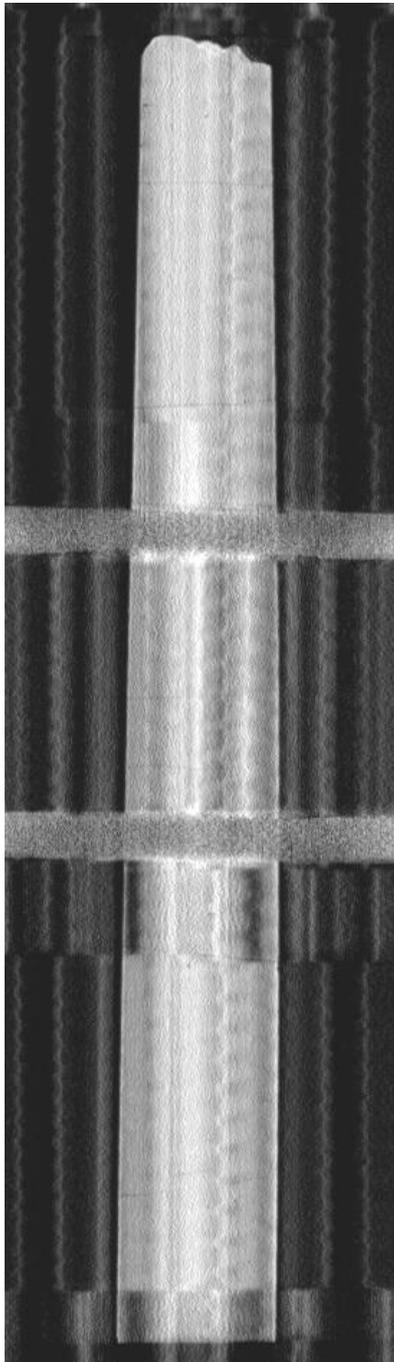


**Bewertung:**

5 Risse bei genauer Betrachtung erkennbar, 2 nur auf linker Seite. Exakte Rissverfolgung teils möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich.

Tab. 12: Auswertung CT-Bild V2 DAT\_GCP\_01A\_COR(159) - 170kN Axial, 0kN Quer

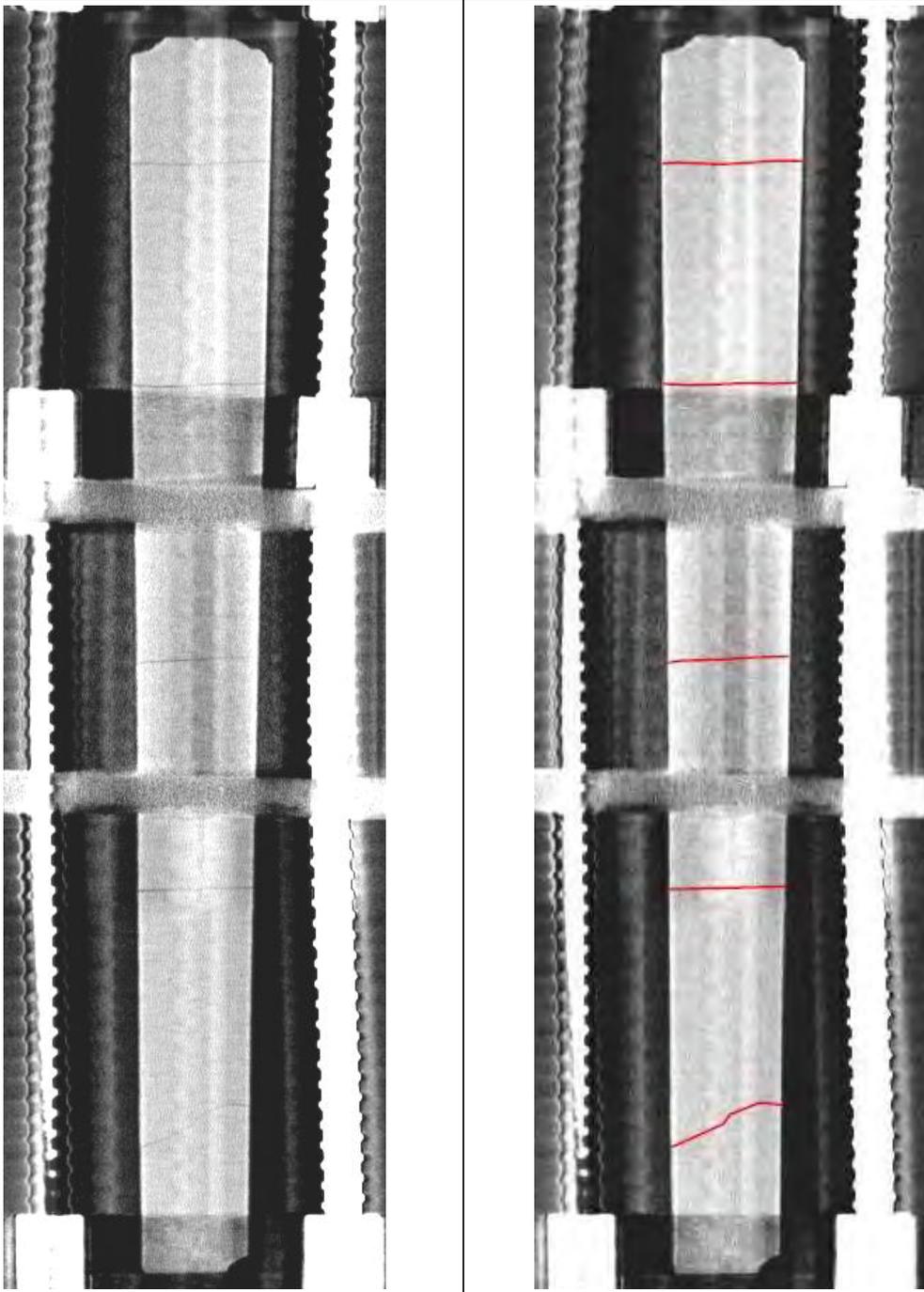
Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_GCP_01A_COR (159) – 170kN Axial, 0kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	90,0 mm	27.11.2020



**Bewertung:**

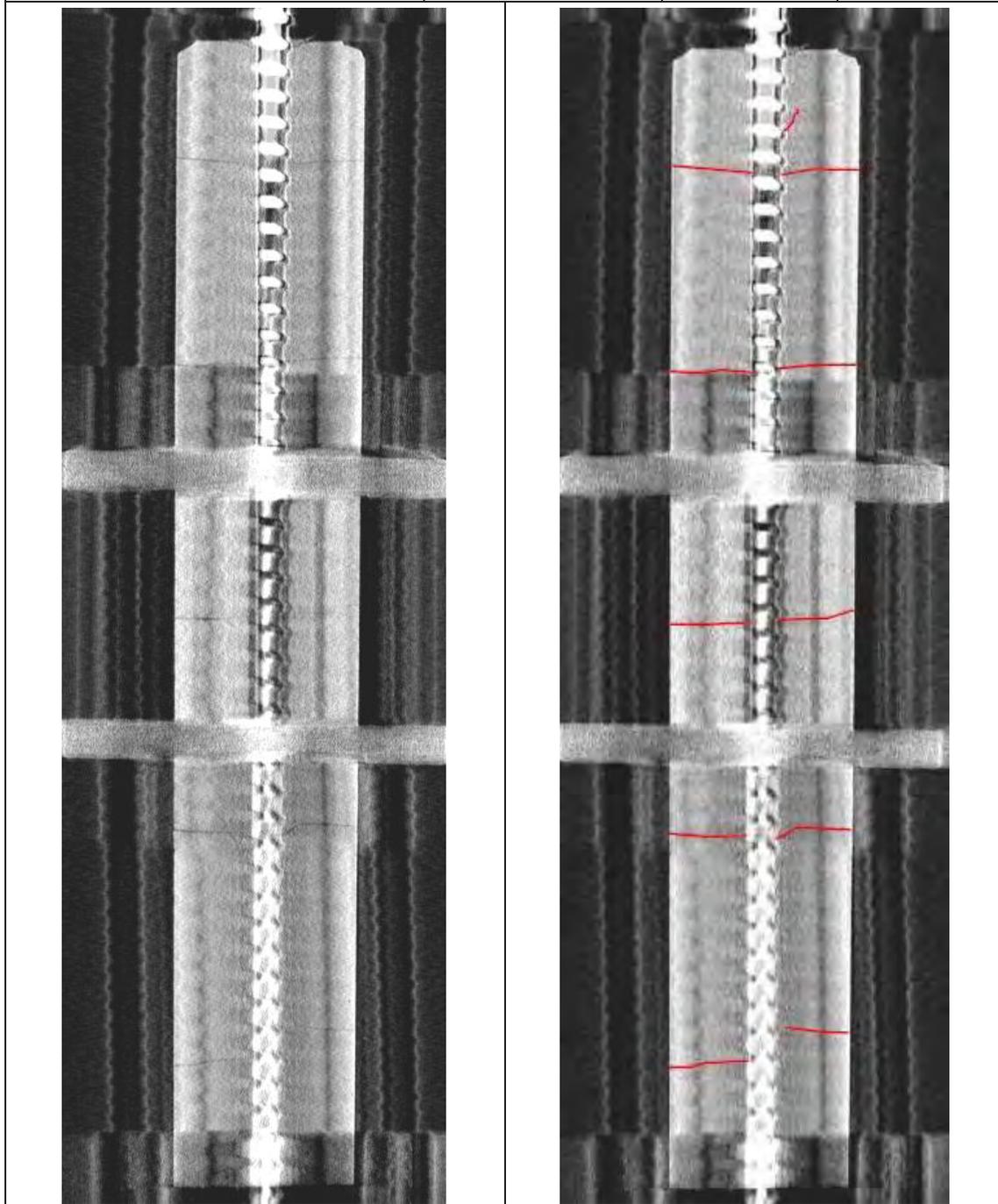
6 Risse bei genauer Betrachtung erkennbar, exakte Rissverfolgung möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich.

Tab. 13: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_GCP\_01B\_COR(60) - 340kN Axial, 0kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_GCP_01B_COR(60) – 340kN Axial, 0kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	12,0 mm	27.11.2020
			
<p><b>Bewertung:</b> 5 Risse eindeutig erkennbar, exakte Rissverfolgung teils möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich.</p>			

Tab. 14: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_GCP\_01B\_COR(100) - 340kN Axial, 0kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_GCP_01B_COR (100) – 340kN Axial, 0kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	36,0 mm	27.11.2020

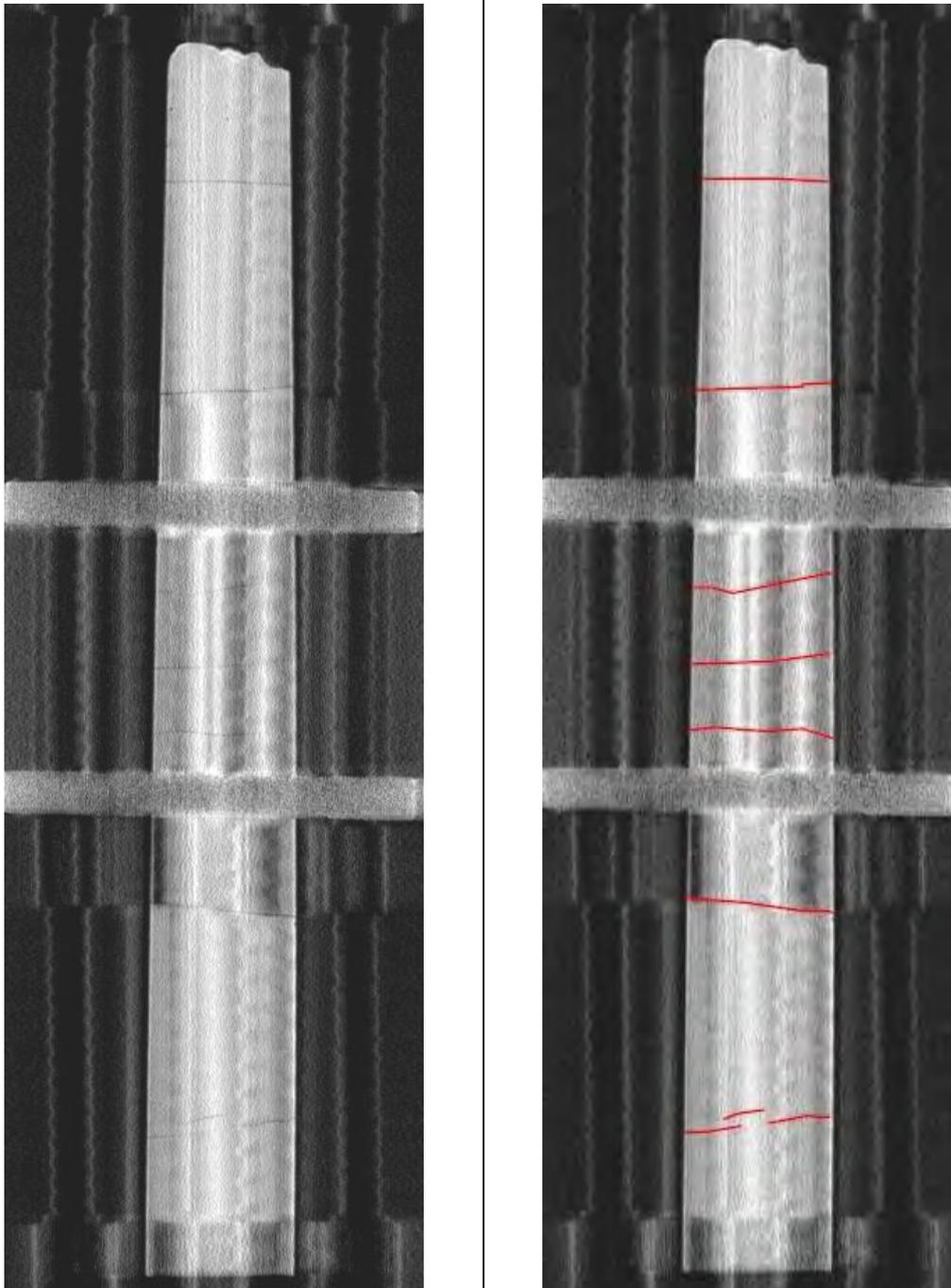


**Bewertung:**

5 Risse eindeutig erkennbar, exakte Rissverfolgung möglich. Zusätzlicher Riss oben. Rissbreitenbestimmung nicht möglich, augenscheinlich aber gering

Tab. 15: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_GCP\_01B\_COR(190) - 340kN Axial, 0kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_GCP_01B_COR (190) – 340kN Axial, 0kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	90,0 mm	27.11.2020

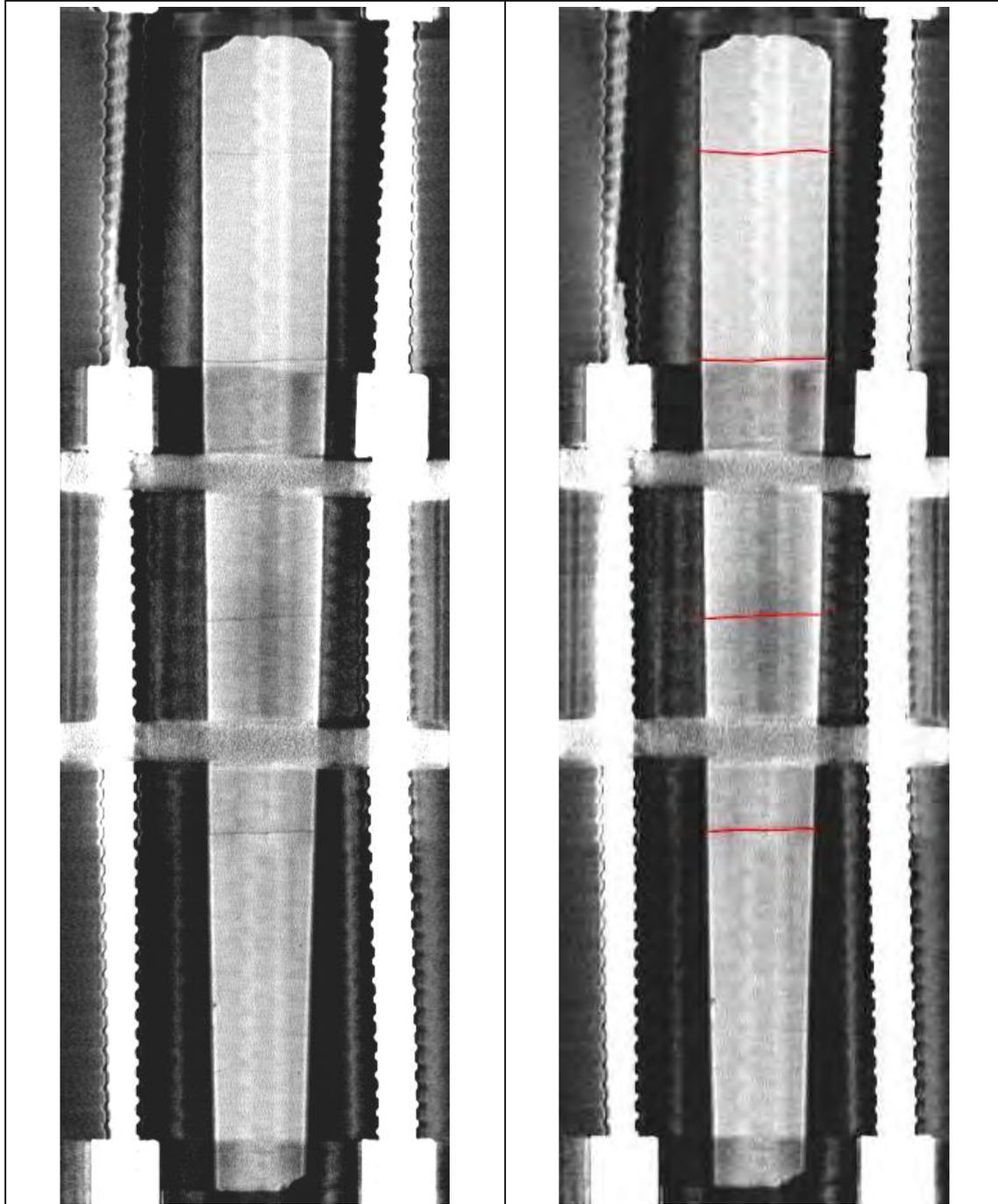


**Bewertung:**

7 Risse eindeutig erkennbar, exakte Rissverfolgung meist möglich. Abweichendes Rissbild zu anderen Schnittebenen im mittleren Bereich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich.

Tab. 16: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_GCP\_01C\_COR(93) - 170kN Axial, 4kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_GCP_01C_COR (93) – 170kN Axial, 4kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	12,0 mm	27.11.2020

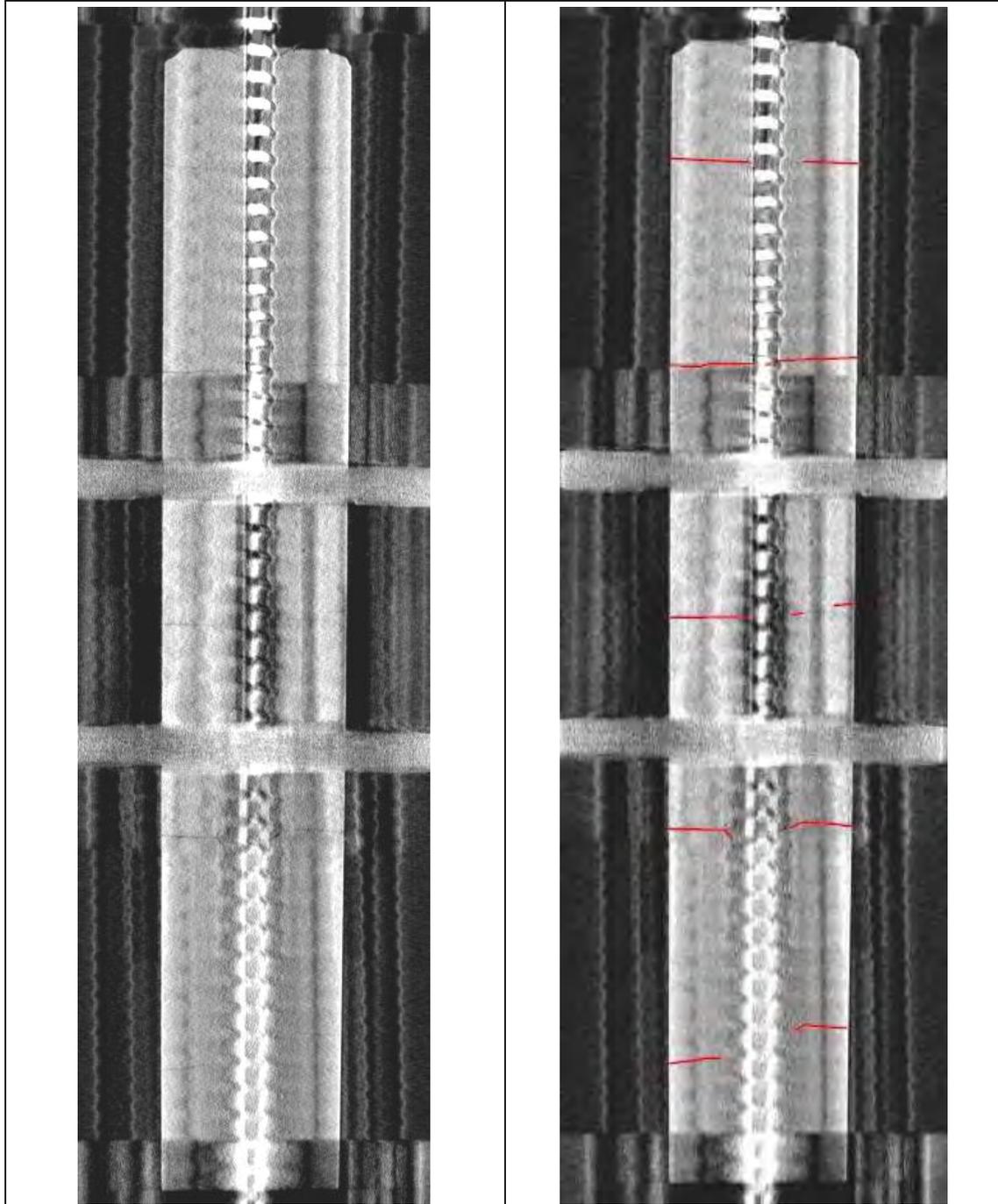


**Bewertung:**

4 Risse eindeutig erkennbar, exakte Rissverfolgung meist möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich.

Tab. 17: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_GCP\_01C\_COR(133) - 170kN Axial, 4kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_GCP_01C_COR (133) – 170kN Axial, 4kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	36,0 mm	27.11.2020

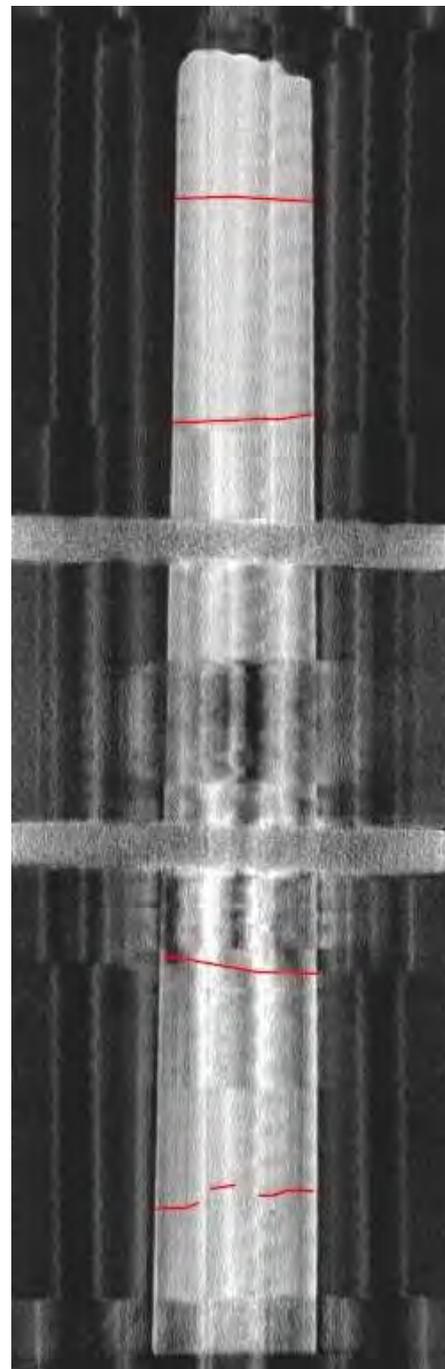
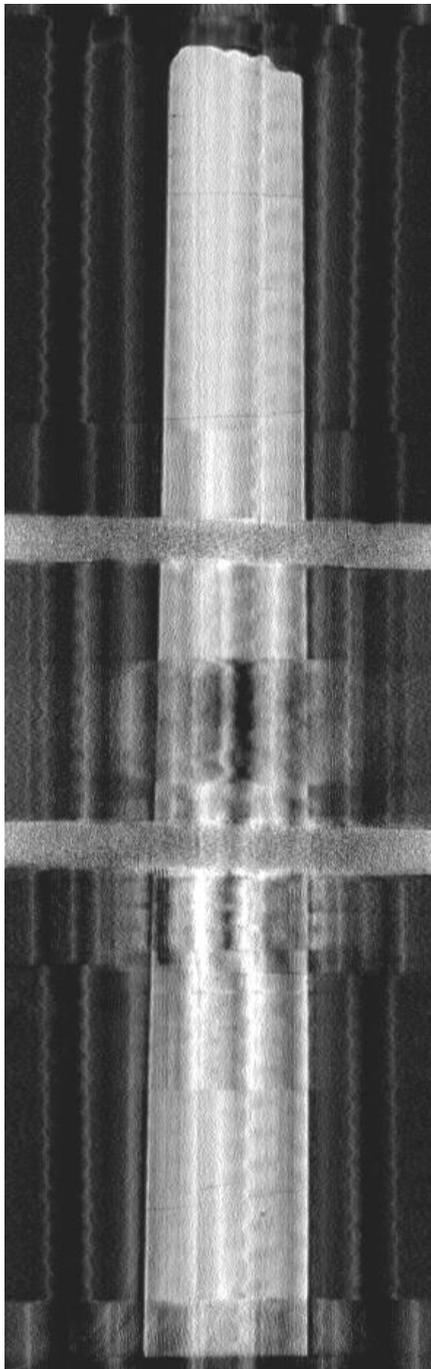


**Bewertung:**

5 Risse bei genauer Betrachtung erkennbar, exakte Rissverfolgung teils möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich. Rissbreite augenscheinlich kleiner als bei höherer Schnittebene.

Tab. 18: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_GCP\_01C\_COR(223) - 170kN Axial, 4kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_GCP_01C_COR (223) – 170kN Axial, 4kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	90,0 mm	27.11.2020



**Bewertung:**

4 Risse bei genauer Betrachtung erkennbar, exakte Rissverfolgung teils möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich. Rissbreite augenscheinlich kleiner als bei höherer Schnittebene, Risse im mittleren Bereich geschlossen.

#### 4.6.12. Bildauswertung V2\_DAT\_DCP\_01

Bereits beim Spannvorgang des doppelt korrosionsgeschützten Versuchskörpers, war eine, abweichend zu dem in Kapitel 4.6.11 beschriebenen Versuchskörper mit einfachem Korrosionsschutz, wenig systematische Rissausbildung, vorwiegend im Mittelbereich des Versuchskörpers, festzustellen. Ebenso zeichnete sich das Rissbild durch eine Vielzahl an kleinen Verästelungen an der Oberfläche aus, welche großteils Rissbreiten  $\leq 0,10$  mm aufwiesen.

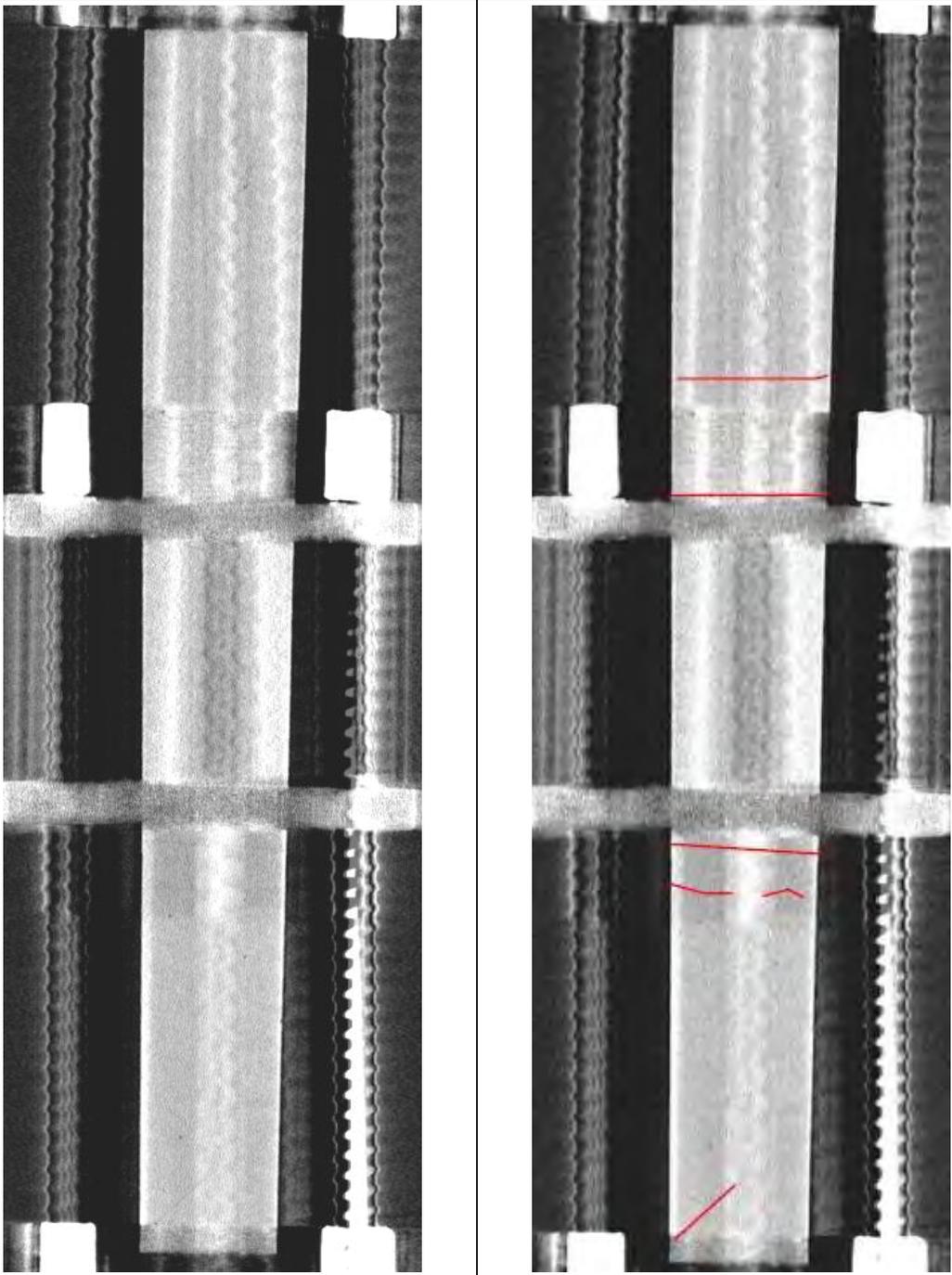
Diese Umstände, wie sie in Abb. 83 ersichtlich sind, erschwerten bei der Auswertung der CT-Aufnahmen eine präzise Detektion der Risse und Rissverläufe. Ebenso kann, bedingt durch den Aufbau eines DCP Versuchskörpers, die Rissbestimmung in der inneren Verpressmörtelschicht nur bei Schnittebenen nahe dem Bewehrungsstab durchgeführt werden.



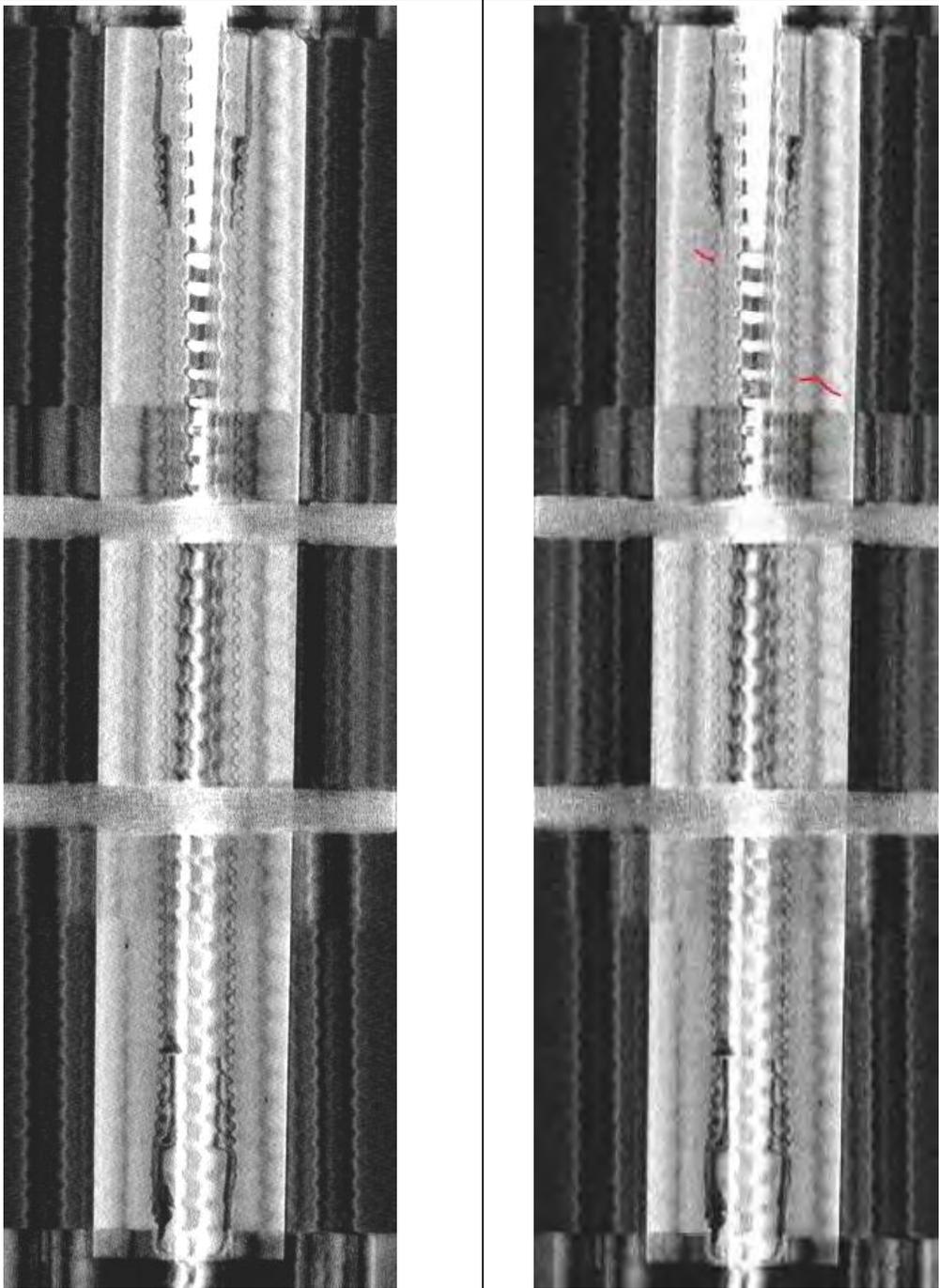
Abb. 83: Rissbild in V2\_DAT\_DCP\_01 mit  $100\% \cdot F_{\max}$

Da sich bei der beschriebenen Laststufe mit 4kN Querkraft eine – im Vergleich zum Prüfkörper V2\_DAT\_GCP\_01 – wesentlich geringere Rissbreitenveränderung entwickelte, wurde der Prüfkörper V2\_DAT\_DCP\_01 abschließend mit einer Querkraft von 11,5 kN und einer Axialkraft von 170 kN ( $50\% \cdot F_{\max}$ ) belastet. Da auch diese Belastung keine nennenswerte Veränderung im Rissbild ergab, werden die Bilder dieser Laststufe nicht explizit in diesem Kapitel angeführt.

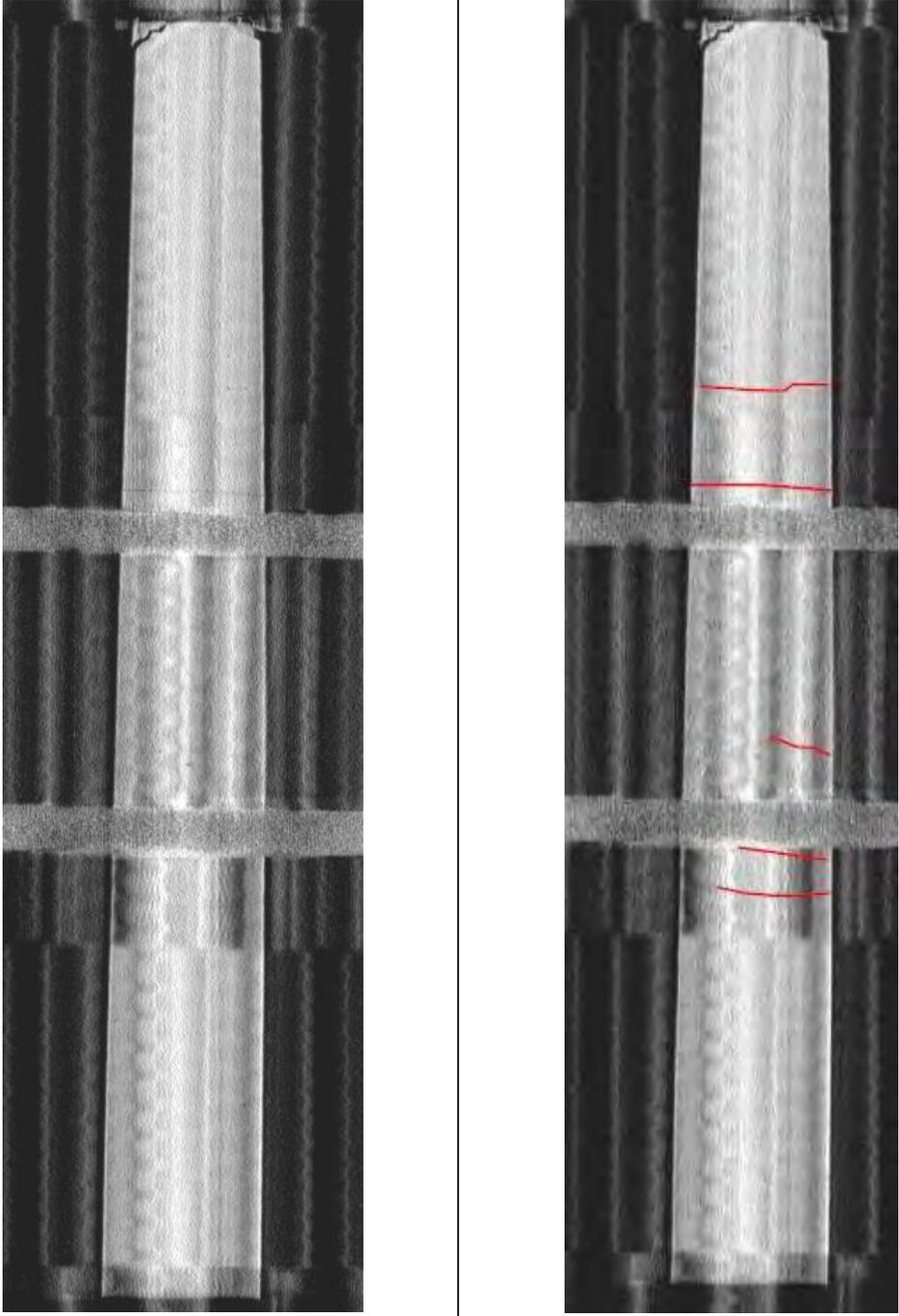
Tab. 19: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_DCP\_01A\_COR(100) - 170kN Axial, 0kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_DCP_01A_COR (100) – 170kN Axial, 0kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	18,0 mm	27.11.2020
			
<p><b>Bewertung:</b> 5 Risse bei genauer Betrachtung erkennbar, exakte Rissverfolgung nicht möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich.</p>			

Tab. 20: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_DCP\_01A\_COR(130) - 170kN Axial, 0kN Quer

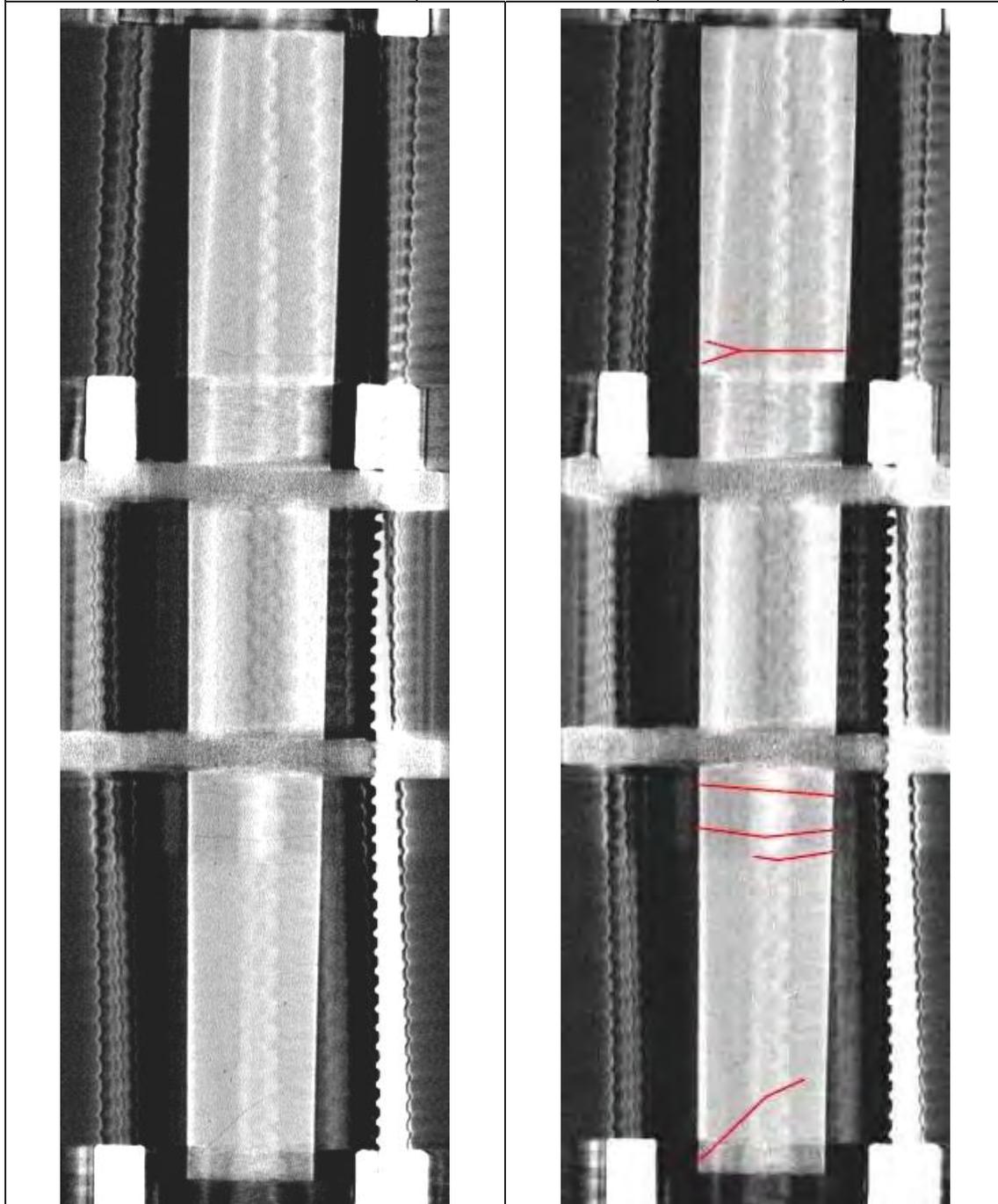
Bildname/Prüflast	Schnittrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_DCP_01A_COR (130) – 170kN Axial, 0kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	36,0 mm	27.11.2020
			
<p><b>Bewertung:</b> 2 Rissansätze bei genauer Betrachtung erkennbar, keine auffallende bzw. durchgehende Risse erkennbar, keine Risse im Inneren des Ripprohrs erkennbar.</p>			

Tab. 21: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_DCP\_01A\_COR(220) - 170kN Axial, 0kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_DCP_01A_COR (220) – 170kN Axial, 0kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	90,0 mm	27.11.2020
			
<p><b>Bewertung:</b> 5 Risse bei genauer Betrachtung erkennbar, exakte Rissverfolgung teils möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich.</p>			

Tab. 22: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_DCP\_01B\_COR(95) - 340kN Axial, 0kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_DCP_01B_COR (95) – 340kN Axial, 0kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	18,0 mm	27.11.2020

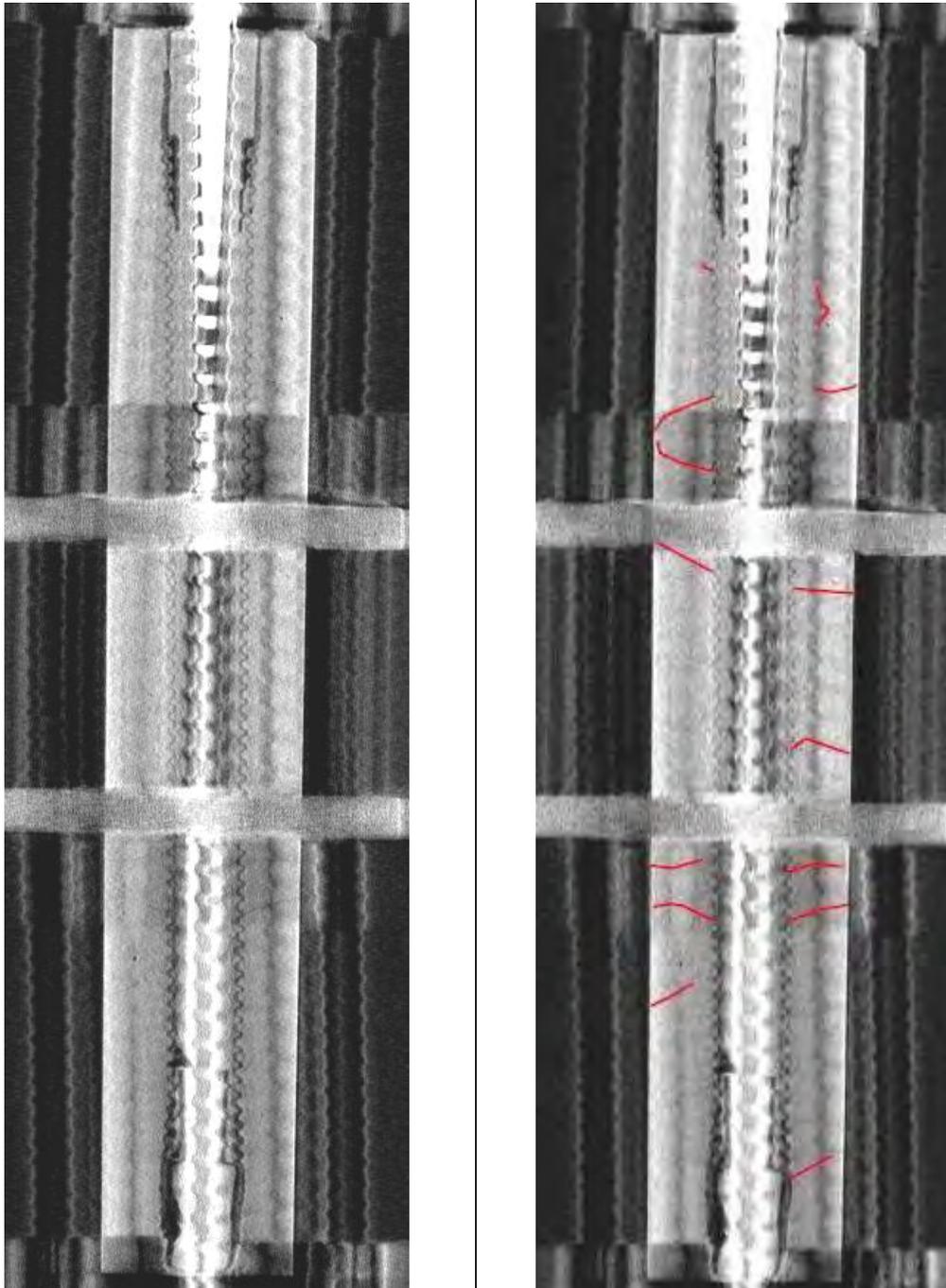


**Bewertung:**

5 Risse bei genauer Betrachtung erkennbar, exakte Rissverfolgung teils möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich. Rissbreite augenscheinlich nur geringfügig größer als bei  $50\% \cdot F_{max}$

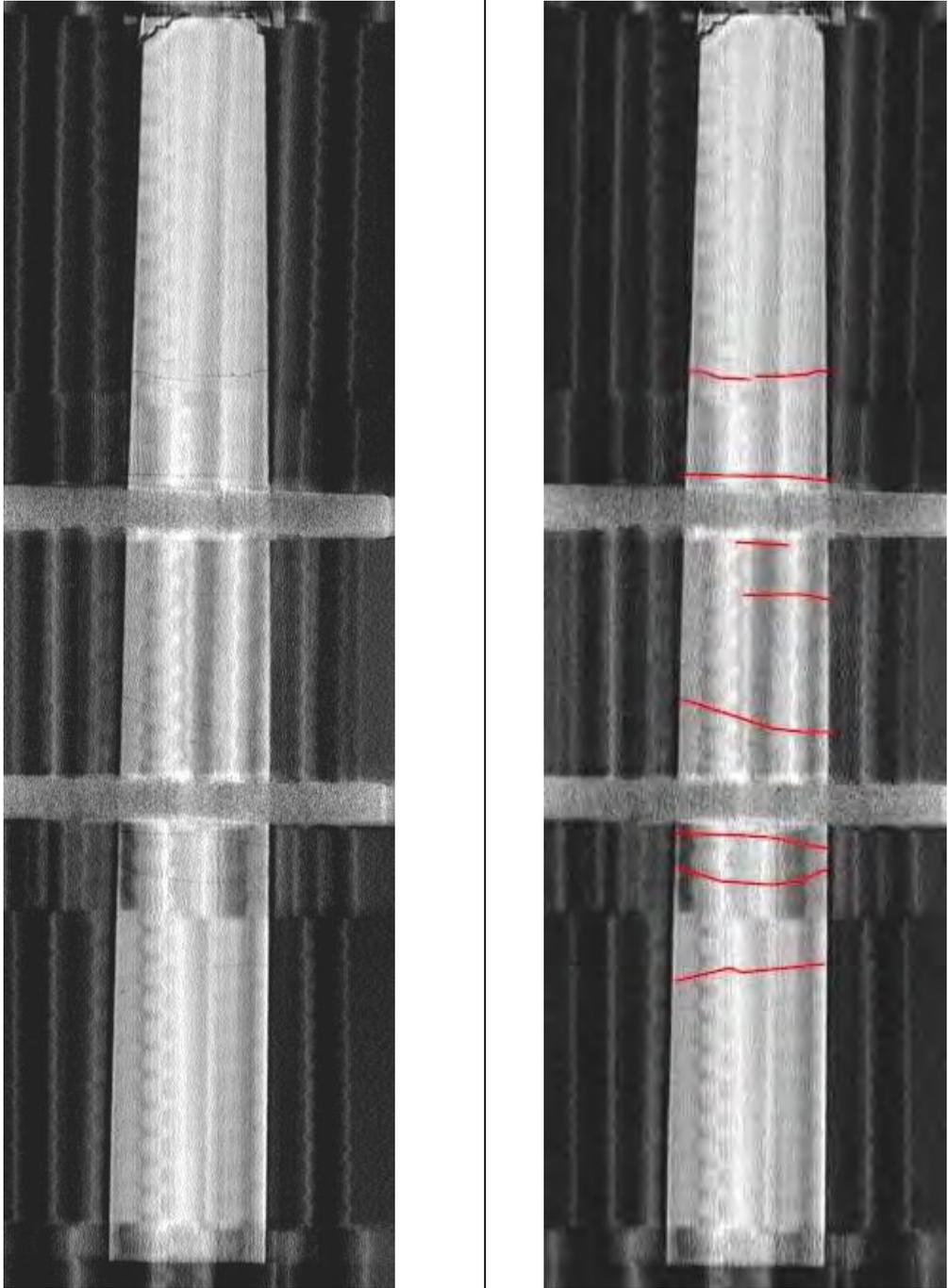
**Tab. 23: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_DCP\_01B\_COR(125) - 340kN Axial, 0kN Quer**

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_DCP_01B_COR (125) – 340kN Axial, 0kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	36,0 mm	27.11.2020

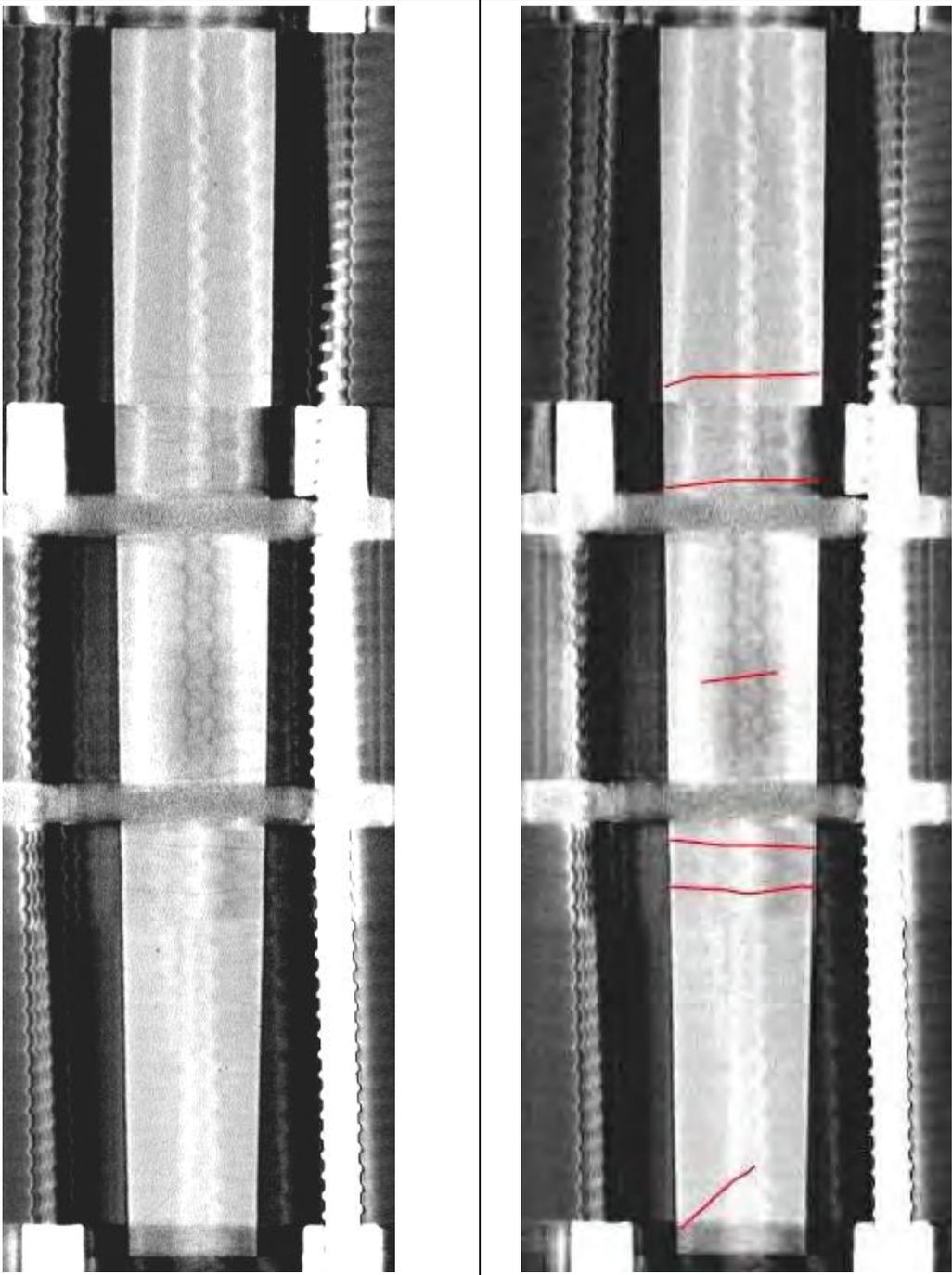

**Bewertung:**

Viele Risse bei genauer Betrachtung erkennbar, exakte Rissverfolgung teils möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich. Rissbreite augenscheinlich nur geringfügig größer als bei  $50\% \cdot F_{\max}$ , keine auffälligen Risse im Inneren des Ripprohrs erkennbar.

Tab. 24: Auswertung CT-Bild V2 DAT\_DCP\_01B\_COR(215) - 340kN Axial, 0kN Quer

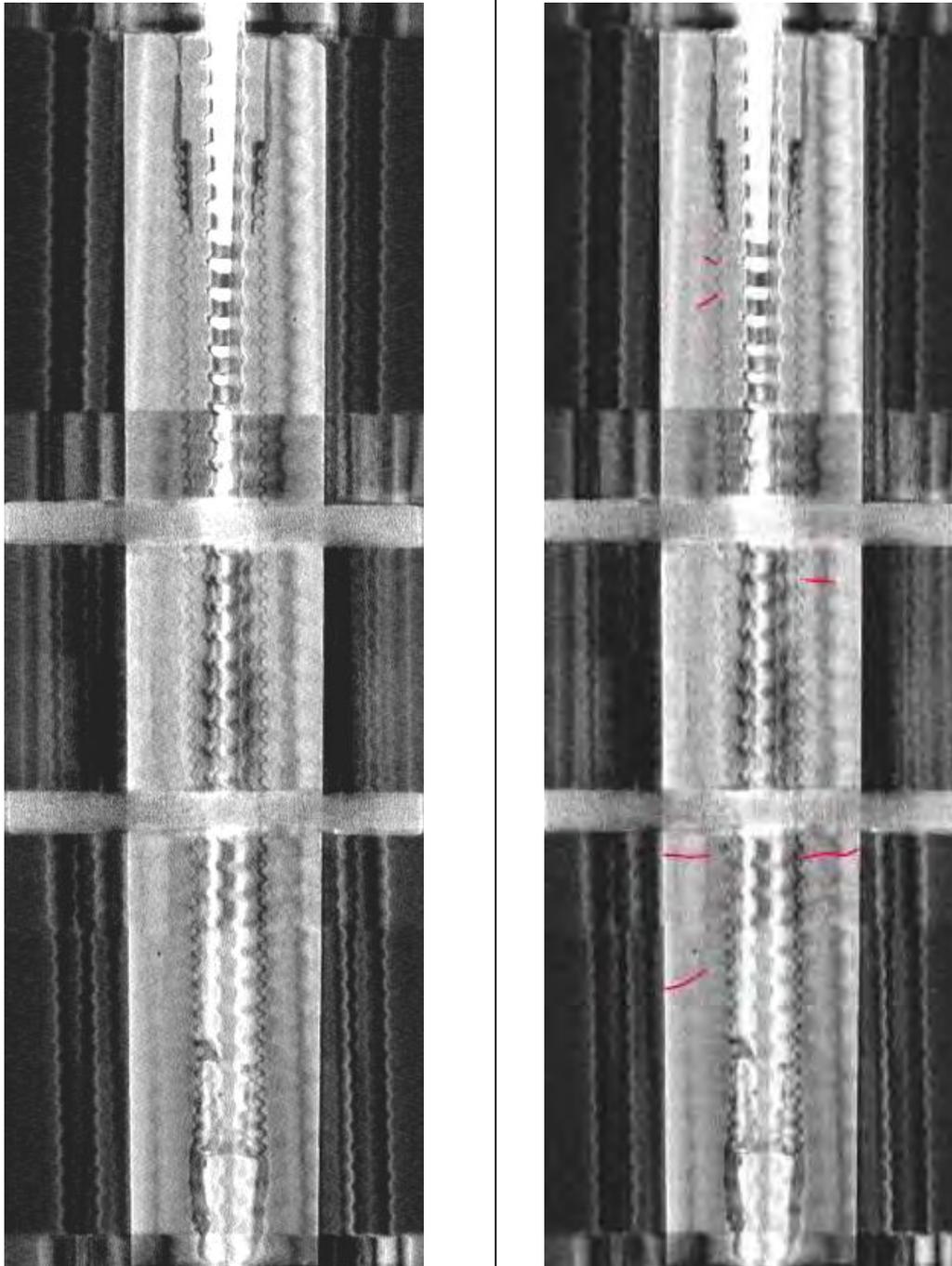
Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_DCP_01B_COR (215) – 340kN Axial, 0kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	90,0 mm	27.11.2020
			
<p><b>Bewertung:</b> 8 Risse bei genauer Betrachtung erkennbar, exakte Rissverfolgung teils möglich. Abweichendes Rissbild zu anderen Schnittebenen. Rissbreitenbestimmung nicht möglich, Rissbreite augenscheinlich nur geringfügig größer als bei 50% * F<sub>max</sub></p>			

Tab. 25: Auswertung CT-Bild V2 DAT\_DCP\_01C\_COR(117) - 170kN Axial, 4kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_DCP_01C_COR (117) – 170kN Axial, 4kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	18,0 mm	27.11.2020
			
<p><b>Bewertung:</b> 6 Risse bei genauer Betrachtung erkennbar, exakte Rissverfolgung teils möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich. Mittig liegender Riss erkennbar, dieser ist bei reiner Axialkraft nicht sichtbar.</p>			

Tab. 26: Auswertung CT-Bild V2\_DAT\_DCP\_01C\_COR(147) - 170kN Axial, 4kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_DCP_01C_COR (147) – 170kN Axial, 4kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	36,0 mm	27.11.2020

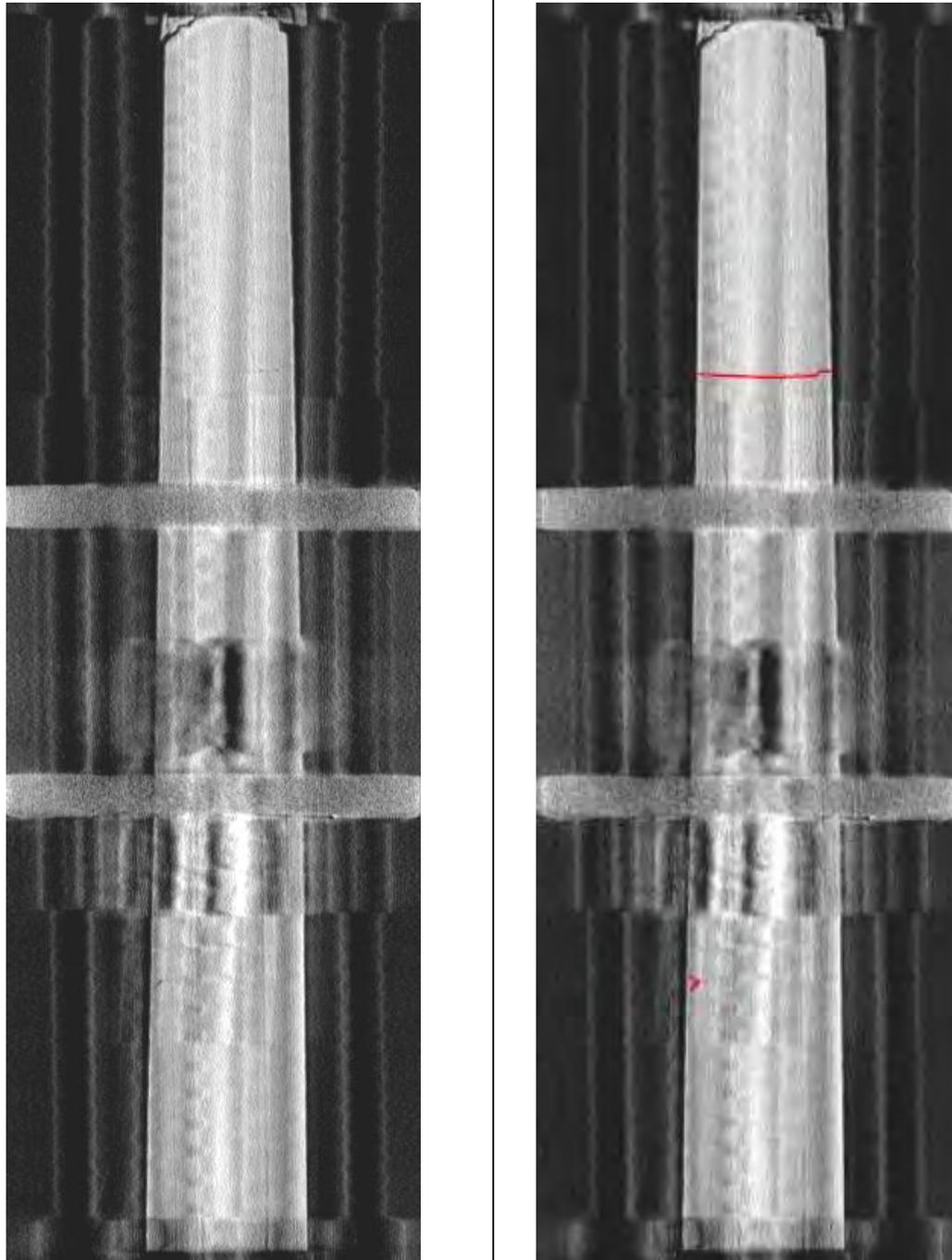


**Bewertung:**

Mehrere Rissansätze bei genauer Betrachtung erkennbar, exakte Rissverfolgung nicht möglich, keine Risse im Inneren des Ripprohrs erkennbar. Rissbreitenbestimmung nicht möglich. Mehr Rissansätze als bei reiner Axialkraft sichtbar.

Tab. 27: Auswertung CT-Bild V2 DAT\_DCP\_01C\_COR(237) - 170kN Axial, 4kN Quer

Bildname/Prüflast	Schnitttrichtung	Schnitttiefe	Scan-Datum
V2_DAT_DCP_01C_COR (237) – 170kN Axial, 4kN Quer	Coronal (von oben nach unten)	90,0 mm	27.11.2020



**Bewertung:**

1 Riss bei genauer Betrachtung erkennbar, exakte Rissverfolgung möglich. Rissbreitenbestimmung nicht möglich. Andere, bei reiner Axialkraft erkennbare Risse sind in dieser Schnittebene nicht sichtbar.

#### 4.6.13. Auswertung der Laborversuche

Zusätzlich zu den beschriebenen Untersuchungen mittels Computertomographen, wurden weitere Versuchskörper der zweiten und dritten Charge (GCP und DCP) im Labor getestet und untersucht. Dieses Kapitel soll zuerst einen Überblick über die Prüfmethode und den Ablauf geben, bevor anschließend eine Auswertung der Rissbilder und Rissbreiten dieser Versuche tabellarisch dargestellt werden. Abschließend findet sich eine Zusammenfassung der Prüfergebnisse.

##### 4.6.13.1. Prüfmethode und Prüfkörper

Getestet und dokumentiert wurden insgesamt acht Prüfkörper, wobei zwei davon die bereits getesteten Prüfkörper aus Kapitel 4.6.10 waren. Ebenso wurde aus praktischen Gründen im Laufe der Laborprüfung von dem in Kapitel 4.6.3 beschriebenen Prüfrahmen auf einen größeren und massiveren Prüfrahmen, wie in Abb. 84 (rechts) dargestellt, gewechselt, da dieser die Durchführung der Prüfungen einfacher gestaltete. Zur Testung wurden folgende Prüfkörper herangezogen:

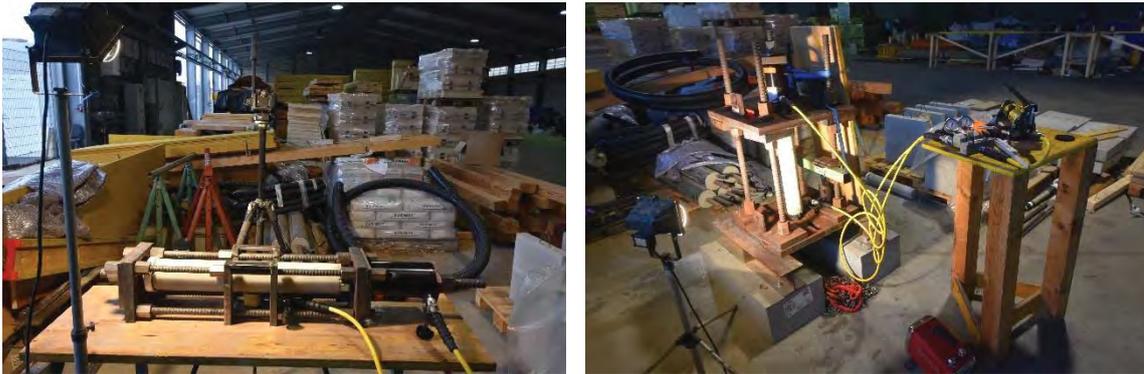
- V2\_DAT\_GCP\_02 (kleiner Prüfrahmen)
- V2\_DAT\_DCP\_02 (kleiner Prüfrahmen)
- V2\_DAT\_GCP\_01 (großer Prüfrahmen, vorab bereits im CT getestet)
- V2\_DAT\_DCP\_01 (großer Prüfrahmen, vorab bereits im CT getestet)
- V3\_DAT\_GCP\_01 (großer Prüfrahmen)
- V3\_DAT\_GCP\_02 (großer Prüfrahmen)
- V3\_DAT\_DCP\_01 (großer Prüfrahmen)
- V3\_DAT\_DCP\_02 (großer Prüfrahmen)

Dabei wurde jeder Prüfkörper im Prüfrahmen gespannt und unter folgenden Laststufen belastet, dokumentiert und das Rissbild (inkl. Rissbreiten) gemessen und skizziert:

- 1. Laststufe: 0 kN Axial; 0 kN Querkraft (Ausgangszustand)
- 2. Laststufe: 85 kN Axial ( $25\% \cdot F_{\max}$ ); 0 kN Querkraft
- 3. Laststufe: 170 kN Axial ( $50\% \cdot F_{\max}$ ); 0 kN Querkraft
- 4. Laststufe: 255 kN Axial ( $75\% \cdot F_{\max}$ ); 0 kN Querkraft
- 5. Laststufe: 340 kN Axial ( $100\% \cdot F_{\max}$ ); 0 kN Querkraft
- 6. Laststufe: 170 kN Axial ( $50\% \cdot F_{\max}$ ); 4 kN Querkraft

Zusätzlich wurden die Prüfkörper der dritten Charge, V3\_DAT\_GCP\_01, V3\_DAT\_DCP\_01, V3\_DAT\_GCP\_02 und V3\_DAT\_DCP\_02 abschließend noch mit einer weiteren Laststufe belastet:

- 7. Laststufe: 170 kN Axial ( $50\% \cdot F_{\max}$ ); 8 kN Querkraft



**Abb. 84: Laboruntersuchungen; Links: kleiner Versuchsrahmen; Rechts: großer Versuchsrahmen**

Die in den nachfolgenden Kapiteln dargestellten Auswertungen entsprechen der tabellarischen Form aller, während der Laborversuche dokumentierten und fotografierten Risse am Prüfkörper. Die jeweiligen Rissbilder wurden nach der Erstrissbildung skizziert und nach jeder Laststufe kontrolliert und falls notwendig ergänzt. Die Rissbreitenbestimmung erfolgte mittels einem Rissbreitenlineal. Dieses wurde auf den jeweiligen Riss gehalten und anschließend mit einem hochauflösenden Makroobjektiv fotografiert. Die Auswertung dieser Rissbreitenbilder erfolgte anschließend am Computer.

Zusätzlich zu den beschriebenen Rissbreiten- und Rissbildversuchen wurde, aufgrund einiger im CT-Scan erhaltenen Ergebnisse – nämlich keine erkennbaren Risse im inneren Verpresskörper des DCP – ein solcher freigelegt und begutachtet. Dafür wurde der Prüfkörper V2\_DAT\_DCP\_02 im Anschluss an die Prüfung aus der Prüfkonstruktion ausgebaut und die äußere Verpressmörtelschicht vorsichtig entfernt. Ebenso wurde das freigelegte Riprohr mittels Säge und Messer behutsam aufgeschnitten und entfernt. Die dazu erhaltenen Ergebnisse sind in Kapitel 4.6.15 dargestellt.

Die in Kapitel 4.6.13.2 bis 4.6.13.9 enthaltenen Tabellen beschreiben den Abstand der Risse im Verpresskörper von der Prüfkörperunterkante (der Presse gegenüberliegende). Des Weiteren wird die Risseigenschaft (z.B. Rissrichtung bzw. Anmerkung) beschrieben. Hierbei wurde in horizontale Risse (ca. 90° zur Bewehrungsachse), links bzw. rechts geneigten Rissen und verästelten Rissen unterschieden. War ein Riss bei einer bestimmten Laststufe noch nicht erkennbar, so wurde dies in den Tabellen mit einem ‚X‘ gekennzeichnet.

Bei der Angabe der Rissbreite (in mm) wurde versucht eine eindeutige Zuordnung der Rissbreite vorzunehmen. War dies nicht möglich, wurde die auf Grund der Auswertung zu erkennende Schwankungsbreite der Rissbreite (z.B. 0,3 – 0,35) angeführt. Ident wurde auch bei sehr kleinen Rissen vorgegangen. Waren diese erkennbar, jedoch nicht messbar (auf Grund einer Rissbreite kleiner 0,10 mm) wurde dies ebenfalls vermerkt.

## 4.6.13.2. Laborauswertung V2\_DAT\_GCP\_02

Tab. 28: Laborauswertung V2\_DAT\_GCP\_02

Alter des Probekörpers: &gt;28 Tage

	3	4	4a	5	2	6	1
<b>Riss-Nr.</b>							
<b>Abstand von Unterkante [cm]</b>	10,5	19,5		28,5	37,5	43	49,5
<b>Rissrichtung</b>	Horizontal	Horizontal	Verästelung von 4	Horizontal	Horizontal	Horizontal mit Verästelung	Horizontal
<b>Rissbreiten [mm]</b>	<b>0% * F<sub>max</sub> - 0kN</b>	<0,1	X	X	X	X	X
	<b>25% * F<sub>max</sub> - 85kN</b>	0,1	0,1	X	<0,1	0,1	X
	<b>50% * F<sub>max</sub> - 170kN</b>	0,2	0,1 - 0,2	X	0,1	0,1 - 0,2	X
	<b>75% * F<sub>max</sub> - 255kN</b>	0,2	0,2	X	0,2	0,2 - 0,3	X
	<b>100% * F<sub>max</sub> - 340kN</b>	0,2	0,35	>0,1	0,35	0,3 - 0,35	<0,1
	<b>50% * F<sub>max</sub> + 4 Quer - 170kN / 4kN</b>	0,2	0,1 - 0,2	<0,1	0,5	0,1 - 0,2	<0,1
<b>Anmerkungen</b>	Gemessene Rissbreiten entsprechen maximaler Rissbreiten, Riss 5 zeigte Risschluss nahe der Querkraftpresse.						

## 4.6.13.3. Laborauswertung V2\_DAT\_DCP\_02

Tab. 29: Laborauswertung V2\_DAT\_DCP\_02

Alter des Probekörpers: &gt;28 Tage

Riss-Nr.	3	2	5	1	4
Abstand von Unterkante [cm]	14,5	26	34	40	48
Rissrichtung / Eigenschaft	Horizontal	links geneigt	Horizontal	rechts geneigt	Horizontal
Rissbreiten [mm]	0% * F <sub>max</sub> - 0kN	X	X	X	X
	25% * F <sub>max</sub> - 85kN	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	50% * F <sub>max</sub> - 170kN	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	75% * F <sub>max</sub> - 255kN	0,1 - 0,2	0,1	<0,1	0,1
	100% * F <sub>max</sub> - 340kN	0,1 - 0,2	0,1	<0,1	0,1
	50% * F <sub>max</sub> + 4 Quer - 170kN / 4kN	0,1 - 0,2	0,3	<0,1	0,1
Anmerkungen	Gemessene Rissbreiten entsprechen maximaler Rissbreiten, Riss 2 zeigte Risschluss nahe der Querkraftpresse.				

4.6.13.4. Laborauswertung V2\_DAT\_GCP\_01

Tab. 30: Laborauswertung V2\_DAT\_GCP\_01

Alter des Probekörpers: &gt;28 Tage

Riss-Nr.	1	2	3	6	4	5
Abstand von Unterkante [cm]	5	16,5	29,5	33	41	52,5
Rissrichtung / Eigenschaft	Horizontal	Horizontal	links geneigt, verästelt	Horizontal, nur halbseitig	Horizontal	links geneigt
Rissbreiten [mm]	0% * Fmax - 0kN	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	25% * Fmax - 85kN	0,1	0,1 - 0,2	0,1	<0,1	<0,1
	50% * Fmax - 170kN	0,1	0,2	0,1	<0,1	0,2
	75% * Fmax - 255kN	0,1	0,3	0,2	<0,1	0,2
	100% * Fmax - 340kN	0,1	0,35	0,2 - 0,3	0,35	0,3 - 0,35
	50% * Fmax + 4 Quer - 170kN / 4kN	0,1	0,2	0,3	<0,1	0,2
Anmerkungen	Prüfkörper wurde bereits für CT-Versuch getestet, daher Rissbild bereits abgeschlossen. Gemessene Rissbreiten entsprechen maximaler Rissbreiten, Riss 3 zeigte Risschluss nahe der Querkraftpresse. Auftreten mehrerer Haarrisse bei Querkraftbelastung					

4.6.13.5. Laborauswertung V2\_DAT\_DCP\_01

Tab. 31: Laborauswertung V2\_DAT\_DCP\_01

Alter des Probekörpers: >28 Tage

Riss-Nr.	1	2	3	6	4	5
Abstand von Unterkante [cm]	16	22	25	33	37	40
Rissrichtung / Eigenschaft	Horizontal, verästelt	Horizontal	rechts geneigt, verästelt	Horizontal	links geneigt	Horizontal
Rissbreiten [mm]	0% * Fmax - 0kN	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	25% * Fmax - 85kN	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	50% * Fmax - 170kN	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	75% * Fmax - 255kN	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	100% * Fmax - 340kN	<0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1
	50% * Fmax + 4 Quer - 170kN / 4kN	<0,1	<0,1	0,1	0,1 - 0,2	<0,1
Anmerkungen	Prüfkörper wurde bereits für CT-Versuch getestet, daher Rissbild bereits abgeschlossen. Gemessene Rissbreiten entsprechen maximaler Rissbreiten, Riss 3 und 6 zeigten Risschluss nahe der Querkraftpresse.					

## 4.6.13.6. Laborauswertung V3\_DAT\_GCP\_01

Tab. 32: Laborauswertung V3\_DAT\_GCP\_01

Alter des Probekörpers: 9 Tage

Riss-Nr.	9	1	8	2	3	4	5	7	6	
Abstand von Unterkante [cm]	6	15,5	22	28	33,5	37	45,5	50,5	55	
Rissrichtung / Eigenschaft	unförmig von Unterkante kommend	links geneigt, verärstelt	Horizontal	Horizontal	rechts geneigt	Horizontal	Horizontal, verärstelt zu 7	Horizontal, verärstelt zu 5	Horizontal, verärstelt	
Rissbreiten [mm]	0% * $F_{max}$ - 0kN	X	X	X	X	X	X	X	X	
	25% * $F_{max}$ - 85kN	X	<0,1	X	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	X	
	50% * $F_{max}$ - 170kN	X	0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	
	75% * $F_{max}$ - 255kN	<0,1	0,2	<0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	
	100% * $F_{max}$ - 340kN	0,2	0,3	<0,1	0,2	0,2	0,2	0,5	0,1	
	50% * $F_{max}$ + 4 Quer - 170kN / 4kN	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	50% * $F_{max}$ + 8 Quer - 170kN / 8kN	<0,1	0,1	0,1	0,1	>0,1	>0,1	0,7	<0,1	<0,1
Anmerkungen	Gemessene Rissbreiten entsprechen maximaler Rissbreiten, Riss 3 bis 5 zeigten Risschluss nahe der Querkraftpresse erst bei 8kN Querkraft.									

## 4.6.13.7. Laborauswertung V3\_DAT\_DCP\_01

Tab. 33: Laborauswertung V3\_DAT\_DCP\_01

Alter des Probekörpers: 9 Tage

Riss-Nr.	9	3	11	2	10	12	4	5	1	7	6	8
Abstand von Unterkante [cm]	15,5	16,5	18,5	19,5	22,5	25	29	33	35,5	37	39	44,5
Rissrichtung / Eigenschaft	Horizontal	rechts geneigt	rechts geneigt	rechts geneigt, verästelt	rechts geneigt, halbseitig	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal, halbseitig	Horizontal, verästelt	Horizontal
Rissbreiten [mm]	0% * F <sub>max</sub> - 0kN	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	25% * F <sub>max</sub> - 85kN	X	<0,1	X	<0,1	X	X	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	X
	50% * F <sub>max</sub> - 170kN	X	<0,1	X	<0,1	X	X	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	X
	75% * F <sub>max</sub> - 255kN	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	X	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
	100% * F <sub>max</sub> - 340kN	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
	50% * F <sub>max</sub> + 4 Quer - 170kN / 4kN	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1 - 0,2	0,1 - 0,2	<0,1	<0,1	<0,1
	50% * F <sub>max</sub> + 8 Quer - 170kN / 8kN	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,2	0,2	<0,1	0,1	<0,1
Anmerkungen	Gemessene Rissbreiten entsprechen maximaler Rissbreiten, Riss 4 bis 5 zeigten Risschluss nahe der Querkraftpresse erst bei 8kN Querkraft.											

## 4.6.13.8. Laborauswertung V3\_DAT\_GCP\_02

Tab. 34: Laborauswertung V3\_DAT\_GCP\_02

Alter des Probekörpers: 9 Tage

Riss-Nr.	6	1	12	8	2	3	9	4	7	10	5	11	
Abstand von Unterkante [cm]	6	13,5	16,5	21,5	24	30	31,5	37	39	46	48	51,5	
Rissrichtung / Eigenschaft	Horizontal	Horizontal	Horizontal, halbseitig	Horizontal									
Rissbreiten [mm]	0% * $F_{max}$ - 0kN	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	
	25% * $F_{max}$ - 85kN	X	<0,1	X	X	<0,1	<0,1	X	<0,1	X	<0,1	X	
	50% * $F_{max}$ - 170kN	<0,1	0,1	X	X	0,1	<0,1	X	0,1	<0,1	X	X	
	75% * $F_{max}$ - 255kN	<0,1	0,1	X	X	0,1	0,1	X	0,1	<0,1	X	0,1	X
	100% * $F_{max}$ - 340kN	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,2	0,1	<0,1	0,1	<0,1	0,1	0,1	<0,1
	50% * $F_{max}$ + 4 Quer - 170kN / 4kN	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,1	0,2	<0,1	0,1 - 0,2	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
	50% * $F_{max}$ + 8 Quer - 340kN / 8kN	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,1	>0,2	<0,1	0,1 - 0,2	<0,1	<0,1	0,1	<0,1
Anmerkungen	Gemessene Rissbreiten entsprechen maximaler Rissbreiten, Riss 3 zeigte Risschluss nahe der Querkraftpresse bei 4kN Querkraft.												

4.6.13.9. Laborauswertung V3\_DAT\_DCP\_02

Tab. 35: Laborauswertung V3\_DAT\_DCP\_02

Alter des Probekörpers: 9 Tage

Riss-Nr.	9	7	1	2	6	11	5	3	4	8	10
Abstand von Unterkante [cm]	14,5	18,5	21	24	26	33,5	35	37	41	43	45
Rissrichtung / Eigenschaft	Horizontal, halbseitig	rechts geneigt	rechts geneigt	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal	Horizontal, zackig	Horizontal, zackig	Horizontal
Rissbreiten [mm]	0% * F <sub>max</sub> - 0kN	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X
	25% * F <sub>max</sub> - 85kN	X	X	<0,1	<0,1	X	X	X	<0,1	X	X
	50% * F <sub>max</sub> - 170kN	X	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	X	<0,1	<0,1	<0,1	X
	75% * F <sub>max</sub> - 255kN	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	X	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1
	100% * F <sub>max</sub> - 340kN	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
	50% * F <sub>max</sub> + 4 Quer - 170kN / 4kN	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	<0,1
	50% * F <sub>max</sub> + 8 Quer - 170kN / 8kN	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	<0,1	0,1	<0,1	0,1	0,1	<0,1
Anmerkungen	Gemessene Rissbreiten entsprechen maximaler Rissbreiten, Riss 3 bis 5, 10 und 11 zeigten deutlichen Risschluss nahe der Querkraftpresse erst bei 8kN Querkraft.										

#### 4.6.14. Zusammenfassung der Prüfergebnisse

Um die Ergebnisse der in den vorhergegangenen Kapiteln ausgewerteten Belastungsversuche veranschaulichen zu können, werden nachfolgend einige der Ergebnisse genauer betrachtet, grafisch aufbereitet und durch eine verbale Beschreibung ergänzt.

Hierzu wurde im ersten Schritt der Rissabstand (aller Risse während der Versuchsdurchführung) zur Probekörperunterkante dargestellt. In Abb. 85 ist eine Zusammenstellung sämtlicher Risse aller untersuchten Versuchskörper, über die gesamte Länge des jeweiligen Probekörpers, dargestellt. Zusätzlich dazu wurden die Daten nach deren Abbindezeit unterteilt. Aus Charge drei, die Probekörper mit einer Abbindezeit von 9 Tagen und aus Charge zwei jene mit einer Abbindezeit >28 Tagen. Der Einfachheit halber, wurden die Probekörpernamen in Abb. 85 um den Ausdruck ‚DAT‘ gekürzt.

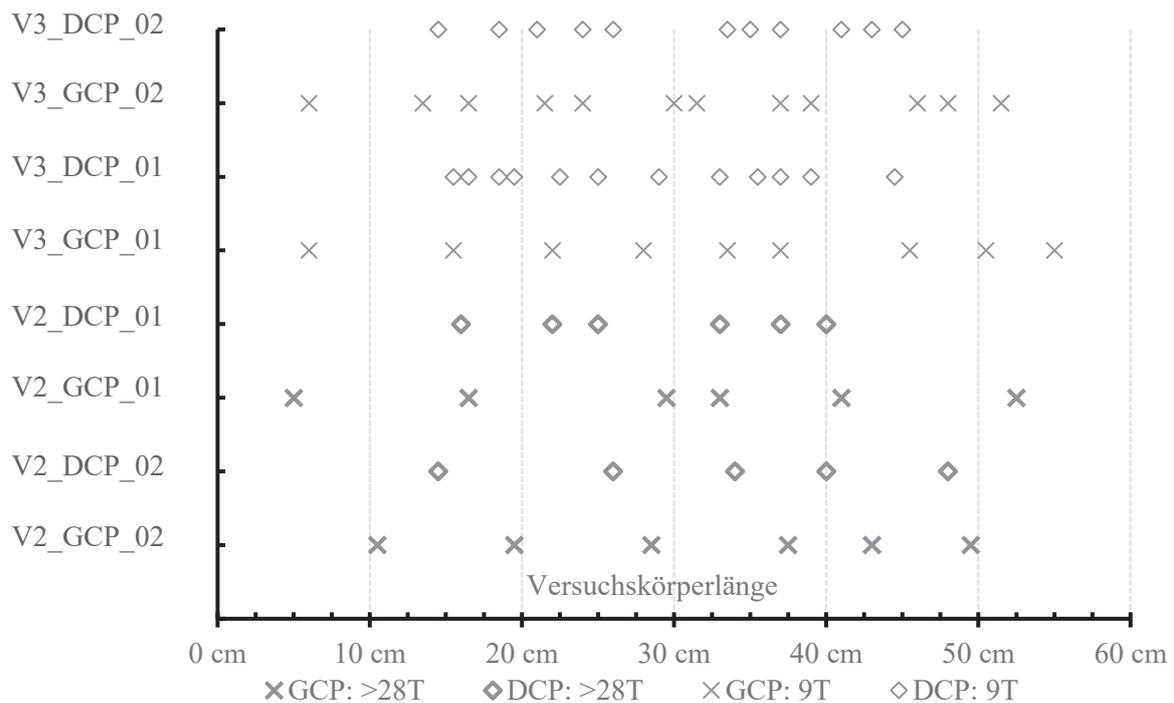
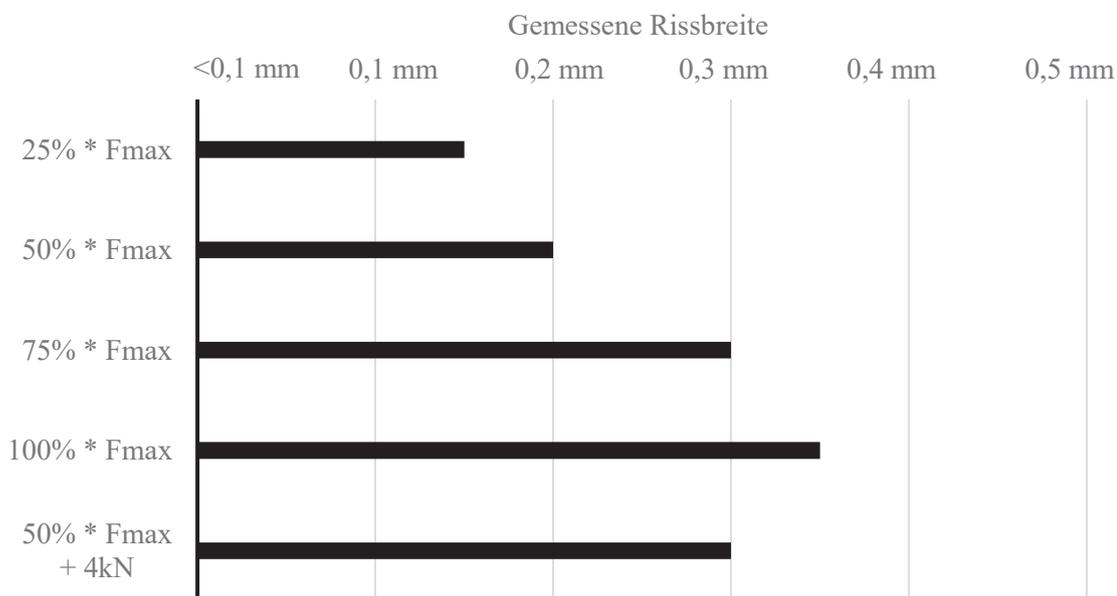


Abb. 85: Rissabstand zur Unterkante des Versuchskörpers

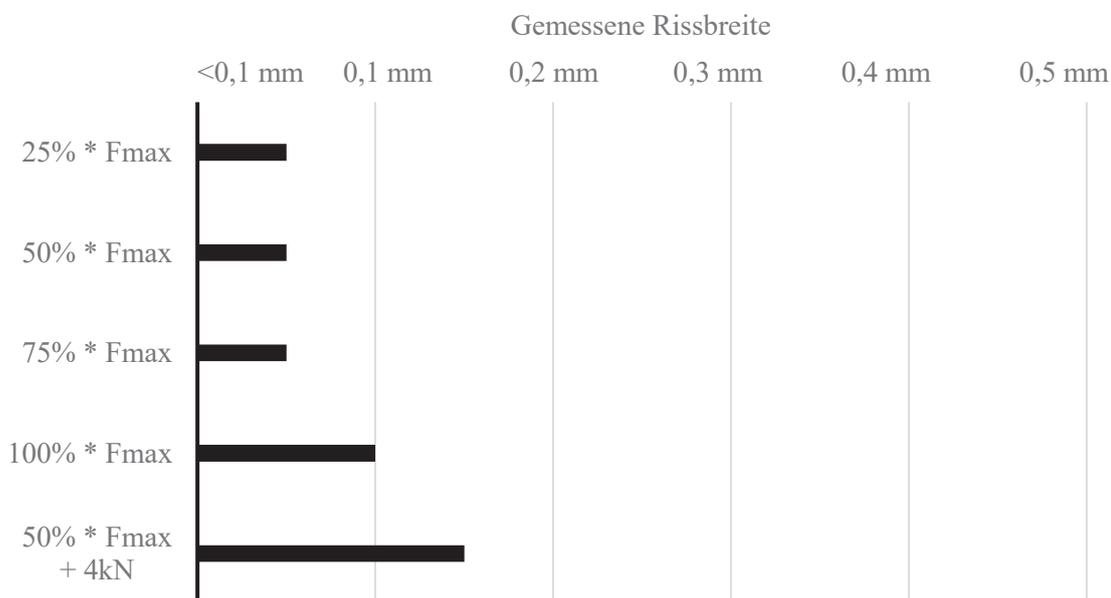
Die Darstellung in Abb. 85 zeigt, dass zum einen zwischen den Versuchskörper mit einer Abbindezeit von 9 Tagen und jenen mit 28 Tagen ein Unterschied in der Anzahl an Rissen zu erkennen ist. Zum anderen ist ersichtlich, dass sich die Rissbildung bei Versuchskörpern mit einfachem Korrosionsschutz regelmäßiger über die Länge des Versuchskörpers verteilt.

Des Weiteren wurden die Rissbreiten der einzelnen Probekörper begutachtet und verglichen. Um dies darstellen zu können, wurde für die nachfolgende Auswertung immer der ‚Maximalriss‘, also die größte, erfasste Rissbreite jedes Risses betrachtet. Daraus lässt sich,

wie in Abb. 86 und Abb. 87 ersichtlich, die Rissbreitenentwicklung des Maximalrisses in Abhängigkeit der Laststufe beobachten. Sollte eine eindeutige Zuordnung der Rissbreite nicht möglich gewesen sein, wurde diese als Zwischenwert angeführt.



**Abb. 86:** Rissbreitenentwicklung V2\_DAT\_GCP\_01



**Abb. 87:** Rissbreitenentwicklung V2\_DAT\_DCP\_01

Abschließend wird in Abb. 88 ein Vergleich der Rissbreiten aller Versuchskörper für die jeweilige Laststufe, unterteilt nach GCP und DCP, dargestellt. Die roten Markierungen stellen den jeweiligen Mittelwert dar.

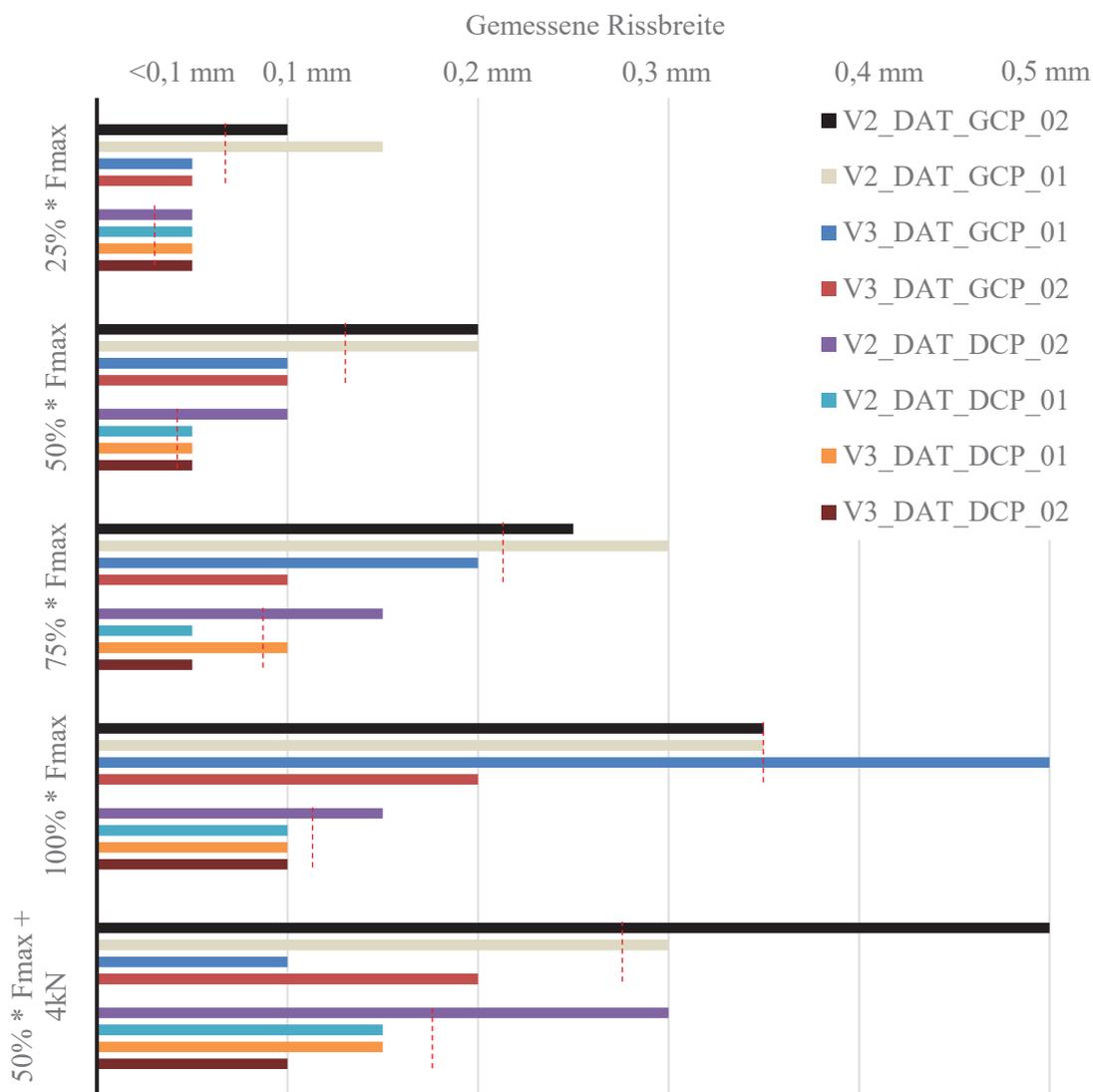


Abb. 88: Vergleich der Rissbreitenentwicklung aller Versuchskörper

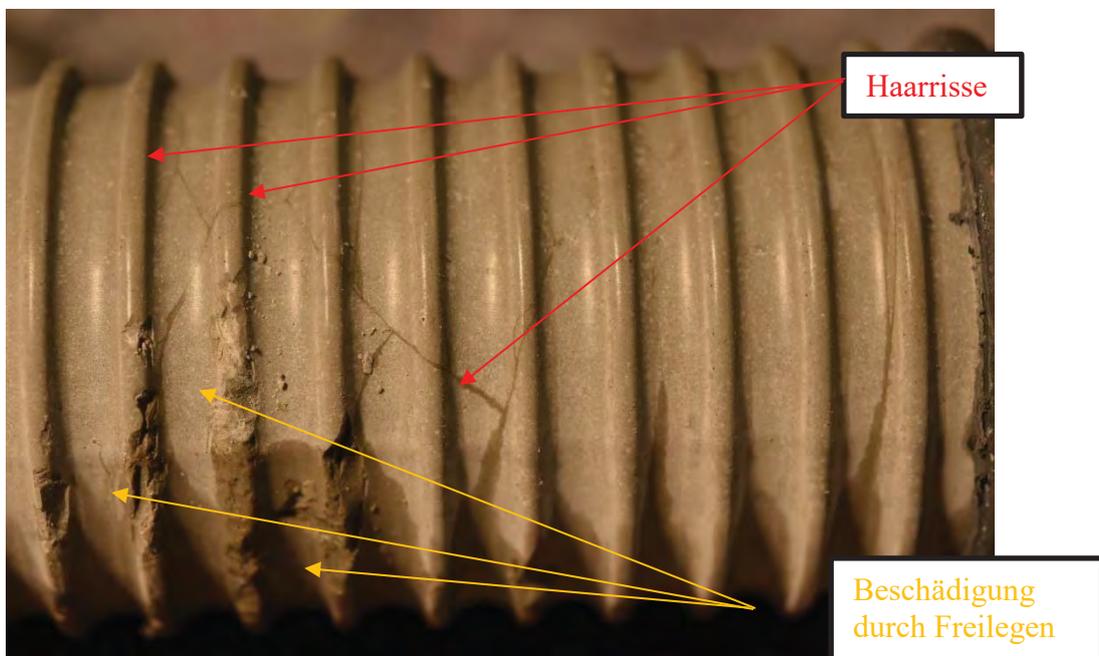
#### 4.6.15. Freilegung des inneren Verpresskörpers von V2\_DAT\_DCP\_02

Wie bereits kurz beschrieben, wurde im Laufe der Laborversuche der innere Verpresskörper eines DCP Versuchskörpers freigelegt und begutachtet. Ausschlaggebender Grund dafür waren die Ergebnisse der in Kapitel 4.6.10 beschriebenen CT-Scans – nämlich keine eindeutig erkennbaren Risse im inneren Verpresskörper. Nach vorsichtigem Entfernen der äußeren Verpressgutschicht mittels Meißel, wurde das Ripprohr behutsam aufgeschnitten und der

Zustand des inneren Verpresskörpers dokumentiert. Um eine bessere Sichtbarkeit der Haarrisse zu erzielen, wurde der Prüfkörper vor der Fotodokumentation zusätzlich benässt. Durch diesen Arbeitsschritt wurden entlang des Verpresskörpers viele sehr dünne Haarrisse ( $< 0,1$  mm) im Verpresskörper sichtbar.



**Abb. 89:** Bruchstück des äußeren Verpresskörpers mit Verbundrippen



**Abb. 90:** Haarrisse im inneren Verpresskörper

Die in Abb. 90 erkennbaren Beschädigungen an den Betonrippen entstanden beim Freilegen.

## **4.7. Zusammenfassung der durchgeführten Laborversuche**

Nachfolgend werden kurz die Ergebnisse und Erkenntnisse der in diesem Kapitel durchgeführten Laborversuche angeführt.

### **4.7.1. Verwendung von Kunststoffen für den Kopfbereich von Ankern**

Die Möglichkeiten von Kunststoffen zeigen, dass derartige Materialien sowohl bei der Sanierung als auch dem Neubau von Ankern verwendet werden können. Bei ersterem besteht die Möglichkeit, vor allem Hohlräume im Kopfbereich von Ankern zu verfüllen und somit deren Funktion und Dauerhaftigkeit zu gewährleisten. Bei zweitem zeigt sich vor allem in Bezug auf die Vorgaben der ÖNORM B 4456 (vgl. Kapitel 4.7.2), dass hier erhebliches Potential gegeben ist.

### **4.7.2. Dichtheit von Ankerköpfen**

Als Grundlage für die ÖNORM B 4456 (ÖNORM B 4456) wurden diese Untersuchungen sowohl im Labor als auch im Feld untersucht. Dabei zeigte sich, dass bereits kleine Schäden bzw. Mängel die Dichtheit des Ankerkopfes beeinflussen und damit zu einer Beeinflussung des Korrosionsschutzes im Kopfbereich führen können.

### **4.7.3. Korrosionsnachbildung bei Mikropfählen**

Mit dieser Methode konnte zwar keine Aussage über die Dauerhaftigkeit der Konstruktionen bzw. die zufolge einer Korrosion eintretende Beeinflussung des Traggliedes gegeben werden, jedoch konnte damit Schadensbereiche bzw. Schwachstellen bei unterschiedlichen Korrosionsschutzsystemen gezeigt werden. Im Zuge weiterer Untersuchungen wäre es hier anzuraten, die Interaktion zwischen Verpresskörper und Boden ebenfalls abzubilden.

### **4.7.4. CT-Untersuchungen von Mikropfählen**

Diese Methode der Untersuchung zeigte, dass damit ein Einblick in das Innere eines Verpresskörpers gegeben werden kann. Dies ist sowohl zur Erfassung des Rissbildes als auch der Wirkung von Korrosionsschutzmaßnahmen eine erhebliche Besserstellung im Vergleich zu anderen Untersuchungsmethoden. Hierbei sollte zukünftig auch die Interaktion zwischen dem Verpresskörper und dem Boden berücksichtigt werden können. Weiters können derartige Untersuchungen auch als Grundlage für die Erarbeitung eines Modelles zur Rissbreitenbestimmung (rechnerisch und nachweistechisch) dienen und herangezogen werden.

## 5. GROSSVERSUCHSFELD

Im Zuge des Projektes wurden neben den in Kapitel 4 angeführten Laborversuchen auch Feldversuche durchgeführt. Diese sollten zum einen Einblick in die Herstellung von Mikropfählen und deren Verpresskörpern geben, zum anderen auch für die Erprobung der statischen und dynamischen Mikropfahlprüfung (vgl. Kapitel 6) dienen und zur Validierung des entwickelten Konzeptes der DCP-SBZ (vgl. Kapitel 3.3) herangezogen werden.

Nachfolgend wird kurz die Planung bzw. die Herstellung und Prüfung der Mikropfähle beschrieben, ehe abschließend auf die Ergebnisse der Feldversuche eingegangen wird.

### 5.1. Planung und Anordnung

Auf dem Gelände der Technischen Universität Graz im Bereich der Inffeldgasse konnte ein Versuchsfeld zur Installation von 15 Mikropfählen umgesetzt werden.

#### 5.1.1. Anordnung

Generell wurde im Zuge der Feldversuche drei Punkte betrachtet:

- Herstellung der Verpresskörper;
- Validierung des Konzeptes DCP-SBZ;
- Mikropfähle für dynamische Prüfungen.

Hierzu wurden drei Bereich an Probemikropfählen geplant, welche in ihrer Lage in Abb. 91 zu erkennen sind.

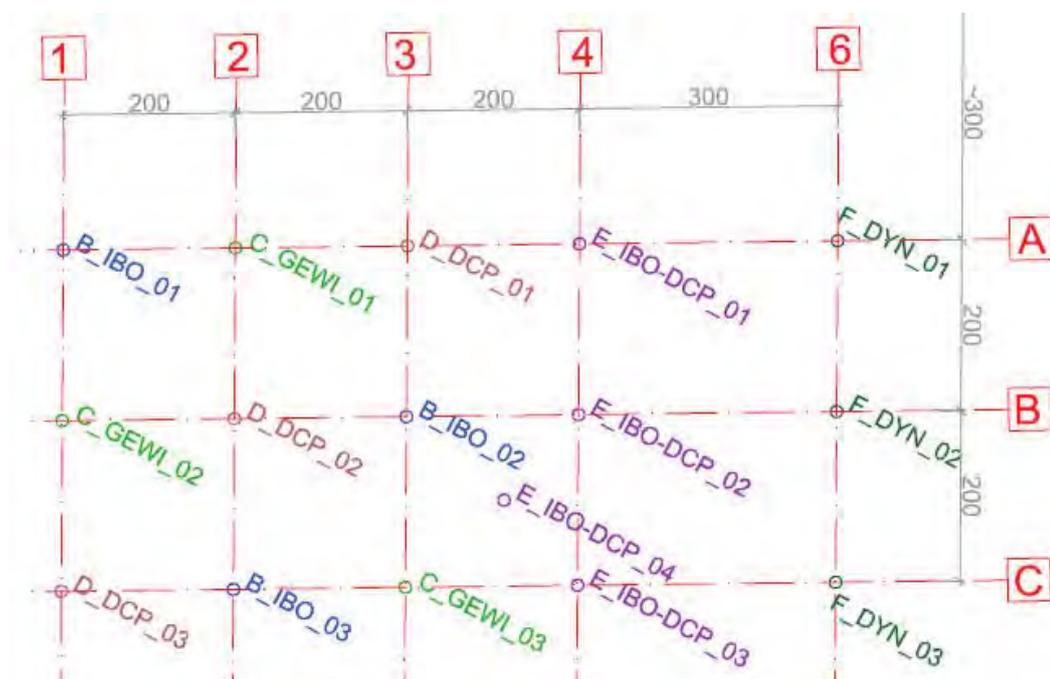


Abb. 91: Planische Darstellung des Feldversuches

Zudem zeigt Abb. 92 eine Übersicht aus der Vogelperspektive zum hergestellten Versuchsfeld.

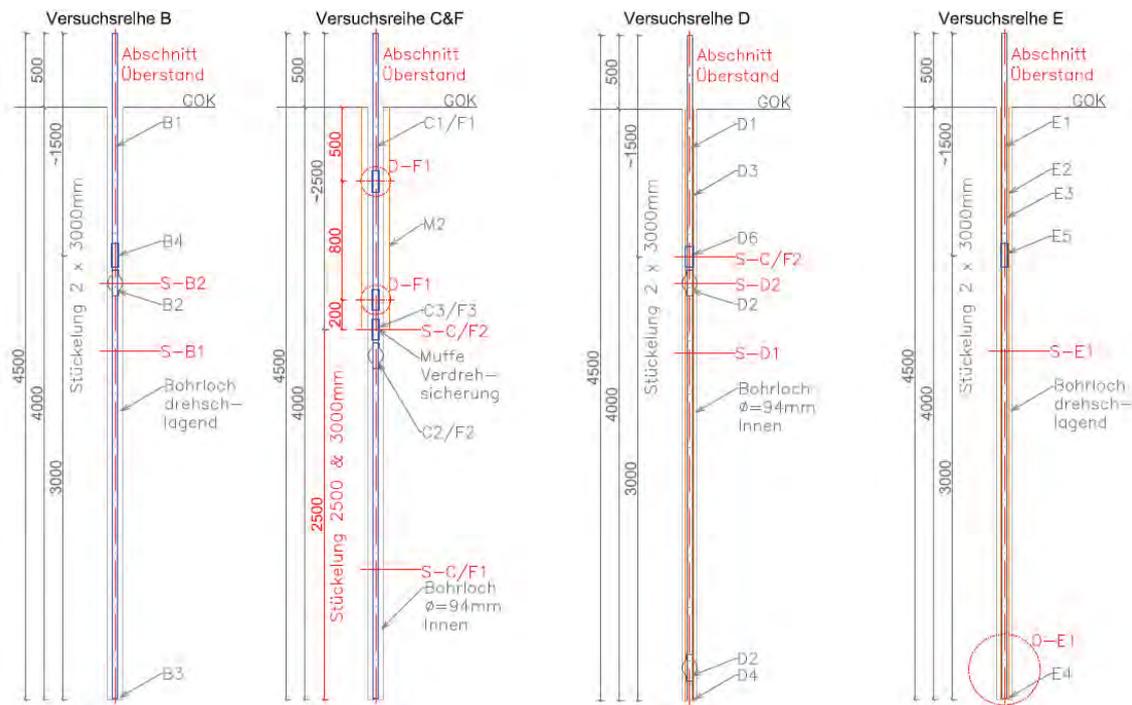


**Abb. 92:       Übersichtsbild der Feldversuche**

Zwischen den Achsen 1/A und 3/C des Versuchsfeldes wurden alternierend verrohrt (GEWI und DCP) sowie selbstbohrende (IBO) Mikropfähle vertikal mit einer Einbindelänge von 4,00 m hergestellt. Entlang der Achse 4 wurden die korrosionsgeschützten Selbstbohrzugelemente (DCP-SBZ) installiert. Mit etwas Abstand zu diesen Zugelementen wurden entlang der Achse 6 drei weitere Mikropfähle installiert, welche für die dynamische Prüfung verwendet wurden.

### **5.1.2. Planung**

Neben der Anordnung der 15 Probemikropfähle im Grundriss wurde auch eine umfassende Planung der Längsabwicklung der Pfähle vorgenommen. Zum einen war dies erforderlich, um beispielsweise die notwendigen Bauteile für die Versuchsreihe E (vgl. Abb. 93) zu erhalten und diese für Probezwecke herzustellen. Andererseits wurde hierdurch auch sichergestellt, dass neben einer Untersuchung der reinen metallischen Zugelemente innerhalb des Verpresskörpers auch Muffenverbindungen einbaut werden.



**Abb. 93: Abwicklung der Probemikropfähle**

In Abb. 93 sind die vier wesentlichen Typen an Probemikropfählen zu erkennen.

#### 5.1.2.1. Versuchsreihe B

Der Hohlstab dieser Probemikropfähle bestand aus einem SHS DN 38, welcher mittels Bohrkronen mit einem Außendurchmesser von 76 mm hergestellt wurde.

#### 5.1.2.2. Versuchsreihe C & F

Der eingebaute Vollstab hatte einen Durchmesser von 32 mm. Zudem wurden Abstandhalter bzw. eine Muffe verwendet. Gebohrt wurde mit einer Rammbohrung mit einem Innendurchmesser von 94 mm.

#### 5.1.2.3. Versuchsreihe D

Mit dieser Reihe wurde das Korrosionsschutzsystem DCP untersucht. Der eingebaute Vollstab hatte einen Durchmesser von 32 mm und war mit einem Ripprohr mit mind. 5 mm Zementsteindeckung ummantelt. Zudem wurden Abstandhalter bzw. eine Muffe verwendet. Gebohrt wurde mit einer Rammbohrung mit einem Innendurchmesser von 94 mm.

#### 5.1.2.4. Versuchsreihe E

Hierbei handelt es sich um die Umsetzung der in Kapitel 3.2 beschriebenen Lösung eines korrosionsgeschützten Selbstboherelementes. Der Fokus lag hierbei auf der Anwendung des Korrosionsschutzsystems und den möglichen Zerstörungen, welche im Zuge der Herstellung auftreten können. Zudem wurden mit dem Typ E\_IBO-DCP\_04 ein 9,00 m langer Mikropfahl

hergestellt, welcher nach der Installation in den Untergrund und vor dem Erhärten des Verpresskörpers wieder gezogen wurde, um mögliche Schäden zufolge der Herstellung erfassen zu können.

Der Hohlstab dieser Probemikropfähle bestand aus einem SHS DN 38, welcher mit einem Ripprohr mit einem Außendurchmesser von 56 mm ummantelt wurde. Daraus ergibt sich eine Kunststoffdeckung von mind. 5 mm zwischen dem Hohlstab und der Innenseite des Ripprohres. Diese Probemikropfähle wurden mittels Bohrkronen mit einem Außendurchmesser von 90 mm hergestellt.

### **5.1.3. Untergrund**

Der Untergrund des Versuchsfeldes kann zum einen durch eine vorhandene Anschüttung und zum anderen durch den im gesamten Grazer Becken vorhandenen anzutreffende Murschotter, welcher durch Wechsellagerungen aus Sand- und Kiesmaterial in unterschiedlicher Ausprägung gekennzeichnet ist. Grundwasser konnte im Zuge des Freilegens der Probemikropfähle nicht erkannt werden. Jedoch wurde große anthropogene Einflüsse im Zuge der Herstellung der Probemikropfähle im oberen Bereich massive Einschlüsse (Holzreste, Ziegelreste, ...) erkannt.

## **5.2. Freilegen der Versuchskörper**

Nach Durchführung der gesamten Versuche, welche im Zuge des Projektes an den Probemikropfählen durchgeführt wurden, wurden diese freigelegt und beurteilt. Dies sollten zum einen den generellen Zustand der Verpresskörper aufzeigen, zum anderen jedoch auch die Auswirkungen der impulsartigen Prüfung (vgl. Kapitel 6.6) und die Herstellbarkeit des neu konzeptionierten Zugelements DCP-SBZ (vgl. Kapitel 3) aufzeigen.

Zum Freilegen wurde der gesamte Installationsbereich der Probemikropfähle mittels Bagger freigelegt und die Verpresskörper (deren Form und Erscheinung) wurden erfasst. Sofern dies möglich war, wurden hierbei auch Vermessungen der Verpresskörper vorgenommen. Auf Grund der massiven Einschnitte wurde diese jedoch nur bedingt umgesetzt. Am Zugelement anhaftende Verpresskörper wurden jedoch nach dem Ausbau aus der Baugrube nachvermessen und dokumentiert.

Nachfolgend sind die Ergebnisse hierzu angeführt.

### 5.2.1. Verpresskörper der Probemikropfähle

Zwei Beispiele zum Zustand der Verpresskörper der Probemikropfähle, nach der Freilegung sind in nachfolgender Abbildung zu erkennen. Auf der linken Seite ist Probepfahl D\_DCP\_01 zu erkennen, welcher verrohrt hergestellt wurde. Auf der rechten Seite der Abbildung ist der Verpresskörper des Probemikropfahles B\_IBO\_02 nach dem Ausbau des Zugelementes aus der Baugrube abgebildet.



**Abb. 94:** Verpresskörper im Zuge des Freilegens; Verpresskörper verrohrte Bohrung (links); Verpresskörper selbstbohrendes Element (rechts)

Die Ergebnisse des Freilegens der Mikropfähle zeigten, dass zwischen verrohrt (gerammt) hergestellten und selbstbohrenden Elementen ein großer Unterschied in der Form und Ausprägung der Verpresskörper vorliegt. Während die verrohrten Bohrungen einen größtenteils gleichmäßigen Verpresskörper aufwiesen, waren bei den Verpresskörpern der selbstbohrenden Elemente (vgl. Abb. 94 rechts) teils große Abweichungen zu erkennen.

### 5.2.2. Zustand der impulsartig geprüften Zugelemente

Vor dem Freilegen wurden die oberen Bereiche der Verpresskörper der geprüften Probemikropfähle untersucht. Die Ergebnisse hierzu sind in Abb. 95 dargestellt. In der linken Abbildung ist der obere Bereich im Zuge der statischen Prüfung zu erkennen. Hierbei zeigt sich, dass dieser teils massive Risse im Kopfbereich aufweist. Die rechte Abbildung zeigt den Verpresskörper nach Durchführung einer dynamischen Prüfung, welcher in den oberen Lagen vollständig zerstört ist.



**Abb. 95:** Zustand des Kopfbereiches des Mikropfahles bei Prüfungen; statische Prüfung (links); dynamische Prüfung (rechts)

Auf Grund der schwierigen Zugänglichkeit der Verpresskörper im Zuge des Freilegens konnten die Verpresskörper der dynamisch geprüften Probemikropfähle nicht mit jenen der statisch geprüften verglichen werden. Jedoch konnte, wie in obiger Abbildung zu erkennen, ein deutlicher Unterschied zwischen den beiden Prüfarten bereits im Zuge der Prüfung erkannt werden.

### 5.2.3. Herstellbarkeit des DCP-SBZ

Im Zuge des Freilegens wurden auch die in Achse 4 des Versuchsfeldes hergestellten und in Kapitel 3.2 angeführten korrosionsgeschützten Selbstbohrmikropfähle freigelegt. Bei der Begutachtung dieser zeigte sich, wie in Abb. 96 zu erkennen, dass keine maßgebenden Schäden am Korrosionsschutz dieser Elemente zu erkennen waren. Lediglich am Muffenstoß oder der Bohrkorne (vgl. Kapitel 3.3) waren leichte Beschädigungen erkennbar.



**Abb. 96:** Freigelegte DCP-SBZ; Ripprohr am Korrosionsschutz (links); Bohrkronen (rechts)

Diese Ergebnisse wurden im Zuge der Weiterentwicklungskonzeptionierung (vgl. Kapitel 3.4) des Konzeptes DCP-SBZ berücksichtigt.

### 5.3. Zusammenfassung

Generell konnte durch das Freilegen der Verpresskörper gezeigt werden, dass zwischen den verrohrt und den selbstbohrend hergestellten Probemikropfählen ein erheblicher Unterschied vorliegt. Die Abweichungen in den Überdeckungen der metallischen Zuelemente mit Verpressgut haben zwar keinen Einfluss auf die Tragfähigkeit – wie dies auch im Zuge der Prüfungen zu erkennen war, jedoch kann vor allem bei selbstbohrenden Elementen nicht immer eine ausreichende Einkapselung mit Zementstein sichergestellt werden, um deren Dauerhaftigkeit zu gewährleisten.

Mit dem Freilegen der DCP-SBZ Probemikropfähle konnte weiters der Zustand des werksseitig aufgetragenen Korrosionsschutzes dieser Elemente gezeigt werden. Hier war zu erkennen, dass keine Schäden des Korrosionsschutzes zu erkennen waren. Lediglich im Bereich der Bohrkronen konnten leichte Abplatzung des Ripprohres bzw. des Verfüllgutes erkannt werden. Generell konnten im Zuge der Feldversuche und des anschließenden Freilegens und auch den mit den Feldversuchen einhergehenden weiteren Versuchen die Möglichkeiten bei der Herstellung von Mikropfählen aufgezeigt werden. Zudem konnte damit eine Validierung des neu entwickelten DCP-SBZ vorgenommen werden und auch Entwicklungen und Verbesserungen im Bereich der Prüfung von Mikropfählen wurden untersucht.

## 6. PRÜFUNG VON MIKROPFÄHLEN

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 zur Ermittlung der vorhandenen Ankerkraft im Zugelement angewendet wird, erwähnen.

Die Anzahl der zu prüfenden Elemente für Abnahmeprüfungen sind in ÖNORM B 1997-1-1 (2013) geregelt. Tab. 36 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. 36: Anzahl der zu prüfenden Zugelemente (ÖNORM B 1997-1-1, 2013)**

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

### 6.1. 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).

#### 6.1.1. Untersuchungsprüfung

Untersuchungsprüfungen werden grundsätzlich vor der Herstellung des Bauwerks bzw. der Zugelemente durchgeführt. Es ist jedoch zu erwähnen, dass diese 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 Herausziehwerstandes 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 Herausziehwerstand  $R_a$  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).

### 6.1.2. 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 Zugelementen 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).

### 6.1.3. 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:

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

mit:

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

#### **6.1.4. 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.

#### **6.1.5. 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.

### 6.1.5.1. 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 aufgebrachten Last, siehe Abb. 97 bzw. (ÖNORM EN ISO 22477-5, 2018). In Österreich kommt nur dieses Verfahren zur Anwendung.

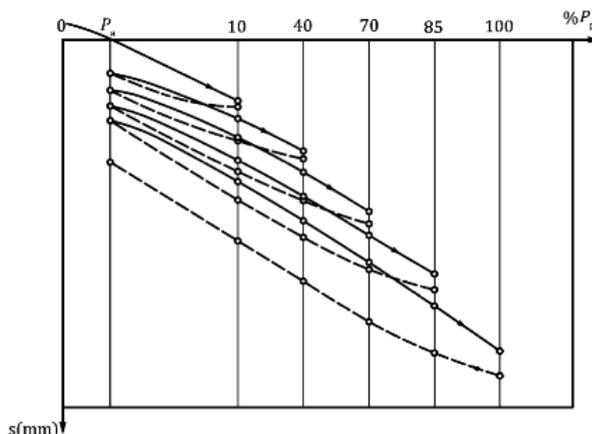


Abb. 97: Last-Verschiebungslinie am Beispiel einer Eignungsprüfung eines Dauerankers in einem nichtbindigen Boden (ÖNORM EN ISO 22477-5, 2018)

### 6.1.5.2. 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).

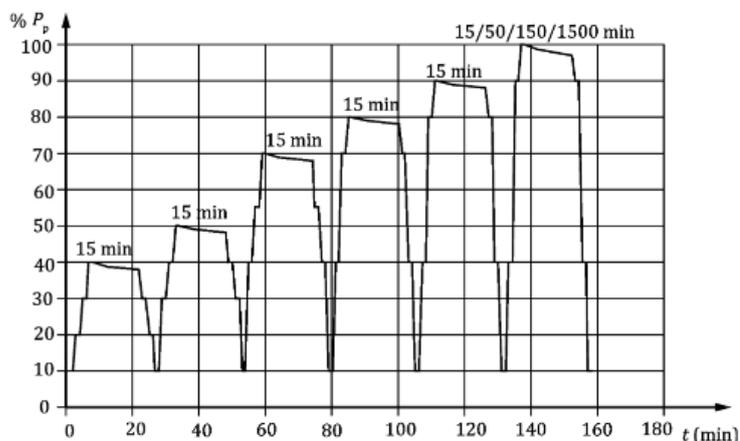


Abb. 98: Belastungsschema für eine Untersuchungsprüfung (ÖNORM EN ISO 22477-5, 2018)

### 6.1.5.3. 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 6.1.5.1) liegt darin, dass die Last konstant gehalten werden muss (ÖNORM EN ISO 22477-5, 2018).

## 6.2. 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.

### 6.2.1. 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 Bauort anstehenden in-situ Baugrundverhältnisse gibt es keine Erfahrungen aus früheren Probelastungen;
- die aufgetragenen Lasten sind höher als bisher unter vergleichbaren Baugrundverhältnissen aufgetragene 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.

#### 6.2.1.1. 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.

#### 6.2.1.2. 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.

### 6.3. 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 Zugglieders es sich handelt. Tab. 37 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 6.1 erläuterten Prüffarten. 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. 37 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. Als weiteres Abbruchkriterium, welches nicht in Tab. 37 berücksichtigt wurde, kann eine starke Kopfverformung angesehen werden. Dieses 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 nächsthöhere 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. 37: Gegenüberstellung der Anforderungen zu Mikropfahlprüfungen je Norm**

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

## 6.4. Interpretation von Zuelementuntersuchungen

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  $L_{app}$ .

### 6.4.1. 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):

$$\alpha = \frac{(s_b - s_a)}{[\log(t_b) - \log(t_a)]} = \frac{(s_b - s_a)}{\log\left(\frac{t_b}{t_a}\right)} \quad (2)$$

mit

$s_a$  Verschiebung des Zugliedes zum Zeitpunkt  $t_a$

$s_b$  Verschiebung des Zugliedes zum Zeitpunkt  $t_b$

$t_a$  Beginn des betrachteten Zeitintervalls

$t_b$  Ende des betrachteten Zeitintervalls

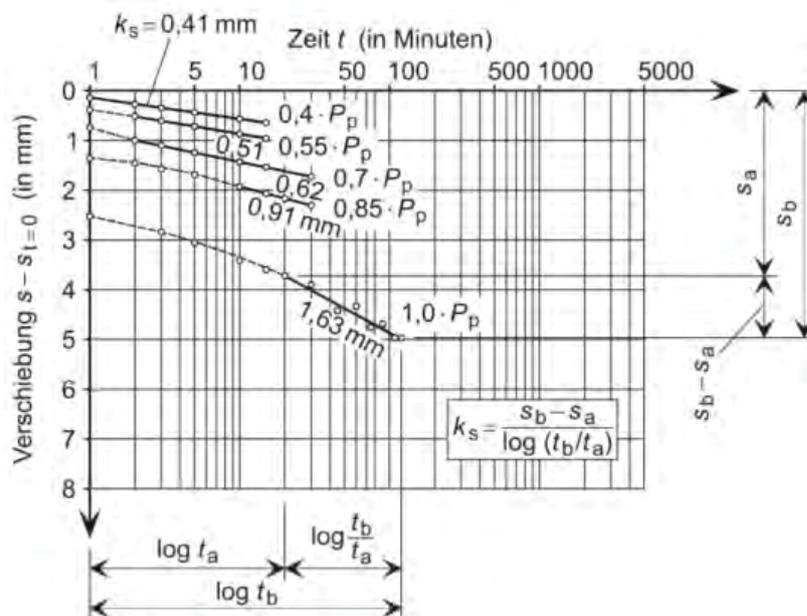


Abb. 99: Beispiel für Zeit-Verschiebungslinien zur Ermittlung der Kriechmaße  $k_s$  eines Dauerankers in nichtbindigem Boden (Möller, 2016)

Abb. 99 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. 37 zu entnehmen.

#### 6.4.2. Rechnerisch freie Stahllänge $L_{app}$

Mit der Ermittlung der rechnerisch freien Stahllänge  $L_{app}$  wird die Begrenzung der Krafteinleitungsstrecke überprüft. Es beschreibt also jene Länge des Stahlzugliedes 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:

$$L_{app} = \frac{A_t * E_t * \Delta S_{el}}{P_p - P_a} \quad (3)$$

Dabei ist

$L_{app}$  die rechnerisch freie Stahllänge;

$A_t$  die Querschnittsfläche des Zugliedes;

$E_t$  das Elastizitätsmodul des Ankerzugliedes;

$\Delta S_{el}$  die elastische Verschiebung des luftseitigen Endes des Zugliedes;

$P_p$  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.

#### 6.4.3. 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 Widerlagerverschiebung 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 6.8.1 und 6.8.2 zu finden.

## **6.5. Zerstörungsfreie Prüfmethoden**

Zerstörungsfreie Prüfmethoden, wie z.B. Ultraschallprüfungen oder Impuls-Echo-Methoden 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 zu erkennen, werden nachfolgend die oben genannten zerstörungsfreien Prüfmethoden erklärt.

### **6.5.1. 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 Praxis-tauglichkeit noch nicht gegeben ist. Aufgetretene Probleme sind unter anderem, dass die eingebrachte Energie max. für 150 cm Länge des Zuggliedes reicht oder, dass die Verfügbarkeit von Prüfköpfen mit bestimmten Durchmessern nicht gegeben ist (Burtscher, Rebhan, Marte, & Scharinger, 2017).

### **6.5.2. 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).

## **6.6. Dynamische Untersuchungen bei geotechnischen Elementen**

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

### **6.6.1. 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 Technology, 2021). Der Mobile Seismic Simulator, kurz MoSeS ist ein hydraulischer Schwingungserreger, welcher vom Austrian Institute of Technology 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. 100. Die Kraftereinleitung in den Untergrund erfolgt über drei Punkte, gleichzeitig werden über diese drei Punkte Messungen durch eingebaute Piezometer in vertikaler Richtung durchgeführt.



**Abb. 100: 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 Hochgeschwindigkeits-strecken, oder
- Künstliche Bauwerksanregung zum Nachweis der Erdbebenbemessung.

### **6.6.2. 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 dynamische 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).

### **6.6.3. Dynamische Pfahlprüfung**

Dynamische Pfahlprüfungen haben im Vergleich zur statischen Variante einige Vorteile, so kann z.B. das Widerlager für die Aufbringung der Prüflast (Totlast oder Verankerung) entfallen. Um weitere Vorteile zu erläutern, wird nachfolgend auf die Anwendungsmöglichkeiten von dynamischen Pfahlprüfungen anhand von Beispielen eingegangen.

### 6.6.3.1. 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 (Allnemics, 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 (Allnemics, 2021).

Der Ablauf der Prüfung ist wie folgt: Zu Beginn wird entweder über einen Bären/Hammer oder einem anderen Fallgewicht, wie beispielsweise in Abb. 101 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. (Allnemics, 2021)



**Abb. 101:** Beispiel eines Versuchsaufbaues für DLT mit einem Fallgewicht (Allnemics, 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 Spannungswellen-geschwindigkeit  $c$ , 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. 102 gegeben. Die am Pfahlkopf aufgebracht Last wird nach Gleichung (14) ermittelt. (Middendorp, van Ginneken, & van Foeken, 2000)

$$F = E * A * \varepsilon \quad (4)$$

Dabei sind:

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

Wie bereits erwähnt kann mit Hilfe der Spannungswellengeschwindigkeit  $c$  und Gleichung (5) auf den E-Modul rückgerechnet werden. Dies ist erforderlich, da es bei Bohrpfählen nicht immer möglich ist, den E-Modul bzw. die Querschnittsfläche mit ausreichender Genauigkeit direkt zu bestimmen. (Middendorp, van Ginneken, & van Foeken, 2000)

$$E = c^2 * \rho \quad (5)$$

Mit:

- $c$  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, van Ginneken, & van Foeken, 2000)

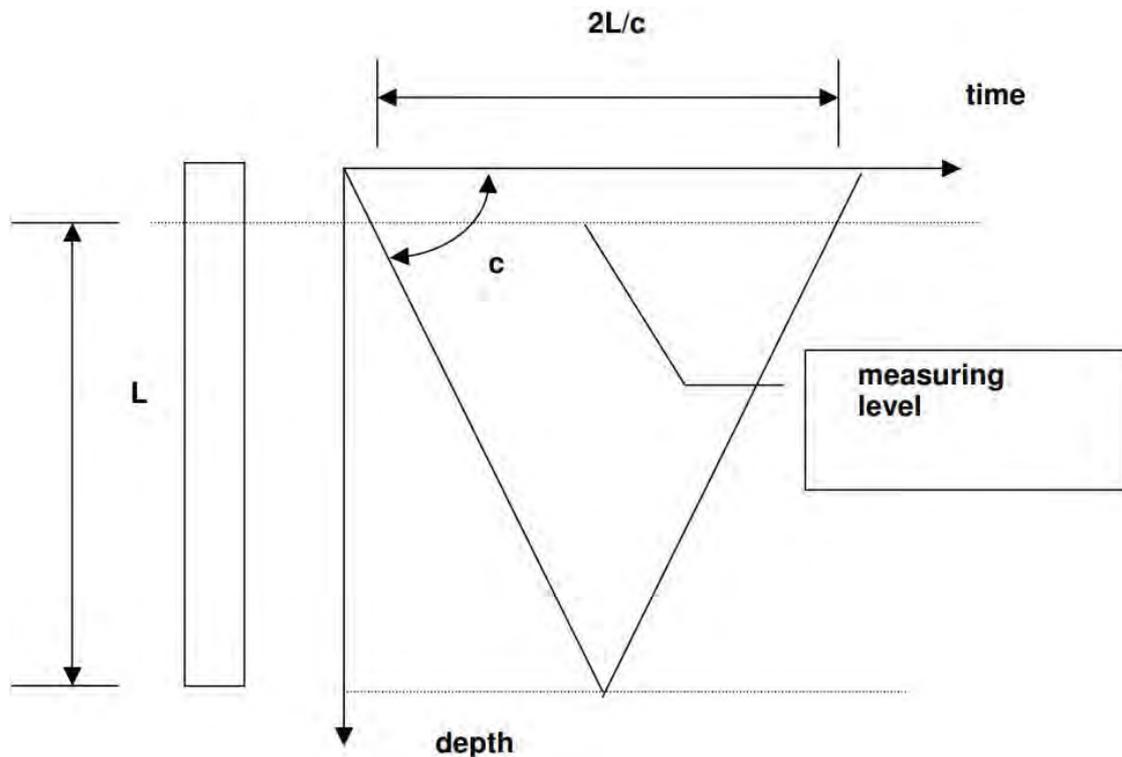


Abb. 102: Berechnung der Spannungswellengeschwindigkeit  $c$  (Middendorp, van Ginneken, & van Foecken, 2000)

### 6.6.3.2. 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. 103 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.

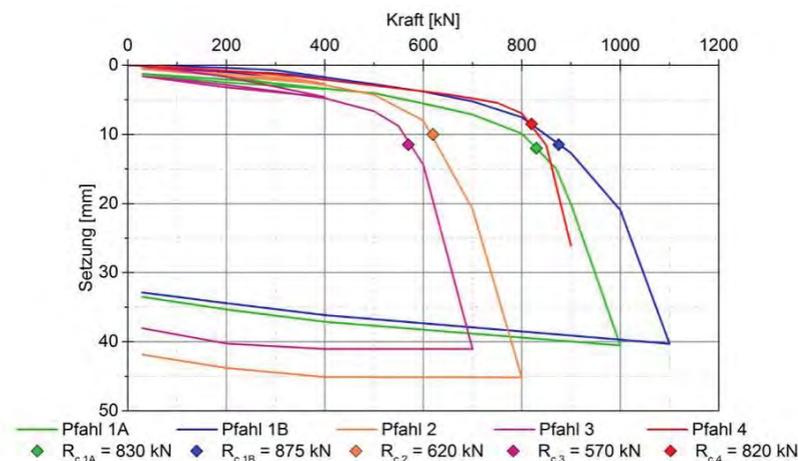
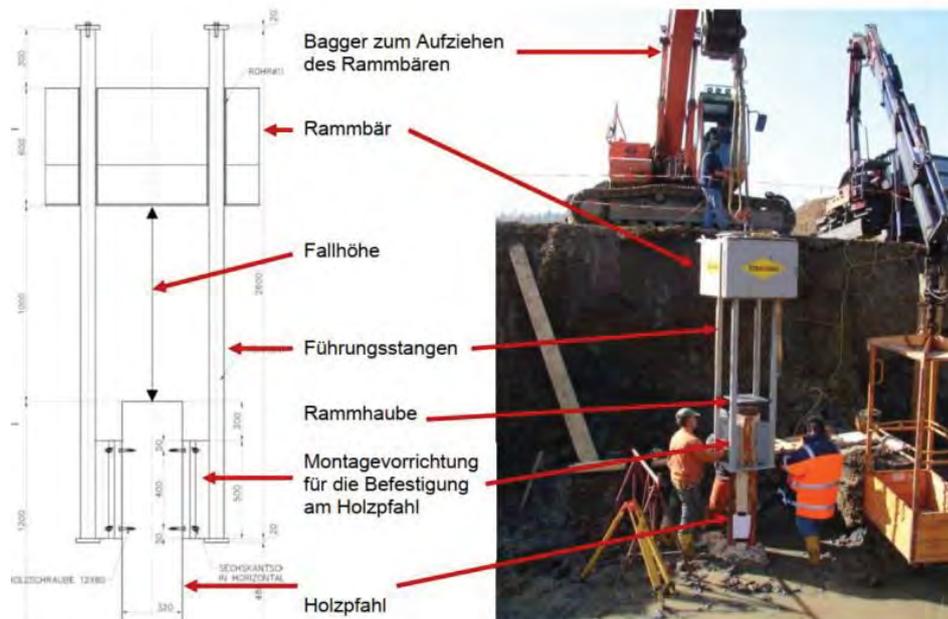


Abb. 103: Kraft-Setzungslinie je Pfahl (Steurer & Adam, 2012)

Zusätzlich wurden dynamische Probelastungen mit einer für diesen Zweck entworfenen Messramme (siehe Abb. 104) 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. 104:** 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. 105 kann nach Schenk (1951) die dynamische Eindringwiderstandskraft  $Q_{dyn}$  errechnet werden, siehe Gleichung (16). Dabei wird auch der Wirkungsgrad C des Stoßes berücksichtigt.

$$Q_{dyn} = \frac{C * m_{bär} * g * h}{s_{pl} + \frac{1}{2} * s_{el}} \quad (6)$$

Dabei ist

$Q_{dyn}$  dynamische Eindringwiderstandskraft

C Wirkungsgrad des Stoßes

- mbär Masse des Rammbären
- g Erdbeschleunigung
- h Fallhöhe des Rammbären
- spl plastische Pfahlbewegung zufolge des Stoßes
- sel elastische Pfahlbewegung zufolge des Stoßes

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

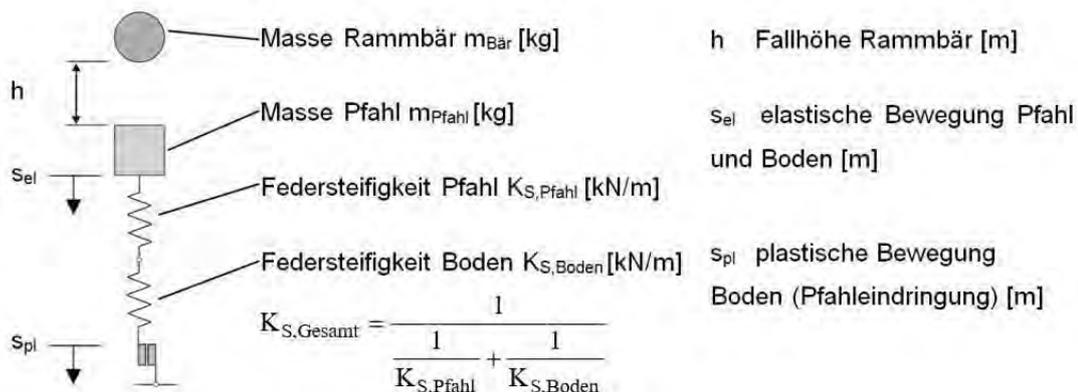


Abb. 105: Masse-Feder-Modell zur Herleitung der Rammformel (Steurer & Adam, 2012)

Während der Prüfung wurden die vertikalen elastischen und plastischen Pfahlbewegungen (siehe Abb. 106) mit der zugehörigen Zeitdauer gemessen. Um eine zusätzliche Kontrollmöglichkeit zu haben, wurden die Pfahlbewegungen auch händisch aufgezeichnet. Die Ergebnisse aus den dynamischen Pfahlprobelastungen ergaben einen Bemessungswert  $R_{c,d,dyn}$  von 449 kN. 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)

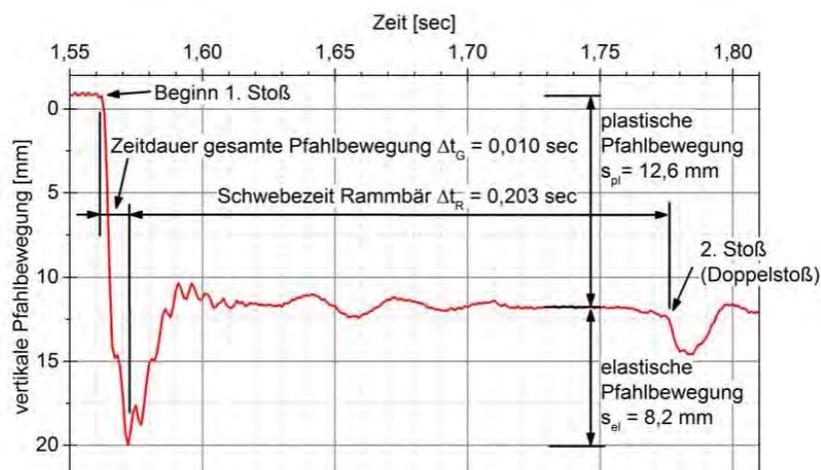


Abb. 106: Aufzeichnung des Wegaufnehmers für einen „Doppelstoß“ (Steurer & Adam, 2012)

## 6.7. Dynamische Prüfung von Zugelementen

Zum derzeitigen Stand der Technik zur Thematik der dynamischen Ankerprüfung muss gesagt werden, dass hauptsächlich zerstörungsfreie Methoden, 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 Zugelementen das Kriechen ist und daher eine zeitliche Beobachtung (und Beanspruchung) zur Bestimmung des Kriechmaßes erforderlich ist. D.h. die Anwendung von dynamischen Pfahlprüfungen für Zugpfähle findet im Idealfall für Zugelemente 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.

## 6.8. Problemstellungen der Prüfungen von Mikropfählen bei Schutzbauten

Wie 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 auf die Möglichkeiten einer dynamischen Prüfung eingegangen wird.

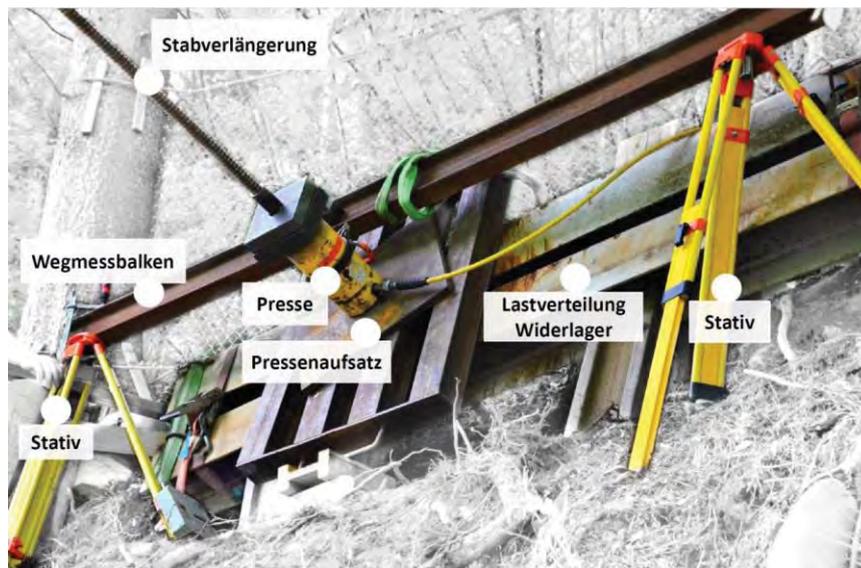
### 6.8.1. Abbruchkriterien für die Prüfung von Mikropfählen bei Schutzbauten

Die ONR 24810 (2020) zum Technischen Steinschlagschutz definiert folgende Abbruchkriterien für die Abnahmeprüfung von Mikropfählen (vgl. Tab. 37):

- Die vorgegebene Prüfkraft muss erreicht werden;
- Die vorgegebene Prüfkraft muss ausreichend lange gehalten werden - mind. 5 Minuten Beobachtungszeitraum;
- Ein Kriechmaß von  $k_s = 5 \text{ mm}$  darf nicht überschritten werden;

- Ein Prüfkraftabfall im Beobachtungszeitraum ist bis maximal  $1,1 * E_{a,k}$  zulässig, 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 6.4.1 beschrieben gestaltet sich jedoch auf Grund der Umgebungsbedingungen und des meist unwegsamen Geländes (vgl. Abb. 107) oftmals schwierig.



**Abb. 107:** 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.

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

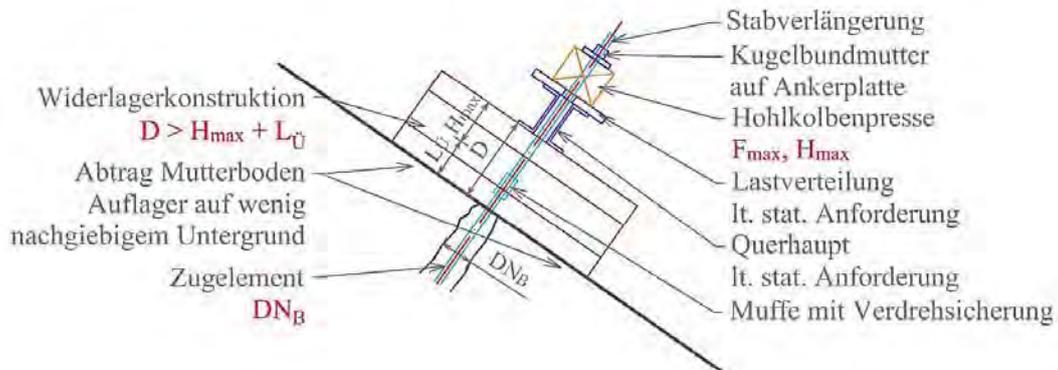
Dieses Kapitel soll Verbesserungsvorschläge für Prüfaufbauten und Abläufe aufzeigen, welche den aktuellen Stand der Technik aus Kapitel 6.8.1 anwendungsnäher bzw. praktikabler abbilden können.

### 6.8.2.1. Anforderungen an die Prüfung und das Prüfequipment

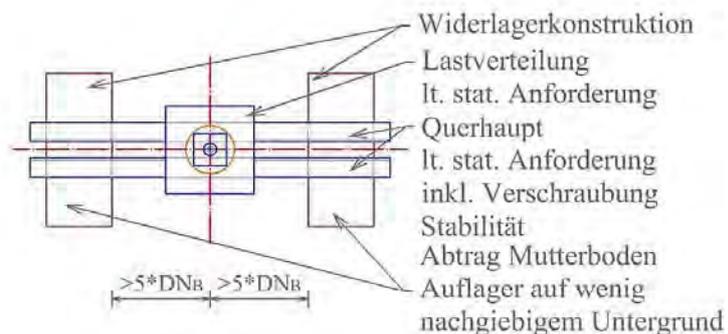
Bei der Durchführung von Abnahmeprüfungen an Mikropfählen wird im Regelfall eine statische Zuglast mittels Hohlkolbenpresse auf das zu untersuchende Zugelement aufgebracht, zu sehen in Abb. 108. Dabei muss die Hohlkolbenpresse eine ausreichende Hubkraft  $F_{max}$  und einen ausreichend großen Hub  $H_{max}$  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 -  $D > H_{max} + L_{Ü}$  - 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. 108:** Schematische Darstellung des Prüfaufbaues zur Abnahmeprüfung; Ansicht (oben); Draufsicht (unten)

6.8.2.2. Vorschlag zu einer Anpassung der Abbruchkriterien und des Prüfaufbaues  
Aufbauend auf den in Kapitel 6.8.1 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 Überlegung ist, dass es im Anwendungsfall äußerst unwahrscheinlich ist, dass dieses Kriterium maßgebend wird, da die Belastung schlag- bzw. impulsartig stattfindet, d.h. rasch auf einen kleinen Wert abfällt. Weiters ist zu berücksichtigen, dass Mikropfähle für Schutzbauten häufig in Hangschutt und Blockhalden befinden, welche tendenziell wenig kriechgefährdet sind (vgl. Augustensen (2006)). Des Weiteren stellt die erforderliche hohe Messgenauigkeit für die 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 hoher

Genauigkeit mit großen Unwägbarkeiten verbunden, da es vor allem im steilen Gelände schwierig ist, ein Messstativ in eine geeignete Position zu bringen (vgl. Abb. 107).

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 z.B. 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 mobilisieren bzw. 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. 109 und Gleichung (17) vorgeschlagen wird.

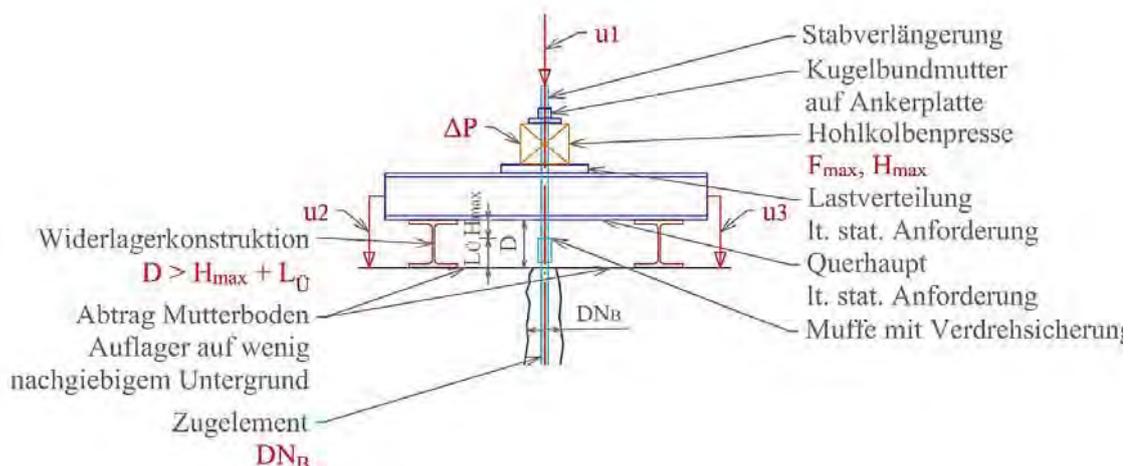


Abb. 109: Schematische Darstellung des Prüfaufbaues inkl. der zu messenden Kriterien

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 AMP des Mikropfahls und damit ein mögliches Abbruchkriterium für die Abnahmeprüfung für Mikropfähle als Fundierung bei Schutzbauten zu:

$$A_{MP} = u_1 - u_2 < 5\text{mm} \quad (7)$$

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 Zugliedes und der Widerlagerkonstruktion darf 5 mm nicht überschreiten.

## 6.9. 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.

### 6.9.1. Konzept und Methode

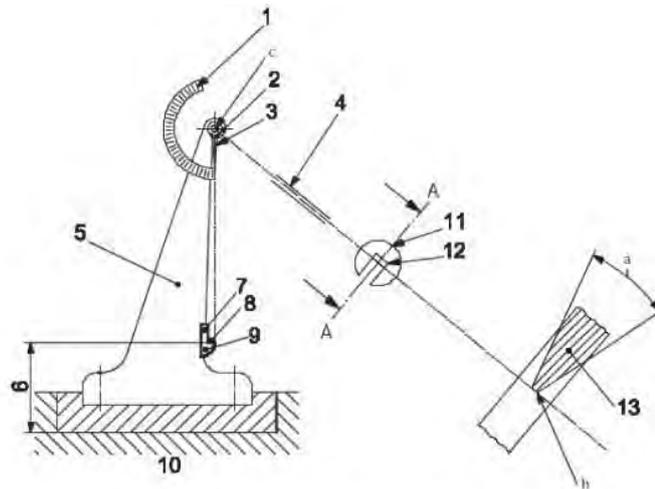
Das Konzept hinter einer impulsartigen Prüfmethode für Mikropfähle ist es, eine dynamische bzw. schlagartige Zugbelastung auf das Zugelement aufzubringen. Der Hintergrund für eine impulsartige Prüfung auf Zug ist, dass passiv wirkende Zugelemente häufig im Bereich von Schutzbauten zum Einsatz kommen 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 6.9.3. Diese wurden auf ihre Vor- und Nachteile sowie ihre Umsetzbarkeit hin untersucht, wobei die Entscheidung auf jenen Aufbau fiel, welcher auf dem Versuchsaufbau des Kerbschlagbiegeversuchs nach Charpy basiert. Dieses Prüfverfahren wird nachfolgend beschrieben.

### 6.9.2. 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. 110, 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 Konstruktions-bereichen 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 Finnenschneide
3 Schleppzeiger	10 Fundament	c Drehachse
4 Pendelstange	11 C-Form-Hammer	
5 Maschinengestell	12 Finnenschneide	
6 Maschinensockel	13 Hammerfinne	
7 Widerlager		

**Abb. 110: Pendelschlagwerk (ÖNORM EN ISO 148-2, 2016)**

6.9.2.1. Ermittlung der verbrauchten Energie

Zur Berechnung der verbrauchten Energie eines Schlages wird nach ÖNORM EN ISO 148-2 (2016) Gleichung (18) verwendet. Zur besseren Verständlichkeit bietet Abb. 111 eine Darstellung der verwendeten Parameter.

$$KV = F * l_2 * (\cos \beta - \cos \alpha) \quad (8)$$

Mit:

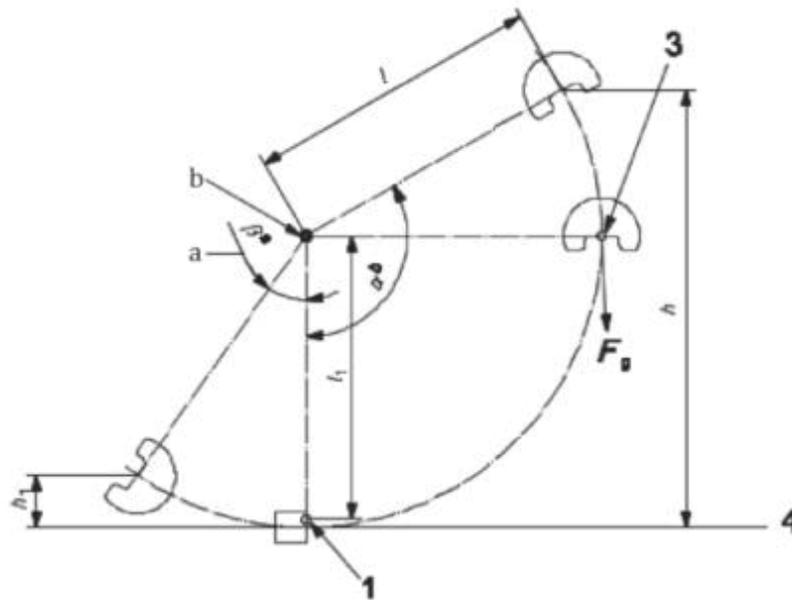
$KV$  berechnete verbrauchte Energie [J]

$F$  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. 111: 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. Dies auch unter Berücksichtigung der Annahme, dass der Auszieh Widerstand des zu prüfenden Zugelementes geringer, wie der innere Widerstand des Zuggliedes ist.

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

### 6.9.3. 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 6.9.3.3 auf die finale Version eingegangen wird.

#### 6.9.3.1. 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. 112.

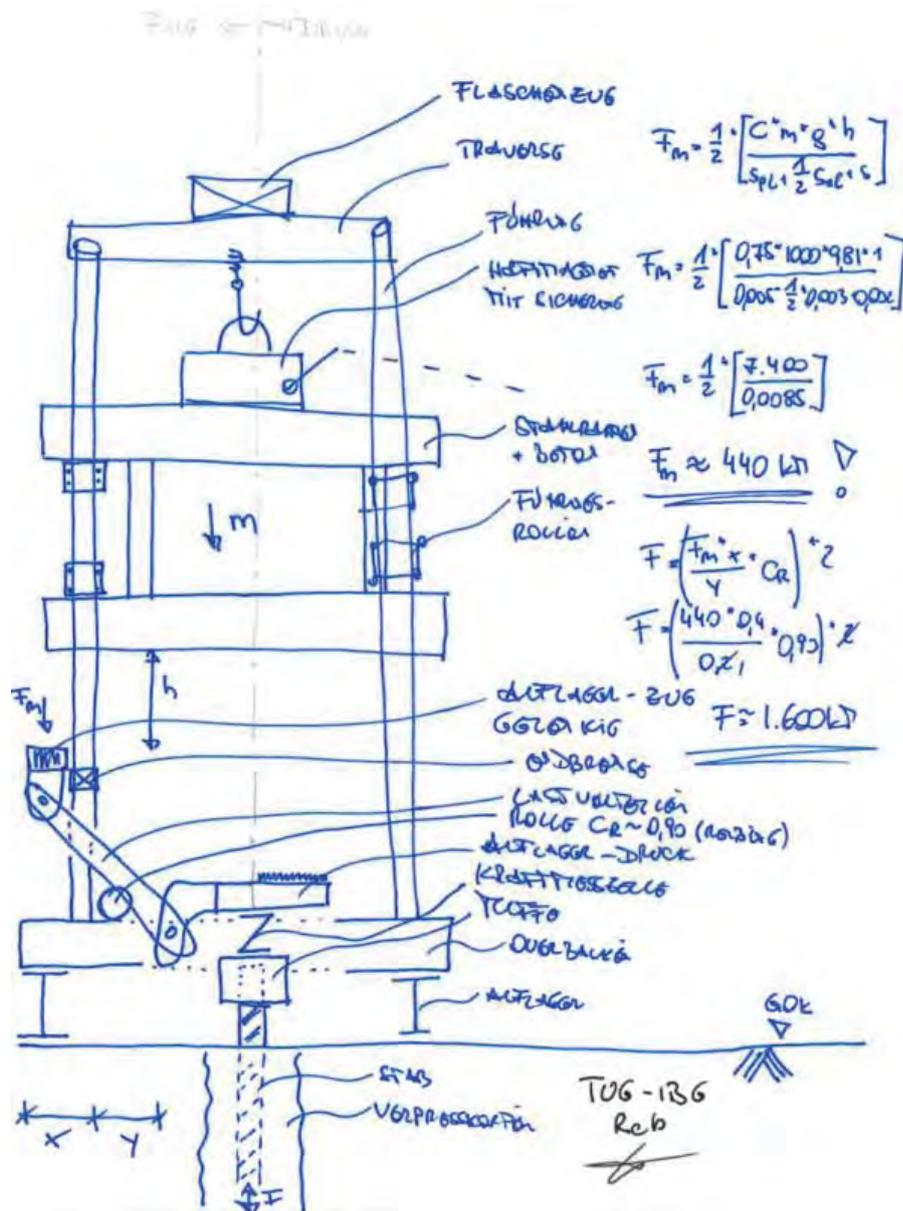


Abb. 112: Handskizze Versuchsaufbau „Fallgewicht 1“

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. 113, 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.

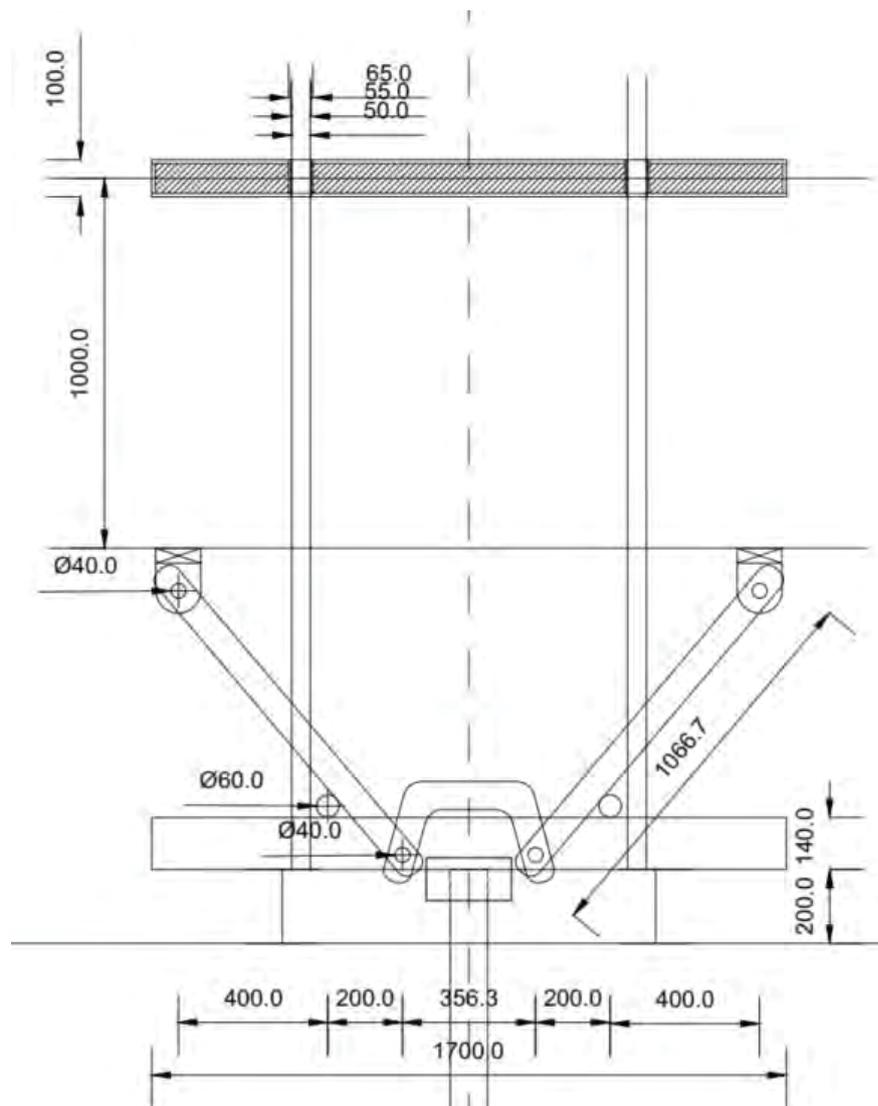
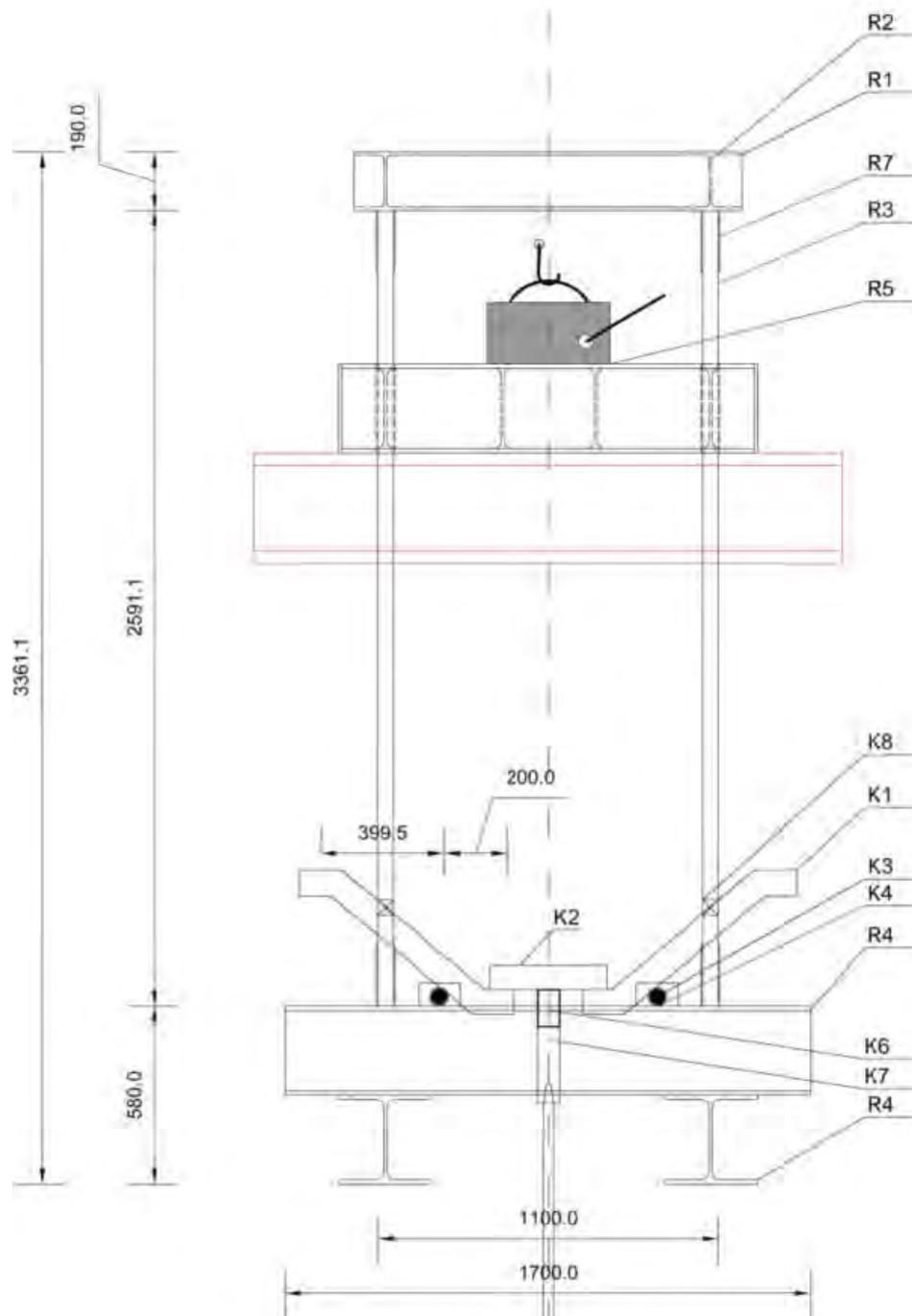


Abb. 113: Versuchsaufbau „Fallgewicht 1“

Aufgrund von Bedenken bzgl. der Kraftumlenkung und der Robustheit der Beton-Stahl-Masse wurde diese Variante nicht realisiert und eine Abänderung ausgearbeitet.

#### 6.9.3.2. Versuchsaufbau „Fallgewicht 2“

Der Versuchsaufbau „Fallgewicht 2“ ist eine abgeänderte Version des im vorherigen Kapitel beschriebenen Aufbaues. Geändert hat sich, wie in Abb. 114 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. 114: 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 zwängungsfreien 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.

### 6.9.3.3. 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. 115 und Abb. 116, welches mit einer variablen Fallmasse bestückt wird. Die Stahlkonstruktion wird per Hebeeinrichtung versetzt und eingerichtet. Im Anschluss wird die Fallmasse aufgezogen und ausgelöst.

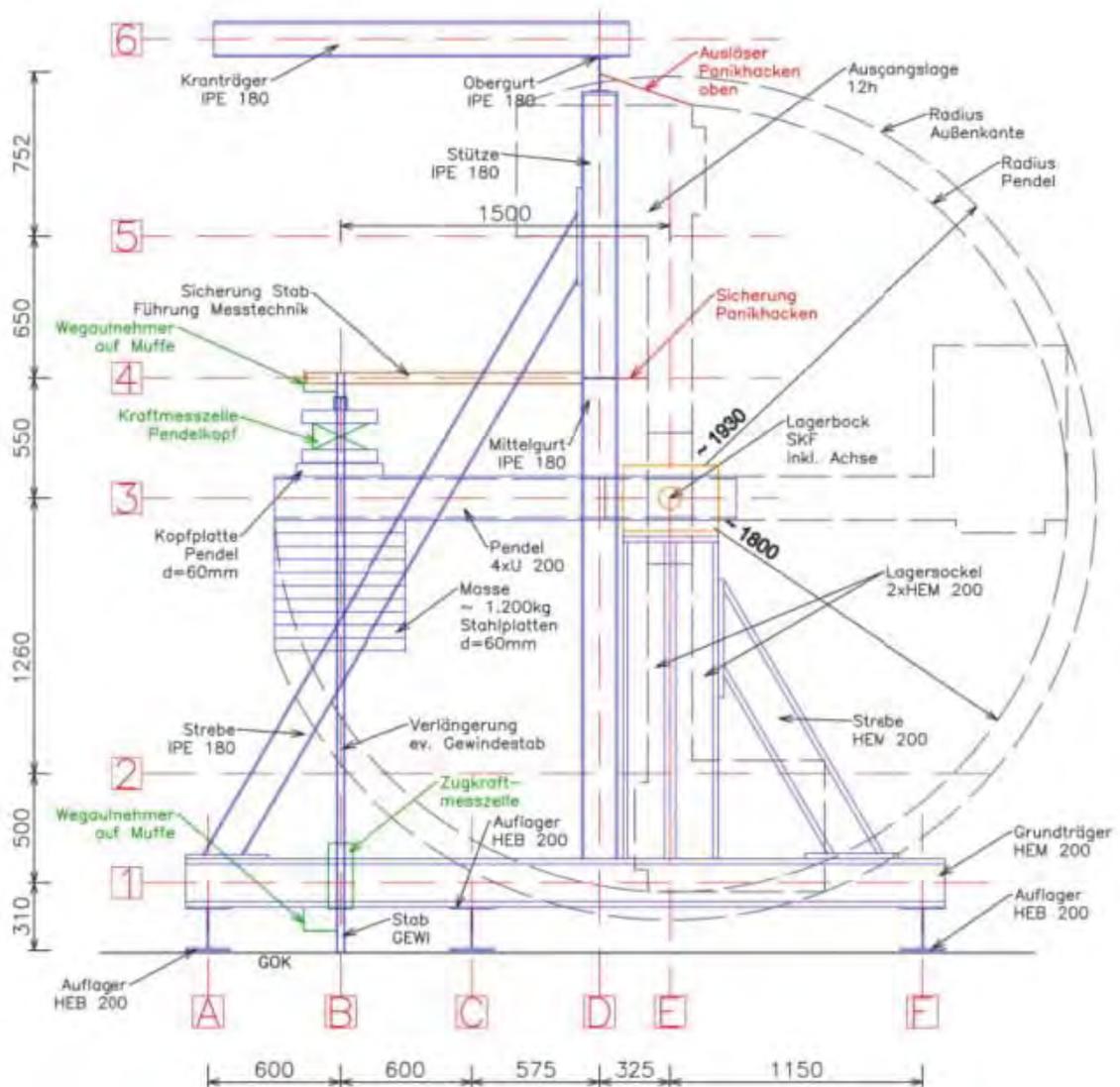
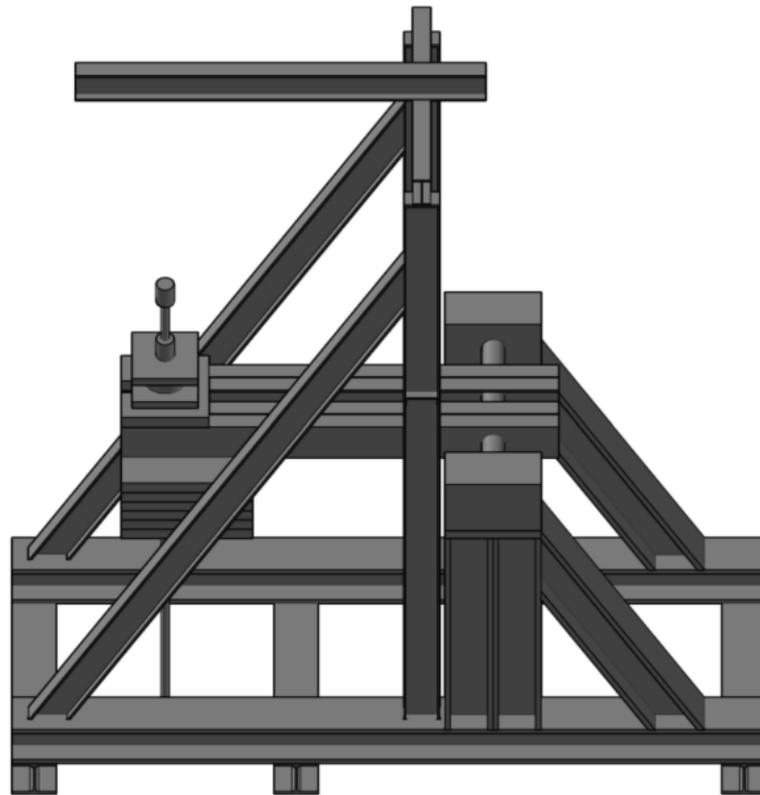


Abb. 115: Versuchsaufbau „Kerbschlag“ - Ansicht (DAT, 2021)



**Abb. 116: Versuchsaufbau „Kerbschlag“ – 3D Modell**

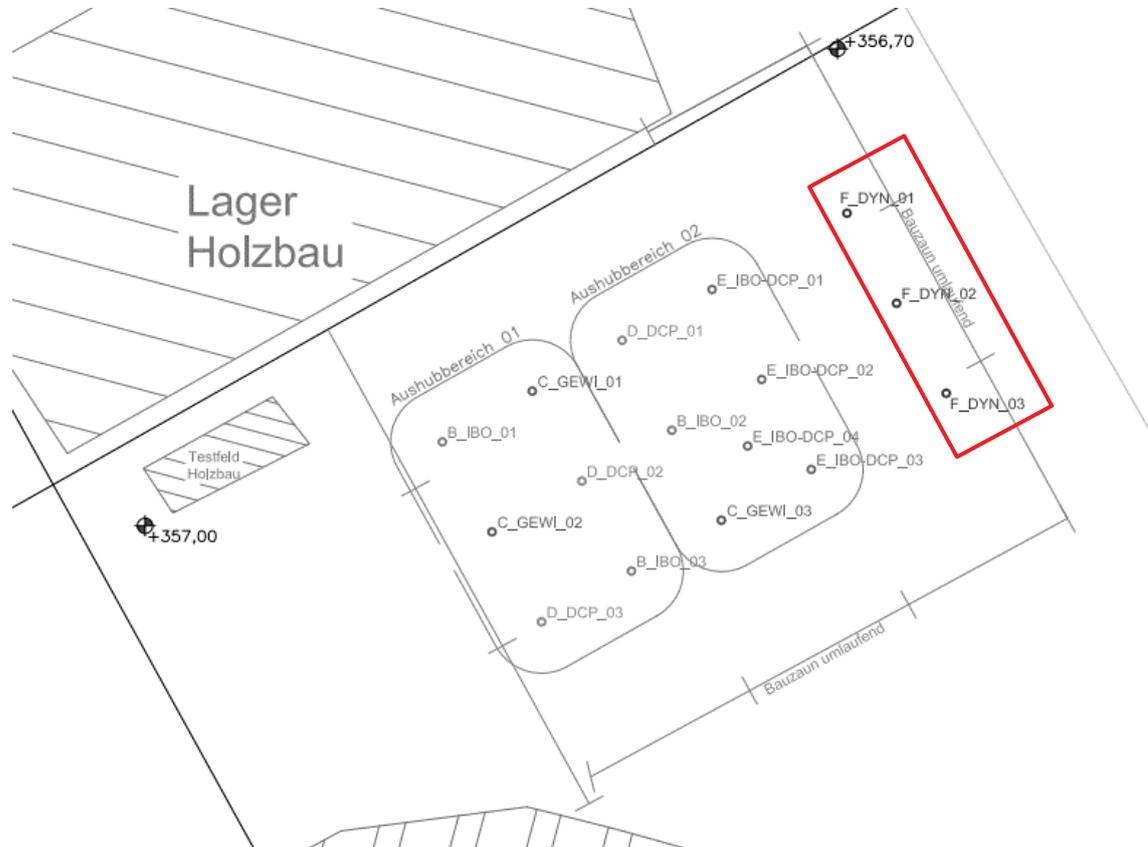
Bau und Abnahme des Versuchsaufbaus „Kerbschlag“ wurde durch die Behensky Maschinenbau GesmbH. & Co. KG. aus Salzburg durchgeführt.

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 6.10) mit einer ersten Validierungsreihe untersucht. An dieser Stelle wird darauf hingewiesen, dass es sich hierbei um Grundsatzuntersuchungen handelt und dieser Versuchsaufbau nur bedingt für den Einsatz in steilem Gelände anwendbar ist.

#### **6.9.4. 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 verwendet. Die Installation dieser Probe-Mikropfähle fand am 28.04.2021 auf einem Versuchsgelände auf den Inffeldgründen in Graz statt. Wie in Abb. 117 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. 117: 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. 118 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. 118 oben links zu erkennen. Die einzelnen Zugelemente der Mikropfähle wurden zuerst mit Muffen (Abb. 118 unten links) verbunden und mit Kunststoffabstandshaltern (Abb. 118 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. 118, unten rechts. Anschließend wurde die Verrohrung gezogen und der Kopfbereich der Mikropfähle aufgefüllt, um eine normgemäße Herstellung und Verfüllung der Mikropfähle sicherzustellen.



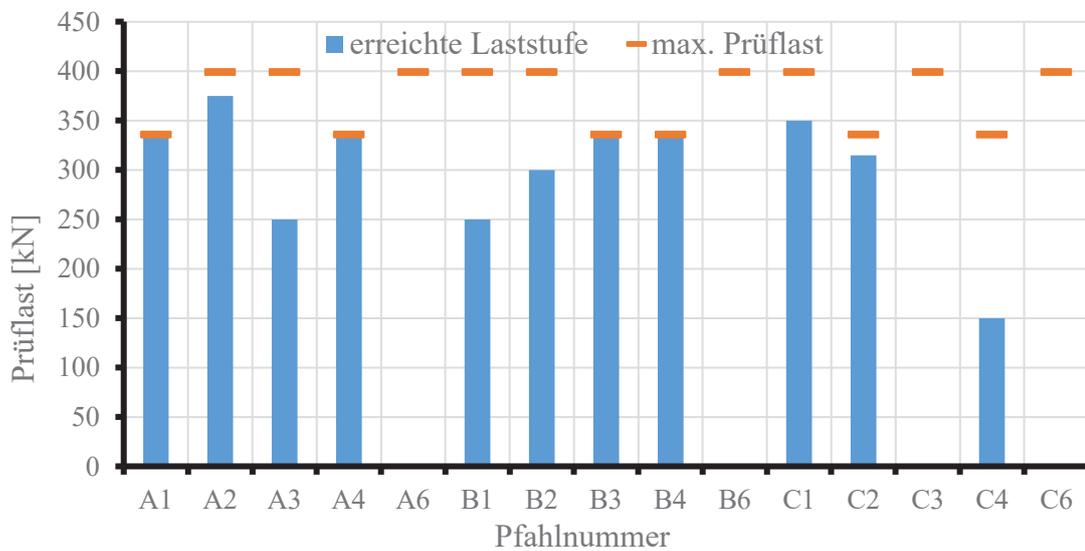
**Abb. 118:** Bilder der Herstellung der Probe-Mikropfähle; Bohrgerät Klemm (oben links); Zusammenbau Mikropfahl (oben rechts); Muffenverbindung (unten links); Verfüllen des Bohrloches mit Zementsuspension (unten rechts)

### 6.9.5. Vorversuche

An den Mikropfählen „F\_DYN\_2“ und „F\_DYN\_3“ (vgl. Abb. 117), welche für die dynamische Zugprüfung vorgesehen sind wurden keine Vorversuche durchgeführt. Als Referenz können die Ergebnisse aus den Prüfungen, der angrenzenden Mikropfähle, siehe Tab. 38 herangezogen werden. Die durchgeführten Prüfungen waren eine Mischung aus Eignungs- Abnahme- und Untersuchungsprüfung und können keiner der in Kapitel 6.1 beschriebenen Prüfungsarten eindeutig zugeordnet werden. Diese statischen Zugversuche wurden am 19.05.2021 und 20.05.2021 durchgeführt, der Versuchsaufbau ist in Abb. 120 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. 38 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. 119 sind die Ergebnisse grafisch dargestellt, um einen besseren Vergleich zu schaffen.

**Tab. 38: 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. 119: Grafische Darstellung der Prüfergebnisse aus Tab. 38 (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 sollte es ermöglichen, neben den Auswirkungen einer impulsartigen und statischen Prüfung auf den Verpresskörper, auch die Auswirkungen der Prüfung auf einen unbeanspruchten Mikropfahl sicherzustellen.



Abb. 120: Statische Zugversuche, (DAT, 2021); Aufbau Messuhr (oben); Prüfaufbau (unten)

Als weiterer Vorversuch kann der erste Test des Versuchsaufbaues am Mikropfahl „C\_GEWI\_03“, 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, Erfahrungen für die Justierung bzw. die Handhabung des Versuchsaufbaues sowie die Versuchsdurchführung zu sammeln, zu sehen in Abb. 121. Eine genaue Beschreibung der Versuchsdurchführung ist in Kapitel 6.10.1.4 enthalten. Ein weiteres heikles Detail, nämlich das Abbremsen des Pendels nach Versuchsdurchführung wurde ebenfalls im Zuge dieses Vorversuches getestet.



**Abb. 121:** Justierung für dynamischen Zugvorversuch an „C\_GEWI\_03“

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.

## 6.10. Versuche zur impulsartigen Prüfung von nicht vorgespannten Zuelementen

Im folgenden Kapitel werden die durchgeführten Versuche zur impulsartigen Prüfung von Mikropfählen, welche durchgeführt wurden, beschrieben. Außerdem werden nachfolgend die Ergebnisse dieser aufbereitet, ausgewertet und interpretiert.

### 6.10.1.1. Parametervariation

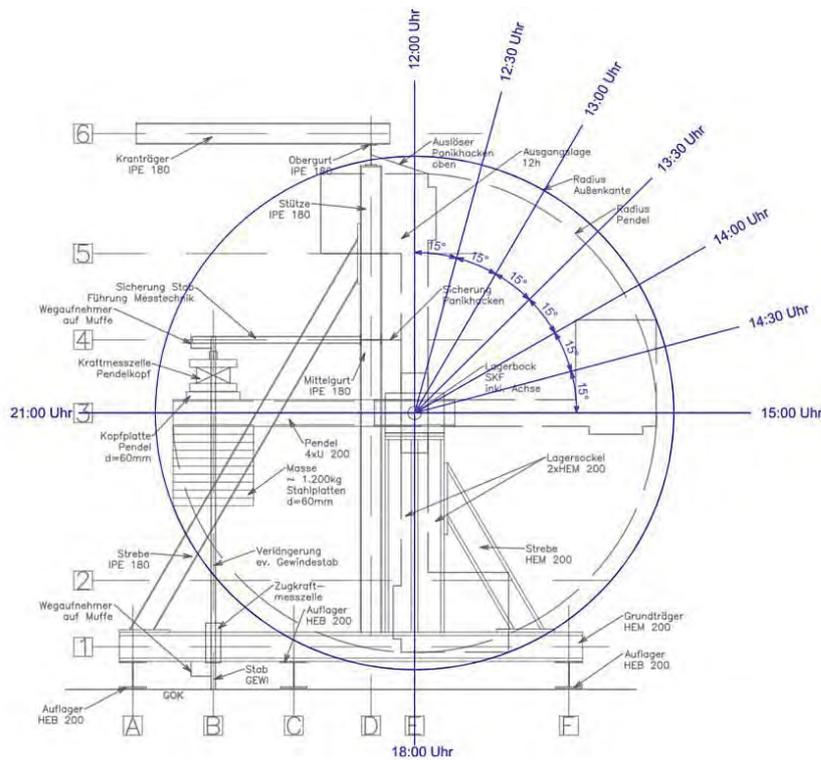
Beim Versuchsaufbau „Kerbschlag“ ergeben sich grundsätzlich zwei Parameter, mit welchen man die Schlagenergie – bzw. die daraus folgende Prüfkraft – variieren kann. Diese sind zum einen die Fallmasse, welche durch das Montieren bzw. Demontieren von Stahlplatten am Pendel verändert werden kann. Zum anderen kann durch das Anheben bzw. Absenken der Fallmasse die Fallhöhe (vgl.  $h$  in Abb. 111) 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.

### 6.10.1.2. 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.

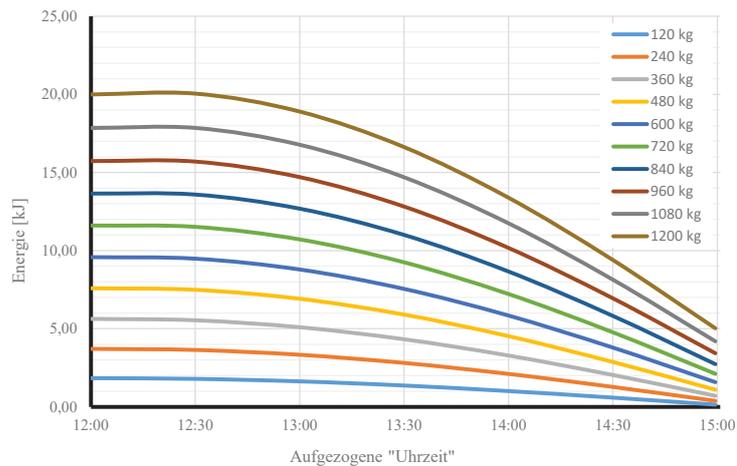
### 6.10.1.3. Fallhöhe

Die Fallhöhe kann einfach durch höheres Aufziehen (vgl. Winkel  $\alpha_B$  in Abb. 111) des Pendels gesteuert werden. Hierbei ist zu erwähnen, dass ein Aufziehen des Pendels ausschließlich zwischen 15:00 Uhr und 12:00 Uhr (vgl. Abb. 122) 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. 122 ersichtlich.



**Abb. 122: 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. 123 eine erste rein theoretische Aussage über die potentielle Energie, welche beim Aufziehen des Pendels entsteht. 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 potentielle Energie in Kilojoule [kJ] (Ordinate) über die Fallhöhe. Die Fallhöhe ist gemäß Abb. 122 als „Uhrzeit“ dargestellt. Die Energiekurven wurden für alle zehn Laststufen ermittelt, während die Fallhöhe zwischen 12:00 Uhr und 15:00 Uhr limitiert ist.



**Abb. 123: Masse-Fallhöhe-Energie Diagramm**

#### 6.10.1.4. Versuchsdurchführung

Nachfolgend wird der Ablauf der Versuchsdurchführung 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 6.9.3.3, Abb. 115 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. 124 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. 124 unten links) bilden, werden auf diesem Stab montiert und so eingerichtet, dass das Pendel diesen in horizontaler Lage trifft (Abb. 124 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 Gewebepband bzw. einer Verdrehsicherung in der Muffe gegen Verdrehen gesichert, besser ersichtlich ist der Anschlag in Abb. 124 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.

124 unten links. Werden diese Schritte nicht ausreichend genau durchgeführt, kann es zu einer nicht ebenmäßigen Beanspruchung des Anschlages kommen, was eine ungleichmäßige Krafteinleitung bzw. beim Zurückpendeln auch ein Knicken des Verlängerungsstabes zur Folge haben könnte. 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. 124 unten rechts) und am Ende mit einem Hebegurt für das spätere Greifen mittels LKW-Kran vorbereitet.



**Abb. 124:** Aufstellen des Prüfaufbaues (oben links); Einrichten des „Anchlages“ (oben rechts); Fixieren des Verlängerungsstabes (unten links); Versuchsaufbau inkl. der eingebauten „Bremse“ (unten rechts)

Zum Heben des Pendels wurde ein Hebegerüst 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. 125 oben links. Anschließend zieht der LKW-Kran das Pendel bis zum gewünschten Ausgangsniveau auf (Abb. 125 oben rechts). Ausgelöst wird der Versuch durch Öffnen des Greifers, wodurch sich die Fallmasse in Bewegung setzt. Dabei fädelt sich der Hebegerüst aus und bleibt am Greifer hängen, während das Pendel in Richtung des Verlängerungsstabes schwingt, siehe Abb. 125 unten links. Anschließend trifft die Kopfplatte des Pendels in horizontaler Lage auf den zuvor montierten Anschlag des Verlängerungsstabes (Abb. 125 unten rechts) und erzeugt so eine impuls- bzw. schlagartige Zugbelastung.



**Abb. 125:** 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. 130).

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. 126, abgebremst.



**Abb. 126: 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.

#### 6.10.1.5. Messkonzept

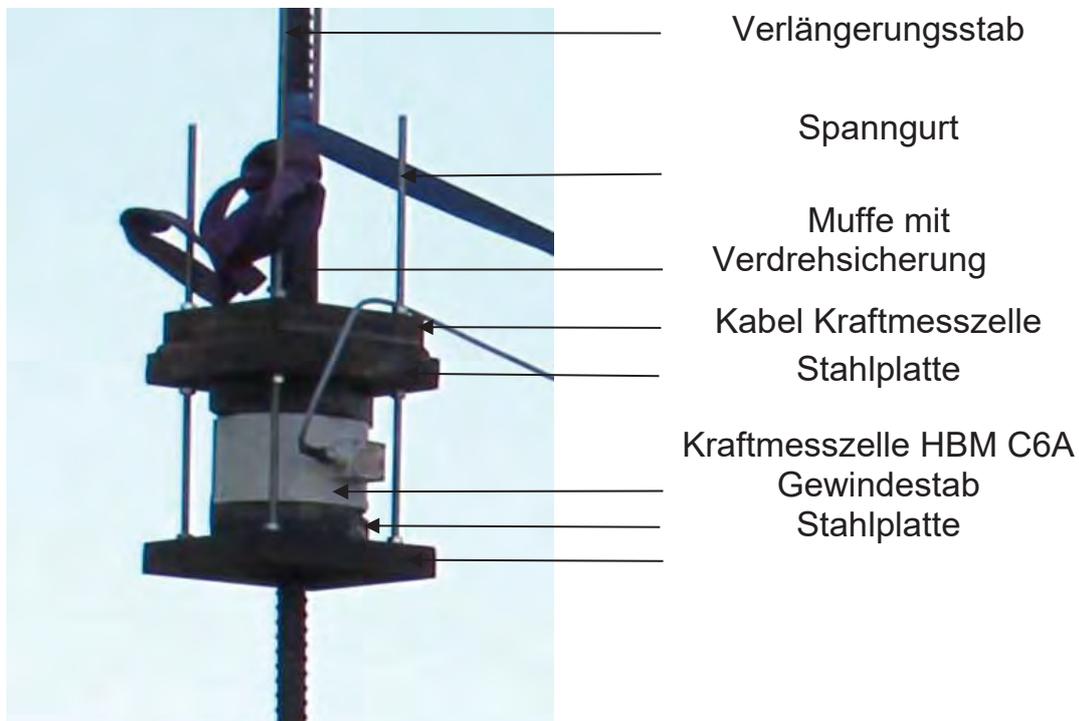
Bei der erneuten Versuchsdurchführung, wurden mehrere Messinstrumente und Sensoren am Versuchsaufbau bzw. am zu untersuchenden Mikropfahl installiert. Diese Messinstrumente hatten das Ziel, die vertikale Verschiebung des Mikropfahls, die horizontale Verschiebung des Versuchsaufbaues, sowie die im Zuge 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.

### Kraftmessung

Der Einbau der Kraftmesszelle (KMZ) HBM C6A (Abb. 127) erwies sich als nicht ganz einfach. So musste zusätzlich an den bereits am Verlängerungsstab montieren „Anschlag“ (siehe Abb. 124 links unten) ein Paket aus Stahlplatten und der KMZ mittels Gewindestäben befestigt werden, zu sehen in Abb. 127.

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.



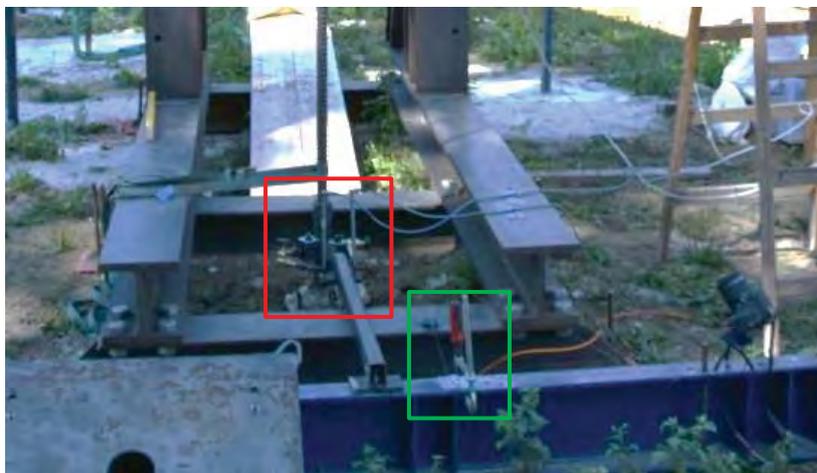
**Abb. 127: Installierte Kraftmesszelle HBM C6A**

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.

## 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. 128 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° 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. 128 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. 128:** 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.

## 6.10.2. Versuchsauswertung

Bei den durchgeführten Versuchen wurden wie in Kapitel 6.10.1.5 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. 122), 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 montieren Stahlplatten waren. Eine tabellarische Auflistung der Rahmenbedingungen und der maximal gemessenen Kräfte zu den durchgeführten Versuchen ist in Tab. 39 gegeben.

**Tab. 39: 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. 39 aufgelisteten Neigungen (Spalte C) beschreiben den Winkel zwischen dem vertikal stehenden Stahlrahmen des Versuchsaufbaues und dem bis zum Startniveau aufgezogenen Pendel (siehe Abb. 122). Die Spalte E „Uhrzeit“ stellt die gemessene Neigung entsprechend der Definition in Abb. 122 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. 129 zu sehen.

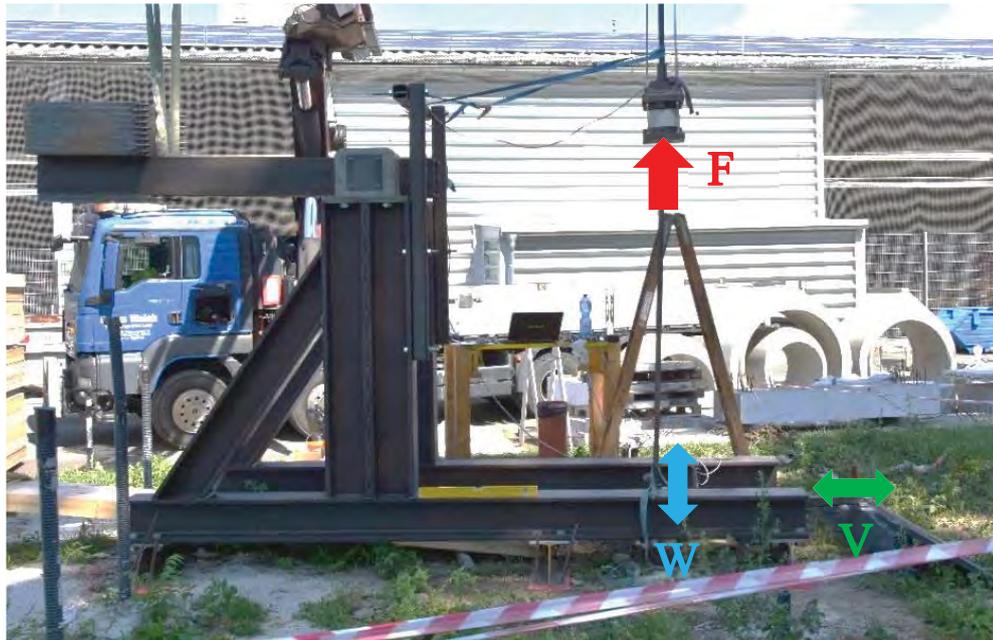
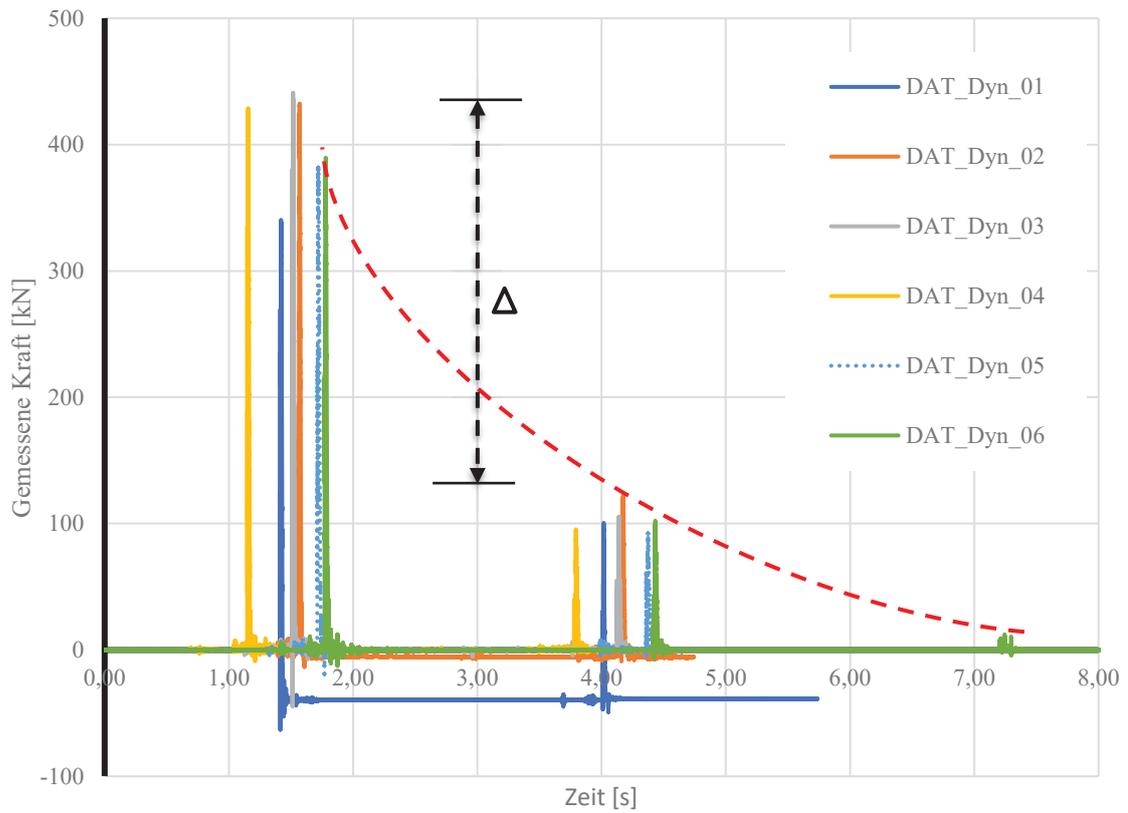


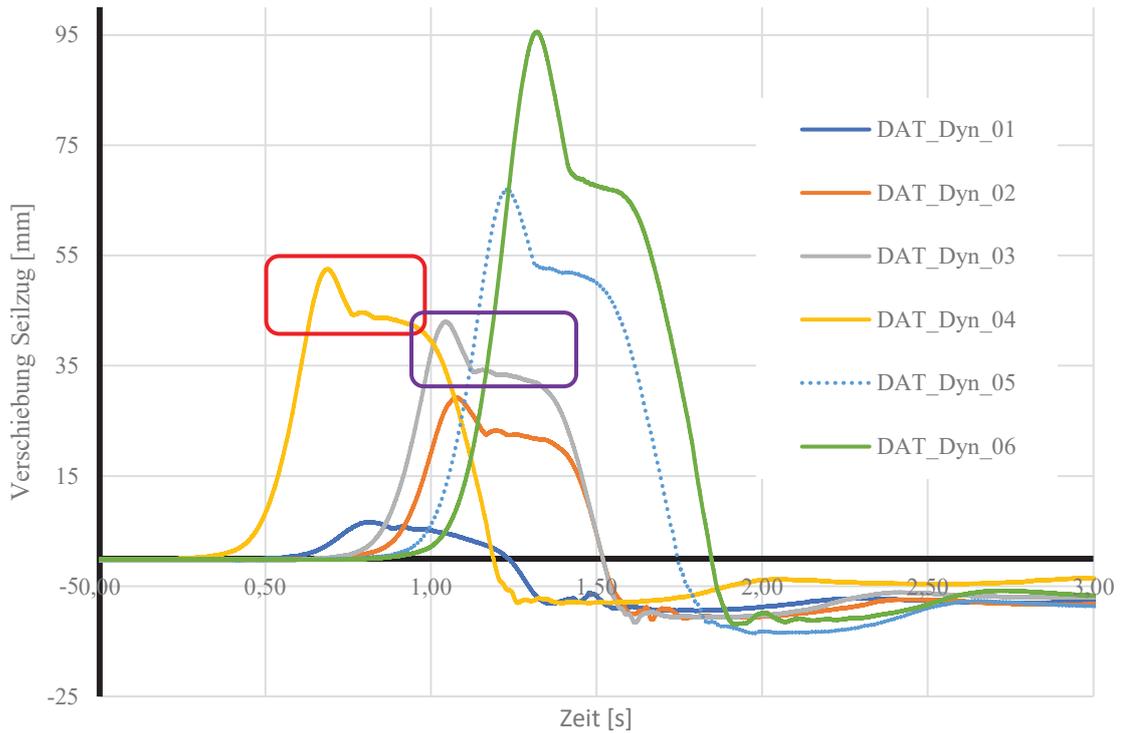
Abb. 129: Darstellung der Messgrößen Kraft (**F**), Weg (**W**) und Verschiebung (**V**)

Die in Abb. 130 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. 132 zeigt ein Detail aus dem Kraft-Zeit-Diagramm, welches das Auftreffen des Pendels auf den Mikropfahl bzw. den Anschlag darstellt.

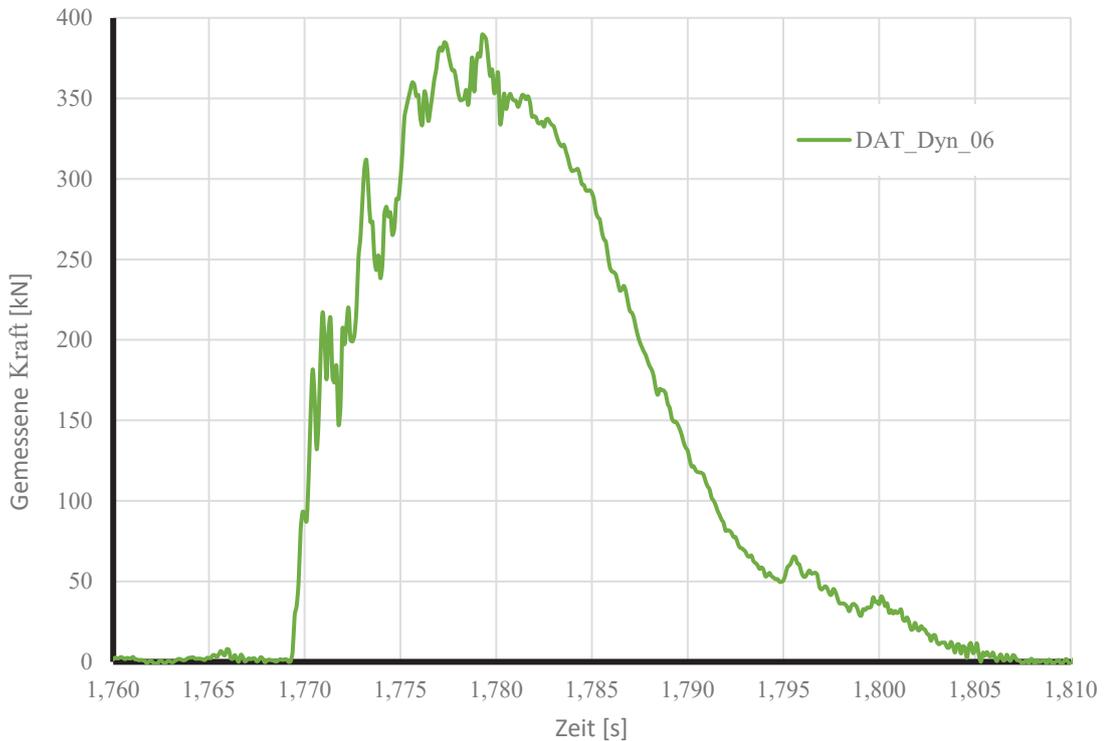
Auf dieses Detail wird in Kapitel 6.10.3 näher eingegangen. Abb. 131 zeigt die Verschiebungen, welche durch den Seilzugwegaufnehmer gemessen wurden. Diese Messergebnisse werden ebenfalls im folgenden Kapitel genauer beschrieben. Auf die Messungen der vertikalen Verschiebungsmessungen wird nur bedingt 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. 130: Kraft-Zeit Diagramm alle Versuchsreihen**

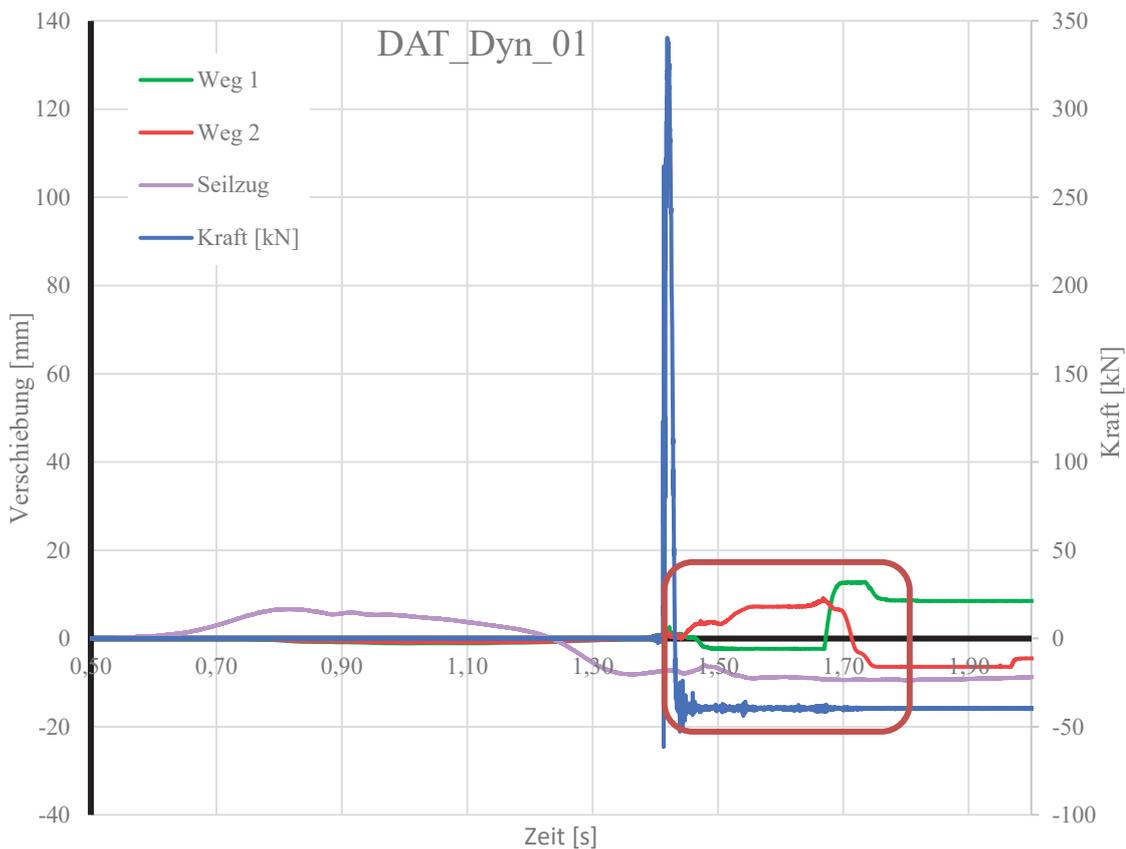


**Abb. 131: Gemessene Verschiebung des Prüfaufbaues**



**Abb. 132: Kraft-Zeit Diagramm Versuchsreihe DAT\_Dyn\_06**

Beispielhaft für alle Versuche sind die gesamten Messergebnisse zweier Versuche in Abb. 133 und Abb. 134 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. 133: Darstellung von Verschiebung und Kraft Versuchsreihe DAT\_Dyn\_01**



**Abb. 134:** Darstellung von Verschiebung und Kraft für Versuchsreihe DAT\_Dyn\_04

### 6.10.3. 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. 130) 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. 39 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. 130) 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. 130 kenntlich zu machen.

Abb. 130 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 geringfügig 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 (bzw. einer hohen Energieumwandlung) verbunden ist. Dieser wiederum lässt einen Rückschluss auf die Interaktion zwischen Untergrund und Mikropfahl bzw. das Mikropfahltragverhalten generell zu.

Wie bereits in Kapitel 6.10.1.5 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. 132 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 den ersten Erwartungen geringere Werte bei der Kraftmessung. Was in erster Instanz als Messfehler interpretiert werden könnte kann jedoch die Folge von vergleichsweise großen Verschiebungen des Prüfaufbaues sein. Bei näherer Betrachtung der Abb. 131 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. 131 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. 133 und Abb. 134 erlauben folgende Interpretationen.

Generell kann gesagt werden, dass die vom Seilzugwegaufnehmer gemessene Verschiebung bei Versuch „DAT\_Dyn\_01“ (Abb. 133), 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. Eine mögliche Erklärung hierfür 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. 133 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. 134 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. 133) wiedergibt. Des Weiteren ist das Aufkippen des Prüfaufbaues markanter in der Grafik ersichtlich. Mit einem blauen Rechteck in Abb. 134 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. 133 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. 39 dargestellt sind können grundsätzlich mit jenen aus den statischen Zugversuchen in Tab. 38 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.

## **6.11. Zusammenfassung**

Die im Zuge des Projekts entwickelte und untersuchte Methode einer impuls- bzw. schlagartigen Beanspruchung von Mikropfählen zeigten, dass durch einen derartigen Ansatz massive Verbesserungen bei der Prüfung von Mikropfählen möglich sind. Nicht nur, dass damit eine realere Abbildung der Beanspruchung möglich ist, sondern dass damit bei Adaptierung und Anpassung des Prüfaufbaues auch eine Vereinfachung der Prüfung von Mikropfählen möglich wäre. Hierzu sind jedoch umfassende weitere Untersuchungen erforderlich, welche neben den Anpassungen des Prüfequipments auch die Interaktion zwischen Verpresskörper und Boden berücksichtigen bzw. betrachten. Hieraus folgend könnte sich weiters eine rechnerische Ableitung der Prüfergebnisse ergeben, welche auf die Bemessung von Mikropfählen für Schutzbauten Einfluss haben könnten.

## 7. VERSUCHSFELD FROHNLEITEN

In Absprache mit den Auftraggebern der ASFiNAG und der ÖBB wurden im Zuge eines kleinen Nachfolgeprojektes einige der Ergebnisse dieses Projektes in einem weiteren Versuchsfeld umgesetzt. Der Fokus hierbei lag auf der Anwendung des in Kapitel 3 beschriebenen doppelkorrosionsgeschütztem Mikropfahl (DCP-SBZ) sowie der Bestimmung von Untergrundkennwerten und der Erprobung neuer Prüfmethode für Mikropfähle. Nachfolgend werden daher kurz der Versuchsaufbau und die installierten Probebereiche angeführt, da diese im Kontext mit den hier durchgeführten Forschungen stehen. Für vertiefte Informationen wird auf den Ergebnisbericht des Dienstleistungsprojektes (Rebhan und Marte 2022) verwiesen.

### 7.1. Ziele des Feldversuches Frohnleiten

Die Hauptziele der Feldversuche sind:

- Erprobung des Prüfaufbaues mit Widerlagern;
- Erprobung des Prüfaufbaues mit Reaktionspfählen;
- Vergleich zwischen unterschiedlichen Prüfaufbauten;
- Ableitung von Untergrundkennwerten für die im Projektgebiet vorliegenden Homogenbereiche.

Neben den oben angeführten Hauptzielen wurden auch weitere Nebenziele verfolgt, welche vor allem der Erfassung des Verhaltens von Mikropfählen im Zuge von Prüfungen dienen und eine Grundlage für weitere Entwicklungen und Forschungen ermöglichen sollen. Diese sind:

- Erprobung eines dynamischen Prüfzylinders für Mikropfähle;
- Schaffen einer Datengrundlage für weitere Untersuchungen durch eine permanente Datenaufzeichnung im Zuge der Versuchsdurchführung;
- Vergleich der Tragfähigkeiten bzw. Mantelreibungen zwischen unterschiedlichen Mikropfahltypen und unterschiedlichen Homogenbereichen;
- Verwendung des doppelt korrosionsgeschützten Selbstbohrmikropfahles (DCP-SBZ) bei unterschiedlichen Untergründen.

Zudem werden die in Kapitel 6.8.2 angeführten Versuchsaufbauten zur Prüfung von Mikropfählen validiert und die in Kapitel 3.4 angeführten Weiterentwicklungen des DCP-SBZ untersucht und erprobt.

Nachfolgend wird lediglich auf den Einbau der DCP-SBZ im Zuge dieses Versuchsfeld sowie die Anordnung der entsprechende Prüfaufbauten näher eingegangen.

## 7.2. Beschreibung des Versuchsfeldes

Das Versuchsfeld befindet sich im Frohnleiten im Bereich der Bahnstrecke. In diesem Bereich wurden bereits vorab Steinschlagschutznetze bzw. ein dazugehöriger Feldweg errichtet. In diesem Bereich liegen fünf Homogenbereiche vor, welche von kompaktem Fels, über Hangschutte bis hin zu einer Anschüttung reichen.

Es wurden daher fünf Probefelder mit je bis zu 13 Mikropfählen errichtet. 7 Stück sind hierbei als Probepfahl gedacht, die restlichen werden als Widerlagerkonstruktion (vgl. Kapitel 7.4.2) herangezogen.

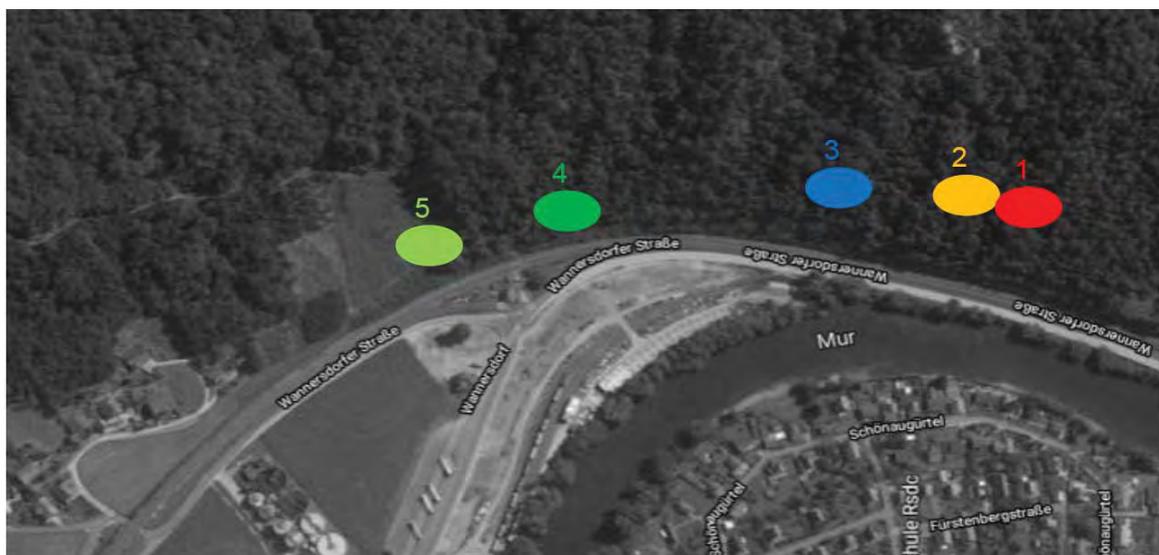


Abb. 135: Lageplan Versuchsfeld Frohnleiten

## 7.3. Weiterentwicklung DCP-SBZ

Im Zuge der Versuche wurden neben Hohlstäben und Vollstäben auch die in Kapitel 3.2 beschriebenen doppelt korrosionsgeschützten Selbstbohrelemente (DCP-SBZ) eingebaut. Neben einer Verbesserung der werkseitigen Herstellung der Kunststoffummantelung wurde hierbei auch eine Optimierung der Bohrkronen, basierend auf den Erkenntnissen der ersten Feldersuche vorgenommen.

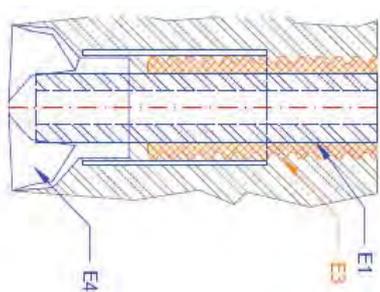


Abb. 136: Verbesserung der Bohrkronen; Links: Planung; Rechts: Ausführung

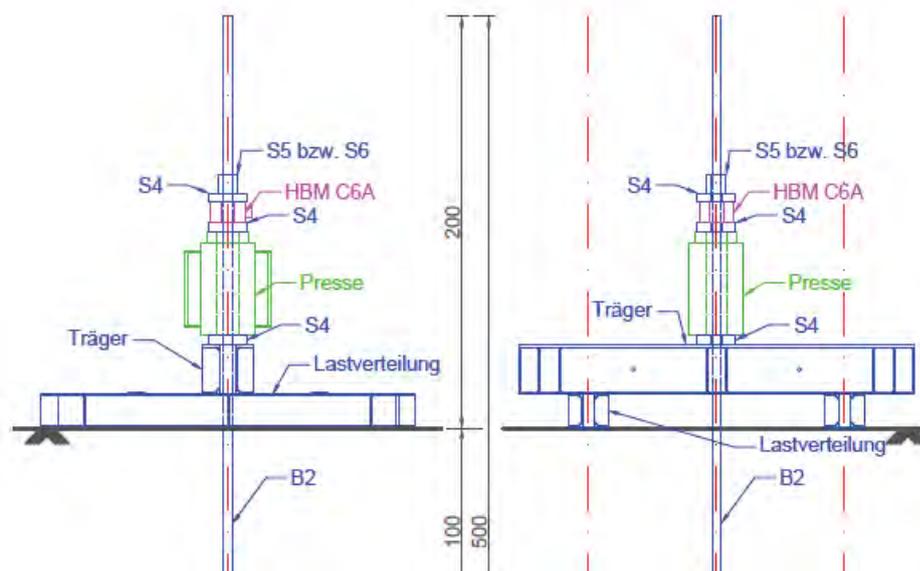
Durch die Anbringung eines, wie in Abb. 136 dargestellten Rohres an der Krone, soll ein Eindringen von grobkörnigen Materialien in den Bereich zwischen Bohrkronen und Ripprohr verhindert werden. Zudem kann durch dieses Rohr auch eine Vergleichmäßigung der Bohrlochwandung erzielt werden, woraus folgend das Einbrechen dieses verhindert wird.

## 7.4. Verwendete Prüfaufbauten

Wie bereits in Kapitel 6.8.2 angeführt, sind aktuell nur bedingt Vorgaben zur Anordnung und Ausführung der Prüfaufbauten für auf Zug belastete Mikropfähle vorhanden. Im Zuge der Versuchsplanung wurden daher zwei Aufbauten näher betrachtet, welche eine praktische Anwendung bzw. den Stand der Technik abbilden.

### 7.4.1. Prüfaufbau 1 - Widerlager

An einer Reihe von Probepfählen wird das klassisch zur Anwendung kommende System aus zwei Lastverteilungsträgern und einem Hauptträger, wie in Abb. 137 dargestellt, erprobt.



**Abb. 137: Prüfaufbau Widerlager**

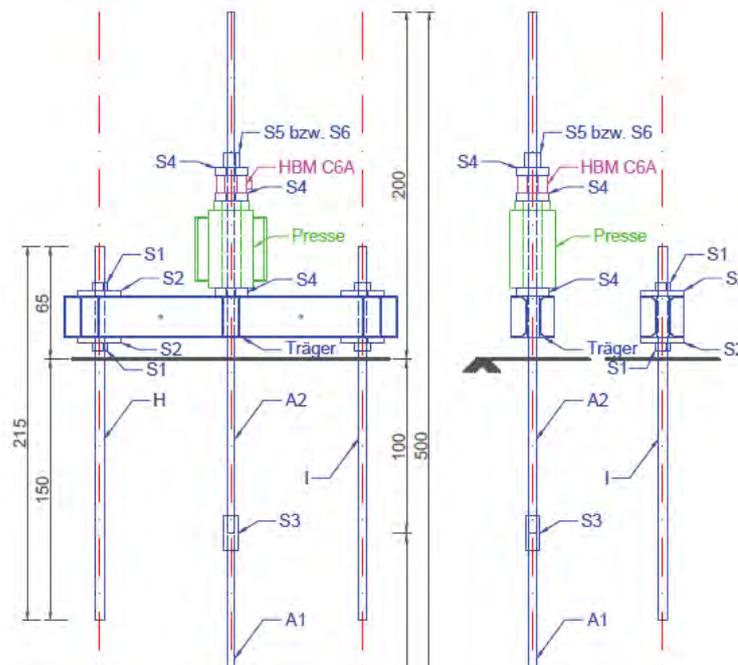
Dabei wird die Presse auf einen Träger aufgesetzt, welcher über zwei Lastverteilungselemente (hier ebenfalls Stahlträger) mit dem Untergrund verbunden ist. Eine der bekannten Problemstellung hier ist, dass neben der Anbringung der Messeinrichtungen zur Erfassung des Kriechmaßes eine Setzung der Lastverteilungsträger stattfinden kann. Neben einer gleichmäßigen Setzung beider Träger ist hier vor allem eine ungleichmäßige Setzung als kritisch zu beachten, da hier neben einem Verschieben der Messeinrichtungen auch eine Biege- und Querkraftbeanspruchung des Zuggliedes vorliegen kann. Neben einer

Beeinflussung der Messergebnisse kann dies auch zu einer Schädigung des Korrosionsschutzes (vor allem im Kopfbereich) der Mikropfähle führen.

Aus diesem Grund werden im Zuge der Feldversuche ausreichend dimensionierte Stahlträger (Doppel-U-Profile) verwendet, welche geringe Verformungen aufweisen. Zudem wird versucht, eine möglichst plane Aufstandsfläche der Lastverteilung auf den Untergrund zu ermöglichen und eine ausreichende Orthogonalität zwischen dem Pressenaufbau und dem Zugglied sicherzustellen.

#### 7.4.2. Prüfaufbau 2 - Reaktionspfähle

Neben dem in 7.4.1 dargestellten klassischen Prüfaufbau mittels Widerlager wurde im Zuge dieser Feldversuche auch eine Widerlagerkonstruktion aus selbstbohrenden Elementen untersucht. Dabei werden keine Lastverteilungselemente (siehe Abb. 137) zur Lasteinleitung in den Untergrund verwendet, sondern diese wird durch im Boden in einem Abstand von  $> 5 \cdot D$  installierte selbstbohrenden Zugelemente (H und I in Abb. 138) ermöglicht.



**Abb. 138: Prüfaufbau Reaktionspfähle**

Identisch zum klassischen Prüfaufbau wie in Abb. 137 dargestellt wird die Belastung durch eine Hohlkolbenpresse aufgebracht und an einen Träger weitergeleitet. Dieser ist durch eine gelenkige Auflagerung (Kolatte bzw. Kugelbund) mit den Reaktionspfählen verbunden, um dort eine möglichst zwängungsfreie Lasteinleitung zu ermöglichen und zudem auch mögliche Ungenauigkeiten aus der Herstellung (z.B. Winkelabweichung zwischen dem Prüfpfahl und den Reaktionspfählen) auszugleichen.



**Abb. 139: Beispiele zum Aufbau des Prüfaufbaues mittels Reaktionspfählen**

Die Anwendung dieses Aufbaues ermöglicht eine einfachere Installation der Widerlager, sowie eine einheitliche und gleichmäßige Lasteinleitung in den Untergrund. Vor allem bei wenig tragfähigen bzw. nachgiebigen Untergründung und weichen Deckschichten kann damit eine ungleichmäßige Verformung des Prüfaufbaues verhindert werden.

#### **7.4.3. Weitere Anpassungen und messtechnische Ausstattung**

Neben der Erfassung der aufgebrauchten Kräfte und der Verschiebungen an Kopf der Mikropfähle wird im Zuge der Feldversuche eine umfassende messtechnische Aufbereitung der Feldversuche vorgenommen. So werden neben den beiden oben angeführten Messgrößen auch die Verformungen und Verschiebungen der Widerlagerkonstruktionen erfasst und es wird ein neues mögliches Abnahmekriterium (gemeinsam mit den in Kapitel 6.1 beschriebenen) erprobt. Dieses Kriterium ist durch das nicht mehr Vorhandensein einer Kraftsteigerung am Kopf des Mikropfahles (bzw. innerhalb der Presse) bei gleichzeitigem

Vorhandensein einer Wegzunahme (Ausziehen des Mikropfahles) definiert. Durch die Geologie des Versuchsfeldes kann dieser Ansatz hier bei unterschiedlichen Untergründen untersucht und erfasst werden und damit auf seine Anwendbarkeit hin validiert werden. Eine der Fragestellungen hierbei ist, inwiefern es sich hier um einen erfassten Peak-Wert (maximal aufbringbare Last) oder um einen residualen Wert (bereits im Versagenszustand) handelt, und wie mit derartigen Kennwerten im Zuge der Bemessung (z.B. Ansetzen von Teilsicherheiten) umzugehen ist.

## **7.5. Zusammenfassung**

Die bisher durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass bei der Prüfung von Mikropfählen – mit Fokus auf Schutzbauten – eine Anpassung der Prüfaufbauten sowie der Abnahmekriterien erforderlich bzw. zielführend ist. Vor allem der Ansatz des Kriechmaßes als Abnahmekriterium erscheint bei den hier vorliegenden dynamischen Lasten wenig sinnvoll. Zudem kann bei einer Anpassung der Prüfaufbauten ein erheblicher technischer und auch zeitlicher Mehrwert generiert werden.

Aktuell Entwicklungen in diesem Bereich, wie beispielsweise die in Ausarbeitung befindliche RVS 08.22.02 zur Fundierung von Steinschlagschutznetzen zeigen, dass hier neben einem wissenschaftlichen Beitrag auch ein praktisches Interesse an Verbesserungen und Innovationen besteht.

Zudem sei anzumerken, dass durch die Entwicklung neuer Prüf- und Untersuchungsmethoden (vgl. Kapitel 6.9) hier auch ein Beitrag zum besseren Verständnis von Lastabtragungs- und Schädigungsmechanismen entstehen kann. Vor allem in Hinblick auf die Zunahme von klimawandelbedingten Naturgefahren wird hier zukünftig sicherlich ein erheblicher Mehraufwand erforderlich sein, um die Sicherheit von Straße und Schiene gewährleisten zu können.

## 8. PROJEKTERGEBNISSE

Nachfolgend werden die Ergebnisse und Erkenntnisse des Forschungsprojektes DAT – Dauerhaftigkeit in der Ankertechnik – zusammengefasst. Diese sind in die Kapitel der Dauerhaftigkeit, der Korrosionsschutzsysteme, die Verwendung von Kunststoffen in der Ankertechnik und die Prüfung bei Mikropfählen für Schutzbauten untergliedert.

### 8.1. Dauerhaftigkeit

In Bezug auf die Dauerhaftigkeit von Zugelementen – und vor allem bei Fundierungen von Schutzbauten – zeigte sich, dass hier eine Vielzahl an Faktoren sowohl im Untergrund als auch von außen zusammenwirken. So bildet einerseits der Untergrund mit dem Zugelement ein Korrosionssystem, welches andererseits durch Grund- und Hangwässer aber auch Einwirkungen wie Chloriden oder Tausalze überlagert wird. Demzufolge stellt die Beurteilung der Korrosion im Untergrund eine große Herausforderung dar.

### 8.2. Korrosionsschutzsysteme

Bei der Betrachtung der Korrosionsschutzsysteme bei Mikropfählen zeigte sich, dass hier sehr unterschiedliche Arten des Korrosionsschutzes vorliegen, welche mit entsprechenden Vor- und Nachteilen verbunden sind. Durch die durchgeführten Laborversuche und auch die im Zuge des Projektes vorgenommene Aufbereitung zur Korrosion im Boden und der Korrosivität des Bodens konnte hier ein umfassender Überblick geschaffen werden, welcher in den weiteren Projektlauf eingebunden wurde bzw. auch in die Arbeiten bei Normen- und Regelwerke eingebracht werden konnte.

Auch war im Zuge der Laborversuche zu erkennen, dass aufgebrauchte Zinkschutzschichten (ZCP nach ÖNORM B 4456) nur eine bedingte Verzögerung einer Korrosionsschädigung mit sich bringt. Vor allem ist hier eine mögliche – teils großflächige – Beschädigung dieser Schutzschicht im Zuge des selbstbohrenden Einbaues anzuführen. Ist dies jedoch nicht der Fall – beispielsweise bei verzinkten Vollstäben oder als Schutz im Kopfbereich – kann durchaus von einer umfassenden Schutzwirkung einer Verzinkung ausgegangen werden.

Generell lässt sich im Zusammenhang mit den Korrosionsschutzsystemen bei Zugelementen zusammenfassen, dass diese sehr stark von der Lagerung, der Art des Einbaues, sowie auch der Korrosivität des Bodens abhängen. Daher ist hier eine Beurteilung der Korrosivität – wie diesen in ÖNORM B 4456 (und auch anderen Regelwerken) empfohlen wird – vorzunehmen, um die Dauerhaftigkeit von Zugelementen und geankerten Konstruktionen sicherzustellen.

### **8.3. Verwendung von Kunststoffen in der Ankertechnik**

Mit dem Konzept des doppelt-korrosionsgeschützten Selbstbohrzuelementes (DCP-SBZ) konnte ein erster Ansatz gezeigt werden, mit welchem eine Kombination aus einem selbstbohrenden System und einem dauerhaften Korrosionsschutz möglich wäre. Zwar sind hier noch weitere Entwicklungen erforderlich, eine erste Validierung des Konzeptes verlief jedoch durchaus positiv und zeigte, dass das entwickelte Konzept großes Potential für Mikropfähle bei Schutzbauten aber auch andere Zuelemente in der Geotechnik aufweist.

### **8.4. Prüfung von Mikropfählen**

Ein Nebenprodukt des Projektes war die dynamische Prüfung von nicht vorgespannten Zuelementen. Hier zeigte sich, dass zumindest mit entsprechendem Aufwand aktuell eine derartige Prüfung möglich ist. Damit könnten zum einen reale, impuls- und schlagartige Einwirkungen bei Zuelemente abgebildet werden und zum anderen auch neue Abnahme- und Prüfkriterien definiert werden. Aktuelle Kriterien hierzu sind auf derartige Einwirkungen nicht angepasst und können daher zu einer Über- bzw. Unterschätzung der Tragfähigkeit von Fundierungen bei Schutzbauten führen.

Zudem zeigten die Untersuchungen zu einer impulsartigen Prüfung bei Mikropfählen, dass hieraus Vereinfachungen in der Prüfung aber auch der Abnahme dieser Konstruktionen entstehen können.

### **8.5. Sonstige Projektergebnisse und Erkenntnisse**

Generell zeigte sich im Projekt, dass die unzähligen Korrosionsmechanismen und Korrosionserscheinungsformen in Bezug auf Anker und Zuelemente durch die streuenden Eigenschaften des Untergrundes überlagert werden. Demzufolge ist es auch entsprechend aufwändig, eine klare und eindeutige Aussage zu einer Korrosionsschädigung bzw. der Wirkung von Korrosionsschutzsystemen zu geben. Dies zeigte sich auch im Zuge der Mitarbeit bei Normen- und Regelwerkausschüssen. Mit der aktuellen Fassung der ÖNORM B 4456 wurde hier jedoch ein in Österreich und Europa einzigartiges Regelwerk geschaffen, welches eine erste Grundlage zur Berücksichtigung der Dauerhaftigkeit bei Zuelemente schafft.

## 9. AUSBLICK UND WEITERE FORSCHUNGEN

Mit dem DAT-Projekt konnten einige Fragestellungen im Zusammenhang mit der Dauerhaftigkeit von Mikropfählen bei Schutzbauten, aber auch bei anderen Zugelementen wie Ankern und Nägeln, erarbeitet werden. Neben den Untersuchungen zu den Korrosionsschutzsystemen wurde mit der Methode der künstlichen Korrosion und der Untersuchung von Verpresskörpern mittels CT-Scan ein neuer Weg aufgezeigt, um den Einfluss von Rissen, deren Bildung und deren Auswirkung auf die Tragfähigkeit zu untersuchen. Bisher wurde bei beiden Betrachtungsweisen lediglich der Verpresskörper an sich betrachtet, die Interaktion mit dem Untergrund wurde nicht abgebildet. Mit zusätzlicher Betrachtung dieser Randbedingung könnte jedoch neben der Rissbildung in Verpresskörpern eventuell auch ein Mehrwert im Bereich der Tragfähigkeit und Lastableitung dieser Konstruktionselemente betrachtet werden.

Ähnlich konnte auch mit der impulsartigen Prüfung bei Mikropfählen eine erste Grundlage für mögliche Vereinfachungen der Prüfung bzw. ein vertiefter Einblick in die Lastableitung bei Mikropfählen bei Schutzbauten gegeben werden. Vor allem sollte hier zukünftig die Fragestellung der Lastableitung bei derartig schlagartigen Einwirkungen betrachtet werden, um neben einer realen Abbildung der Belastung auch eine Optimierung der Fundierung bei Schutzbauten zu ermöglichen.

Ein Fokus des Projektes war es, einen neuen Typ von Zugglied zu entwickeln, welches in Form des korrosionsgeschützten Selbstbohrzugelementes (DCP-SBZ) in einem ersten Konzept umgesetzt wurde. Die Entwicklung dieses Fundierungstypen wird durch das Konsortium fortgesetzt – vor allem mit dem Fokus künftig ein derartiges Mikropfählsystem anbieten zu können bzw. auch dessen weitere Anwendungsgebiete in der Zugelementtechnik zu untersuchen.

Abschließend sei festzuhalten, dass bereits einige Erkenntnisse und Ergebnisse aus diesem Projekt in die Normung bzw. die Regelwerkarbeit eingeflossen sind. Dies wird durch das Konsortium des Projektes beibehalten, um neben der Dissemination auch die Weiterentwicklung im Bereich der Anker- und Zugelementtechnik stattfindet.

## 10. PUBLIKATIONEN UND VERÖFFENTLICHUNGEN

Nachfolgend findet sich eine Liste der Publikationen, Veröffentlichungen und der studentischen Abschlussarbeiten, welche im Zusammenhang mit diesem Projekt bzw. aufbauend auf Projektergebnissen entstanden sind.

### 10.1. Publikationen

Rebhan, et. al., Dauerhaftigkeit von Mikropfählen und anderen Verankerungselementen; 13. Österreichische Geotechniktagung; 27-28.01.2022, unveröffentlicht

Rebhan, Kainz; Daxer; Zöhrer; Thurner; Tschuchnigg; Marte; New test method for micro piles subjected to tensile loads – first field tests and validation; 11<sup>th</sup> International Symposium Field Monitoring in Geomechanics 2022; unpublished

Granitzer; Rebhan; Tschuchnigg; Experimental and Numerical Studies on the load transfer mechanisms on micropiles; 11<sup>th</sup> International Symposium Field Monitoring in Geomechanics 2022; unpublished

Rebhan; Dold; Tschuchnigg; Burtscher; Marte; Behaviour of cracked grout-bodies of micropiles with different corrosion protection measures; Mediterranean Geoscience Conference; 25-28. November 2021; unpublished

### 10.2. Vorträge und Präsentationen

Auf Grund der Verschiebung von Seminaren, Workshops und Konferenzen wurden bisher keine wissenschaftlichen Vorträge gehalten. Im Zuge der Vorstellung der neuen ÖNORM B 4456 wurde jedoch das Thema der Korrosivität im Boden durch Matthias J. Rebhan im Zuge von zwei Terminen (Wien und Innsbruck) vor Fachpublikum vorgestellt.

### 10.3. Studentische Arbeiten

Name	Titel	Datum
Hans-Peter Daxer	Untersuchungen zum Verhalten von verankerten Bauwerken infolge eines Ankerversagens	2021
Cornelius Dold	Versuchstechnische und analytische Untersuchung zum Rissverhalten und Rissbild von Verpresskörpern bei Zugelementen	2021
Martin Hehn	Einfluss von Rissbreiten auf das Korrosionsverhalten von Mikropfählen	2021
Florian Hassler	Untersuchungen zur Verwendung von Kunststoffen für die Herstellung von kurzzeitbelasteten geankerten Konstruktionen	Laufend Geplant Q2/2022
Lukas Wegscheider	Methoden zur Bestimmung der Korrosivität des Untergrundes nach ÖNORM B 4456	Laufend Geplant Q3/2022
Cederic Haberey	Impulsartige Prüfung von Mikropfählen – Weiterentwicklung und Vergleich mit anderen Prüfmethoden	Laufend Geplant Q4/2022

## 11. ANHÄNGE

Neben den Ausführungen, welche in den vorherigen Kapiteln angeführt sind, finden sich weitere Unterlagen im Anhang. Dies sind:

#	Bezeichnung	Seiten
A	Planung CT-Scans Mikropfahl	1 x A3
B	Planung Korrosionswanne	1 x A3
C	Planung Versuchskörper Korrosionswanne	1x A4
D	Planung dynamisches Prüfgerät	1 x A3
E	Planung Großversuchsfeld	1 x A0

Diese Dokumente sind dem hier vorliegenden Endbericht jeweils in A4 angefügt.

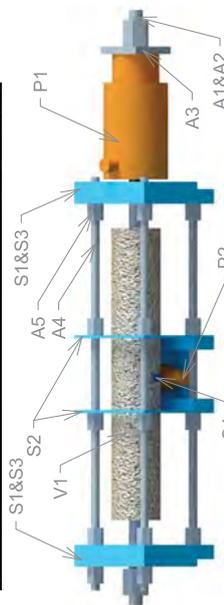
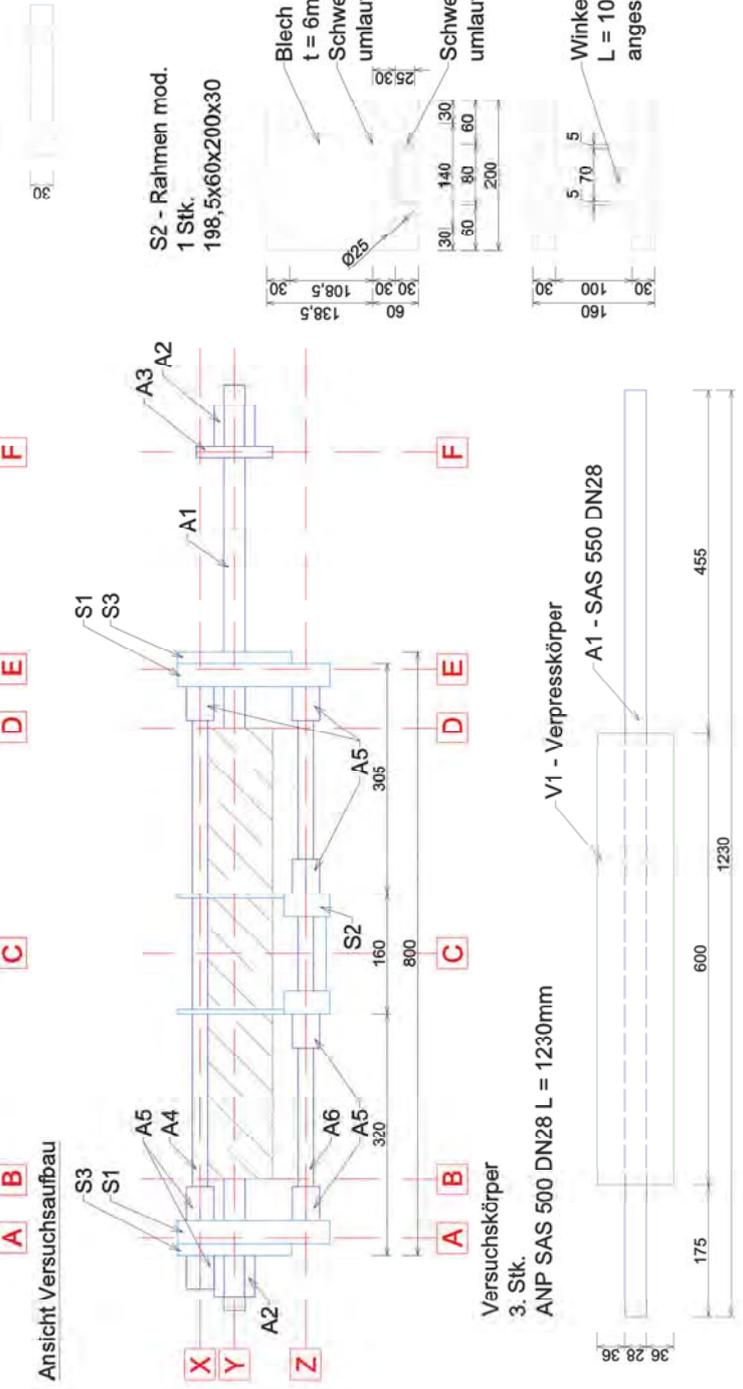
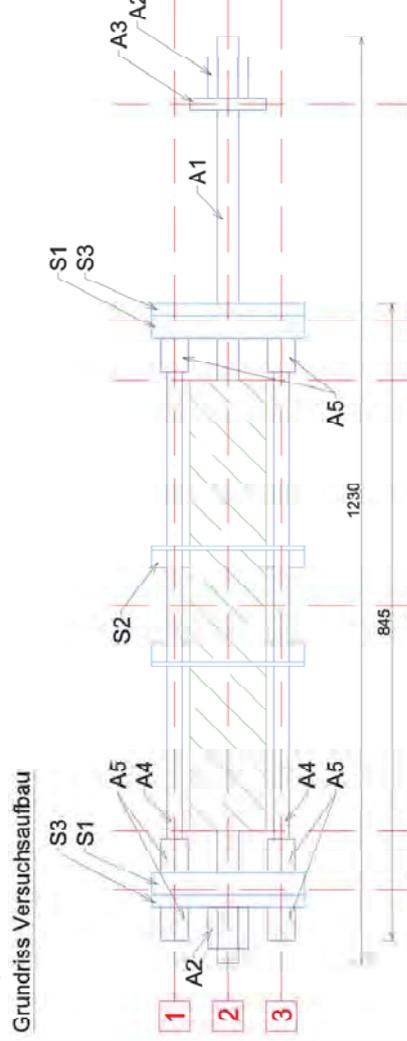
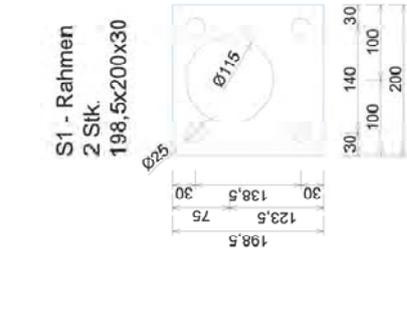
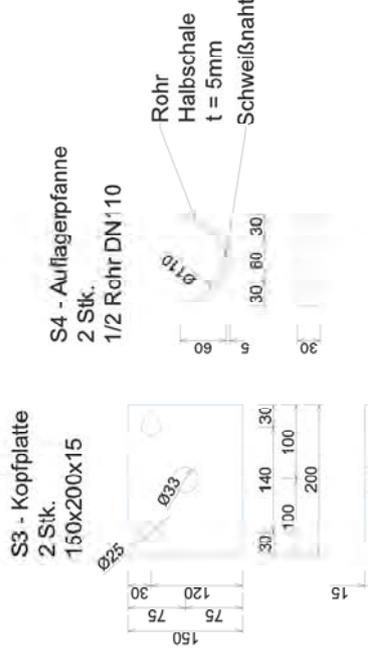
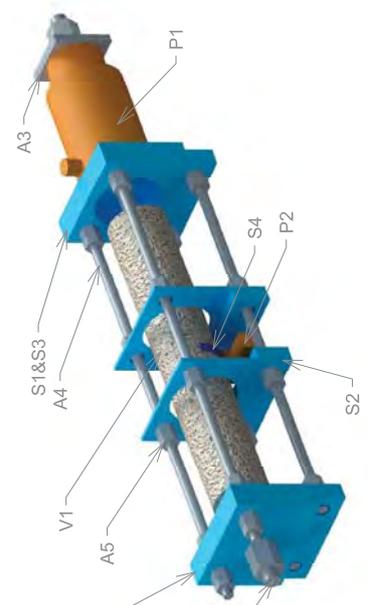
BAUTEILE - Stahlbau			
S235 S0 unverzinkt und unlackiert			
#	Bezeichnung	Maße [mm]	Stk.
S1	Rahmen	198,5x200x30	2
S2	Rahmen mod.	160x200x30	1
S3	Kopflatte	150x200x15	2
S4	Auflagerfanne	1/2 Rohr DN110	2

ANP-SYSTEMS SAS550			
#	Bezeichnung	Maße [mm]	Stk.
A1	Prüfstab DN28	1230,00	5
A2	Ankermutter DN28 T2002	-	4
A3	Pfahlkopflatte DN28 T2139	-	2
A4	Druckstab DN20	845,00	4
A5	Ankermutter DN20 T2002	-	22
A6	Druckstab DN20	800,00	4

Zementkörper			
#	Bezeichnung	Maße [mm]	Stk.
V1	Verpresskörper	600,00	3

Pressentechnik			
#	Bezeichnung	Typ	Stk.
P1	Zugpresse	RACH-302	1
P2	Biegepresse	RC-50	1
P3	Handpumpe	?	1
P4	Manometer	?	1
P5	Schläuche	?	2
P6	Sperr- und Verteilventil	?	1

Gewicht Versuchs Aufbau			
#	Bezeichnung	Gewicht [kg]	
S	Stahlbau	26,81	
A	ANP-Systems	20,02	
V	Verpresskörper	10,86	
P	Pressentechnik	13,70	
<b>Gesamt</b>		<b>71,39</b>	



**TU Graz**

Forschungsprojekt DAT

Dauerhaftigkeit in der Ankerentechnik

Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerisches Geotechnik

Technische Universität Graz

---

Prüfaufbau Rissbildung Verpresskörper

Schema Prüfaufbau Planung

Revision / Änderung	06.08.2020	Ersteller	Geprüft
erste Ausarbeitung		06.08.2020	
Maßstab	Datum	Ersteller	Geprüft
1:5	06.08.2020	Reb	

Plan. Nr.: DAT\_KV\_20a

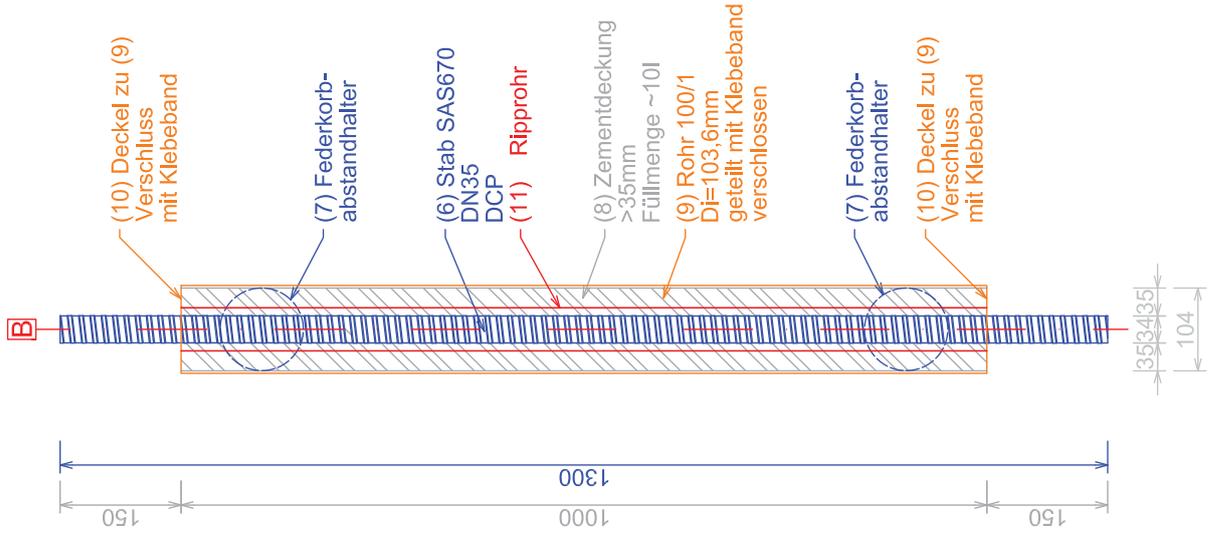
**ANP-Systeme**

#	Beschreibung	Stück
6	1 Betonstahl SAS 670 DN35 L = 1300mm	6
7	Federkorbabstanzhalter	12
11	Ripprohr SAS 670 DN35 L = 1000mm	3

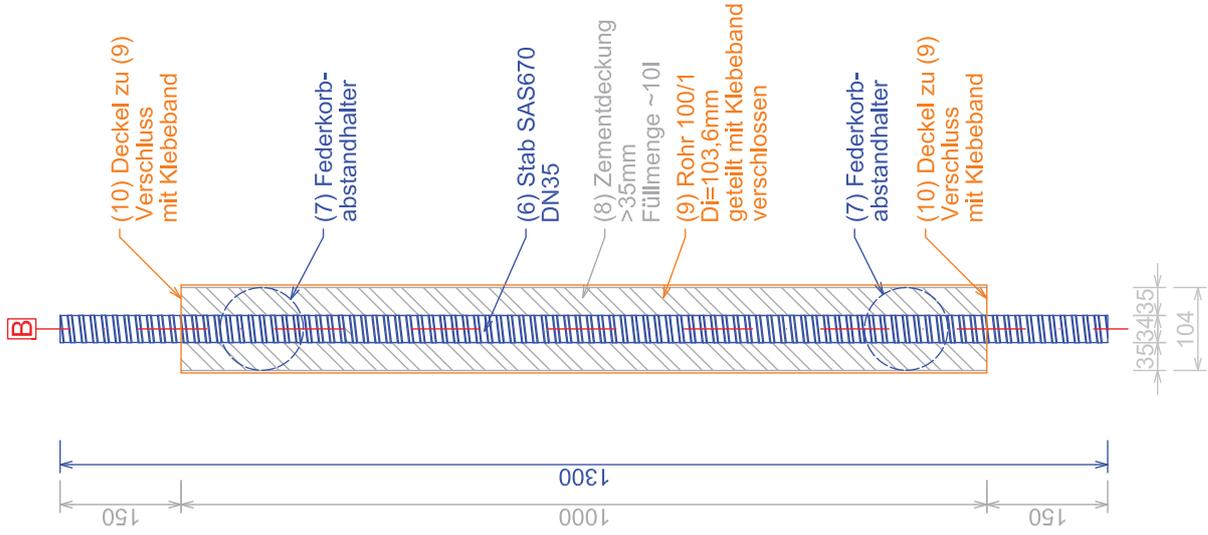
**Lieferadresse**

Technische Universität Graz  
 Wasserbaulabor Inffeldgasse  
 z.H. Matthias Rebhan  
 Inffeldgasse 26  
 8010 Graz  
 Tel. 0316 873 6738  
**Telefonische Voranmeldung 1h vor Ankunft!**

Versuchskörper VK\_10b  
 3 Stück!



Versuchskörper VK\_10a  
 3 Stück!



Forschungsprojekt DAT  
 Dauerhaftigkeit in der Ankerentechnik

Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik  
 Technische Universität Graz

**Prüfaufbau Korrosionsprüfung**

Schema Prüfaufbau Planung

Revision / Änderung		17.11.2020	
erste Ausarbeitung		Ersteller	Geprüft
Maßstab	Datum	Ersteller	Geprüft
	17.11.2020	Reb	
		Plan. Nr.	DAT_KV_10a

### ANP-Systeme

#	Beschreibung	Stück
1	2 Ankermutter TR2002-35	4
2	3 Pfahlkopfplatte TR2139-35	4
3	1 Betonstahl SAS 670 DN35 L = 400mm	2
4	6 Muffe TR3003-35	4
5	1 Betonstahl SAS 670 DN35 L = 1000mm	2
6	1 Betonstahl SAS 670 DN35 L = 1300mm	5
7	11 Federkorbidstanzhalter	12
X	8 Schrumpfschlauch L = 1000mm	5

### IBG

#	Beschreibung	Stück
8	Ankermörtel Sack a 25kg	5

### Pipeline

#	Beschreibung	Stück
9	KG DN110	5
10	Muffenstopfen KG DN 110	10
11	POLO-RDS DN200	4
12	KG=EA200/110/45 Hoserohr	2
13	KGVI DN 110 Muffenstopfen	2
14	KG RK DN 200 Putzschaft	2

### Lieferadresse

Technische Universität Graz  
 Wasserbaulabor Inffeldgasse  
 z.H. Matthias Rebhan  
 Inffeldgasse 26  
 8010 Graz  
 Tel. 0316 873 6738  
**Telefonische Voranmeldung Ihr vor Ankunft!**



Forschungsprojekt DAT  
 Dauerhaftigkeit in der Ankerstechnik

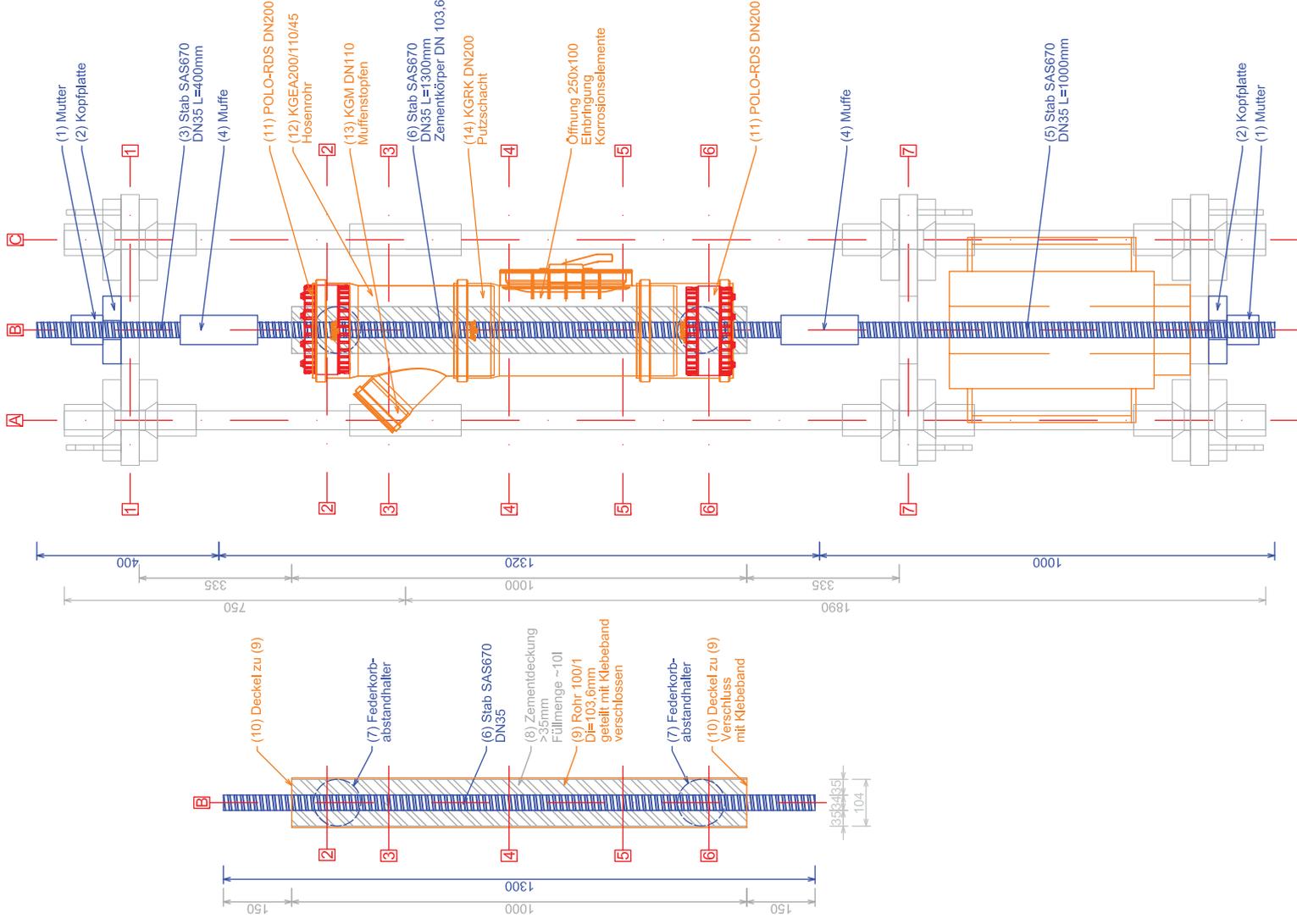
Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik  
 Technische Universität Graz

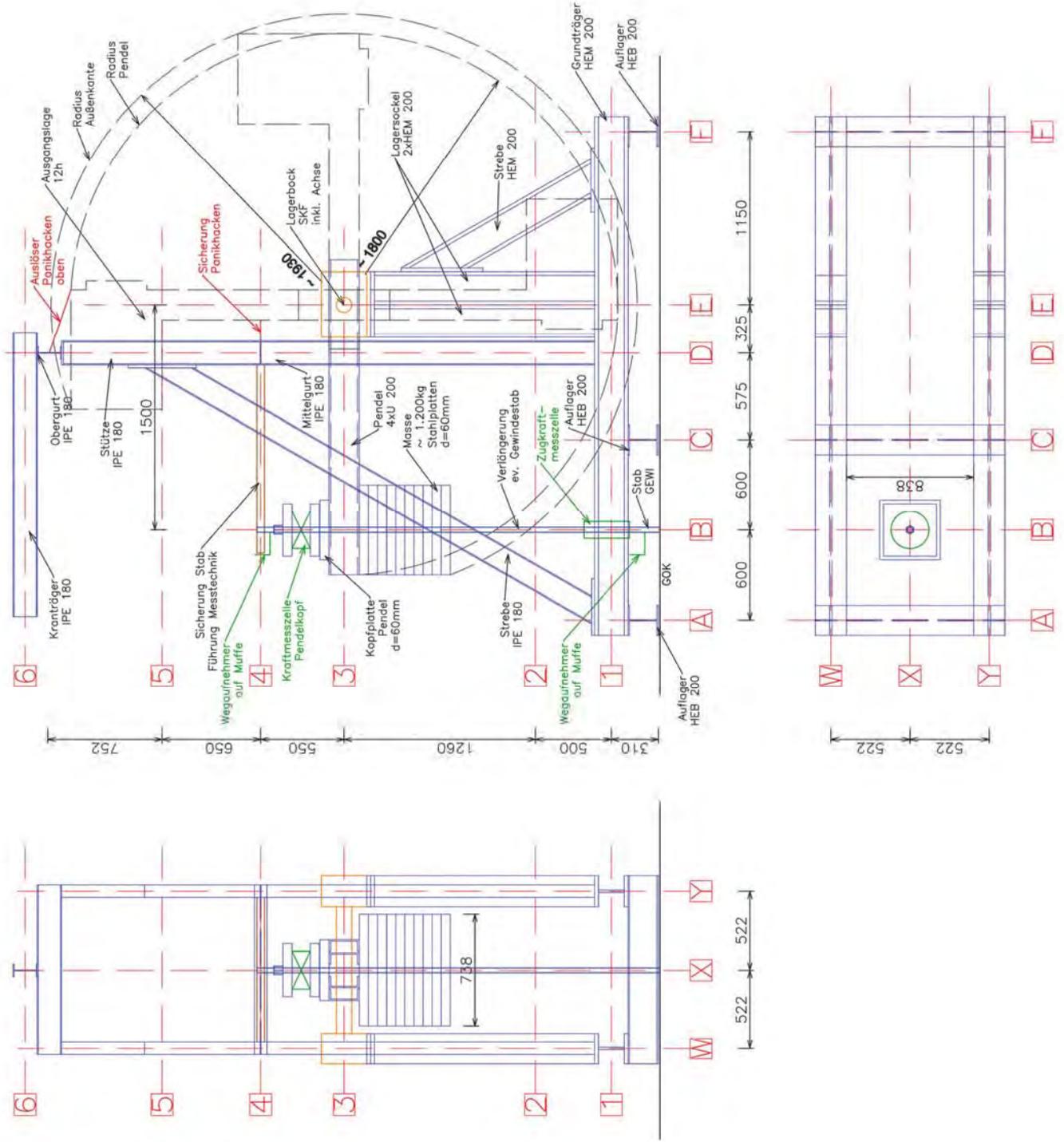
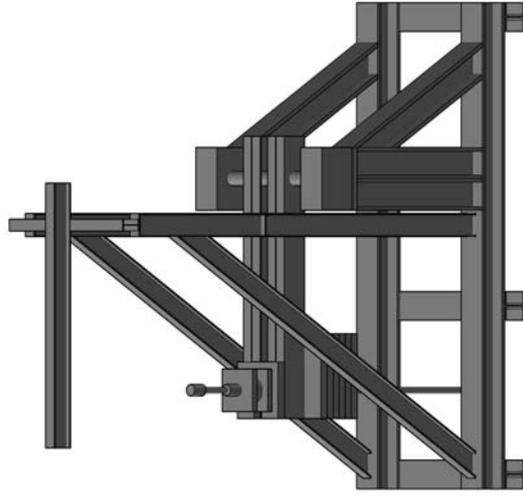
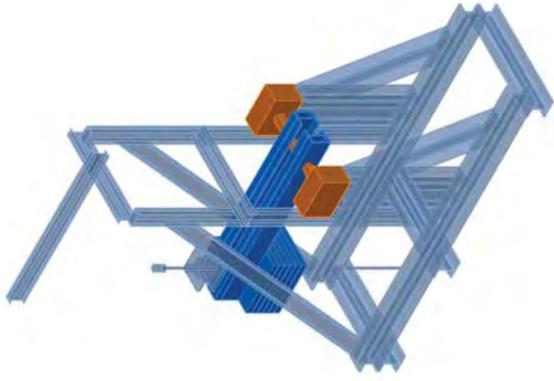
## Prüfaufbau Korrosionsprüfung

### Schema Prüfaufbau Planung

#### Revision / Änderung

Revision / Änderung	Datum	Ersteller	Geprüft	Plan. Nr.
erste Ausarbeitung	09.06.2020			
Überarbeitung Maßstab	25.06.2020			
1:10	25.06.2020	Reb		DAT_KV_01b





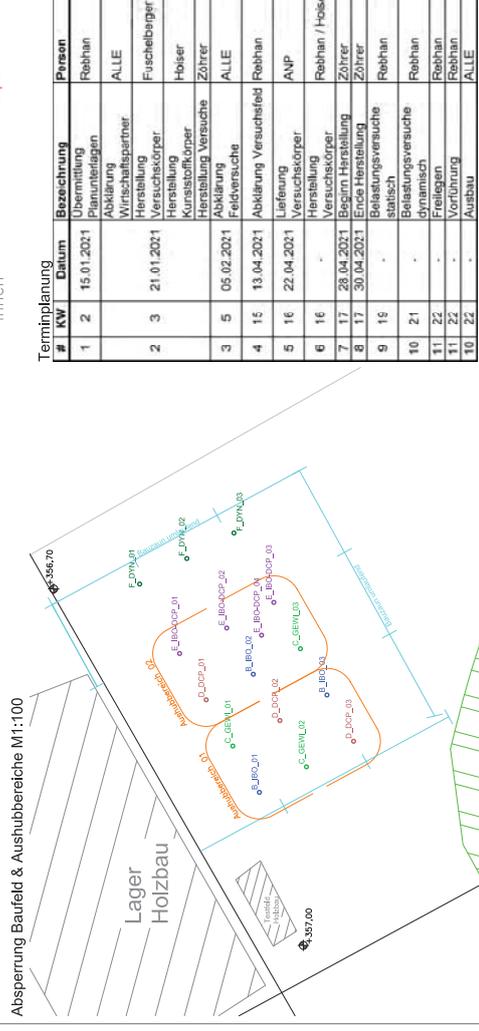
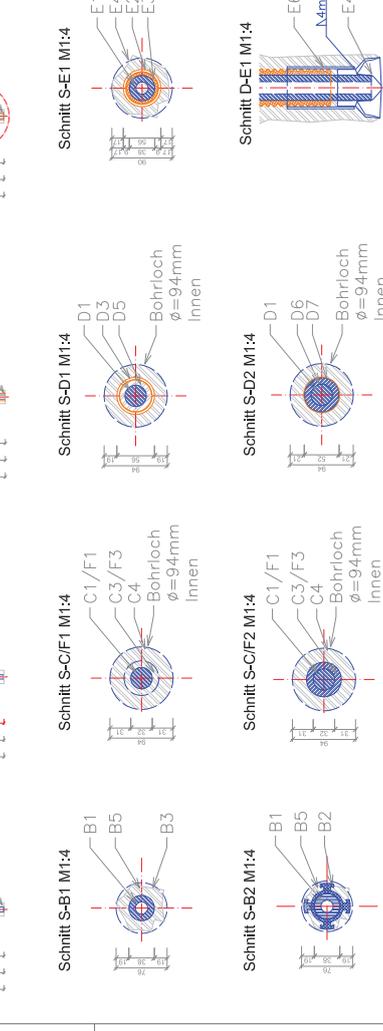
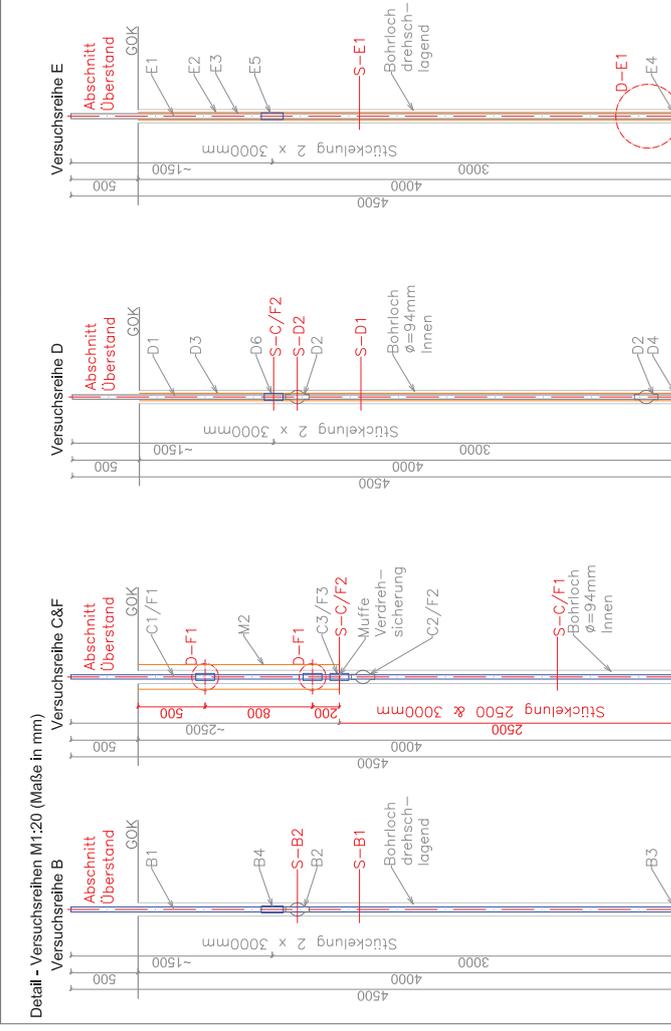
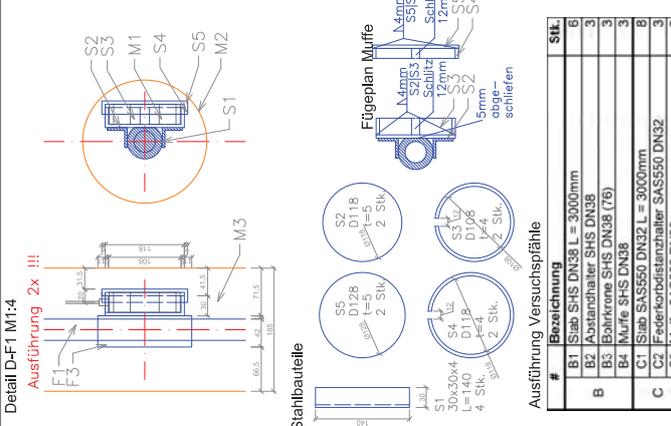
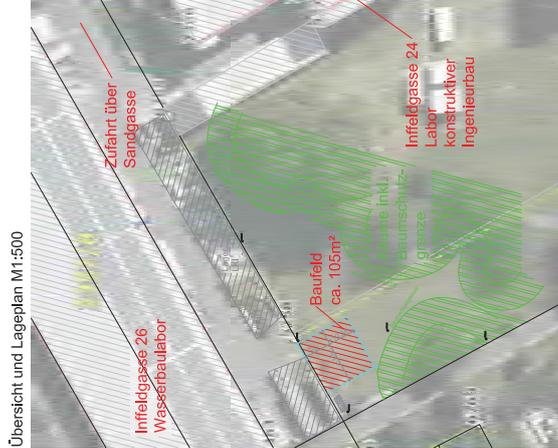
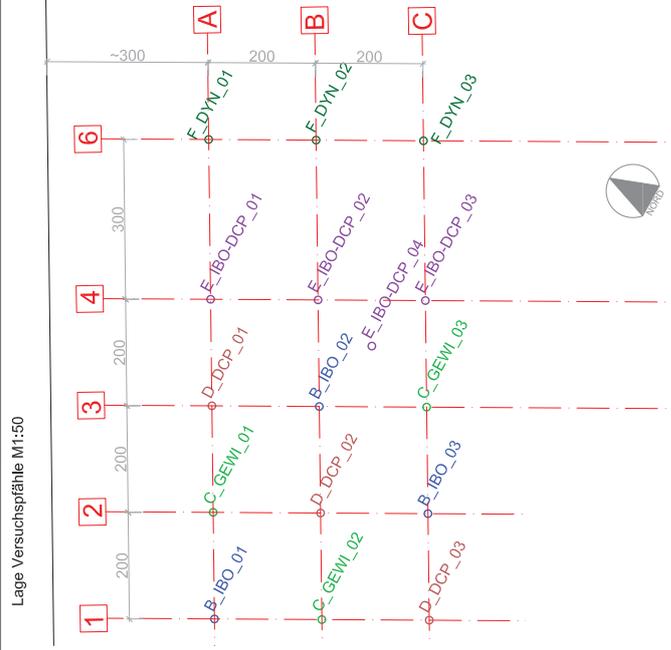
Forschungsprojekt DAT  
Dauerhaftigkeit in der Ankerstechnik

Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik  
Technische Universität Graz

## Dynamische Pfahlprüfung

### Schema Prüfanlage

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



### Terminplanung

#	KW	Datum	Bezeichnung	Person
1	2	15.01.2021	Übermittlung Planunterlagen	Rehhan
2	3	21.01.2021	Abklärung Wirtschaftspartner	ALLE
2	3	21.01.2021	Herstellung Versuchskörper	Fuchsberger
2	3	21.01.2021	Herstellung Kurstestkörper	Hoiser
3	5	05.02.2021	Herstellung Versuchsversuche	Zorrner
3	5	05.02.2021	Abklärung Feldversuche	ALLE
4	15	13.04.2021	Abklärung Versuchsablauf	Rehhan
5	16	22.04.2021	Lieferung Versuchsversuche	ANP
6	16	-	Herstellung Versuchsversuche	Rehhan / Hoiser
7	17	28.04.2021	Beginn Herstellungsversuche	Zorrner
8	17	30.04.2021	Ergebnisregulierung	Zorrner
9	19	-	Beurteilung Versuchsversuche	Rehhan
10	21	-	Beurteilung Versuchsversuche	Rehhan
11	22	-	Dynamisch	Rehhan
11	22	-	Freigeben	Rehhan
11	22	-	Vorführung	Rehhan
10	22	-	Ausbau	ALLE

DAT - Dauerhaftigkeit in der Auererntechnik  
Großversuche  
Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Nautische Geotechnik  
Technische Universität Graz

Großversuche

Planung Großversuche Gesamt

Revision / Änderung 11.05.2021

1000f - sechste Ausarbeitung

Datum 11.05.2021

Ersteller MR

Geprüft

Plan-Nr. 192\_1000f

### Herstellung Prüfung

#	Typ	Plan	Platttyp	Beschreibung	Herstellung	Prüfung
B	IBC 01	X	SHS MKP DN38	IBO - drehschlagend hergestellt und freigelegt	drehschlagend	Statisch
B	IBC 02	B	SHS MKP DN38	freigelegt	verrohrt	Statisch
B	IBC 03	B	SHS MKP DN38	freigelegt	verrohrt	Statisch
C	GEWI 01	X	GEWI SAS550 DN32	GEWI/DCP - verrohrt hergestellt und freigelegt	verrohrt	Statisch
C	GEWI 02	X	GEWI SAS550 DN32	hergestellt und freigelegt	verrohrt	Statisch
C	GEWI 03	X	GEWI SAS550 DN32	hergestellt und freigelegt	verrohrt	Statisch
D	DCP 01	D	GEWI SAS550 DN32	GEWI/DCP - verrohrt hergestellt und freigelegt	verrohrt	Statisch
D	DCP 02	D	GEWI SAS550 DN32	hergestellt und freigelegt	verrohrt	Statisch
D	DCP 03	D	GEWI SAS550 DN32	hergestellt und freigelegt	verrohrt	Statisch
E	IBC-DCP 01	E	SHS MKP DN38	IBO-DCP - drehschlagend hergestellt und freigelegt	drehschlagend	Statisch
E	IBC-DCP 02	E	SHS MKP DN38	hergestellt und freigelegt	verrohrt	Statisch
E	IBC-DCP 03	E	SHS MKP DN38	hergestellt und freigelegt	verrohrt	Statisch
E	IBC-DCP 04	E	SHS MKP DN38	6m schrag	drehschlagend	Statisch
E	IBC-DCP 05	E	SHS MKP DN38	6m schrag	drehschlagend	Statisch
E	IBC-DCP 06	E	SHS MKP DN38	12m vertikal	verrohrt	Statisch und dynamisch
F	DY1 01	F	GEWI SAS550 DN32	GEWI/DCP - verrohrt hergestellt und belastet	verrohrt	Statisch und dynamisch
F	DY1 02	F	GEWI SAS550 DN32	hergestellt und belastet	verrohrt	Statisch und dynamisch
F	DY1 03	F	GEWI SAS550 DN32	hergestellt und belastet	verrohrt	Statisch und dynamisch

B IBO - Herstellungsqualität  
C GEWI - Herstellungsqualität  
D DCP - Herstellungsqualität  
E IBO-DCP - Machbarkeit  
F GEWI - Dynamische Prüfung

## 12. LITERATURVERZEICHNIS

ANP - SYSTEMS GMBH (2016): Zulassung ANP - Mikropfahl SAS 550 am 23.03.2016.

ASCE (2009): 2009 Report Card for America's Infrastructure. Reston, Va.: American Society of Civil Engineers.

Bergmeister, Konrad (2009): Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele. Berlin: Ernst & Sohn, zuletzt geprüft am 26.02.2020.

bmvit (2018): Ausschreibungsleitfaden Verkehrsinfrastrukturforschung F&E Dienstleistungen (VIF 2018). im Rahmen der Mobilität der Zukunft.

Böning, Georg (2018): Optimierung technischer Parameter in der Computertomographie (CT) zur Qualitätssicherung in der Patientenversorgung. Dissertation. Universitätsmedizin Berlin, Berlin. Medizinische Fakultät Charité.

Briehl, Horst (2008): Chemie der Werkstoffe. 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Teubner (Lehrbuch Chemie). Online verfügbar unter [http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2998486&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm](http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2998486&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm).

Burkert, Andreas; Lehmann, Jens; Ebell, Gino (2010): Korrosions- und Verbundverhalten verzinkter Betonstähle in Betonen mit chromatreduzierten Zementen. Hg. v. Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart.

Burtscher, S.L; Rebhan, M.J; Marte, R.; Scharinger, F. (Hg.) (2017a): Neue Methoden zur Korrosionsdetektion an Litzen- und Stabankersystemen. Unter Mitarbeit von S.L Burtscher, M.J Rebhan, R. Marte und F. Scharinger. 32. Christian Veder Kolloquium: Zugelemente in der Geotechnik - Anker | Nägel | Zugpfähle. Graz, 2017. TU Graz. Graz, University of Technologie.

Burtscher, Stefan L.; Rebhan, Matthias J.; Marte, Roman; Scharinger, Florian (2017b): Neue Methoden zur Korrosionsdetektion an Litzen- und Stabankersystemen.

Chauvin Arnoux Group (2010): Leitfaden zur Erdungsprüfung. Erdungsprüfung und Messung des spezifischen Erdwiderstands. 1. Aufl.

Cornelius Dold, BSc. (2021): Versuchstechnische und analytische Untersuchung zum Rissverhalten und Rissbild von Verpresskörper bei Zugelementen. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz.

Degner, Ralf (2009): pH-Messung. Der Leitfaden für Praktiker. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co; John Wiley & Sons.

Dold, Cornelius (2021): Versuchstechnische und analytische Untersuchung zum Rissverhalten und Rissbild von Verpresskörpern bei Zugelementen. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik, zuletzt geprüft am 28.06.2021.

Dominik Wöls, BSc. (2020): Versuchstechnische Untersuchung von korrosionsgeschädigten Winkelstützmauern. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Online verfügbar unter [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwil2obM8f7rAhULEcAKHU3jCR0QFjAAegQIAxAB&url=https%3A%2F%2Fdiglib.tu-graz.at%2Fversuchstechnische-untersuchung-von-korrosionsgeschaedigten-winkelstuetzmauern-2018&usg=AOvVaw2QV5cTZGo7zWvs\\_k1E4IEt](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwil2obM8f7rAhULEcAKHU3jCR0QFjAAegQIAxAB&url=https%3A%2F%2Fdiglib.tu-graz.at%2Fversuchstechnische-untersuchung-von-korrosionsgeschaedigten-winkelstuetzmauern-2018&usg=AOvVaw2QV5cTZGo7zWvs_k1E4IEt), zuletzt geprüft am 23.09.2020.

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation - Bundesamt für Strassen (2009): Verbund von Spanngleidern.

Enerpac Tool Group (2020(a)): Hollow Plunger Hydraulic Cylinders. Datenblatt. Hg. v. Enerpac Tool Group, zuletzt geprüft am 26.11.2020.

Enerpac Tool Group (2020(b)): Hydraulic Cylinders. Datenblatt. Hg. v. Enerpac Tool Group.

Fabian Mikulik, BSc. (2019): Versuchstechnische Untersuchungen zu vorgespannten Ankern. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz.

FFG: Ausschreibungsleitfaden VIF 2018, zuletzt geprüft am 26.02.2020.

Geobrugg AG: Steinschlagschutzverbauung GBE-500A-R System. GS-1122 d; Ausgabe 22.05.17.

Geobrugg AG: Steinschlagverbauung RXE-500 System. GS-1196 d; Ausgabe 22.05.17.

Grundbau-Taschenbuch Teil 2 (2018). 8. Auflage. Berlin, München: Ernst.

Hans-Dieter Schüssele (2007): Elektropraktiker. Hg. v. Berlin 61.

Hehn, Martin (2021a): Einfluss von Rissbreiten auf das Korrosionsverhalten von Mikropfählen. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik, zuletzt geprüft am 28.06.2021.

Hehn, Martin (2021b): Einfluss von Rissbreiten auf das Korrosionsverhalten von Mikropfählen. Diplomarbeit. TU Graz, Graz. Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik.

Holzer, Christian (2018): Wirtschaftsfaktor Korrosionsschutz. In: *JOT Journal für Oberflächentechnik* 58 (1), S. 20–21. DOI: 10.1007/s35144-017-0390-x.

Kons. DAT: Anbot VIF 2018 - Forschungsprojekt DAT. Dauerhaftigkeit in der Ankertechnik.

Maaß, Peter; Peißker, Peter (Hg.) (2008): Handbuch Feuerverzinken. 3., vollst. überarb. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter [http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2998679&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm](http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2998679&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm).

Minova International Ltd (2020a): Glas fibre Resin Polymer (GFRP) Products. Online verfügbar unter <https://www.minovaglobal.com/emea-cis/our-products/steel-and-gfrp-products/glass-fibre-resin-polymer-products/>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2020, zuletzt geprüft am 12.10.2020.

Minova International Ltd (2020b): Products. Online verfügbar unter <https://www.minovaglobal.com/emea-cis/our-products/>, zuletzt aktualisiert am 22.11.2020, zuletzt geprüft am 22.11.2020.

Mölk, Michael; Hofmann, Robert: Schutzbauwerke gegen Steinschlag nach ONR 24810, zuletzt geprüft am 26.02.2020.

Neugebauer, Pia; Zedler, Thomas; Pohl, Sophia; Mark, Peter (2015): Rissbreitenbegrenzung mit verzinkter Bewehrung. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (3), S. 191–200. DOI: 10.1002/best.201400085.

Nürnberg, Ulf (1995a): Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen - Band 1.

Nürnberg, Ulf (1995b): Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen - Band 2.

Nürnberg, Ulf (1995): Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. 2 Bände. Wiesbaden: Bauverl.

ÖNORM B 4456; Dauerhaftigkeit von Verankerungen; (Entwurf - Stand 07.09.2020).

ÖNORM EN 12699.

ÖNORM EN 14199.

ÖNORM EN 14490.

ÖNORM EN 1537.

ÖNORM EN 1990.

ÖNORM EN 1990.

ÖNORM EN 206.

ÖNORM EN ISO 1461.

ONR 24810. Technischer Steinschlagschutz - Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung (2017).

Presses de l'ENPC (1991): Recommendations Clouterre. Soil Nailing Recommendations - 1991, For Designing, Calculating, Constructing and Inspecting Earth Support Systems Using Soil Nailing. Frankreich.

Rebhan, Matthias J. (2019): DOKUMENTATION ZUR VERSUCHSDURCHFÜHRUNG. Ankerprüfung Rissbreitenentwicklung.

Rebhan, Matthias J.; Marte, Roman; Vorwagner, Alois; Tschuchnigg, Franz; Kwapisz, Maciej (2019): Corrosion damage to cantilever MR walls – Representation in tests and calculations. In: *Geomechanics and Tunneling* 12 (5), S. 506–514. DOI: 10.1002/geot.201900023.

Rebhan, Matthias, Dipl.-Ing. Dipl.-Ing., BSc (2019): Korrosionsschäden bei Winkelstützmauern. Dissertation. Technische Universität Graz, Graz.

05.04.2012: RMS SPECIFICATION D&C B114 Ground Anchors.

Sainsbury, Bre-anne Louise; Bolton, John; Meikle, Tom (2016): A new corrosion resistant ground support.

SCHMOLZ + BICKENBACH AG - Swiss Steel AG (2020): Spezial-Betonstahl für Bau und Geotechnik. Top12 in der Geotechnik. Online verfügbar unter <https://www.swiss-steel.com/betonstahl/top12/geotechnik/>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2020, zuletzt geprüft am 12.10.2020.

Tostmann, Karl-Helmut (2005): Korrosion. Ursachen und Vermeidung. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/352760331X>.

Weißbach, Wolfgang; Dahms, Michael; Jaroschek, Christoph (2015): Werkstoffkunde. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 19., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (Lehrbuch).

Wichter, Lutz; Meiniger, Wolfgang (2009): Verpressanker. In: Karl Josef Witt (Hg.): Grundbau-Taschenbuch. Teil 2: Geotechnische Verfahren. 7. Aufl., 1. Nachdr. Berlin: Ernst, S. 304–366.

#### Literaturverzeichnis

ANP - SYSTEMS GMBH (2016): Zulassung ANP - Mikropfahl SAS 550 am 23.03.2016.

ASCE (2009): 2009 Report Card for America's Infrastructure. Reston, Va.: American Society of Civil Engineers.

Bergmeister, Konrad (2009): Schutzbauwerke gegen Wildbachgefahren. Grundlagen, Entwurf und Bemessung, Beispiele. Berlin: Ernst & Sohn, zuletzt geprüft am 26.02.2020.

bmvit (2018): Ausschreibungsleitfaden Verkehrsinfrastrukturforschung F&E Dienstleistungen (VIF 2018). im Rahmen der Mobilität der Zukunft.

Böning, Georg (2018): Optimierung technischer Parameter in der Computertomographie (CT) zur Qualitätssicherung in der Patientenversorgung. Dissertation. Universitätsmedizin Berlin, Berlin. Medizinische Fakultät Charité.

Briehl, Horst (2008): Chemie der Werkstoffe. 2., überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Teubner (Lehrbuch Chemie). Online verfügbar unter [http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2998486&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm](http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2998486&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm).

Burkert, Andreas; Lehmann, Jens; Ebell, Gino (2010): Korrosions- und Verbundverhalten verzinkter Betonstähle in Betonen mit chromatreduzierten Zementen. Hg. v. Fraunhofer IRB Verlag. Stuttgart.

Burtscher, S.L; Rebhan, M.J; Marte, R.; Scharinger, F. (Hg.) (2017a): Neue Methoden zur Korrosionsdetektion an Litzen- und Stabankersystemen. Unter Mitarbeit von S.L Burtscher, M.J Rebhan, R. Marte und F. Scharinger. 32. Christian Veder Kolloquium: Zugelemente in der Geotechnik - Anker | Nägel | Zugpfähle. Graz, 2017. TU Graz. Graz, University of Technologie.

Burtscher, Stefan; Rebhan, Matthias; Marte, Roman; Scharinger, Florian: Neue Methoden zur Korrosionsdetektion an Litzen- und Stabankersystemen. In: Beiträge zum 32. Christian Veder Kolloquium, zuletzt geprüft am 31.08.2018.

Burtscher, Stefan L.; Rebhan, Matthias J.; Marte, Roman; Scharinger, Florian (2017b): Neue Methoden zur Korrosionsdetektion an Litzen- und Stabankersystemen.

Chauvin Arnoux Group (2010): Leitfaden zur Erdungsprüfung. Erdungsprüfung und Messung des spezifischen Erdwiderstands. 1. Aufl.

Cornelius Dold, BSc. (2021): Versuchstechnische und analytische Untersuchung zum Rissverhalten und Rissbild von Verpresskörper bei Zugelementen. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz.

Degner, Ralf (2009): pH-Messung. Der Leitfaden für Praktiker. Weinheim: WILEY-VCH Verlag GmbH & Co; John Wiley & Sons.

Dold, Cornelius (2021): Versuchstechnische und analytische Untersuchung zum Rissverhalten und Rissbild von Verpresskörpern bei Zugelementen. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik, zuletzt geprüft am 28.06.2021.

Dominik Wöls, BSc. (2020): Versuchstechnische Untersuchung von korrosionsgeschädigten Winkelstützmauern. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Online verfügbar unter [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwil2obM8f7rAhULEcAKHU3jCR0QFjAAegQIAxAB&url=https%3A%2F%2Fdiglib.tu-graz.at%2Fversuchstechnische-untersuchung-von-korrosionsgeschaedigten-winkelstuetzmauern-2018&usg=AOvVaw2QV5cTZGo7zWvs\\_k1E4IEt](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&cad=rja&uact=8&ved=2ahUKEwil2obM8f7rAhULEcAKHU3jCR0QFjAAegQIAxAB&url=https%3A%2F%2Fdiglib.tu-graz.at%2Fversuchstechnische-untersuchung-von-korrosionsgeschaedigten-winkelstuetzmauern-2018&usg=AOvVaw2QV5cTZGo7zWvs_k1E4IEt), zuletzt geprüft am 23.09.2020.

Eidgenössisches Departement für Umwelt, Verkehr, Energie und Kommunikation - Bundesamt für Strassen (2009): Verbund von Spanngleidern.

Enerpac Tool Group (2020(a)): Hollow Plunger Hydraulic Cylinders. Datenblatt. Hg. v. Enerpac Tool Group, zuletzt geprüft am 26.11.2020.

Enerpac Tool Group (2020(b)): Hydraulic Cylinders. Datenblatt. Hg. v. Enerpac Tool Group.

Fabian Mikulik, BSc. (2019): Versuchstechnische Untersuchungen zu vorgespannten Ankern. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz.

FFG: Ausschreibungsleitfaden VIF 2018, zuletzt geprüft am 26.02.2020.

Geobrugg AG: Steinschlagschutzverbauung GBE-500A-R System. GS-1122 d; Ausgabe 22.05.17.

Geobrugg AG: Steinschlagverbauung RXE-500 System. GS-1196 d; Ausgabe 22.05.17.

Grundbau-Taschenbuch Teil 2 (2018). 8. Auflage. Berlin, München: Ernst.

Hans-Dieter Schüssele (2007): Elektropraktiker. Hg. v. Berlin 61.

Hehn, Martin (2021a): Einfluss von Rissbreiten auf das Korrosionsverhalten von Mikropfählen. Masterarbeit. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik, zuletzt geprüft am 28.06.2021.

Hehn, Martin (2021b): Einfluss von Rissbreiten auf das Korrosionsverhalten von Mikropfählen. Diplomarbeit. TU Graz, Graz. Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik.

Holzer, Christian (2018): Wirtschaftsfaktor Korrosionsschutz. In: *JOT Journal für Oberflächentechnik* 58 (1), S. 20–21. DOI: 10.1007/s35144-017-0390-x.

Kons. DAT: Anbot VIF 2018 - Forschungsprojekt DAT. Dauerhaftigkeit in der Ankertechnik.

Maaß, Peter; Peißker, Peter (Hg.) (2008): Handbuch Feuerverzinken. 3., vollst. überarb. Aufl. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter [http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2998679&prov=M&dok\\_var=1&dok\\_ext=htm](http://deposit.d-nb.de/cgi-bin/dokserv?id=2998679&prov=M&dok_var=1&dok_ext=htm).

Minova International Ltd (2020a): Glas fibre Resin Polymer (GFRP) Products. Online verfügbar unter <https://www.minovaglobal.com/emea-cis/our-products/steel-and-gfrp-products/glass-fibre-resin-polymer-products/>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2020, zuletzt geprüft am 12.10.2020.

Minova International Ltd (2020b): Products. Online verfügbar unter <https://www.minovaglobal.com/emea-cis/our-products/>, zuletzt aktualisiert am 22.11.2020, zuletzt geprüft am 22.11.2020.

Mölk, Michael; Hofmann, Robert: Schutzbauwerke gegen Steinschlag nach ONR 24810, zuletzt geprüft am 26.02.2020.

Neugebauer, Pia; Zedler, Thomas; Pohl, Sophia; Mark, Peter (2015): Rissbreitenbegrenzung mit verzinkter Bewehrung. In: *Beton- und Stahlbetonbau* 110 (3), S. 191–200. DOI: 10.1002/best.201400085.

Nürnberg, Ulf (1995a): Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen - Band 1.

Nürnberg, Ulf (1995b): Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen - Band 2.

Nürnberg, Ulf (1995): Korrosion und Korrosionsschutz im Bauwesen. 2 Bände. Wiesbaden: Bauverl.

ÖNORM B 4456, 01.06.2021: ÖNORM B 4456.

01.09.2015: ÖNORM EN 12699.

01.03.2016: ÖNORM EN 14199.

ÖNORM EN 14490, 15.07.2010: ÖNORM EN 14490.

ÖNORM EN 1537, 15.10.2015: ÖNORM EN 1537.

ÖNORM B 1990, 05.03.2013: ÖNORM EN 1990.

ÖNORM B 1990, 05.03.2013: ÖNORM EN 1990.

ONR 24810. Technischer Steinschlagschutz - Begriffe, Einwirkungen, Bemessung und konstruktive Durchbildung, Überwachung und Instandhaltung (2017).

Presses de l'ENPC (1991): Recommendations Clouterre. Soil Nailing Recommendations - 1991, For Designing, Calculating, Constructing and Inspecting Earth Support Systems Using Soil Nailing. Frankreich.

Rebhan, Matthias J. (2019): DOKUMENTATION ZUR VERSUCHSDURCHFÜHRUNG. Ankerprüfung Rissbreitenentwicklung.

Rebhan, Matthias J.; Marte, Roman (2022): Dienstleistungsprojekt. Prüfung von Mikropfählen für Schutzbauten. Ergebnisbericht. Technische Universität Graz, Graz. Institut für Bodenmechanik, Grundbau und Numerische Geotechnik.

Rebhan, Matthias J.; Marte, Roman; Vorwagner, Alois; Tschuchnigg, Franz; Kwapisz, Maciej (2019): Corrosion damage to cantilever MR walls – Representation in tests and calculations. In: *Geomechanics and Tunnelling* 12 (5), S. 506–514. DOI: 10.1002/geot.201900023.

Rebhan, Matthias, Dipl.-Ing. Dipl.-Ing., BSc (2019): Korrosionsschäden bei Winkelstützmauern. Dissertation. Technische Universität Graz, Graz.

Sainsbury, Bre-anne Louise; Bolton, John; Meikle, Tom (2016): A new corrosion resistant ground support.

SCHMOLZ + BICKENBACH AG - Swiss Steel AG (2020): Spezial-Betonstahl für Bau und Geotechnik. Top12 in der Geotechnik. Online verfügbar unter <https://www.swiss-steel.com/betonstahl/top12/geotechnik/>, zuletzt aktualisiert am 12.10.2020, zuletzt geprüft am 12.10.2020.

Tostmann, Karl-Helmut (2005): Korrosion. Ursachen und Vermeidung. Weinheim: Wiley-VCH. Online verfügbar unter <http://onlinelibrary.wiley.com/book/10.1002/352760331X>.

Weißbach, Wolfgang; Dahms, Michael; Jaroschek, Christoph (2015): Werkstoffkunde. Strukturen, Eigenschaften, Prüfung. 19., vollst. überarb. und erw. Aufl. Wiesbaden: Springer Vieweg (Lehrbuch).

Wichter, Lutz; Meiniger, Wolfgang (2009): Verpressanker. In: Karl Josef Witt (Hg.): Grundbau-Taschenbuch. Teil 2: Geotechnische Verfahren. 7. Aufl., 1. Nachdr. Berlin: Ernst, S. 304–366.