



Manuel Lagger, BSc

**Entwicklung einer Messvorrichtung
zur Ermittlung der Verformungseigenschaften
von Perlkiesverfüllungen**

MASTERARBEIT

zur Erlangung des akademischen Grades

Diplom-Ingenieur

Masterstudium Bauingenieurwissenschaften - Geotechnical and Hydraulic Engineering

eingrichtet an der

Technischen Universität Graz

Betreuer

O.Univ.-Prof. Dipl-Ing. Dr.mont. Wulf Schubert

Institut für Felsmechanik und Tunnelbau

Technische Universität Graz

Zweitbetreuer

Dipl-Ing. BSc. Michael Rudolf Henzinger

Graz, August 2016

Eidesstattliche Erklärung

Affidavit

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

I declare that I have authored this thesis independently, that I have not used other than the declared sources/resources, and that I have explicitly marked all material which has been quoted either literally or by content from the used sources. The text document uploaded to TUGRAZonline is identical to the present master's thesis.

Datum / Date

Unterschrift / Signature

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all jenen bedanken, die mich während meiner gesamten Studienzeit und im Speziellen bei der Erstellung meiner Masterarbeit unterstützt haben.

Durch die Arbeit am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau konnte ich interessante Einblicke in die spannende Welt des Tunnelbaus gewinnen. Die Faszination dieser Disziplin des Ingenieurbaus hat mich schlussendlich dazu bewogen, meine Masterarbeit in diesem Fachgebiet zu verfassen. Bei Prof. Wulf Schubert möchte ich mich bedanken, da seine Tür bei Fragen immer offen stand und er immer einen guten Ratschlag parat hatte.

Ein herzlicher Dank gebührt auch Michael Henzinger, der mir nicht nur die Anregung zu diesem interessanten Thema gab, sondern mich fortwährend unterstützt hat. Nicht nur die Movie Night hat dazu beigetragen, dass ich in ihm auch einen guten Freund gefunden habe.

Bei Anton Kaufmann möchte ich mich für die Unterstützung bei allen Tätigkeiten im Labor bedanken. Ohne seine Ratschläge und Hilfe wäre die Umsetzung meiner Versuche oft nur schwer möglich gewesen.

Für die Unterstützung in bodenmechanischen Belangen gilt mein Dank Otto Leibniz vom Institut für Bodenmechanik und Grundbau.

Mein Dank gilt auch meinen Freunden und Kollegen des Stahlbauzeichensaals, mit denen ich auf eine tolle Studienzeit zurückblicken kann.

Bei meiner Freundin Tina möchte ich mich für ihre großartige Unterstützung und Motivationsfähigkeit bedanken. Dir danke ich auch für deinen Rückhalt in jeder Lebenslage.

Der größte Dank gilt jedoch meiner gesamten Familie. Bei meinen Eltern Andrea und Albert, sowie meinen Großeltern Marianne und Otto, möchte ich mich besonders bedanken. Ohne ihre Unterstützung in jeglicher Hinsicht wäre das Studium für mich so nicht denkbar gewesen.

Vielen Dank!

Abstract

When using shield TBMs, prefabricated reinforced concrete segments are used as final outer lining. In the course of hard rock tunnelling the required gap between lining and excavation boundary (=annular gap) is filled with a fine grained and closely graded gravel (= pea gravel). Thereby, the backfilled material provides the contact between the excavation boundary and the lining segments. Furthermore, the occurring rock loads are evenly distributed by the backfilled material.

The lining design is usually performed using the bedded frame model method. In hard rock conditions only the backfilled material is considered to be relevant for the bedding situation. Therefore, a sound knowledge of the deformation properties of pea gravel is inevitable. At the present time these parameters are determined in non-standardised laboratory and on-site tests. Furthermore, no validation of the used parameters is performed in situ.

Based on the static load plate test a prototype for the in situ determination of the deformation properties of pea gravel has been designed and manufactured. The test is performed through the openings in the lining used for the backfilling procedure. The prototype can be mounted and held in position using four brackets. The load plate, connected to a hydraulic cylinder, can be loaded to a maximum test stress of 1,50 MPa. The stiffness of the backfilled material can be calculated using the recorded measurement data (applied force and load plate displacement).

Tests under controlled laboratory conditions confirmed the suitability of the presented test method. Thereby, the test results have been verified using two independent test procedures. The results show that the stiffness moduli in the design stages are generally overestimated by a factor of 5-10.

The master thesis at hand contains the development process and the detailed design of the manufactured prototype. The evaluation of the test data is shown on the basis of the performed tests. The verification has been done using those results.

Kurzfassung

Bei Einsatz von Schildmaschinen erfolgt die Auskleidung des Tunnels durch vorgefertigte Stahlbetonsegmente (Tübbinge). Der bautechnisch erforderliche Hohlraum zwischen Auskleidung und Gebirge (= Ringspalt) wird bei Hartgesteinsvortrieben in der Regel mit Perlkies verfüllt. Das eingebrachte Material dient dabei der gleichmäßigen Verteilung der Gebirgslasten und sorgt für den Kraftschluss zwischen Auskleidung und Gebirge.

Die Bemessung der Tunnelschale erfolgt meist mit der Methode des gebetteten Stabzugs. Bei Hartgesteinsvortrieben wird das Ringraummaterial primär als bettungsrelevant angesehen. Die Kenntnis der Verformungseigenschaften ist daher unabdingbar. Diese werden zum aktuellen Zeitpunkt in nicht normgerechten Labor- und Baustellenversuchen bestimmt. Ein Vergleich der ermittelten Steifigkeiten kann nicht erfolgen. Zudem erfolgt keine Überprüfung der in der Bemessung eingesetzten Kennwerte in situ.

Auf Basis des statischen Lastplattenversuchs wurde ein Prototyp zur in situ Bestimmung der Verformungseigenschaften von Perlkies entwickelt. Die Prüfung erfolgt dabei über die Verblasöffnung der Tübbinge. Der Prototyp wird über vier Montagewinkel in der Verblasöffnung in Position gehalten. Die mit einem Hydraulikzylinder verbundene Lastplatte kann bis zu einer maximalen Prüfspannung von 1,50 MPa belastet werden. Über die aufgezeichneten Messwerte (Druckkraft und Lastplattenverschiebung) kann die Steifigkeit des Ringraummaterials bestimmt werden.

Versuche unter kontrollierten Laborbedingungen haben die Eignung des Prüfverfahrens bestätigt. Die Ergebnisse konnten durch zwei unabhängige Versuche verifiziert werden. Dabei zeigte sich, dass die in der Regel in der Bemessung verwendeten Steifemoduli für Perlkies um den Faktor 5-10 überschätzt werden.

Die vorliegende Masterarbeit beinhaltet die Konzeptentwicklung sowie die Detailplanung des entwickelten Prototypen. Anhand der durchgeführten Versuche wird die Auswertung exemplarisch gezeigt. Die Verifikation erfolgt mit Hilfe dieser Ergebnisse.

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Stand der Technik	1
1.2	Ziele der Arbeit	4
2	Konzeptentwicklung	5
2.1	Festlegung des grundlegenden Messverfahrens	7
3	Messvorrichtung	8
3.1	Randbedingungen	8
3.2	Entwurf	9
4	Stahlbaukomponenten	11
4.1	Lastplatte	11
4.2	Schutzrohr	12
4.3	Verlängerung - Zylinderkolben	13
4.4	Halterung - Hydraulikzylinder	14
4.5	Widerlagerplatte	17
4.6	Montagewinkel - Wegaufnehmer	18
4.7	Distanzelement	18
4.8	Messhorizont	19
4.9	Montagewinkel - Messvorrichtung	20
4.10	Zusätzliches Material	20
5	Hydrauliksystem	23
5.1	Hydraulikzylinder	23
5.2	Zusätzliche Komponenten	24
6	Messtechnik	26
6.1	Druckkraftaufnehmer	26
6.2	Wegaufnehmer	27
6.3	Datenlogger	28

7 Funktionstest	29
7.1 Druckkraftvergleich	30
7.2 Abschätzung der Systemsteifigkeit	32
8 Laborversuche	33
8.1 Versuchsdurchführung	35
8.2 Systemsteifigkeit	36
9 Auswertung	40
9.1 Darstellung der Ergebnisse	40
9.2 Berechnung der Verformungseigenschaften	43
10 Verifikation der Ergebnisse	48
10.1 Verifikation über Großödometerversuch	48
10.2 Verifikation mittels dynamischem Lastplattenversuch	51
11 Fazit und Ausblick	54
Anhang A - Materialliste	58
Anhang B - Detailpläne	65

Abbildungsverzeichnis

1.1	In Lastrichtung geschichteter Baugrund.	3
2.1	Auswertematrix der Literaturrecherche, in Anlehnung an DIN (2011).	6
3.1	Schematische Darstellung der Verblasöffnung.	8
3.2	Prototyp der Messvorrichtung ohne Montagewinkel.	10
4.1	Aufsicht [<i>links</i>] und Schnittdarstellung [<i>rechts</i>] der Lastplatte.	11
4.2	Darstellung des Schutzrohres als Aufsicht [<i>links</i>] und Schnitt [<i>rechts</i>].	12
4.3	Lastplatte mit Schutzrohr.	12
4.4	Schnittdarstellung der Verlängerung des Zylinderkolbens.	13
4.5	Halterung des Hydraulikzylinders.	14
4.6	Schnittdarstellung der Halterung des Hydraulikzylinders.	15
4.7	Zylinderrohr mit Darstellung als Aufsicht [<i>links</i>] und Schnitt [<i>rechts</i>].	15
4.8	Aufsicht [<i>links</i>] und Schnittdarstellung [<i>rechts</i>] der Zylinderkopfplatte.	15
4.9	Befestigungsplatte als Aufsicht mit Angabe der Bohrungsweiten.	16
4.10	Aufsicht der Widerlagerplatte mit Bohrungsbeschriftung.	17
4.11	Montagewinkel - Wegaufnehmer: Ansicht [<i>links</i>], Schnittdarstellung [<i>mitte</i>] und Aufsicht [<i>rechts</i>].	18
4.12	Distanzelement in Aufsicht [<i>links</i>] und Schnittdarstellung [<i>rechts</i>].	19
4.13	Ansicht [<i>links</i>], Aufsicht [<i>mitte</i>] und Schnittdarstellung [<i>rechts</i>] des Feststellrings.	19
4.14	Ansicht [<i>links</i>], Schnitt [<i>mitte</i>] und Aufsicht [<i>rechts</i>] eines Montagewinkels der Messvorrichtung.	21
4.15	In der Verblasöffnung des Tübbingabschnitts fixierte Montagewinkel.	21
4.16	Darstellung der Einrichtplatte als Aufsicht.	22
5.1	Schaltbild des Hydrauliksystems.	23
5.2	Hydrauliksystem der Messvorrichtung.	23
6.1	Komponenten des Messsystems.	26
6.2	Auf der Messvorrichtung montierter Wegaufnehmer.	27
6.3	Datenlogger.	28

7.1	Versuchsaufbau des Funktionstest.	29
7.2	Schematischer Versuchsaufbau für den Funktionstest.	30
7.3	Vergleich der Druckkräfte.	31
7.4	Verschiebungsdaten des internen Wegaufnehmers zur Abschätzung der Systemverformung.	32
8.1	Perlkies 8/11 [<i>links</i>] und Sand 0,40/0,50 [<i>rechts</i>] als Ringraummaterial.	33
8.2	Schematischer Versuchsaufbau der Laborversuche.	34
8.3	Versuchsaufbau der Laborversuche.	35
8.4	Einbau des Prototypen der Messvorrichtung in horizontaler Lage mit vier [<i>links</i>] bzw. zwei [<i>rechts</i>] Montagewinkeln.	35
8.5	Gemessene Verschiebungen in der Mitte der Widerlagerplatte.	38
8.6	Idealisierte Systemverformung der Messvorrichtung, dargestellt über das Spannungs-Verformungs-Verhalten.	39
9.1	Spannungs-Verschiebungs-Diagramm der durchgeführten Testversuche mit Perlkies 8/11.	41
9.2	Spannungs-Verschiebungs-Verlauf für die mittlere Setzung und die zugehörigen Testserien.	42
9.3	Druck-Verschiebungs-Diagramm des durchgeführten Testversuchs mit Sand.	42
10.1	Semilogarithmisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm der im Großödometer durchgeführten Versuche an Perlkies 8/11.	49
10.2	Spannungs-Dehnungs-Diagramm der durchgeführten Großödometerversuche an Perlkies 8/11 (semilogarithmisch).	50
10.3	Lastplatte (300 mm) des LFG in der mit Perlkies 8/11 gefüllten Ringraum-Box.	51

Tabellenverzeichnis

7.1	Laststufen für den Funktionstest.	31
8.1	Laststufen für die Laborversuche.	37
9.1	Auswertung der Bettungsmoduli für die Versuche mit Perlkies 8/11.	44
9.2	Statische Verformungsmoduli je Laststufe.	45
9.3	Steifemoduli je Laststufe.	46
9.4	Bettungsmoduli der Testserie <i>03-001</i> mit Sand als Ringraummaterial.	47
9.5	Verformungsparameter der Testserie <i>03-001</i>	47
10.1	Ergebnisse der Großödometerversuche an Perlkies 8/11.	49
10.2	Ergebnisvergleich - Großödometer und Messvorrichtung.	50
10.3	Versuchsergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche.	52
10.4	Vergleich der Verformungsmoduli $E_{v,1}$ in [MPa].	53
10.5	Vergleich des Zusammendrückungsmoduls $M_{E,1}$ in [MPa].	53

Abkürzungen

DM	.....	Durchmesser
EEPROM	.....	Electrically Erasable Programmable Read-Only Memory
GK	.....	Größtkorn
LFG	.....	Leichtes Fallgewichtsgerät
TBM-DS	.....	Doppelschildmaschine
TBM-S	.....	Einfachschildmaschine
TVM	.....	Tunnelvortriebsmaschine
ÖVBB	.....	Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik

Symbole

D	.....	Durchmesser der Lastplatte [mm]
d_i	.....	Schichtdicke [mm]
E	.....	Elastizitätsmodul [MPa]
E'	.....	dräniertes Elastizitätsmodul [MPa]
E_D	.....	Dilatometermodul [MPa]
E_M	.....	Modul des Ménard-Pressiometers [MPa]
E_{oed}	.....	Steifemodul aus dem Ödometerversuch [MPa]
E_{PLT}	.....	Steifemodul des Belastungsversuchs für Flachgründungen [MPa]
E_s	.....	Steifemodul des Bodens [MPa]
$E_{v,1}$	.....	statischer Verformungsmodul bei Erstbelastung [MPa]
$E_{v,2}$	.....	statischer Verformungsmodul bei Zweitbelastung [MPa]
E_{vd}	.....	dynamischer Verformungsmodul [MPa]
F_{LP}	.....	aufgebrachte Druckkraft [kN]
F_{krit}	.....	kritische Knicklast [kN]
I	.....	Trägheitsmoment [m ⁴]
K	.....	Steifigkeitsverhältnis nach ÖNORM B 4417 (1979) [-]
k_r	.....	Bettungsmodul in radialer Richtung nach Behnen et al. (2012) [MN/m ³]
k_s	.....	Bettungsmodul (Lastplattenversuch) [MN/m ³]
l	.....	Länge des druckbelasteten Stabes [m]
l_k	.....	Knicklänge [m]
M_E	.....	Zusammendrückungsmodul [MPa]
R	.....	Radius der Systemlinie der Tunnelschale [m]
s_{max}	.....	Maximalsetzung beim dynamischen Lastplattenversuch [mm]
s_{sys}	.....	Systemverformung des Prototypen [mm]
u	.....	Radialverformung [m]
v	.....	Verschiebung der Lastplatte [mm]

ε	.....	Dehnung [-]
$\Delta\varepsilon$	.....	Dehnungsdifferenz [-]
$\Delta\sigma$	.....	Spannungsdifferenz [MPa]
Δv	.....	Verschiebungsdifferenz [mm]
ν	.....	Querdehnzahl [-]
σ	.....	Druckspannung [MPa]
σ_0	.....	Vorbelastungsspannung [MPa]
σ_r	.....	radiale Bettungsspannung [MPa]

1 Einleitung

Maschinelle Tunnelvortriebe sind in manchen Fällen wegen wirtschaftlicher und terminlicher Überlegungen eine Alternative zu klassischen Konstruktionsmethoden. Im Gegensatz zum konventionellen Tunnelbau erfolgt beim Einsatz von Einfach- oder Doppelschildmaschinen (*TBM-S/TBM-DS*) der Ausbau mittels vorgefertigter Stahlbetonsegmente (*Tübbingsegmente*). Mehrere Segmente bilden einen sofort tragfähigen Tübbingring. Dabei erfolgt die Montage im Schutz des Schildes.

Durch den Überschneidung des Bohrkopfes kommt es zu einem Hohlraum zwischen ausgebrochener Tunnelaibung und Schild (*Steuerspalt*). Die Größe des Steuerspalts ist dabei maßgebend für den Kurvenradius der Tunnelvortriebsmaschine (*TVM*). Ebenso müssen die auftretenden Gebirgsverformungen aufgenommen werden, um ein Verklemmen der TVM zu verhindern.

Beim Verlassen des Tübbingrings aus dem Schildschwanz kommt es herstellungsbedingt zu einer Vergrößerung des sogenannten Ringspalts. Um eine kraftschlüssige Verbindung zwischen Gebirge und Tunnelauskleidung zu schaffen, wird dieser mit einem geeigneten Bettungsmaterial verfüllt. Das eingebrachte Bettungsmaterial dient dabei auch der gleichmäßigen Verteilung der aus dem Gebirgsdruck resultierenden Spannungen. Bei Vortrieben im Hartgestein kommt ein feinkörniger, enggestufter Kies (*Perlkies*) zum Einsatz. Der Perlkies wird dabei mittels Druckluft, ausgehend von der Sohle bis zur Firste, in den Ringspalt eingeblasen. Im Sohlbereich erfolgt die Verfüllung häufig mit Mörtel bzw. einem Perlkies-Mörtel-Gemisch. Bei TVM-Vortrieben im Lockergestein erfolgt die Verfüllung des Ringraums mittels Mörtelsuspension.

Die normativen Mindestanforderungen an Perlkies als Ringspaltmaterial sind in ÖNORM EN 12620 (2014) geregelt. Zudem liefert die Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (2009) in der Richtlinie *Tübbingsysteme aus Beton* Informationen zu Bettungsgrundsätzen und Ansätzen in der Bemessung.

1.1 Stand der Technik

Mithilfe des gebetteten Stabzugs wird bei der Bemessung von Tunnelschalen die Interaktion der Tunnelschale mit der Hohlraumlaibung durch radiale Bettungsfedern simuliert. Die

Steifigkeit des Ringspaltmaterials wird dabei als maßgebendes Kriterium einer ausreichenden Bettungswirkung erachtet. Über den Bettungsmodul (k_r) und die radial wirkenden Verformungen (u_r) besteht folgender Zusammenhang zur radialen Bettungsspannung (σ_r) (Behnen et al., 2012).

$$\sigma_r = k_r * u_r \quad (1.1)$$

Nach Behnen et al. (2012) ist der Bettungsmodul abhängig von der Geometrie und Steifigkeit der Tunnelschale, der Art und Höhe der Belastung sowie der Steifigkeit des Bodens. Im deutschsprachigen Raum hat sich bei der Bemessung die vereinfachte lineare Beziehung nach Gleichung 1.2 durchgesetzt. Der Faktor f wird hierbei meist mit 1,0 angesetzt. Der Bettungsmodul wird somit lediglich durch die Steifigkeit des Bodens (E_s) und dem Radius der Systemlinie der Tunnelschale (R) charakterisiert. Diese vereinfachte Bettungsformel bildet jedoch weder das Steifigkeitsverhältnis, noch die Boden-Baugrund-Interaktion ab. Ebenso wird die lage- und tiefenabhängige Veränderung des Bettungsmoduls nicht berücksichtigt.

$$k_r = f \frac{E_s}{R} \quad (1.2)$$

Bei in Lastrichtung geschichtetem Baugrund (Abbildung 1.1) wird daher der Bettungsmodul im Allgemeinen nach Gleichung 1.3 abgeschätzt.

$$k_r = \frac{1}{\frac{d_1}{E_{s1}} + \frac{d_2}{E_{s2}}} \quad (1.3)$$

Praxisrelevant ist Gleichung 1.3 bei einer Ringraumverfüllung mittels Perlkies in kompakten Fels, da in diesem Fall der Steifemodul des Gebirges erheblich größer ist als jener der Perlkiesschicht. Einer vergleichsweise dünnen Perlkiesschicht (d_1) mit Steifemodul (E_{s1}) folgt eine mächtige Schicht (d_2). Diese weist den deutlich größeren Steifemodul (E_{s2}) des anstehenden Gebirges auf. Auf Basis der Grundgleichung (1.2) wird die maßgebende Dicke des Gebirges (d_2) durch Subtraktion der Ringspaltstärke (d_1) von der Systemlinie der Tunnelschale (R) berechnet.

$$d_2 = R - d_1 \quad (1.4)$$

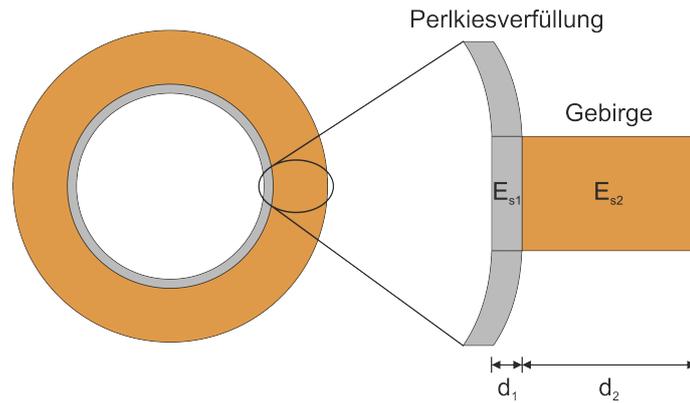


Abbildung 1.1: In Lastrichtung geschichteter Baugrund.

Näherungsweise ist dabei lediglich der mit Perlkies verfüllte Ringspalt (d_1) bettungsrelevant (Behnen et al., 2012). Dies lässt erkennen, dass genaue Kenntnisse über die Steifigkeitseigenschaften des Perlkieses (E_{s1}) unabdingbar sind.

$$k_r = \frac{E_{s1}}{d_1} \quad (1.5)$$

Zum aktuellen Zeitpunkt wird der Steifemodul der Perlkiesverfüllung lediglich mit Laborversuchen bestimmt. Der grundsätzlich am besten geeignete, in ÖNORM EN ISO 17892-5 (2015) geregelte, eindimensionale Kompressionsversuch (*Ödometerversuch*) kann auf Grund der zu geringen Probekörperabmessungen jedoch nicht angewendet werden. International entwickelte Großödometer, wie jener von Wieser (2011) etwa, können zur Bestimmung der spannungsabhängigen Steifigkeiten von Perlkies eingesetzt werden.

In der Praxis kommt es zudem zum Einsatz modifizierter Versuche zur Ermittlung der Steifigkeit bzw. des Bettungsmoduls. Auch Modellversuche, bei denen der Ringraum im Maßstab 1:1 modelliert wird, werden herangezogen (Behnen et al., 2012). Da weder ein einheitliches Prüfverfahren, noch einheitliche Probekörperabmessungen definiert sind, können die Ergebnisse der unterschiedlichen Versuche nur schwer miteinander verglichen werden.

Henzinger et al. (2016) haben gezeigt, dass es während der Vortriebsarbeiten zu einer ständigen Umlagerung von Perlkies im Ringspalt im Bereich des Schildschwanzes kommt. Eine homogene Bettungsverteilung in Umfangs- sowie Längsrichtung ist dadurch nicht gegeben. Eine homogene Spannungsverteilung im Ringraum ist folglich nicht zu erwarten. Mehrere Ringe hinter dem Schildschwanz wird die vollständige Bettung der Auskleidung wieder angenommen. Eine Überprüfung der tatsächlichen Bettungsqualität bzw. der Bettungssteifigkeit des Ringspaltmaterials erfolgt allerdings nicht.

Behnen et al. (2012) beschreiben, dass die Steifigkeit des Ringspaltmaterials im gesamten baupraktischen Spektrum keinen wesentlichen Einfluss auf die in der Auskleidung auftretenden Biegemomente hat. Bei Steifigkeiten des Ringspaltmaterials unter 20 MPa steigen allerdings die Radialverformungen an Firste und Ulme deutlich an. Thienert & Pulsfort (2011) hingegen haben bei Untersuchungen an mörtelgebundenen Ringspaltmaterialien gezeigt, dass die Steifigkeit des Ringspaltmaterials einen deutlichen Einfluss auf die Biegebeanspruchung in den Tübbingsegmenten hat.

Die Literaturrecherche hat zudem ergeben, dass eine einheitliche Meinung zum Einfluss der Bettungssteifigkeit auf die Schnittgrößen in der Auskleidung generell nicht existiert. Ebenso finden sich keine einheitlichen Werte zu Steifigkeiten diverser Perlkiesfraktionen. Auch auf projektspezifische Erfahrungen kann nur schwer zurückgegriffen werden.

1.2 Ziele der Arbeit

Wie aus Kapitel 1.1 hervorgeht, ist die tatsächliche Steifigkeit der Perlkiesverfüllung im Ringspalt unbekannt. Die Literaturrecherche ergab, dass bis dato kein Messverfahren zur in situ Bettungsüberprüfung vorhanden ist. Aus diesem Grund wird eine Messvorrichtung entwickelt, die es ermöglichen soll, die spannungsabhängige Steifigkeit bzw. den Bettungsmodul der Ringraumverfüllung in situ zu erfassen. Als Messstelle steht dabei lediglich die Verblasöffnung der Tübbingung zur Verfügung. Zudem muss sichergestellt sein, dass es auf Grund der Messprozedur möglichst zu keiner Unterbrechung der Vortriebsarbeiten kommt.

Auftretende Schadensbilder an Tübbingsegmenten lassen darauf schließen, dass der Ringraum nicht immer vollständig verfüllt ist. Mit der entwickelten Messvorrichtung soll zudem eine möglichst einfache Überprüfung der Bettungsqualität realisierbar sein. Die von der ÖVBB herausgegebene Richtlinie *Tübbingsysteme aus Beton* (Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik, 2009) empfiehlt die Durchführung von Sehnenmessungen im Bereich der First- bzw. Ulmtübbingung. Messungen im Bereich der Perlkiesverblasung sind bautechnisch oftmals jedoch nicht umsetzbar. Mit dem entwickelten Prototypen soll eine Prüfung in diesem Bereich auf Höhe der Ulme durchführbar sein.

Die entwickelte Messvorrichtung soll zudem eingesetzt werden, um die mögliche Nachverdichtungswirkung auf Grund der Maschinenerschütterungen der TVM zu erfassen.

2 Konzeptentwicklung

Als Basis zur Entwicklung eines Messkonzeptes werden bodenmechanische Feldversuche auf ihre Eignung zur Ermittlung der Verformungseigenschaften grobkörniger Böden untersucht. Ebenso wird die Anwendbarkeit der jeweiligen Messmethode in der Verblasöffnung eruiert. Generell wird ein möglichst normenkonformes Messverfahren angestrebt. Die Ergebnisse der Literaturrecherche sind in Abbildung 2.1 zu finden. Folgende Versuche scheinen dabei eine hohe Relevanz bei der Entwicklung eines Messverfahrens zur in situ Bettungsüberprüfung aufzuweisen

- Belastungsversuch für Flachgründungen
- Statischer Lastplattenversuch
- Drucksondierung
- Pressiometerversuch

Ferner wird die Tauglichkeit einer modifizierten Anwendung eines *Federhammers aus Stahl des Typs N*, ursprünglich von Schmidt entworfen, ermittelt. Dieser kommt als Prüfgerät bei der Ermittlung der Rückprallzahl bei der Prüfung von Betonbauteilen zur Anwendung (ÖNORM EN 12504-2, 2013). Untersucht wird dabei, ob eine Erfassung der Rückprallzahl durch direkte bzw. indirekte Messung möglich ist und ein Indexwert zur Qualität der Bettung erfasst werden kann.

Versuche mit einem digitalen Schmidthammer *Digi-Schmidt N-12* haben jedoch gezeigt, dass weder die direkte noch die indirekte Messung zu einem Ergebnis führen. Bei der direkten Messung war auf Grund des Eindringens des Kolbens in den Perlkies keine Messwernerfassung möglich. Bei der indirekten Messung lag der erfasste Rückprallwert außerhalb des Messintervalls des verwendeten Prüfgeräts. Die Ermittlung eines Indexwertes durch Anpassung eines Rückprallhammers, etwa durch Änderung der Federmasse, wird in dieser Arbeit nicht weiter verfolgt.

AUSWERTEMATRIX - LITERATURRECHERCHE	KRITERIEN										Relevanz
	Ermittlung von Steifigkeitsparametern			Anwendbarkeit - Perikies			ermittelbare relevante Parameter			Relevanz	
	gute Eignung	mäßige Eignung	ungeeignet	gute Eignung	mäßige Eignung	ungeeignet	direkt - ohne Erfahrung	abgeleitet - ohne Einschränkung	abgeleitet - mit Einschränkung		
Versuch	zugehörige Norm bzw. Grundlage										
Belastungsversuch für Flachgründungen	DIN EN ISO 22476-13	x	-	-	x	-	-	k_s | E_{PLT}	-	E	****
Bohrlochrammsondierung	ÖNORM B 4094	-	x	-	-	x	-	-	-	E_s	**
Dilatometerversuch	ÖNORM EN ISO 22476-5	-	x	-	-	x	-	-	E_D	E_s	**
Drucksondierung	ÖNORM EN ISO 22476-1; 12	x	-	-	x	-	-	-	-	E_{oed} | E_s	****
Dynamischer Lastplattenversuch	RVS 08.03.04	x	-	-	-	x	-	E_{vd}	-	-	***
Flachdilatometerversuch	ÖNORM CEN ISO/TS 22476-11	-	x	-	-	-	x	-	-	E_{oed}	**
Flügelversuch	ÖNORM EN ISO 22476-9	-	-	x	-	-	x	-	-	-	*
Gewichtssondierung	ÖNORM EN ISO 22476-10	-	x	-	-	-	x	-	-	E'	**
Pressiometerversuch	ÖNORM EN ISO 22476-4	x	-	-	-	x	-	-	E_M	E_s	****
Rammsondierung	ÖNORM EN ISO 22476-2	-	x	-	-	x	-	-	-	E_{oed}	***
Standard Penetration Test	ÖNORM EN ISO 22476-3	-	x	-	-	-	x	-	-	E'	**
Statischer Lastplattenversuch	ÖNORM B 4417	x	-	-	-	-	-	k_s | E_v	-	-	****
Versuch mit Seitendrucksonde	ÖNORM EN ISO 22476-7	-	x	-	-	-	x	-	-	E_s	**

Legende:
 * nicht relevant
 ** wenig relevant
 *** relevant
 **** sehr relevant
 ***** äußerst relevant

Abbildung 2.1: Auswertematrix der Literaturrecherche, in Anlehnung an DIN (2011).

2.1 Festlegung des grundlegenden Messverfahrens

Der Unterschied zwischen Belastungsversuch für Flächen Gründungen und statischem Lastplattenversuch liegt vor allem im Versuchsmaßstab. Beide Versuche sind durch einen simplen Versuchsaufbau charakterisiert. Für diese Arbeit spielt der Belastungsversuch für Flächen Gründungen auf Grund der Größe nur eine untergeordnete Rolle.

Beim statischen Lastplattenversuch erfolgt die Lastaufbringung durch eine hydraulische Presse. In jeder Laststufe werden die aufgebrachte Kraft bzw. die Normalspannung unter der Lastplatte und die zugehörige Setzung erfasst. Aus den Erstbelastungsästen der Drucksetzungslinie kann der Bettungsmodul (k_s) direkt bestimmt werden. Die durch den Versuch erfassbare Tiefe des Untergrunds ist dabei mit dem ein- bis zweifachen Durchmesser der Lastplatte begrenzt (ÖNORM B 4417, 1979). Dies entspricht einer erfassbaren Tiefe von 140 mm bei einem Lastplattendurchmesser von 70 mm. Für übliche Ringspaltstärken mit ca. 200 mm ist daher ein Einfluss des Gebirges auf die Ergebnisse zu vernachlässigen.

Gegenüber der Drucksondierung besteht der Vorteil einer unkomplizierteren Erfassung der Messgrößen und eines weniger komplexen Versuchsaufbaus. Bei der Drucksondierung ist zudem eine konstante Eindringgeschwindigkeit der Prüfsonde zu gewährleisten (ÖNORM EN ISO 22476-12, 2009). Beim statischen Lastplattenversuch sind lediglich die Schrittweiten der Laststufen konstant zu halten.

Ein Messverfahren auf Basis des Pressiometerversuchs wird als kritisch erachtet, da das Einbringen der Messsonde zu einer Störung der Lagerungsdichte im Ringraum führen kann. Im Falle einer Verlegung der Verblasöffnung durch Perlkies kann überdies eine Beschädigung oder ein Verlust der Messsonde nicht ausgeschlossen werden. Angesichts der geringen Dehnungen der Membran, in Kombination mit einem großen Porenraum der Perlkiesverfüllung, kann das Ergebnis der Messung stark verfälscht sein.

Auf Grundlage der erweiterten Literaturrecherche wird der statische Lastplattenversuch als Basisversuch für die Entwicklung eines Prototypen zur in situ Bettungsprüfung herangezogen. Mit den gewonnenen Messwerten werden der Bettungsmodul (k_s) und der statische Verformungsmodul (E_v) ermittelt. Aus dem Verformungsmodul erfolgt anschließend eine Rückrechnung des Steifemoduls (E_s) der Perlkiesverfüllung.

3 Messvorrichtung

Bei der Entwicklung des Prototypen ist es erforderlich, alle Komponenten im Detail aufeinander abzustimmen um eine Fehlfunktion zu verhindern. Oberste Prämisse ist zudem die einfache Handhabung der Versuchsapparatur. Eingriffe in das Tübbingdesign oder Anpassungen vor Ort durch die Versuchsdurchführung sind ebenfalls zu vermeiden.

3.1 Randbedingungen

Für die Detailplanung aller Komponenten sind Form und Größe der Verblasöffnung die maßgebenden geometrischen Randbedingungen. Im Allgemeinen sind dies jedoch projektspezifische Parameter. Für die Entwicklung des vorgestellten Prototypen wird daher die Verblasöffnungsgeometrie eines laufenden Großprojektes herangezogen (siehe Abbildung 3.1).

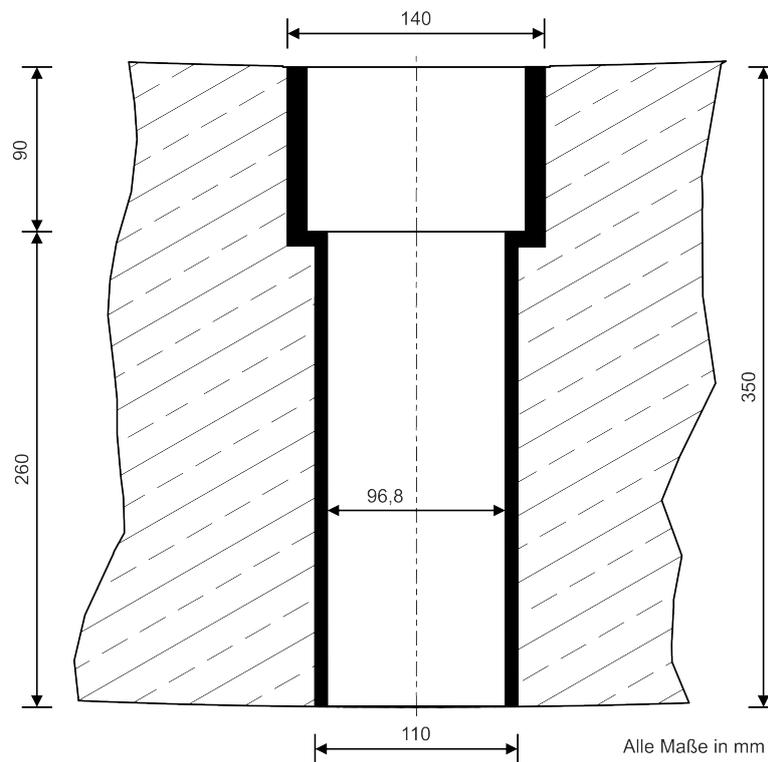


Abbildung 3.1: Schematische Darstellung der Verblasöffnung.

Folgende Abmessungen sind bei der Entwicklung des Prototypen maßgebend

- Kleinster Innendurchmesser: 96,8 mm
- Größter Außendurchmesser: 140 mm
- Tübbingstärke: 350 mm

3.2 Entwurf

Der Prototyp ist modular aufgebaut. Jede Komponente ist so konzipiert, dass eine leichte Montage und Demontage erfolgen kann. Im Falle von Schäden können Bauteile schnell ersetzt werden. In gewissem Maße ist auch die Anpassung einzelner Komponenten für abweichende Verblasöffnungsgeometrien möglich. Soweit die konstruktiven Umstände es erlauben, werden sämtliche Komponenten durch Schraubverbindungen miteinander verbunden.

Die Detailplanung selbst orientiert sich an den Vorgaben der ÖNORM B 4417 (1979) für den *statischen Lastplattenversuch*. Abbildung 3.2 zeigt die Messvorrichtung sowie die schematische Darstellung mit Beschriftung aller Hauptkomponenten. Die zur Befestigung in der Verblasöffnung benötigten Montagewinkel sind nicht abgebildet.

Das System zur Lastaufbringung (siehe Kapitel 5), sowie das eingesetzte Messsystem (siehe Kapitel 6) können ohne externe Stromversorgung betrieben werden. Damit ist ein universeller Einsatz der Messvorrichtung in allen Bereichen des Tunnels möglich.

Mit der Messvorrichtung kann die auf den Perlkies aufgebrachte Kraft (F_{LP}), sowie die dabei entstehende Verschiebung der Lastplatte (v) messtechnisch erfasst werden. Die Kraftaufbringung erfolgt mithilfe eines kompakten einfachwirkenden Hydraulikzylinders mit einer Nennkraft von 45 kN. Dieser wird mit einer Niederdruckhandpumpe gesteuert. Die Gesamt konstruktion wird für eine maximale Prüfspannung von 1,50 MPa ausgelegt. Dies entspricht einer Zylinderdruckkraft von ca. 5,50 kN.

Die Rückverankerung der Messvorrichtung erfolgt bergseitig des Tübbingsegments mithilfe von vier Montagewinkeln. Diese werden einzeln in die Verblasöffnung eingebracht und mittels kugelgelagerten Gelenktellern luftseitig in Position gehalten. Die Ausrichtung der Montagewinkel erfolgt unter Zuhilfenahme der Einrichtplatte. Zur Kraftübertragung wird die Messvorrichtung kraftschlüssig mit den Montagewinkeln verbunden.

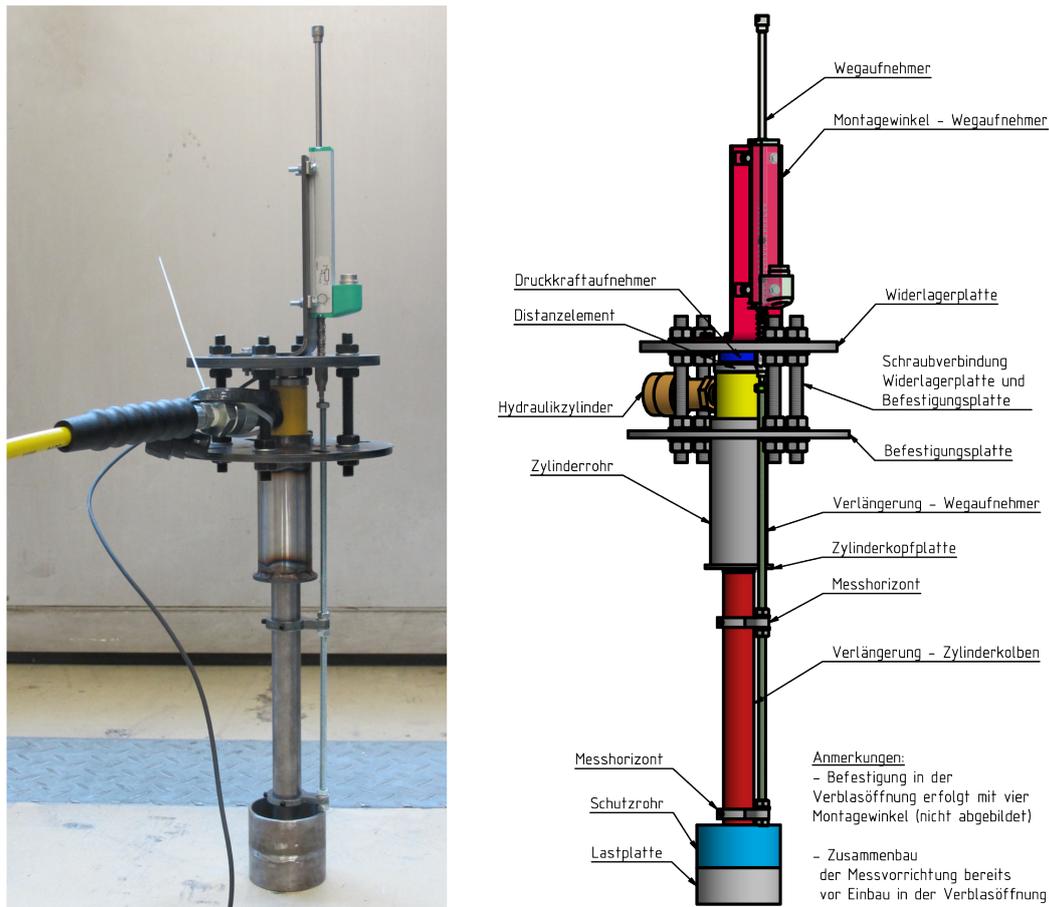


Abbildung 3.2: Prototyp der Messvorrichtung ohne Montagewinkel.

Die Messvorrichtung, inklusive Hydraulik- und Messsystem, kann bereits vor dem Einbringen in die Verblasöffnung montiert werden.

Bei der Belastung des Perlkieses im Ringraum stützt sich der Hydraulikzylinder an der Widerlagerplatte ab. Diese wird dadurch auf Biegung beansprucht. Über vier zugbeanspruchte Gewindestäbe wird die entstehende Reaktionskraft in die Befestigungsplatte geleitet. Hier kommt es ebenfalls zu einer Biegebeanspruchung der Stahlplatte. Bei maximaler Prüflast und gleichmäßiger Lastaufteilung muss jeder Montagewinkel ca. 1,40 kN auf der Bergseite des Tübbings aufbringen. Über den bergseitigen Flansch wird die im Steg auftretende Zugkraft als Druckbelastung in den Tübbing eingeleitet. Bei konservativer Annahme der Lastfläche von 10 x 10 mm (anstelle von 40 x 40 mm) muss der Tübbing eine Druckbeanspruchung von maximal 14 MPa aufnehmen. Bei vollflächiger Auflage des bergseitigen Flansches reduziert sich die Druckbeanspruchung auf unter 1 MPa. Bei Tübbing ab einer Festigkeitsklasse C25/30 ist der Auslastungsgrad signifikant unter der Belastungsgrenze.

4 Stahlbaukomponenten

Sämtliche Konstruktionszeichnungen sowie deren Ergänzungen (Bohrpositionen, Abwicklungen und Schweißpläne) sind im *Anhang B - Detailpläne* zu finden. Die in den folgenden Abbildungen angeführten Bemaßungen sind in mm.

4.1 Lastplatte

Die Lastplatte ist eine 30 mm starke zylindrische Platte mit einem Durchmesser (D) von 68 mm. Bei einem Größtkorn (GK) von 16 mm entspricht der Durchmesser dem 4,25-fachen Größtkorn. Gemäß ÖNORM B 4417 (1979) kann die Lastplatte bei Erfüllung von Gleichung 4.1 als praktisch starr betrachtet werden.

$$K = \frac{E \cdot I}{E_s \cdot D^4} \geq 0,50 \quad (4.1)$$

Selbst bei einer unrealistisch hohen Annahme der Steifigkeit des Perlkieses (E_s) von 300 MPa ist dieses Kriterium des Steifigkeitsverhältnisses ($K = 3,44$) erfüllt.

Die Lastplatte selbst ist aus *Blankstahl S355J2G3* gefertigt. An der Oberseite ist ein metrisches Standardgewinde M16 mit einer Bohrtiefe von 20 mm in Plattenmitte angeordnet. Dieses dient dem Anschluss der Verlängerung des Zylinderkolbens. Aufsicht und Schnitt durch die Lastplatte sind in Abbildung 4.1 dargestellt.

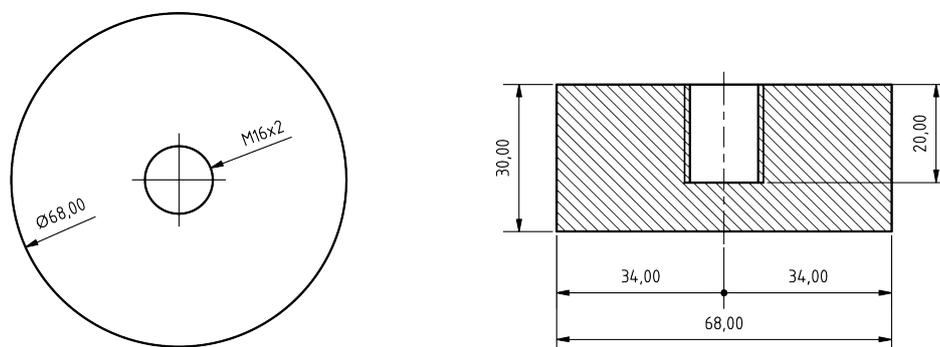


Abbildung 4.1: Aufsicht [*links*] und Schnittdarstellung [*rechts*] der Lastplatte.

4.2 Schutzrohr

Das Schutzrohr (Abbildung 4.2) ist ein 3 mm starkes Stahlrohr aus *Blankstahl S355J2G3*, mit einem Außendurchmesser von 68 mm. Dieses ist bündig mit der Oberseite der Lastplatte durch eine außenliegende Schweißnaht (*Kehlnaht*) verbunden. Während der Versuchsdurchführung verhindert das Schutzrohr ein vollständiges Einsinken der Lastplatte im Perlkies. Zudem wird sichergestellt, dass kein Perlkies zwischen die Belastungseinheit und die Montagewinkel der Messvorrichtung eindringen kann. Ein Verlust der Lastplatte im Ringraum wird dadurch ausgeschlossen.

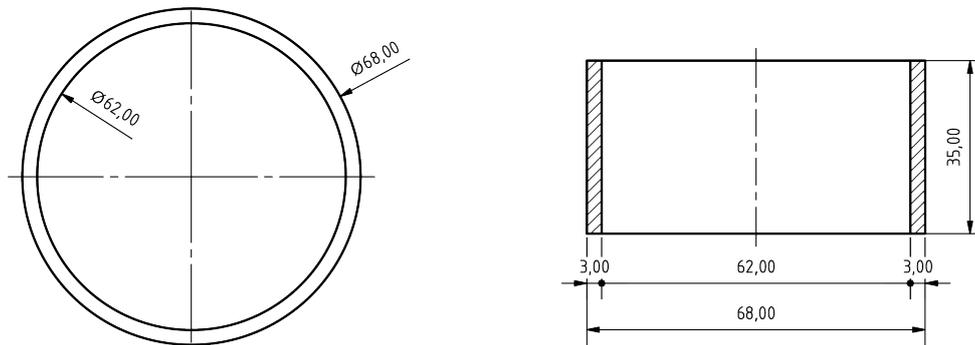


Abbildung 4.2: Darstellung des Schutzrohres als Aufsicht [*links*] und Schnitt [*rechts*].

Die Lastplatte mit dem angeschweißten Schutzrohr ist in Abbildung 4.3 abgebildet.



Abbildung 4.3: Lastplatte mit Schutzrohr.

4.3 Verlängerung - Zylinderkolben

Der Hochflussskupplungsstecker des Hydraulikzylinders muss auf Grund seiner Bauform aus der Verblasöffnung herausragen. Ein direkter Anschluss der Lastplatte an den Hydraulikzylinder ist daher nicht möglich. Um eine Verbindung zwischen Zylinderkolben und Lastplatte zu schaffen wird ein Verlängerungselement benötigt. Dies wird durch einen 272 mm langen Stahlstab aus *Blankstahl S355J2G3* mit 25 mm Durchmesser realisiert. Dieser kann über ein 12 mm langes 3/4"-16 UN-Feingewinde mit dem Zylinderkolben starr verbunden werden. Zur Verbindung mit der Lastplatte ist ein 18 mm langes metrisches M16 Standardgewinde angeordnet.

Die beiden Vertiefungen in der Verlängerung des Zylinderkolbens dienen der Justierung zweier Stahlplatten. Diese als Messhorizont bezeichneten Platten (siehe Kapitel 4.8) werden zur Befestigung eines metrischen Gewindestabs M6 mit 365 mm Länge verwendet. Hiermit kann eine Verbindung zur Tastspitze des Wegaufnehmers erfolgen. Aus Platzgründen kann dieser nicht innerhalb der Verblasöffnung angeordnet werden. Mit dem eingesetzten Wegaufnehmer (siehe Kapitel 6.2) wird die Kolbenbewegung erfasst. In weiterer Folge wird daraus die Lastplattenverschiebung ermittelt.

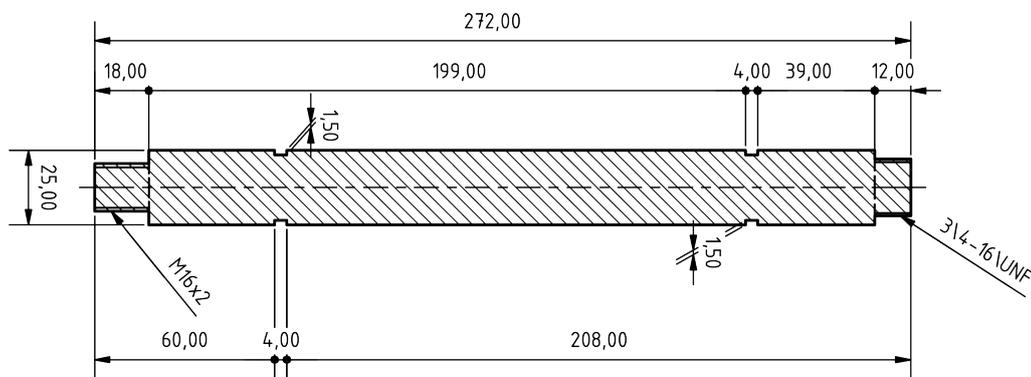


Abbildung 4.4: Schnittdarstellung der Verlängerung des Zylinderkolbens.

Da die Verlängerung des Zylinderkolbens auf Druck belastet ist, wird die kritische Knicklast (F_{krit}) nach Gleichung 4.2 ermittelt. Für die Berechnung wird zusätzlich der maximale Hub des Zylinders miteinbezogen.

$$F_{krit} = \pi^2 \frac{E \cdot I}{l_k^2} = \pi^2 \frac{E \cdot I}{(2 \cdot l)^2} \quad (4.2)$$

Bei Annahme des ersten Euler-Falls mit einem reduzierten Durchmesser von 22 mm, auf Grund der Vertiefung, und einer Bauteillänge (l) von 336 mm ergibt sich eine kritische Knicklast von rund 52,70 kN. Für den vorgesehenen Einsatzbereich ist ein Knicken daher auszuschließen.

4.4 Halterung - Hydraulikzylinder

Die Halterung des Hydraulikzylinders (Abbildung 4.5 und 4.6) besteht aus den drei, miteinander verschweißten, Bauteilen

- Zylinderrohr
- Zylinderkopfplatte
- Befestigungsplatte



Abbildung 4.5: Halterung des Hydraulikzylinders.

Das 120 mm lange, 3 mm starke Zylinderrohr (Abbildung 4.7) mit einem Innendurchmesser von 40 mm dient der Führung des Hydraulikzylinders. Gefertigt ist es aus *Edelstahl* mit der Materialbezeichnung *X2CrNi12*. Der Hydraulikzylinder mit 38 mm Außendurchmesser ist darin in Achsrichtung frei beweglich. Zur Reduktion der Reibung ist dieser mit einer selbstklebenden Gleitfolie *iglidur[®] B160* umwickelt.

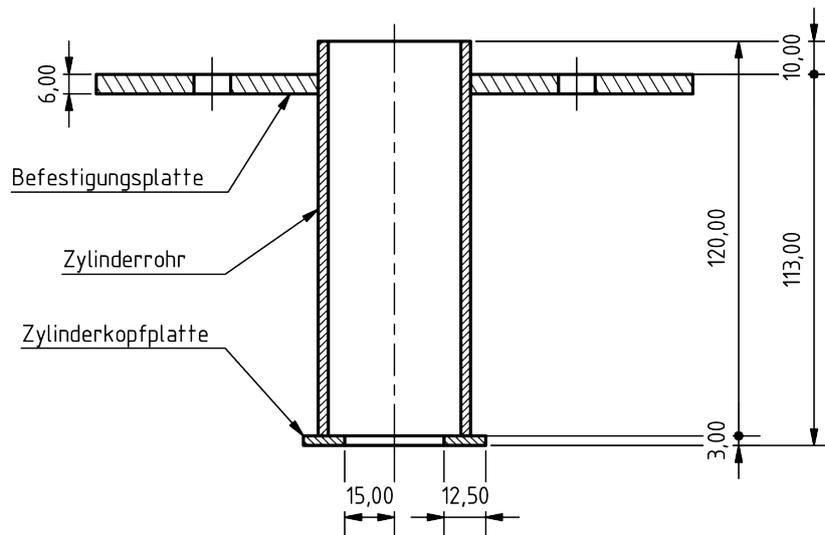


Abbildung 4.6: Schnittdarstellung der Halterung des Hydraulikzylinders.

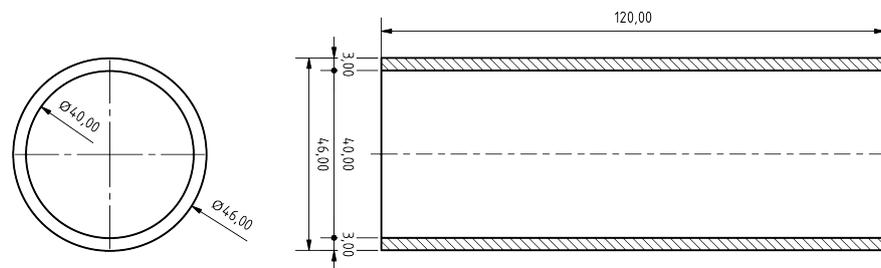


Abbildung 4.7: Zylinderrohr mit Darstellung als Aufsicht [links] und Schnitt [rechts].

Im entlasteten Zustand liegt der Hydraulikzylinder kopfseitig (auf Seite der Kolbenstange) auf einem 3 mm dicken Stahlring mit einem Innendurchmesser von 30 mm auf. Der Außendurchmesser der aus *S355J2+N* gefertigten Zylinderkopfplatte (Abbildung 4.8) beträgt 55 mm. Bei Belastung der Lastplatte durch den Hydraulikzylinder wird die Zylinderkopfplatte nicht beansprucht. Durch eine außenliegende Schweißnaht (*Kehlnaht*) werden Zylinderrohr und Zylinderkopfplatte dauerhaft verbunden.

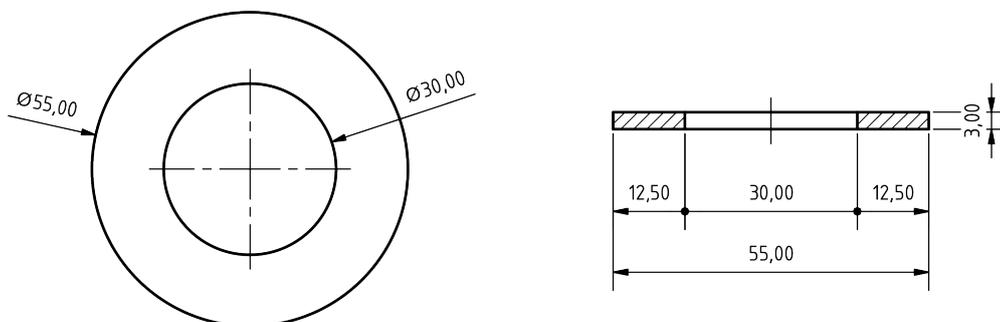


Abbildung 4.8: Aufsicht [links] und Schnittdarstellung [rechts] der Zylinderkopfplatte.

Die Befestigungsplatte (Abbildung 4.9) ist das zentrale Bauteil der Messvorrichtung. Die 6 mm dicke Stahlplatte aus *Baustahl S355J2+N*, mit einem Außendurchmesser von 180 mm, besitzt diverse Ausnehmungen, um folgende Funktionen übernehmen zu können

- Anschluss der Messvorrichtung an die Montagewinkel in der Verblasöffnung mithilfe der vier Langlöcher
- Anschluss der Widerlagerplatte über vier Gewindestäbe an die Messvorrichtung in den vier Durchgangsbohrungen (DM 11 mm)
- Fixierung des Zylinderrohrs über das Innenloch (DM 46 mm)

Die Verbindung von Zylinderrohr und Befestigungsplatte erfolgt durch eine Schweißverbindung mit zwei außenliegenden Kehlnähten. Der Überstand des Zylinderrohrs wird mit 10 mm festgelegt. Die restlichen Anschlüsse erfolgen durch Schraubverbindungen. Die Langlöcher, sowie die Durchgangsbohrungen DM 11 mm zum Anschluss der Widerlagerplatte, sind in einem Winkel von 90° platziert. Die einzelne Durchgangsbohrung DM 15 mm dient als Durchlass für die Erfassung der Kolbenbewegung.

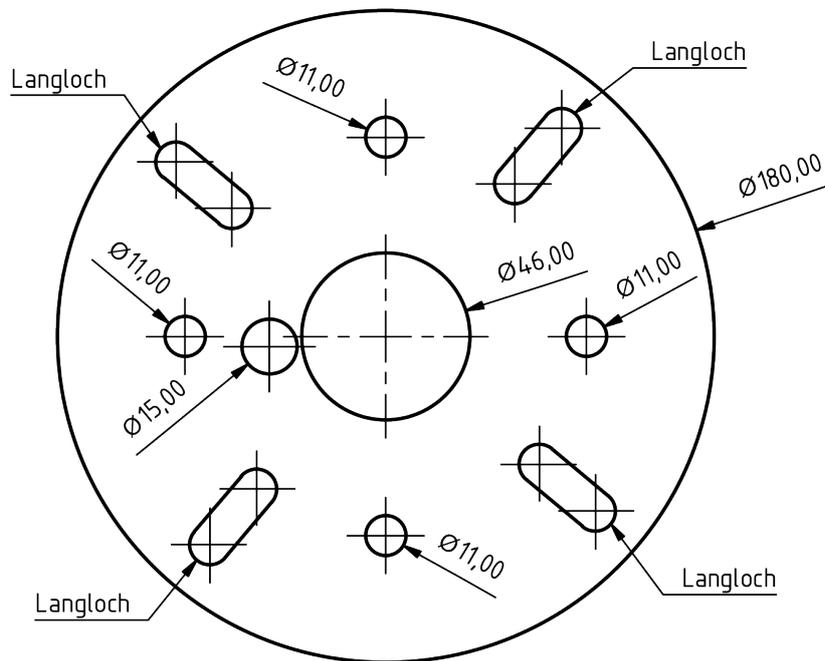


Abbildung 4.9: Befestigungsplatte als Aufsicht mit Angabe der Bohrungsweiten.

4.5 Widerlagerplatte

Die aus *Baustahl S355J2+N* hergestellte 8 mm starke Widerlagerplatte (Abbildung 4.10) hat einen Außendurchmesser von 160 mm. Ihre Hauptfunktion ist es, dem Hydraulikzylinder ein Widerlager zu schaffen. Unterhalb der Widerlagerplatte ist ein Druckkraftaufnehmer zur Erfassung der Zylinderdruckkraft angeordnet. Über drei um 120° versetzte Bohrungen DM 2,70 mm mit Senkung wird dieser an der Plattenunterseite befestigt. Die vier um 90° verdrehten Bohrungen DM 11 mm dienen der Verbindung mit der Befestigungsplatte mittels metrischen M10 Gewindestäben. Durch die versetzt angeordnete Durchgangsbohrung DM 15 mm erfolgt die Messung der Kolbenbewegung.

Über die beiden Langlöcher wird der Montagewinkel des Wegaufnehmers mit der Widerlagerplatte mittels zwei metrischen M4 Sechskantschrauben verbunden. Die Widerlagerplatte dient somit als Ausgangsebene für die Erfassung der Kolbenbewegung. Aus dieser wird nachfolgend die Verschiebung der Lastplatte ermittelt. In einem Kalibrierungsversuch (siehe Kapitel 7) wird untersucht, inwiefern die Messergebnisse auf Grund der Bauteil- bzw. Systemverformungen zu korrigieren sind.

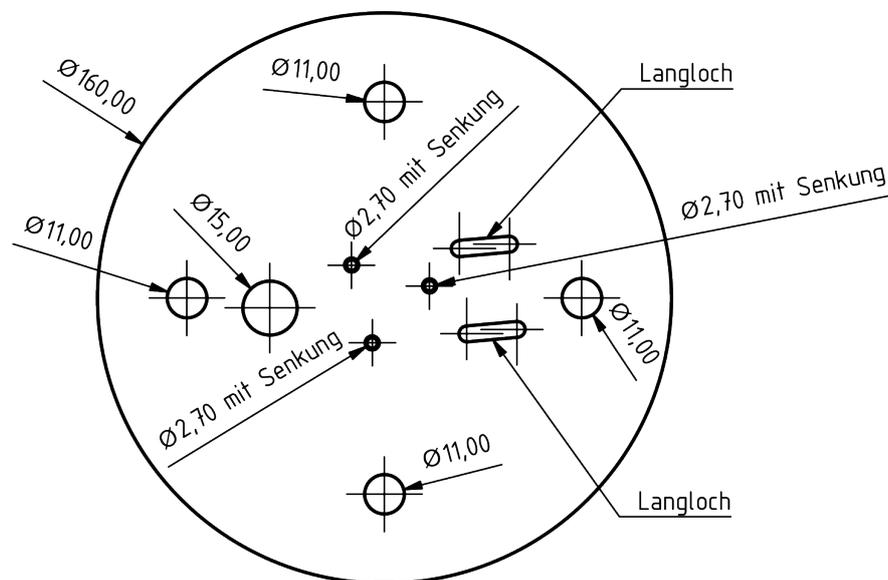


Abbildung 4.10: Aufsicht der Widerlagerplatte mit Bohrungsbeschriftung.

4.6 Montagewinkel - Wegaufnehmer

Der Montagewinkel für den Wegaufnehmer (Abbildung 4.11) wird aus einem 3 mm dicken Stahlblech aus *Baustahl S355J2+N* hergestellt. Der Montagewinkel wird durch Abkanten des rechteckigen Stahlblechs mit den Maßen 50 x 218 mm gefertigt. Der Biegewinkel von 90° ist mit einem Biegeradius von 10 mm ausgeführt. Der eingesetzte Wegaufnehmer (siehe Kapitel 6.2) wird auf dem Montagewinkel mit vier metrischen M4 Sechskantschrauben montiert. Für die Schraubverbindungen sind insgesamt sechs Durchgangsbohrungen DM 5 mm angeordnet.

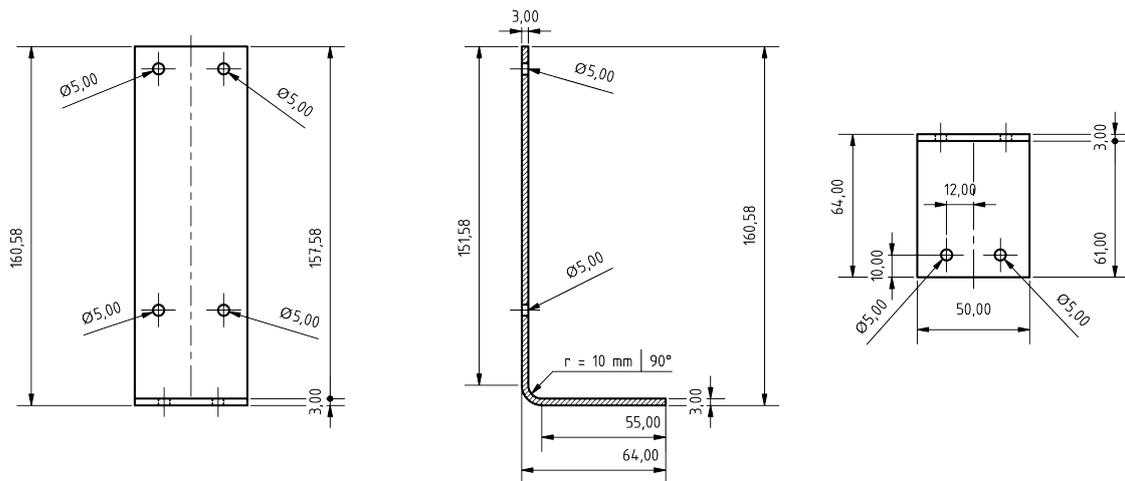


Abbildung 4.11: Montagewinkel - Wegaufnehmer: Ansicht [links], Schnittdarstellung [mitte] und Aufsicht [rechts].

4.7 Distanzelement

Zwischen Druckkraftaufnehmer und Zylinderboden ist eine 6 mm starke zylindrische Platte aus *Blankstahl S355J2G3* angeordnet. Diese ist erforderlich, um eine ebene Oberfläche für den sphärischen Messkopf des Druckkraftaufnehmers zu schaffen. Über zwei angefertigte mbox1/4''-20-UNC-Zylinderschrauben mit Innensechskant wird das Distanzelement (Abbildung 4.12) kraftschlüssig mit dem Zylinderboden verbunden. Hierfür verfügt das Distanzelement über zwei Durchgangsbohrungen DM 6,50 mm mit einer 4,00 mm tiefen Aufweitung auf 9,70 mm.

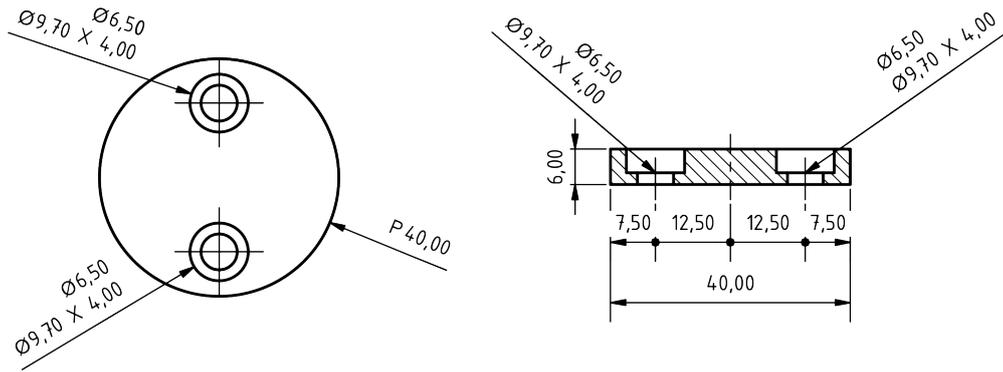


Abbildung 4.12: Distanzelement in Aufsicht [links] und Schnittdarstellung [rechts].

4.8 Messhorizont

Wie in Kapitel 4.3 erwähnt, werden zwei Messhorizonte zur Erfassung der Kolbenbewegung auf der Verlängerung des Zylinderkolbens befestigt. Diese Messhorizonte sind aus einem 8 mm starken Stahlblech aus *Baustahl S355J2+N* gefertigt. Mit dem 25 mm großen Innenloch werden sie über die Verlängerung des Zylinderkolbens geschoben. Die Justierung in der Vertiefung der Verlängerung des Zylinderkolbens erfolgt mit je drei metrischen $M5$ Gewindestiften mit Zampfen (*Wurmschrauben*). Die Bohrungen $DM 6,60$ mm werden dazu in Achsrichtung des Wegaufnehmers ausgerichtet. Die Verbindung zur Tastspitze des Wegaufnehmers wird mit einem metrischen $M6$ Gewindestab hergestellt. Die Tastspitze ist dabei nicht mit dem Gewindestab verschraubt.

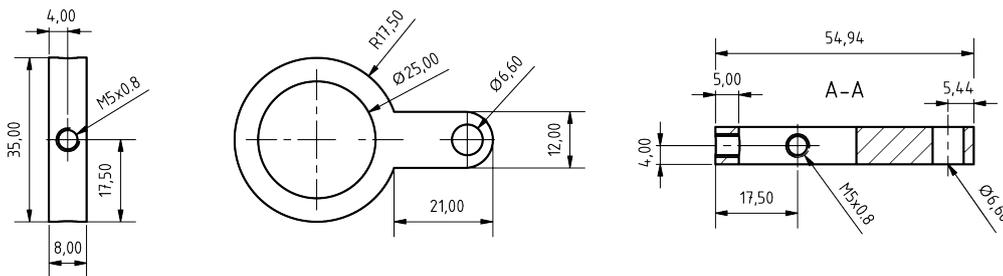


Abbildung 4.13: Ansicht [links], Aufsicht [mitte] und Schnittdarstellung [rechts] des Feststellers.

4.9 Montagewinkel - Messvorrichtung

Insgesamt werden vier Montagewinkel (Abbildung 4.14) zur Rückverankerung der Messvorrichtung bergseitig des Tübbings eingesetzt. Diese werden, ausgehend von der Verblasöffnungsachse, um 90° versetzt zueinander angeordnet.

Die Montagewinkel werden durch Abkanten eines Rechteckprofils mit 534 x 40 mm hergestellt. Die Materialstärke der aus *Baustahl S355J2+N* gefertigten Stahlwinkel beträgt 6 mm. Die beiden Biegewinkel von 90° bzw. 91° weisen einen Biegeradius von 10 mm auf. Auf dem luftseitigen Flansch (90 x 40 mm) sind zwei Durchgangsbohrungen angeordnet. Jene mit DM 11 mm dient dem Anschluss der Messvorrichtung. Die Gelenkteller mit Gewindestab werden in der Durchgangsbohrung DM 9 mm fixiert. Mit diesen werden die Montagewinkel vor dem Einbau der Messvorrichtung in Position gehalten (Abbildung 4.15).

Am bergseitigen Flansch wird jeweils eine 4 mm starke *PMMA* Kunststoffplatte mit den Maßen 40 x 40 mm tübbingseitig angebracht. Die gegenüberliegende Seite des Flansches ist angefast um den Einbau im, mit Perlkies verfüllten Ringraum, zu erleichtern. Zweck der *PMMA* Platten ist die Vergrößerung des verbleibenden Querschnitts in der Verblasöffnung. Für eine erfolgreiche Versuchsdurchführung muss der Abstand zwischen den gegenüberliegenden Montagewinkeln mindestens 72 mm betragen.

4.10 Zusätzliches Material

Für den Zusammenbau der gesamten Messvorrichtung ist unterschiedlichstes Kleinmaterial (Schrauben, Muttern und Scheiben) und Werkzeug erforderlich. In *Anhang A - Materialliste* ist eine übersichtliche Darstellung aller im Einsatz befindlicher Komponenten zu finden.

Zur Justierung der Montagewinkel in der Verblasöffnung wird eine zylindrische Stahlplatte aus *Baustahl S355J2+N* mit einem Durchmesser von 96 mm eingesetzt. In die 6 mm starke Einrichtplatte (Abbildung 4.16) sind vier Aussparungen zur Positionierung der Montagewinkel eingelassen. Über das Mittelloch DM 17,50 mm wird die Einrichtplatte an einem 450 mm langen metrischen M16 Gewindestab angeschraubt. Die Montagewinkel werden einzeln eingebracht und mit der Einrichtplatte grob vorpositioniert. Vor Einführung der Messeinrichtung in die Verblasöffnung werden die Montagewinkel justiert und die Durchgängigkeit der Verblasöffnung wird mit der Einrichtplatte geprüft.

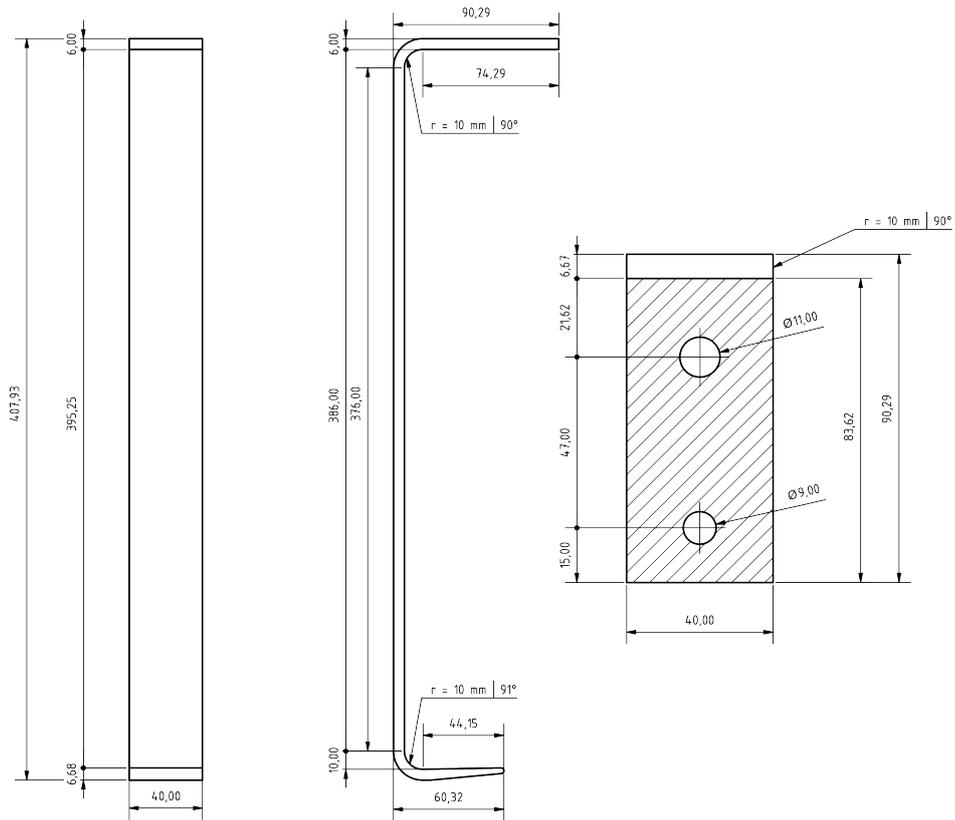


Abbildung 4.14: Ansicht [links], Schnitt [mitte] und Aufsicht [rechts] eines Montagewinkels der Messvorrichtung.

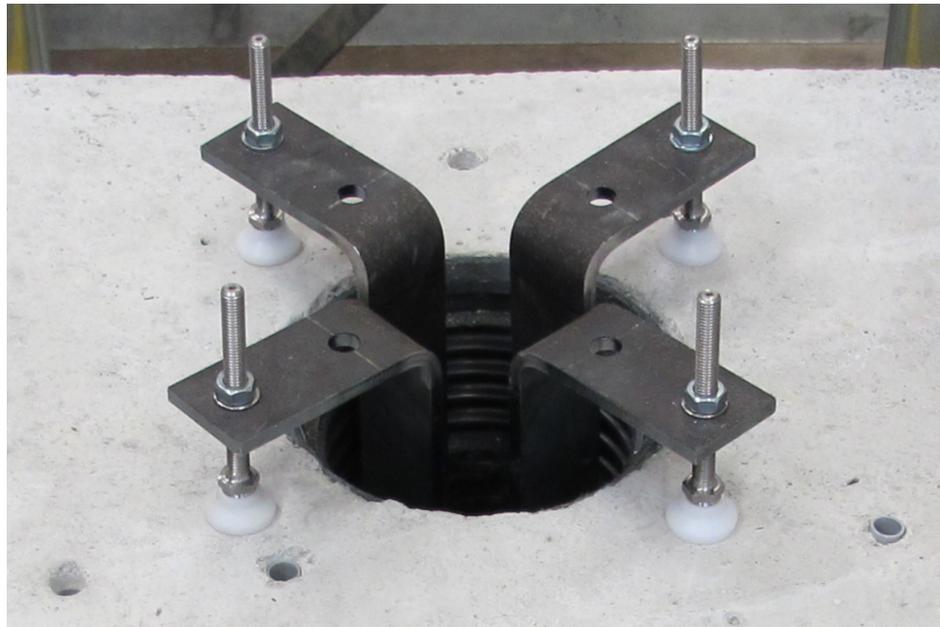


Abbildung 4.15: In der Verblasöffnung des Tübbingabschnitts fixierte Montagewinkel.

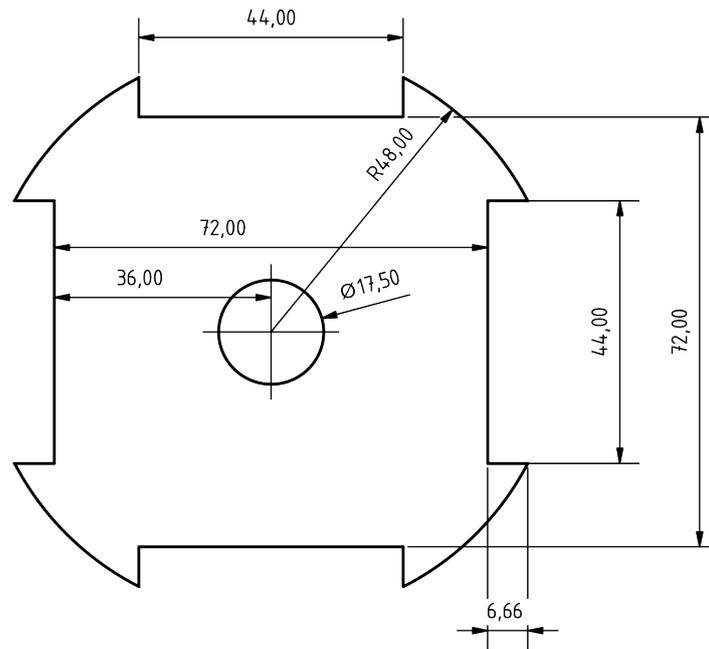


Abbildung 4.16: Darstellung der Einrichtplatte als Aufsicht.

5 Hydrauliksystem

In diesem Kapitel wird das Hydrauliksystem, welches bei der Messvorrichtung eingesetzt wird, beschrieben. Der grundlegende Aufbau ist in Abbildung 5.1 dargestellt. Das Gesamtsystem ist dabei ohne externe Stromversorgung verwendbar. In Abbildung 5.2 ist das gesamte System abgebildet.

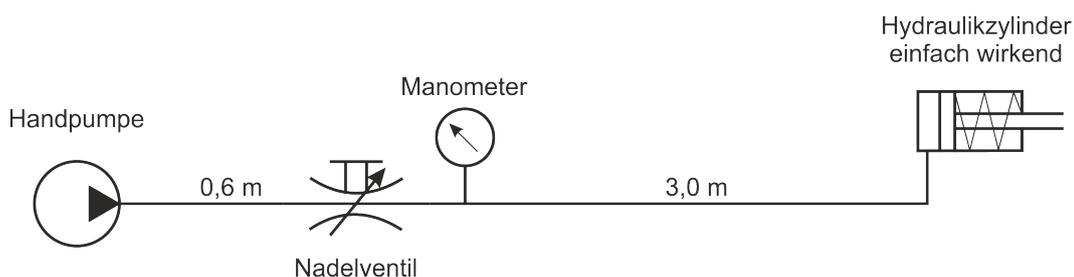


Abbildung 5.1: Schaltbild des Hydrauliksystems.

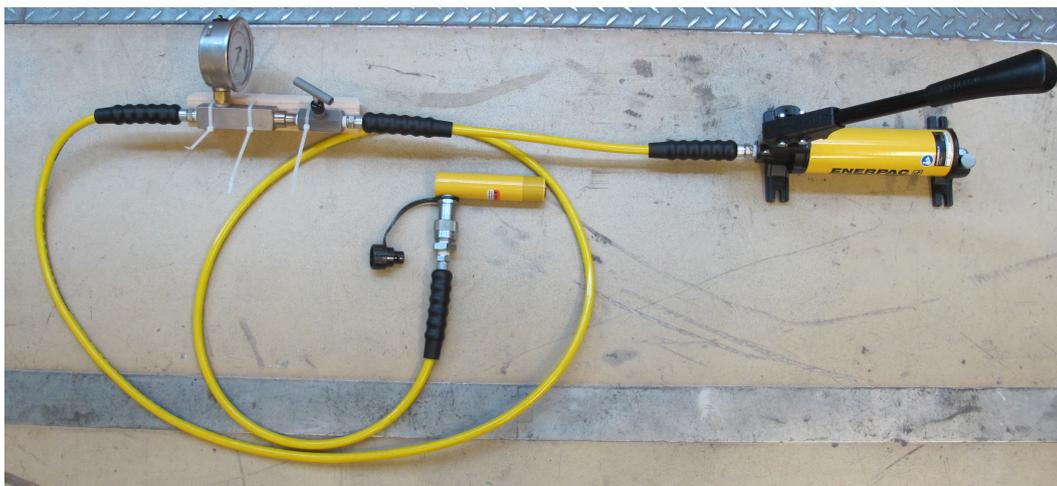


Abbildung 5.2: Hydrauliksystem der Messvorrichtung.

5.1 Hydraulikzylinder

Die Lastaufbringung auf die Lastplatte erfolgt mit einem einfach wirkenden Hydraulikzylinder der *Energpac RC-53*. Bei einem Betriebsdruck von 700 bar ist eine maximale Druckkraft von 45 kN möglich. Der Rückzug der Pleuelstange erfolgt über eine verstärkte Rückzugfeder. Für den Zweck der Perlkiesprüfung ist der Betriebsdruck auf 200 bar, durch die in Verwen-

dung stehende Handpumpe, (siehe Abschnitt 5.2) begrenzt. Daraus resultiert eine maximale Betriebsdruckkraft von ca. 13 kN. Der verwendete Zylinder mit einem Außendurchmesser von 38 mm ist aus hochfestem, legierten Stahl hergestellt. Ein Zylinderhub von 76 mm ist mit einem Ölvolumen von 50 cm³ möglich.

Der 165 mm lange Hydraulikzylinder (im eingefahrenen Zustand) wird über Zylinderrohr und Zylinderkopfplatte (siehe Kapitel 4.4) in der Messvorrichtung in Position gehalten. Zur Reduktion der Reibung in der Halterung ist eine selbstklebende Gleitfolie *iglidur*[®] B160 auf die Zylinderoberfläche aufgebracht. Die Verbindung mit der Verlängerung des Zylinderkolbens (siehe Kapitel 4.3) erfolgt über das Kolbenstangeninnengewinde. Am Zylinderboden wird das Distanzelement (siehe Kapitel 4.7) befestigt. Über die seitlich angebrachte Hochflussschließmuffe wird die Verbindung zum restlichen Hydrauliksystem hergestellt. Im drucklosen Zustand kann dabei der Hydraulikzylinder vom restlichen System getrennt werden.

5.2 Zusätzliche Komponenten

Zum Betrieb des Hydrauliksystems werden zudem folgende Komponenten benötigt

- Handpumpe
- Manometer mit Druck- und Kraftanzeige
- Nadelventil

Die Aufbringung des Öldrucks erfolgt mit der einstufigen Niederdruckhandpumpe *Enerpac P-18* mit einem Ölvolumen von 360 cm³. Der maximale Betriebsdruck beträgt 200 bar. Über ein eingebautes Druckbegrenzungsventil kann der maximale Betriebsdruck zudem verringert werden. Mit dem Pumpenhebel wird der Hydraulikdruck im System aufgebaut. Je Hub wird ein Ölvolumen von 2,46 cm³ gefördert. Der Druck wird solange konstant gehalten bis das seitliche Ablassventil geöffnet wird.

An die Handpumpe ist ein 0,60 m langer Hydraulikschlauch mit Gummizugentlastung angeschlossen. Auf diesen folgt ein Nadelventil *Enerpac V-82*. Dieses wird zur Feinregulierung des Zylinderdrucks beim Be- und Entlasten eingesetzt. Zum Konstanthalten des Hydraulikdrucks in jeder Laststufe kann das Nadelventil als Absperrventil eingesetzt werden.

Nach dem Nadelventil ist ein *Enerpac Druck- und Kraftmanometer* in das Hydrauliksystem eingebaut. Dieses Glycerin-Manometer dient in erster Linie der Kontrolle des Öldrucks im System. Zusätzlich zur Skaleneinteilung in *bar* ist der Öldruck als Kraft in *kN* abzulesen. Die Verbindung zwischen Hydraulikzylinder und dem Manometer-Aufnahmestück erfolgt mit einem 3 m langen Hydraulikschlauch mit Gummizugentlastung.

Alle Komponenten, mit Ausnahme der Niederdruckhandpumpe, sind für einen maximalen Betriebsdruck von 700 bar ausgelegt. Die Verbindung aller Bestandteile erfolgt über 3/8'' NPT-Gewinde. Zum Zwecke der Abdichtung sind alle Außengewinde mit Teflon-Band umwickelt.

6 Messtechnik

Zur Erfassung der Lastplattenverschiebung und der dabei aufgebrauchten Druckkraft werden zwei unabhängige Messsensoren eingesetzt. Über einen Datenlogger können die Messsignale erfasst werden. Das verwendete Messsystem (Abbildung 6.1) wird in diesem Kapitel beschrieben.



Abbildung 6.1: Komponenten des Messsystems.

6.1 Druckkraftaufnehmer

Mit dem Druckkraft-Miniatursensor *Lorenz Messtechnik K-13*, welcher über eine Nennkraft von 10 kN verfügt, wird die aufgebrauchte Zylinderdruckkraft erfasst. Die Messung erfolgt dabei mit einer Genauigkeit von 0,50 %. Zur Gewährleistung der Messgenauigkeit ist die Messkappe des Sensors sphärisch ausgeführt. Die geringen Abmessungen (32 mm Durchmesser; 20 mm Höhe) ermöglichen die Verwendung unter beengten Verhältnissen. An der Unterseite ist der Druckkraftaufnehmer mit der Widerlagerplatte verschraubt.

Der aus rostbeständigem Edelstahl gefertigte Druckkraftaufnehmer ist nach Schutzart IP67 klassifiziert. Im vorkonfektionierten Anschlussstecker für den Datenlogger sind im integrierten EEPROM alle spezifischen Aufnehmerdaten gespeichert.

6.2 Wegaufnehmer

Die Messung der Bewegung des Zylinderkolbens erfolgt mit dem Linearpotentiometer *Way-Con LRW2-C-100*. Der maximale Messweg von 100 mm wird mit einer Linearität des Messbereichs von $\pm 0,10\%$ erfasst. Das Gehäuse des nach IP40 klassifizierten Sensors ist aus Aluminium gefertigt. Die doppelt gelagerte Schubstange mit Kugelspitze ist aus rostfreiem Edelstahl. Der Wegaufnehmer selbst ist außerhalb der Verblasöffnung über einen Montagewinkel an die Widerlagerplatte angeschlossen (Abbildung 6.2). Messaufnehmer und Verlängerung des Zylinderkolbens sind über einen metrischen M6 Gewindestab (siehe Kapitel 4.8) verbunden. Der Anschlussstecker ist ebenfalls für den Datenlogger vorkonfektioniert. Auf ein integriertes EEPROM kann bei diesem Aufnehmertyp verzichtet werden.



Abbildung 6.2: Auf der Messvorrichtung montierter Wegaufnehmer.

6.3 Datenlogger

Die Erfassung und Sicherung der Messdaten wird mit dem Universalmessgerät *ALMEMO 25904-AS* (Abbildung 6.3) realisiert. Das Gerät ist mit vier Messeingängen und zwei Ausgängen mit ALMEMO-Buchsen ausgestattet. Über den geräteinternen EEPROM-Speicher können 100.000 Messwerte gespeichert werden. Für die Bettungsüberprüfung ist dieser als Linear-speicher konfiguriert. Somit werden bei Erreichen der Speicherkapazität von 500 kB keine Messwerte überschrieben. Der Betrieb des Datenloggers ist ohne externe Stromversorgung mithilfe von Batterien möglich. Zudem erfolgt die Anspeisung der Messsensoren über das Universalmessgerät.

Die Messsensoren können vor Versuchsbeginn beliebig an die Eingangsbuchsen angeschlossen werden. Über die vorkonfektionierten ALMEMO-Stecker werden die jeweiligen Sensoren automatisch erkannt. Ein Laden von Skaliertabellen entfällt daher. Vor Versuchsbeginn ist der Dateiname im Datenloggermenü einzugeben und die Messung zu starten. Ein Nullsetzen der Messsensoren ist zu jedem beliebigen Zeitpunkt möglich.

Die Abtastung der Messwerte erfolgt mit einer Messrate von 10 Hz. Mit der Datenloggerfunktion können bei zwei angeschlossenen Sensoren alle 0,30 Sekunden Messwerte in den internen Gerätespeicher übertragen werden. Eine maximale Messdauer von 3,50 Stunden ist möglich. In der Messstellenliste können beide Sensoren gleichzeitig überwacht werden. Zudem kann im Datenloggermodus jeder Messwert mit oberer und unterer Warngrenze einzeln dargestellt werden. Für die Auswertung werden die Messdaten über die USB-Schnittstelle auf einen PC übertragen.



Abbildung 6.3: Datenlogger.

7 Funktionstest

Der Prototyp wird in einem ersten Versuchsaufbau einem ausführlichen Funktionstest unterzogen. Dabei wird neben der Handhabung des Prototypen die korrekte Erfassung der aufgetragenen Druckkraft überprüft. Für den Funktionstest wird ein Tübbingabschnitt mit den Maßen 500 x 400 x 350 mm mit einer mittig angeordneten Perlkiesverblasöffnung hergestellt. Der unbewehrte Tübbingabschnitt aus Beton der Güte *C25/30* wird auf zwei metallischen Unterlegplatten zwischen zwei Spannfeldschienen aufgestellt. Um eine Hebung des Tübbingabschnitts zu verhindern wird dieser mit zwei Querbalken am Spannfeld fixiert.

Die Messvorrichtung wird mit den vier Montagewinkeln in der Verblasöffnung fixiert. Unter der Lastplatte wird zentrisch ein Druckkraftaufnehmer *HBM C9B* mit einer Nennkraft von 50 kN und einer Genauigkeit von 0,50 % positioniert. Dieser dient der Kontrolle der Messwerte des internen Druckkraftaufnehmers der Messvorrichtung.

Abbildung 7.1 zeigt den Gesamtaufbau inklusive der erforderlichen Messtechnikkomponenten. Der schematische Versuchsaufbau ist in Abbildung 7.2 dargestellt.

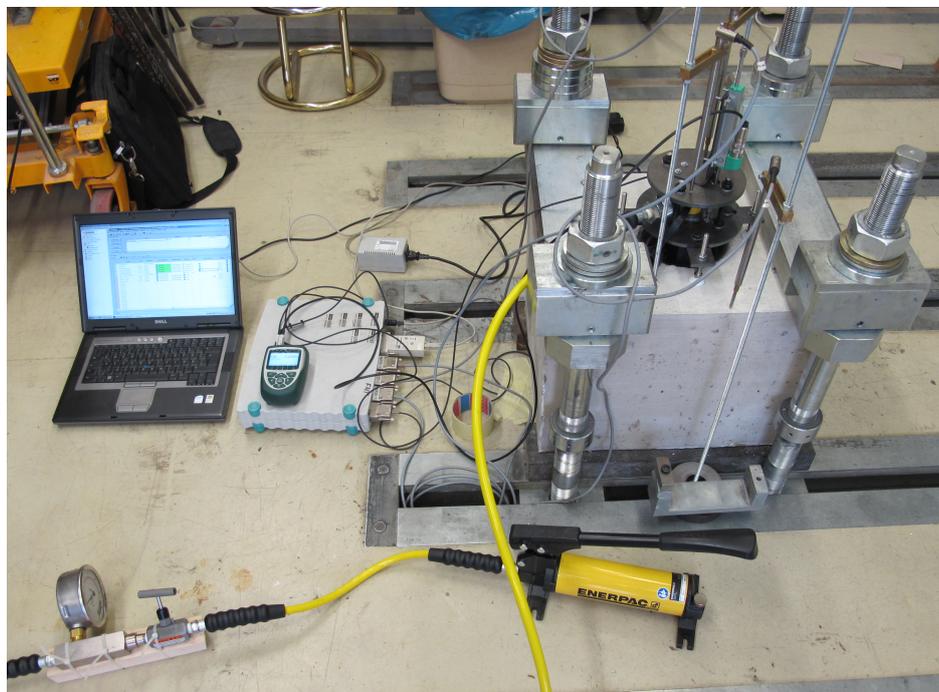


Abbildung 7.1: Versuchsaufbau des Funktionstest.

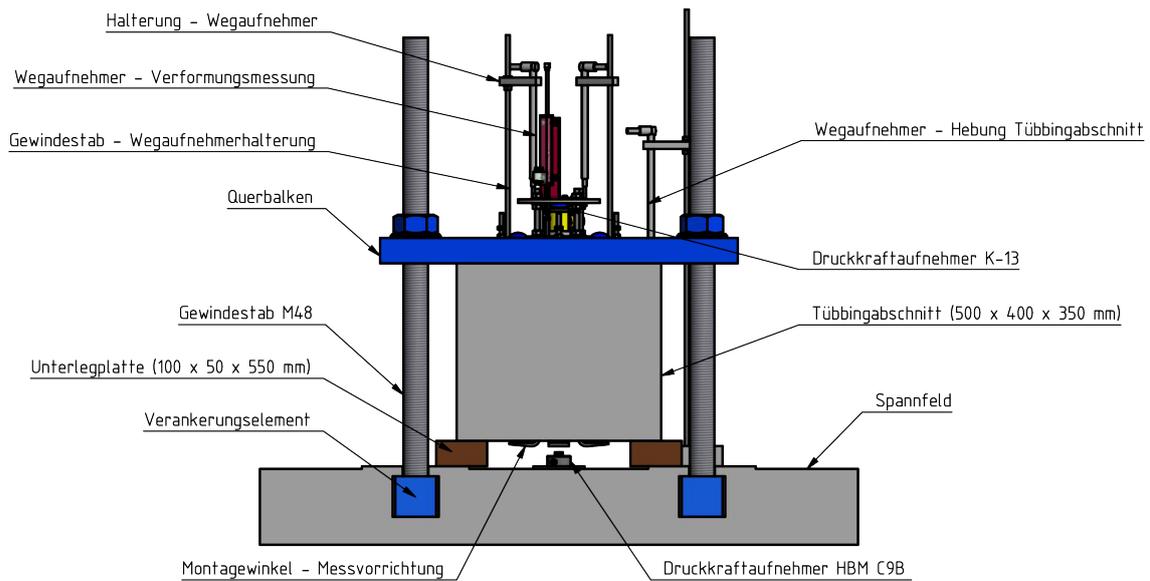


Abbildung 7.2: Schematischer Versuchsaufbau für den Funktionstest.

Mit zwei Wegaufnehmern *HBM WA T50* wird die Verschiebung der Messvorrichtung aus der Verblasöffnung heraus auf Höhe des Lochkreises der Widerlagerplatte erfasst. Als Referenzebene wirkt die „luftseitige“ Tübbingoberfläche. Die Systemverformung selbst kann über den Wegaufnehmer der Messvorrichtung abgeschätzt werden. Allerdings werden aufgrund des Versuchsaufbaus größere Werte gemessen, da es durch die Druckbelastung zu einer Verformung des Untergrunds unter dem Druckkraftaufnehmer *HBM C9B* kommt. Aus diesem Grund wird in weiteren Versuchen mit Perlkies die Verformung in der Mitte der Widerlagerplatte erfasst. Ein dritter Wegaufnehmer *HBM WA T50* wird zur Überwachung etwaiger Hebungen des Tübbingabschnitts eingesetzt.

7.1 Druckkraftvergleich

Insgesamt wurden drei Testserien (*01-001*, *01-002* und *01-003*) zur Überprüfung der Druckkraftmessung durchgeführt. In den ersten zwei Testserien wurden zudem die Verschiebungen aus der Verblasöffnung heraus erfasst. Die Laststufen sind in Tabelle 7.1 angeführt. Jede Laststufe wurde etwa fünf Minuten lang konstant gehalten. Abbildung 7.3 zeigt die Gegenüberstellung der gemessenen Druckkräfte für die beiden Druckkraftaufnehmer.

Tabelle 7.1: Laststufen für den Funktionstest.

Laststufe [Nr.]	Normalspannung [MPa]	Druckkraft [kN]
1	0,20	0,73
2	0,40	1,45
3	0,20	0,73
4	0,40	1,45
5	0,60	2,18
6	0,80	2,91
7	1,00	3,63
8	0,50	1,82
9	1,00	3,63
10	1,25	4,54
11	1,40	5,08
12	1,00	3,63
13	0,50	1,82
14	0,00	0,00

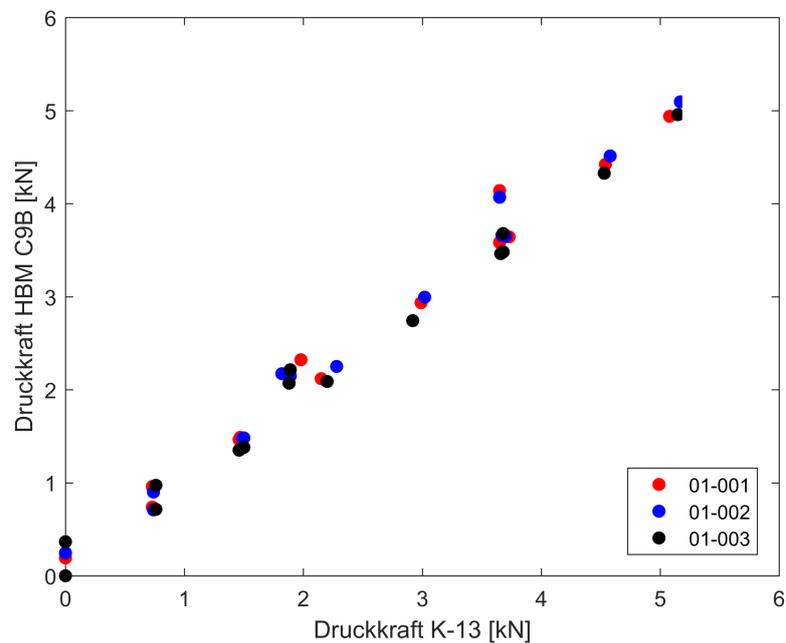


Abbildung 7.3: Vergleich der Druckkräfte.

Für die Erst- und Wiederbelastungen liegt die absolute Abweichung je Laststufe der beiden Druckkraftaufnehmer unter 5,00 %. Die in der Abbildung ersichtlichen Ausreißer traten nur

in den Entlastungen auf. Durch Hystereseeffekte wurden hier mit dem Druckkraftaufnehmer *HBM C9B* stets größere Druckkräfte, als mit dem Druckkraftaufnehmer der Messvorrichtung, gemessen. Die Reibung zwischen Hydraulikzylinder und Zylinderrohr kann für die weitere Auswertung vernachlässigt werden. In den durchgeführten Testserien konnte diese auch nicht eindeutig identifiziert werden. Auf Basis der durchgeführten Versuchsserien kann zudem die korrekte Erfassung der Druckkraft in der Messvorrichtung angenommen werden.

7.2 Abschätzung der Systemsteifigkeit

Für die Versuchsserien *01-001* und *02-002* wurden die Verschiebungsdaten des internen Wegaufnehmers zur Abschätzung der Systemverformung ausgewertet (Abbildung 7.4). Dabei wurde neben der Verformung der Messvorrichtung auch die Deformation des Bodens erfasst. Bei einer Spannung von 1,40 MPa wurde eine maximale Verschiebung von 0,79 mm gemessen. Die Verschiebung aus der Verblasöffnung heraus, welche am Lochkreis der Widerlagerplatte erfasst wurde, beträgt ca. 20 % der Messwerte des internen Wegaufnehmers. Folglich kann daraus geschlossen werden, dass die Verformung des Bodens den größten Anteil an der gemessenen Verschiebung verursacht. Während der Durchführung des Funktionstest konnte keine Hebung des Tübbingabschnitts beobachtet werden.

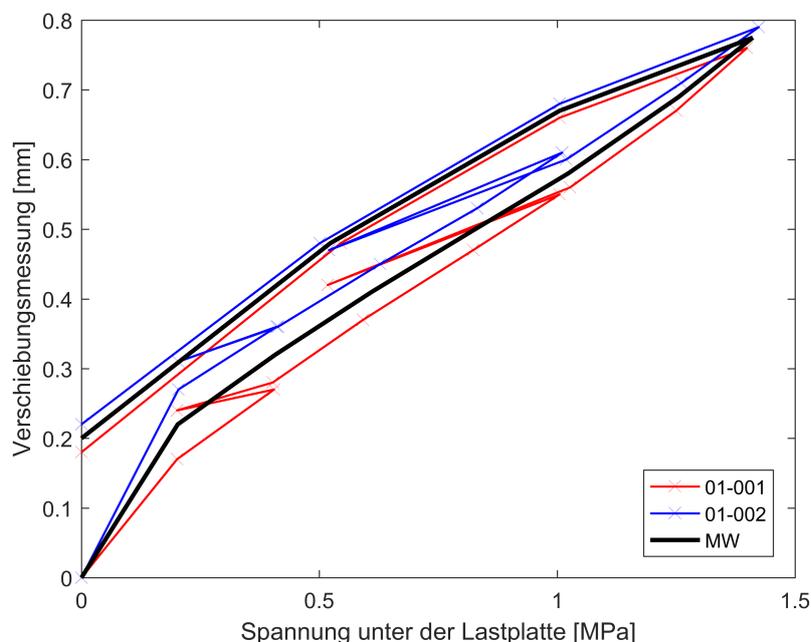


Abbildung 7.4: Verschiebungsdaten des internen Wegaufnehmers zur Abschätzung der Systemverformung.

8 Laborversuche

Zusätzlich zum Funktionstest werden Laborversuche in einem simulierten Ringraum mit dem Prototypen der Messvorrichtung durchgeführt. Dabei wird der Einsatz des Prototypen unter möglichst realen Bedingungen geprüft. Neben der Erfassung der Systemverformung soll mit den durchgeführten Versuchsserien geklärt werden, ob das Messverfahren für die Erfassung der Verformungseigenschaften des Ringspaltmaterials geeignet ist. Zudem ist zu prüfen, ob mit den Ergebnissen eine Rückrechnung der Spannungen im Ringraum möglich ist. Für die Versuche wird ein 200 mm dicker Ringraum in einer Holzbox (520 x 420 x 500 mm) simuliert. Als Ringraumverfüllung (Abbildung 8.1) kommt neben Perlkies der Fraktion 8/11 mm (*Testserie 02-00x*) auch Sand der Fraktion 0,40/0,50 mm (*Testserie 03-00x*) zum Einsatz.



Abbildung 8.1: Perlkies 8/11 [*links*] und Sand 0,40/0,50 [*rechts*] als Ringraummaterial.

Im Rahmen der Laborversuche wurden vier Testserien mit Perlkies (*02-001* bis *02-004*) und eine Testserie mit trockenem Sand (*03-001*) durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse ist in Kapitel 9 zu finden. Das Ringraummaterial wird jeweils lose und im trockenen Zustand eingebracht. Der Tübbingabschnitt wird anschließend auf dem zu prüfenden Untergrund positioniert. Wie beim Funktionstest wird eine Hebung des Tübbingabschnitts durch eine Fixierung mittels zweier Querbalken am Spannfeld verhindert. Durch das Eigengewicht des Tübbingabschnitts und der Fixierungskomponenten, sowie der Vorspannkraft der Muttern, wird eine Spannung von ca. 0,20-0,25 MPa im simulierten Ringraum erzeugt. Der schematische Aufbau der Versuche ist in Abbildung 8.2 dargestellt.

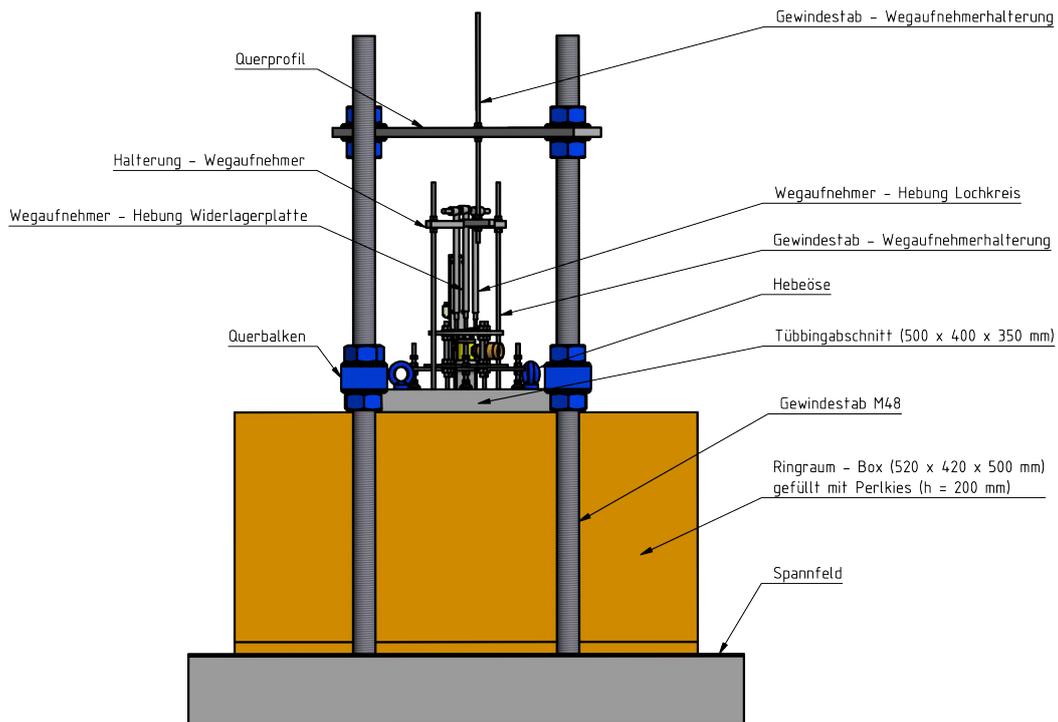


Abbildung 8.2: Schematischer Versuchsaufbau der Laborversuche.

Nach Fixierung des Tübbingabschnitts werden die Montagewinkel einzeln in die Verblasöffnung eingebracht. Die Positionierung erfolgt mithilfe der Einrichtplatte. Über die Gelenkteller werden die Montagewinkel am Tübbingabschnitt vorgespannt. Nach erfolgter Montage kann die Messvorrichtung in die Verblasöffnung eingebracht werden. Beim Einbringen der Montagewinkel wird die Prüffläche selbst nur gering belastet, da das Ringraummaterial nur in radialer Richtung durch die Montagewinkel verdrängt wird. Die Belastung durch die Lastplatte erfolgt daher unter nahezu ungestörten Bedingungen.

Analog zum Funktionstest wird die Verschiebung aus der Verblasöffnung heraus mit zwei Wegaufnehmern *HBM WA T50* auf Höhe des Lochkreises der Widerlagerplatte erfasst. Ein dritter Wegaufnehmer *HBM WA T50* dient der Messung der relevanten Systemverformung in der Mitte der Widerlagerplatte. Als Referenzebene dient ein über dem Tübbingabschnitt angebrachtes Querprofil. Der Versuchsaufbau der Laborversuche ist in Abbildung 8.3 ersichtlich.

Abweichend zum geplanten Einsatz in situ erfolgt aufgrund des Versuchsaufbaus eine Prüfung der Ringraumverfüllung in vertikaler Richtung. Der Einbau der Messvorrichtung in horizontaler Lage wird daher zusätzlich untersucht.

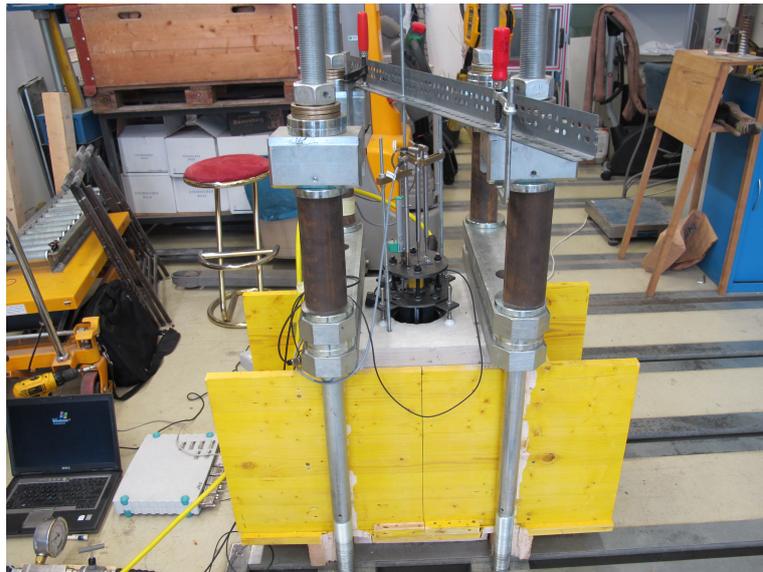


Abbildung 8.3: Versuchsaufbau der Laborversuche.

Durch ausreichende Verspannung der Montagewinkel in der Verblasöffnung kann der Prototyp auch in dieser Lage zentrisch in der Verblasöffnung positioniert werden. Ebenso ist ein Einbau mit nur zwei Montagewinkeln möglich, jedoch werden dabei größere Systemverformungen erwartet (Abbildung 8.4).

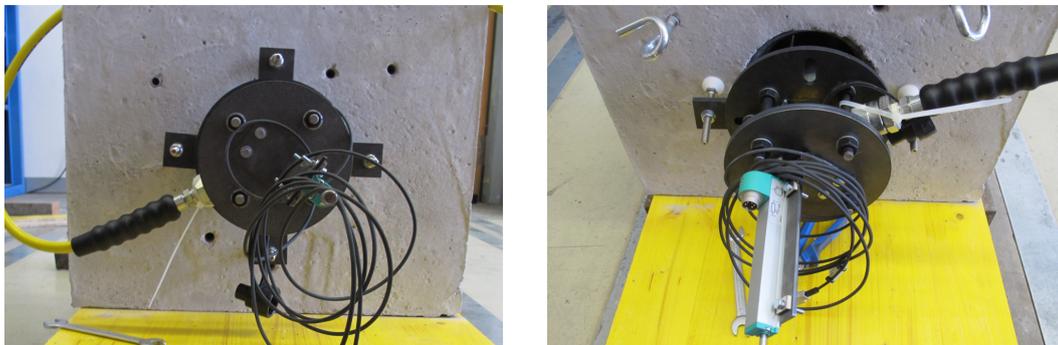


Abbildung 8.4: Einbau des Prototypen der Messvorrichtung in horizontaler Lage mit vier [links] bzw. zwei [rechts] Montagewinkeln.

8.1 Versuchsdurchführung

Die Durchführung des Versuchs richtet sich nach den Bestimmungen der ÖNORM B 4417 (1979). Vorhandene Hohlräume im Ringraummaterial im Bereich unter der Lastplatte können abweichend zur Norm nicht mit trockenem Mittelsand aufgefüllt werden. Der Kontaktschluss zwischen Lastplatte und Ringraummaterial erfolgt zudem erst bei Versuchsbeginn. Erkennbar

ist dieser durch einen Anstieg der gemessenen Druckkraft. Unmittelbar nach dem Kontaktschluss wird die Druckkraft bis zu einer Spannung von 0,02 MPa erhöht. Zwei Minuten nach Aufbringung der Vorbelastung ist der Wegaufnehmer zu tarieren.

15 Belastungsstufen zu je 0,10 MPa werden aufgebracht bis eine maximale Spannung unter der Lastplatte von 1,50 MPa erreicht wird. Zusätzlich zu den Erstbelastungen werden, nach je vier Belastungsstufen, drei Ent- und Wiederbelastungsstufen durchgeführt. Dabei wird um jeweils 0,20 MPa entlastet und anschließend wieder belastet. Nach Erreichen der maximalen Prüfspannung wird in Schritten von 0,20 MPa bis zur Vorbelastungsspannung entlastet.

Der Übergang zur nächsten Laststufe erfolgt unmittelbar nachdem die Verschiebungsrate geringer als 0,02 mm/min ist. Um die Belastung konstant zu halten, ist die aufgebrachte Druckkraft kontinuierlich zu überwachen. Druckkraftänderungen (Anstieg und Abfall) muss unverzüglich entgegengesteuert werden. Die Regelung des Hydraulikdrucks erfolgt dabei durch ein Zusammenwirken von Handpumpe und Nadelventil. Im Falle einer Überbelastung in einer Laststufe wird die aufgebrachte Kraft nicht vermindert. Nachfolgende Laststufen werden wie geplant durchgeführt. Das Belastungsschema für die Laborversuche ist in Tabelle 8.1 angeführt. Die Versuchsdauer für eine Testserie beträgt ca. 1,50 Stunden.

8.2 Systemsteifigkeit

Für die korrekte Auswertung der Messergebnisse ist die Systemsteifigkeit des Prototypen zu untersuchen. Für den Fall, dass die Verformung der Messvorrichtung 5,00 % der gemessenen Lastplattenverschiebung überschreitet, sind die gemessenen Verschiebungen der Lastplatte zu korrigieren. Die Systemsteifigkeit des Prototypen wird folglich über das Spannungs-Verschiebungs-Verhalten dargestellt.

Die Verformung der Messvorrichtung unter Belastung wurde in insgesamt sechs Versuchen messtechnisch ermittelt (Abbildung 8.5). In vier Versuchen (02-001 bis 02-004) wurde die Verformung in der Mitte der Widerlagerplatte direkt mit einem externen Wegaufnehmer erfasst. Für die Testserien 01-001 und 01-002 aus dem Funktionstest wurde die Systemverformung aus den Messwerten des internen Wegaufnehmers rückgerechnet. Dies erfolgte über die Auswertung der Verschiebungen, welche auf Höhe des Lochkreises der Widerlagerplatte erfasst wurden. Diese war bei allen durchgeführten Versuchen nahezu ident.

Tabelle 8.1: Laststufen für die Laborversuche.

Laststufe	Lastart	Normalspannung	Druckkraft
[Nr.]	[-]	[MPa]	[kN]
1	Vorbelastung	0,02	0,07
2	Erstbelastung	0,10	0,36
3	Erstbelastung	0,20	0,73
4	Erstbelastung	0,30	1,09
5	Erstbelastung	0,40	1,45
6	Entlastung	0,20	0,73
7	Wiederbelastung	0,40	1,45
8	Erstbelastung	0,50	1,82
9	Erstbelastung	0,60	2,18
10	Erstbelastung	0,70	2,54
11	Erstbelastung	0,80	2,91
12	Entlastung	0,60	2,18
13	Wiederbelastung	0,80	2,91
14	Erstbelastung	0,90	3,27
15	Erstbelastung	1,00	3,63
16	Erstbelastung	1,10	3,99
17	Erstbelastung	1,20	4,36
18	Entlastung	1,00	3,63
19	Wiederbelastung	1,20	4,36
20	Erstbelastung	1,30	4,72
21	Erstbelastung	1,40	5,08
22	Erstbelastung	1,50	5,45
23	Entlastung	1,30	4,72
24	Entlastung	1,10	3,99
25	Entlastung	0,90	3,27
26	Entlastung	0,70	2,54
27	Entlastung	0,50	1,82
28	Entlastung	0,30	1,09
29	Entlastung	0,10	0,36
30	Entlastung	0,02	0,07

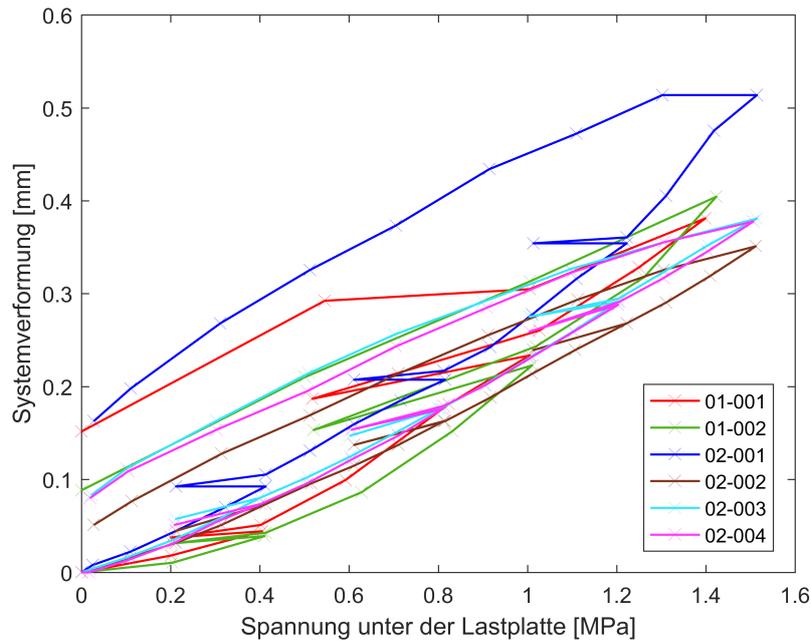


Abbildung 8.5: Gemessene Verschiebungen in der Mitte der Widerlagerplatte.

Zur Auswertung der Systemsteifigkeit wurden die Messwerte abschließend gemittelt. Bei der maximalen Prüfspannung von 1,50 MPa liegt die Systemverformung des Prototypen unter 0,40 mm. Die Auswertung der einzelnen Messdaten hat zudem gezeigt, dass die Verformung der Messvorrichtung zu jedem Zeitpunkt stets geringer als 5,00 % der gemessenen Verschiebung der Lastplatte ist.

Das Spannungs-Verformungs-Verhalten kann näherungsweise über die mathematischen Zusammenhänge der Gleichungen 8.1 bis 8.3 beschrieben werden.

$$\text{Belastung} \rightarrow s_{sys,j} = s_{sys,i} + 0,245 \cdot \Delta\sigma_{j-i} \quad (8.1)$$

$$\text{Entlastung} \rightarrow s_{sys,j} = s_{sys,i} - 0,170 \cdot \Delta\sigma_{j-i} \quad (8.2)$$

$$\text{Wiederbelastung} \rightarrow s_{sys,j} = s_{sys,i} + 0,170 \cdot \Delta\sigma_{j-i} \quad (8.3)$$

Die Systemverformung (s_{sys}) ist dabei abhängig von der Belastungsart zu ermitteln, da die Steigungen in den Ent- und Wiederbelastungen geringer als in den Erstbelastungen sind. Die aktuelle Systemverformung ist somit abhängig von der Vorbelastung sowie der Spannungsdifferenz zwischen zwei Laststufen ($\Delta\sigma_{j-i}$). Nach vollständiger Entlastung kommt es zu einer bleibenden Verformung von ca. 0,10 mm (siehe Abbildung 8.6). Allerdings ist anzunehmen, dass es zu keinen plastischen Verformungen der Messvorrichtung kommt. Hierfür ist die Spannung in den einzelnen Komponenten zu gering.

Die bleibende Verformung ergibt sich vielmehr durch geringe Verformungen der Betonoberfläche an der Lasteinleitungsfläche der Montagewinkel.

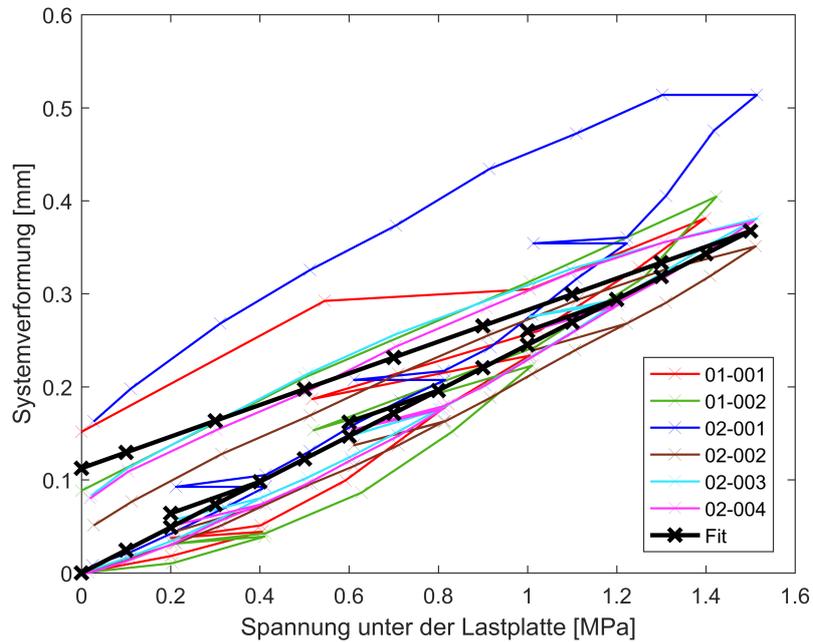


Abbildung 8.6: Idealisierte Systemverformung der Messvorrichtung, dargestellt über das Spannungs-Verformungs-Verhalten.

Für den geplanten Einsatz der Messvorrichtung kann die Systemverformung vernachlässigt werden. Die gemessenen Verschiebungen der Lastplatte für den untersuchten Spannungsbereich bis 1,50 MPa sind nicht zu korrigieren. Erweiterte Untersuchungen bei der Auswertung haben zudem gezeigt, dass bei Berücksichtigung der Verformung des Prototypen der Einfluss auf die gewonnenen Parameter äußerst gering ist.

9 Auswertung

Für die Auswertung werden die im Datenlogger gesicherten Messwerte auf einen PC übertragen und in ein Microsoft[®] Excel Dateiformat konvertiert. Die Anfangs- und Endwerte jeder Laststufe werden identifiziert und der Datensatz wird zur weiteren Verarbeitung reduziert. Die gemessenen Druckkräfte werden nach Gleichung 9.1 in Spannungen übergeführt. Die Fläche der Lastplatte mit einem Durchmesser von 68 mm beträgt 3632 mm².

$$\sigma = \frac{F_{LP}}{3632} \cdot 1000 \quad (9.1)$$

9.1 Darstellung der Ergebnisse

Die grafische Darstellung der Versuchsergebnisse erfolgt in einem Spannungs-Verschiebungs-Diagramm. Für alle Laststufen wird die Spannung unter der Lastplatte mit der zugehörigen Verschiebung der Lastplatte aufgetragen und miteinander verbunden. Da im Versuch die Seitendehnung nicht behindert ist, kann das Material bis zum Versagenszustand belastet werden. Anhand des Kurvenverlaufs im Spannungs-Verschiebungs-Diagramm ist dies durch eine Annäherung an eine vertikale Gerade zu erkennen. Bei Annäherung an den Bruchzustand können keine verlässlichen Verformungsparameter bestimmt werden.

In Abbildung 9.1 befindet sich die grafische Darstellung der Versuche an Perlkies 8/11. Die Ergebnisse zeigen dabei eine deutliche Streuung der Verschiebung der Lastplatte bei steigender Prüfspannung. Dies ist primär auf die Zusammensetzung des Materials zurückzuführen. Der untersuchte Perlkies wird faktisch als Einkornkies mit runden Körnern betrachtet. Jedoch sind neben Rundkorn auch gedrungene Körner sowie Mürbkorn zu finden. Ebenso führt die Ausrichtung der Körner untereinander zu Streuungen in den Ergebnissen.

Aufgrund der Streuungen der Verschiebungswerte der vier Testserien wird zusätzlich die mittlere Verschiebung ausgewertet. Hierfür wird für jede Laststufe der Mittelwert der Verschiebungen berechnet. Die Testserie 02-003 bleibt dabei jedoch unberücksichtigt, da diese deutlich höhere Verschiebungen aufweist. Ab einem Spannungsniveau von 1,00 MPa ist in dieser Testserie bereits eine Annäherung an den Bruchzustand erkennbar. Zudem wurden nach Beendigung des Versuchs gebrochene Körner unter der Lastplatte entdeckt. Dies erklärt teil-

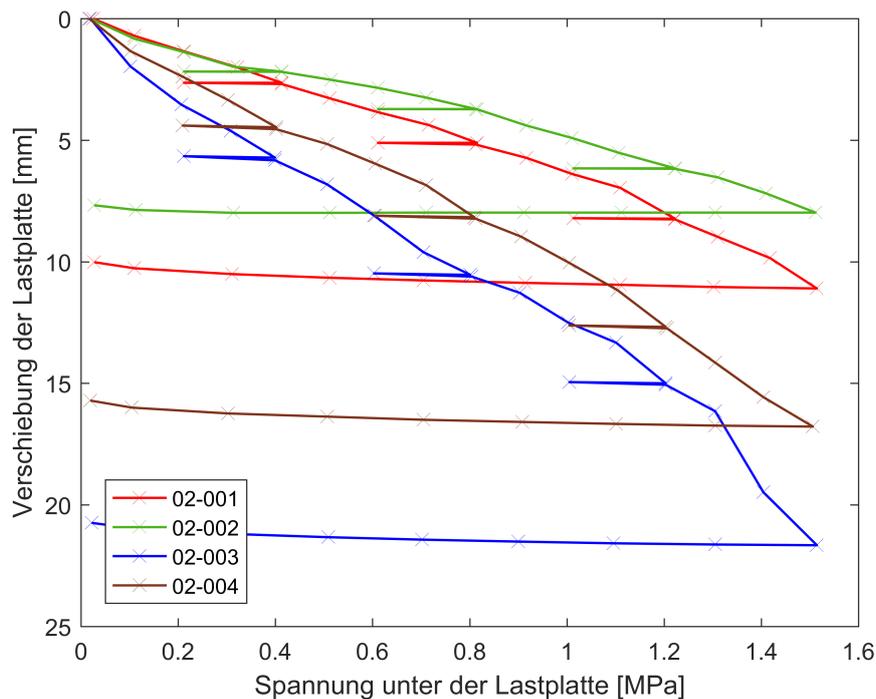


Abbildung 9.1: Spannungs-Verschiebungs-Diagramm der durchgeführten Testversuche mit Perlkies 8/11.

weise die hohen Verschiebungen. In Abbildung 9.2 ist der Spannungs-Verschiebungs-Verlauf auf Basis der mittleren Verschiebung dargestellt.

Abbildung 9.3 zeigt das Spannungs-Verschiebungs-Diagramm für Sand 0,40/0,50 als Ringraummaterial. Darin ist deutlich erkennbar, dass der Bruchzustand bei einer Spannung von 0,50 MPa nahezu erreicht wird. Der Versuch wurde bereits nach Erreichen dieser Laststufe abgebrochen. Aufgrund der fehlenden seitlichen Behinderung des Probenmaterials kommt es zu einem Einsinken der Lastplatte bei steigender Spannung. Der durchgeführte Versuch verdeutlicht, dass das Prüfverfahren auch durch das Verhältnis von Korngröße zu Ringraumgeometrie beeinflusst wird. Die Auswertung der Verformungseigenschaften (siehe Kapitel 9.2) für die Testserie 03-001 bestätigt dies durch eine Abnahme der Steifigkeit bzw. des Bettungsmoduls bei zunehmender Spannung.

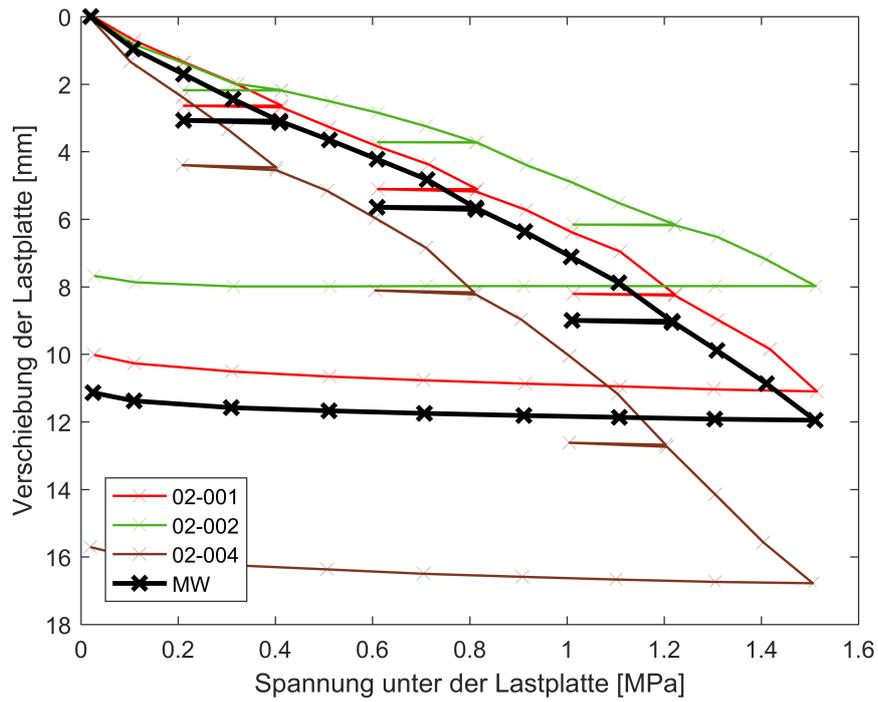


Abbildung 9.2: Spannungs-Verschiebungs-Verlauf für die mittlere Setzung und die zugehörigen Testserien.

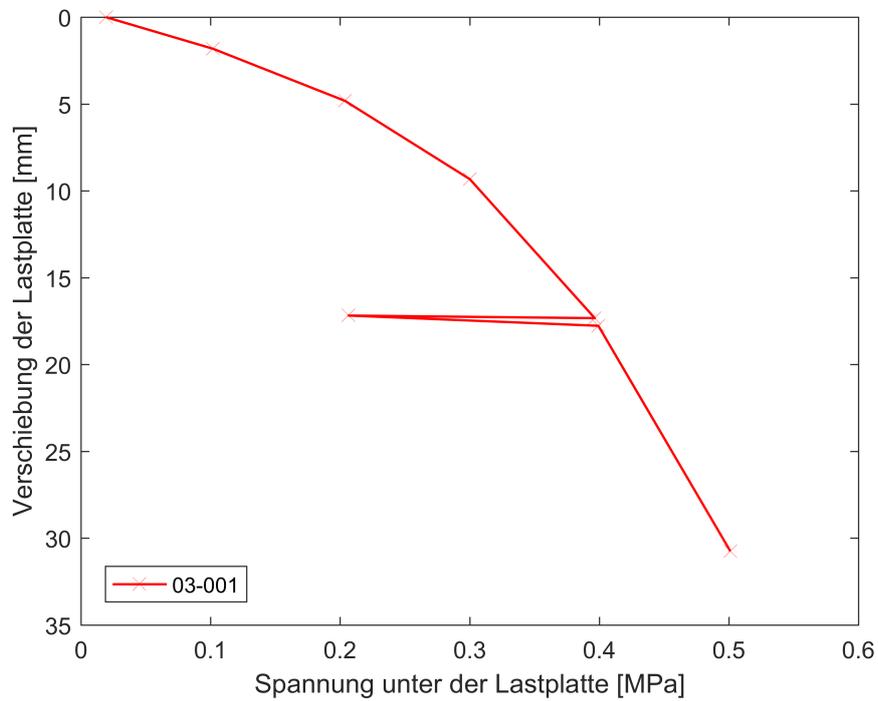


Abbildung 9.3: Druck-Verschiebungs-Diagramm des durchgeführten Testversuchs mit Sand.

9.2 Berechnung der Verformungseigenschaften

Die Ermittlung der Verformungseigenschaften erfolgt ebenso in Anlehnung an die ÖNORM B 4417 (1979). Die durchgeführten Versuche haben jedoch gezeigt, dass es in den Ent- und Wiederbelastungen nur zu äußerst geringen Verschiebungsab- bzw. zunahmen von maximal 0,10 mm kommt. Deshalb, und aufgrund der untergeordneten Rolle von Ent- und Wiederbelastungen im Ringspalt, werden die Verformungseigenschaften nur für die Erstbelastungsstufen ermittelt.

Der Bettungsmodul (k_s) wird nach Gleichung 9.2 über die aufgebrachte Druckspannung (σ) und die zugehörige Verschiebung (v) je Laststufe ermittelt. Die Berechnung erfolgt hierbei immer zwischen gewählter Lastplattenspannung und der Vorbelastungsspannung (σ_0), welche in Abzug gebracht wird.

$$k_s = \frac{\sigma - \sigma_0}{v} \quad (9.2)$$

Die Ergebnisse für die Versuche an Perlkies sind in Tabelle 9.1 zu finden. Die hervorgehobenen Zahlen markieren jene Spannung (definiert als *Grenzspannung*), ab welcher der Bettungsmodul nur mehr in geringem Maße zunimmt bzw. auch abnimmt. Diese Grenzspannung liegt bei den durchgeführten Versuchen in einem Bereich von 0,21 bis 0,51 MPa. Auf Basis dieses Verhaltens kann angenommen werden, dass die Spannung im Ringraum theoretisch der Grenzspannung entspricht. Dies wird dadurch begründet, dass die Steifigkeit des Ringraummaterials direkt von der Ringraumspannung abhängt. Wenn die Lastplattenspannung die Ringraumspannung überschreitet, kommt es aufgrund der unbehinderten Seitendehnung zu keiner Erhöhung der Steifigkeit des Ringraummaterials.

Bedingt durch die Streuung des Spannungsbereichs kann bei Auswertung des Bettungsmoduls jedoch nur eine grobe Abschätzung der Ringraumspannung erfolgen. Die abgeschätzten Werte liegen zudem ca. 0,20 MPa über der tatsächlichen Ringraumspannung der Testversuche. Für den gemittelten Bettungsmodul liegt die Grenzspannung sogar bei 0,51-0,61 MPa. Tabelle 9.1 zeigt zudem, dass es ab einer Spannung von ca. 1,00 MPa zu einer stetigen Verminderung des Bettungsmoduls kommt. Dies lässt die Annäherung an den Bruchzustand erkennen.

Tabelle 9.1: Auswertung der Bettungsmoduli für die Versuche mit Perlkies 8/11.

Spannung [MPa]	Bettungsmodul k_s [MN/m ³]					
	-	02-001	02-002	02-003	02-004	Mittelwert ^{*)}
0,02	-	-	-	-	-	-
0,11	120	109	43	64	98	
0,21	139	140	54	81	120	
0,31	148	149	64	85	127	
0,41	147	181	68	86	138	
0,51	149	197	73	95	147	
0,61	152	208	73	99	153	
0,71	158	213	73	101	157	
0,81	155	213	86	97	155	
0,91	156	204	80	99	153	
1,01	154	202	80	98	152	
1,11	156	197	83	97	150	
1,22	146	195	81	94	145	
1,31	143	198	81	91	144	
1,41	141	193	72	89	141	
1,51	134	187	70	89	137	

^{*)} 02-003 nicht berücksichtigt

Da der Bettungsmodul keine Materialkonstante ist und keine direkte Rückrechnung auf den Steifemodul (E_s) ermöglicht, wird der Verformungsmodul der Erstbelastungen ($E_{v,1}$) nach Gleichung 9.3 bestimmt. Die Berechnung erfolgt als Sekantenmodul für jeweils eine Laststufe. Die Spannungsdifferenz ($\Delta\sigma$) und die Änderung der Verschiebung der Lastplatte (Δv) errechnet sich nach den Gleichungen 9.4 und 9.5.

$$E_v = \frac{0,75 \cdot D \cdot \Delta\sigma}{\Delta v} \quad (9.3)$$

$$\Delta\sigma = \sigma_2 - \sigma_1 \quad (9.4)$$

$$\Delta v = v_2 - v_1 \quad (9.5)$$

Tabelle 9.2 enthält die ermittelten Verformungsmoduli für die Versuche mit Perlkies 8/11 als Ringraummaterial. Die markierten Werte kennzeichnen abermals die Grenzspannung. Diese streut in einem Bereich zwischen 0,21 und 0,51 MPa. Für die mittlere Verschiebung der

Lastplatte ergibt sich eine Grenzspannung von 0,31-0,41 MPa. Die tatsächliche Ringraumspannung wird erneut geringfügig überschätzt. Analog zur Auswertung des Bettungsmoduls ist eine Steifigkeitsreduktion ab einer Prüfspannung von ca. 1,00 MPa erkennbar.

Tabelle 9.2: Statische Verformungsmoduli je Laststufe.

Spannungsbereich [MPa]	Verformungsmodul $E_{v,1}$ [MPa]				
	02-001	02-002	02-003	02-004	Mittelwert ^{*)}
0,02-0,11	6	6	2	3	5
0,11-0,21	8	9	3	5	8
0,21-0,31	9	9	5	5	7
0,31-0,41	7	25	4	5	12
0,41-0,51	9	16	6	9	11
0,51-0,61	9	15	5	6	10
0,61-0,71	10	13	5	6	10
0,71-0,81	7	11	6	4	7
0,81-0,91	10	8	9	6	8
0,91-1,01	7	9	4	5	7
1,01-1,11	9	8	6	5	7
1,11-1,22	5	9	3	3	6
1,22-1,31	6	13	5	4	8
1,31-1,41	6	8	2	4	6
1,41-1,51	4	7	3	4	5

*) 02-003 nicht berücksichtigt

Zum Vergleich der Verformungsparameter mit jenen aus Laborversuchen ist es erforderlich, den Verformungsmodul in den Steifemodul überzuführen. Bei Annahme eines vollelastischen, isotropen Halbraums kann der Steifemodul (E_s) nach Gleichung 9.6 über die Querdehnzahl (ν) berechnet werden (Schultze & Muhs, 1967). Da ein vollelastischer, isotroper Halbraum in der Realität allerdings nicht auftritt ist die Umrechnung nicht exakt. Für die Untersuchungen in dieser Arbeit sind die Ungenauigkeiten in der Umrechnung jedoch nicht relevant. Zudem ist die exakte Bestimmung der Querdehnzahl für den untersuchten Perlkies nicht möglich. Aus Erfahrung wird daher ein Wert von 0,25 angesetzt.

$$E_s = \frac{(1 - \nu)(1 - \nu^2)}{(1 + \nu)(1 - 2\nu)} E_v \quad (9.6)$$

In Tabelle 9.3 sind die berechneten Steifemoduli der Versuche mit Perlkies 8/11 für eine Querdehnzahl von 0,25 ersichtlich. Die Grenzspannung wird durch die hervorgehobenen Werte gekennzeichnet. Diese liegt im selben Bereich wie bei der Auswertung der Verformungsmoduli der Erstbelastung.

Tabelle 9.3: Steifemoduli je Laststufe.

Spannungsbereich [MPa]	Steifemodul E_s [MPa]				Mittelwert ^{*)}
	02-001	02-002	02-003	02-004	
0,02-0,11	9	7	2	4	7
0,11-0,21	12	12	4	6	10
0,21-0,31	13	11	5	6	10
0,31-0,41	11	31	5	5	16
0,41-0,51	13	19	6	10	14
0,51-0,61	13	18	4	7	13
0,61-0,71	15	15	4	7	12
0,71-0,81	10	14	6	4	9
0,81-0,91	15	10	8	7	10
0,91-1,01	11	11	5	5	19
1,01-1,11	13	10	7	5	9
1,11-1,22	7	11	4	4	7
1,22-1,31	9	16	5	4	10
1,31-1,41	9	9	2	4	8
1,41-1,51	6	8	3	5	6

^{*)} 02-003 nicht berücksichtigt

Der Bettungsmodul für die Testserie mit Sand (03-001) ist in Tabelle 9.4 ersichtlich. Die Verformungsparameter für diese Testserie sind in Tabelle 9.5 dargestellt. Die Ergebnisse zeigen eine deutliche Steifigkeitsreduktion bei Lasterhöhung ab der zweiten Laststufe. Dies lässt die Annäherung an den Bruchzustand eindeutig erkennen. Verlässliche Verformungsparameter können daher nicht ausgewertet werden.

Tabelle 9.4: Bettungsmoduli der Testserie *03-001* mit Sand als Ringraummaterial.

Spannung	Bettungsmodul k_s
[MPa]	[MN/m ³]
0,02	-
0,10	45
0,20	38
0,30	30
0,40	22
0,50	16

Tabelle 9.5: Verformungsparameter der Testserie *03-001*.

Spannungsbereich	Verformungsmodul $E_{v,1}$	Steifemodul E_s
[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,02-0,10	2	3
0,10-0,20	2	2
0,20-0,30	1	1
0,30-0,40	1	1
0,40-0,50	0	0

Anhand der durchgeführten Versuche können folgende Aussagen getroffen werden

- Bei einem zu großen Verhältnis von Größtkorn zu Ringraumvolumen kommt es bei der gewählten Lastplattengeometrie zu einem Bruchzustand im Prüfkörper. Dieser ist bereits bei geringen Lasten erkennbar. Das Verhältnis von Größtkorn zu Lastplattendurchmesser ist daher nicht das einzige Kriterium für eine erfolgreiche Messung.
- Bei theoretischer Verwendung von Sand als Ringraummaterial ist keine verlässliche Prüfung der Verformungseigenschaften möglich.
- Mit dem vorhandenen Lastplattendurchmesser ist die Erfassung der Verformungseigenschaften von Perlkies 8/11 möglich. Bei einer Spannung unter der Lastplatte von 1,00 MPa kann der Versuch abgebrochen werden, da eine Annäherung an den Bruchzustand erkennbar ist.
- Die exakte Ermittlung der Ringraumspannung ist aufgrund der Streuung in den Ergebnissen nicht möglich.

10 Verifikation der Ergebnisse

Die Versuchsergebnisse zeigen, dass die Steifigkeit von Perlkies 8/11 für das Spannungsintervall von 0,20-0,50 MPa in einem Bereich von 10-30 MPa variiert. In der Literatur wird die Steifigkeit teilweise 5-10 mal steifer angegeben. Die Werte stammen dabei meist aus nicht näher beschriebenen Baustellenversuchen. Literaturwerte für die Steifigkeit von Perlkies sind nicht zu finden. Für Kies im Allgemeinen finden sich in der Literatur (Kuntsche (2016), Schmidt et al. (2014), Schröder (2014) und Maybaum et al. (2011)) Steifigkeitswerte von ca. 50-150 MPa für eine lockere bis mitteldichte Lagerung. Hierbei ist in der Regel jedoch weder die zugehörige Referenzspannung, noch die Abstufung des Materials angegeben.

Aus diesem Grund erfolgt eine Verifikation der Verformungsparameter durch zwei voneinander unabhängigen Versuchen. Der Vergleich der Steifemoduli erfolgt mit Ergebnissen aus vier durchgeführten Kompressionsversuchen. Beim eingesetzten Großödometer handelt es sich um eine Weiterentwicklung des Standard Casagrande Ödometers (Wieser, 2011). Aufgrund der Abmessungen des Versuchsapparatur erfolgt die Prüfung nach den Anforderungen der ÖNORM EN ISO 17892-5 (2015) bezüglich des maximal zulässigen Größtkorns. Für eine weitere Verifikation der Ergebnisse wird der dynamische Lastplattenversuch (RVS.08.03.04, 2008) eingesetzt.

10.1 Verifikation über Großödometerversuch

In den durchgeführten Großödometerversuchen wurden jeweils Probekörper mit einer Höhe von 80 mm und einem Durchmesser von 300 mm axial be- und entlastet. Das Probenmaterial wurde dabei im trockenen Zustand lose eingebracht und nicht verdichtet. Abbildung 10.1 zeigt das semilogarithmische Spannungs-Dehnungs-Diagramm der durchgeführten Testserien (*PK-01* bis *PK-04*). Die nach Gleichung 10.1 berechneten Steifemoduli je Laststufe sind in Tabelle 10.1 ersichtlich. Für die Verifikation wurden nur die Erstbelastungen ausgewertet. Bedingt durch die Materialzusammensetzung des untersuchten Perlkies 8/11 kommt es auch in diesem Versuch zu einer geringfügigen Streuung der Ergebnisse.

$$E_s = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad (10.1)$$

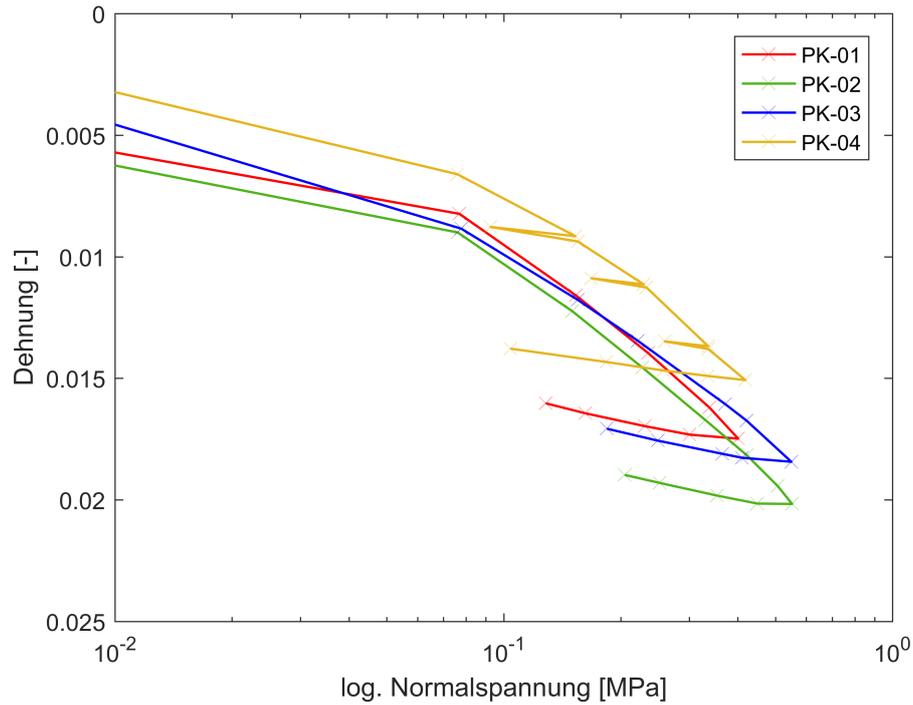


Abbildung 10.1: Semilogarithmisches Spannungs-Dehnungs-Diagramm der im Großödometer durchgeführten Versuche an Perlkies 8/11.

Tabelle 10.1: Ergebnisse der Großödometerversuche an Perlkies 8/11.

PK-01		PK-02		PK-03		PK-04	
$\Delta\sigma$	E_s	$\Delta\sigma$	E_s	$\Delta\sigma$	E_s	$\Delta\sigma$	E_s
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,00-0,08	9	0,00-0,08	8	0,00-0,08	9	0,00-0,08	11
0,08-0,15	23	0,08-0,15	23	0,08-0,16	26	0,08-0,15	30
0,15-0,24	35	0,15-0,23	33	0,16-0,22	39	0,15-0,23	42
0,24-0,34	46	0,23-0,33	48	0,22-0,37	58	0,23-0,34	43
0,34-0,40	49	0,33-0,42	64	0,37-0,42	74	0,34-0,42	65
		0,42-0,55	65	0,42-0,55	76		

Aus den vier Versuchen wurde der mittlere Kurvenverlauf durch Mittelwertbildung gebildet (Abbildung 10.2). Ent- und Wiederbelastungen wurden nicht berücksichtigt, mit Ausnahme der Entlastung nach der maximalen Prüfspannung.

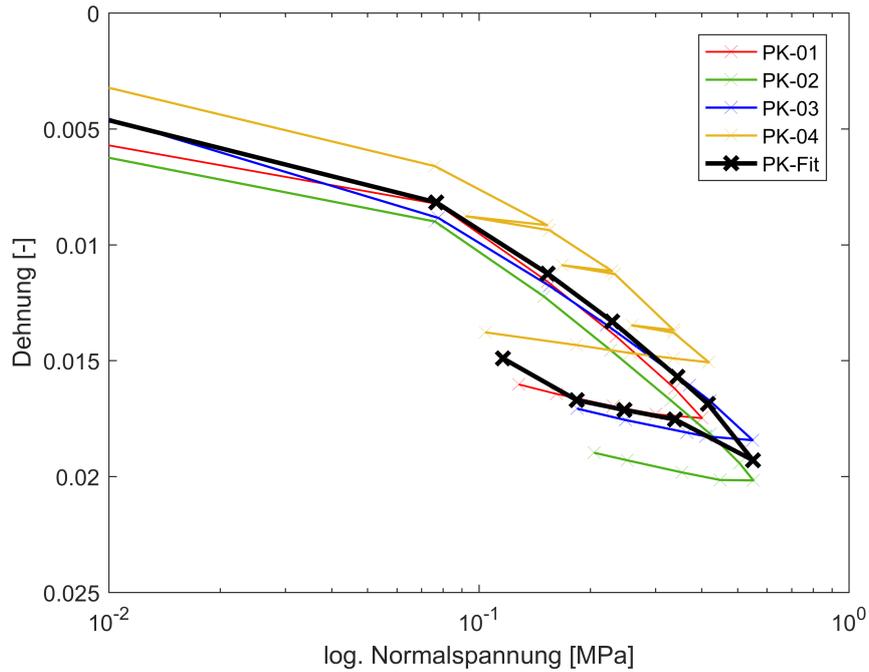


Abbildung 10.2: Spannungs-Dehnungs-Diagramm der durchgeführten Großödometerversuche an Perlkies 8/11 (semilogarithmisch).

Die gemittelten Steifemoduli der Großödometerversuche und jene aus den Versuchen mit der entwickelten Messvorrichtung sind in Tabelle 10.2 dargestellt. Anhand der Ergebnisse wird die Plausibilität der gewonnenen Steifemoduli aus den Laborversuchen bestätigt. Aus dem Vergleich der Steifemoduli kann für den Ringraum eine Spannung von ca. 0,10-0,20 MPa ausgewertet werden. Dies entspricht in etwa der tatsächlichen Ringraumspannung in den Laborversuchen. Die Auswertung zeigt ebenso, dass die nach Gleichung 9.6 errechneten Steifigkeiten zu geringe Werte liefern. Für eine quantitative Aussage diesbezüglich ist der Datenumfang jedoch zu gering.

Tabelle 10.2: Ergebnisvergleich - Großödometer und Messvorrichtung.

Mittelwert Großödometer		Mittelwert Messvorrichtung	
Spannungsbereich	Steifemodul	Spannungsbereich	Steifemodul
[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
0,00-0,08	9	0,02-0,11	7
0,08-0,16	25	0,11-0,21	10
0,16-0,23	37	0,21-0,31	10
0,23-0,34	48	0,31-0,41	16
0,34-0,42	61	0,41-0,51	14

10.2 Verifikation mittels dynamischem Lastplattenversuch

Der zum Verdichtungsnachweis von Tragschichten im Straßen- und Eisenbahnbau eingesetzte dynamische Lastplattenversuch nach RVS.08.03.04 (2008) wird für eine weitere Verifikation der Ergebnisse der Verformungsparameter aus den Laborversuchen eingesetzt. Hierbei wird das leichte Fallgewichtsgerät (LFG) *ZFG 3000 GPS* mit einem Fallgewicht von 15 kg eingesetzt. Die Versuchsdurchführung erfolgt in der Ringraum-Box der Laborversuche, welche bis zu einer Höhe von 200 mm mit Perlkies gefüllt ist. Die Lastplatte mit einem Durchmesser von 300 mm wird zentrisch in der Ringraum-Box positioniert (Abbildung 10.3).



Abbildung 10.3: Lastplatte (300 mm) des LFG in der mit Perlkies 8/11 gefüllten Ringraum-Box.

Vor Durchführung der Messung werden drei Vorbelastungsstöße ausgeführt, um einen vollflächigen Kontakt zwischen Lastplatte und Prüfkörper zu schaffen. Darauf folgend werden drei Messstöße durchgeführt. Die jeweiligen Setzungen ($s_{max,i}$) werden dabei automatisch erfasst und der Mittelwert (s_{max}) berechnet. Die Prüfspannung kann für einen Durchmesser der Lastplatte von 300 mm mit ca. 0,10 MPa angenommen werden. Der dynamische Verformungsmodul (E_{vd}) wird nach Gleichung 10.2 berechnet.

$$E_{vd} = \frac{22,5}{s_{max}} \quad (10.2)$$

Tabelle 10.3 enthält die gemessenen Setzungen sowie die daraus ermittelten dynamischen Verformungsmoduli (E_{vd}) für drei durchgeführte Versuchsserien ($DLP-01$ bis $DLP-03$). Daraus resultiert ein mittlerer Verformungsmodul von 15,40 MPa.

Tabelle 10.3: Versuchsergebnisse der dynamischen Lastplattenversuche.

Messwert		DLP-01	DLP-02	DLP-03
s_1	[mm]	1,694	1,569	1,449
s_2	[mm]	1,604	1,449	1,356
s_3	[mm]	1,531	1,361	1,221
s_{max}	[mm]	1,610	1,460	1,342
E_{vd}	[MPa]	13,98	15,41	16,77

Für den Vergleich der Ergebnisse muss der dynamische Verformungsmodul in den statischen Verformungsmodul für Erstbelastungen ($E_{v,1}$) übergeführt werden. Nach der RVS.08.03.04 (2008) kann eine, auf Basis des statischen Erstbelastungsmoduls, definierte Mindestanforderung mit dem dynamischen Lastplattenversuch überprüft werden. Eine direkte Umrechnung von gemessenen dynamischen Verformungsmoduli ist nicht vorgesehen. Zum Zwecke der Verifikation der Steifigkeitsparameter aus den Laborversuchen kann jedoch eine Umrechnung nach Gleichung 10.3 erfolgen. Diese ist gültig für nicht bindige Böden mit einem statischen Verformungsmodul unter 25 MPa.

$$E_{v,1} = \frac{5}{6} E_{vd} \quad (10.3)$$

Brandl et al. (2003) haben durch Versuche auf speziell hergestellten Versuchsfeldern und Baustellen die Beziehung nach Gleichung 10.4 entwickelt. Für insgesamt 56 ausgewertete Wertpaare konnte eine gute Korrelation mit den Ergebnissen der Prüfung auf ungebundenen Foundationsschichten erzielt werden.

$$E_{v,1} = 1,751 \cdot E_{vd} - 23,45 \quad (10.4)$$

Tabelle 10.2 zeigt die Gegenüberstellung der ermittelten Verformungsmoduli. Der Wert für die Versuche ist gültig für das Spannungsintervall von 0,02 bis 0,11 MPa. Mit der Formel nach Brandl et al. (2003) ergibt sich eine gute Übereinstimmung mit den Versuchsergebnissen. Bei Rückrechnung nach Gleichung 10.3 ergibt sich der 2,5-fache Wert für den Verformungsmodul. Trotz dieser Abweichung kann die Plausibilität der Ergebnisse aus den Laborversuchen

bestätigt werden. Zudem wird gezeigt, dass die Annahmen für die Steifigkeit der Perlkiesverfüllung in den meisten Fällen massiv überschätzt wird.

Tabelle 10.4: Vergleich der Verformungsmoduli $E_{v,1}$ in [MPa].

RVS 08.03.04	Brandl et. al.	Messvorrichtung
13	4	5

Ein weiterer Vergleich erfolgt über den in der SN 670 317b (1998) definierten Zusammendrückungsmodul (M_E). Für die gemittelten Versuchsergebnisse der Testserien $02-00x$ wurde dieser nach Gleichung 10.5 für den Spannungsbereich von 0,02 bis 0,11 MPa bestimmt. In einem Forschungsprojekt des Bundesamt für Straßen (2014) wurde eine Korrelation zum dynamischen Verformungsmodul auf Basis von 241 durchgeführten Messungen an ungebundenen Tragschichten entwickelt. Die Regression nach Gleichung 10.6 kann dabei grundsätzlich als gut bewertet werden.

$$M_E = D \frac{\Delta\sigma}{\Delta v} \quad (10.5)$$

$$M_{E,1} = 1,75 \cdot E_{vd} - 20,00 \quad (10.6)$$

Der Vergleich der Zusammendrückungsmoduli ist in Tabelle 10.5 ersichtlich. Die Ergebnisse zeigen hier eine gute Übereinstimmung.

Tabelle 10.5: Vergleich des Zusammendrückungsmoduls $M_{E,1}$ in [MPa].

Bundesamt für Straßen	Messvorrichtung
7	7

Anhand der durchgeführten Verifikationen konnten die Ergebnisse aus den Laborversuchen mit dem Prototypen der Messvorrichtung bestätigt werden. Damit konnte auch die grundsätzliche Eignung des Messverfahrens zur Bestimmung der Verformungseigenschaften von Perlkies bekräftigt werden.

11 Fazit und Ausblick

Auf Basis des statischen Lastplattenversuchs konnte ein Messverfahren zur Ermittlung der Verformungsparameter von Perlkies im Ringraum entwickelt werden. Die Durchführung der Prüfung erfolgte dabei über die Perlkiesverblasöffnung der Tübbingsegmente. Hierfür wurde eigens ein Prototyp am Institut für Felsmechanik und Tunnelbau entwickelt und der Einsatz getestet. Durch Erfassung von Druckkraft und Verschiebung der Lastplatte kann der Bettungsmodul bestimmt werden. Dieser wird durch Rückrechnung in den Steifemodul übergeführt und geht direkt in die Bemessung ein.

In einem Funktionstest wurden die Handhabung des Hydrauliksystems und der Messtechnik getestet. Die korrekte Erfassung der aufgetragenen Druckkraft mit dem integrierten Druckkraftaufnehmer konnte evaluiert werden. Die Steuerung der Druckkraft über das Nadelventil ist dabei äußerst präzise. Zudem wurde das Messverfahren in Laborversuchen unter möglichst realen Bedingungen geprüft. Die Systemverformung wurde messtechnisch erfasst und kann für die untersuchten Spannungen unter der Lastplatte von maximal 1,50 MPa vernachlässigt werden. Die Fixierung der Messvorrichtung mit Hilfe der vier Montagewinkel hat sich bewährt. Das Einbringen erfordert jedoch einen größeren Zeitaufwand.

Die Ergebnisse der Laborversuche zeigen, dass der Prototyp zur Beurteilung der Verformungseigenschaften von Perlkies eingesetzt werden kann. Bei wiederholter Versuchsdurchführung können verlässliche Parameter bestimmt werden und die Ringraumspannung abgeschätzt werden. Die ermittelten Steifigkeitskennwerte unterscheiden sich dabei deutlich von in der Bemessung angewandten Werten. Diese werden teilweise bis zu 5-10 mal steifer angenommen. Aus diesem Grund erfolgte eine Verifikation der Versuchsergebnisse durch zwei unabhängige Versuche.

Anhand durchgeführter Großödometerversuche wurde die Plausibilität der Ergebnisse aus den Testversuchen bestätigt. Der Vergleich der Ergebnisse beider Versuche ermöglichte zudem eine Abschätzung der Spannung im simulierten Ringraum. Diese entspricht in etwa der tatsächlichen Ringraumspannung in den Laborversuchen. Eine exakte Ermittlung der Ringraumspannung aus den Versuchsergebnissen mit dem Prototypen ist derzeit nicht möglich. Hierzu sind weitere Versuche unter kontrollierten Laborbedingungen erforderlich. Eine weitere Kontrolle der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe des dynamischen Lastplattenversuchs. Die

rückgerechneten Werte der Verformungs- und Zusammendrückungsmoduli zeigen eine gute Übereinstimmung mit jenen aus den Laborversuchen.

Mit den Laborversuchen wurde die Eignung des Prototypen zur Erfassung der Verformungseigenschaften von Perlkies durch die Verblasöffnung gezeigt. Die Ergebnisse zeigen zudem, dass die bisher in der Bemessung eingesetzten Steifemoduli meist überschätzt wurden.

Mit den Erfahrungen aus den Laborversuchen kann der Einsatz des Prototypen in situ erfolgen. An Vorversuchen wurde bereits der Einbau in horizontaler Lage erfolgreich getestet. Für den Einsatz in einem vollständig verfüllten Ringraum ist das Einbringen der Montagewinkel von besonderem Interesse. Zudem ist zu untersuchen, ob eine Nachverdichtungswirkung durch die TVM erfassbar ist.

Für anschließende Untersuchungen sind folgende Aspekte zu beachten:

- Zur Reduktion der Versuchsdauer von ca. 1,50 Stunden kann das Belastungsschema in zukünftigen Versuchen adaptiert werden. Zudem ist bei der Prüfung von Perlkies eine maximale Prüfspannung von 1,00 MPa ausreichend. Bei größeren Spannungen ist bereits eine Annäherung an den Bruchzustand erkennbar.
- Aus Ent- und Wiederbelastung über zwei Spannungsintervalle der Erstbelastung können keine brauchbaren Ergebnisse gewonnen werden. Zu untersuchen sind daher Verformungsparameter bei größeren Spannungsintervallen.
- Durch Adaption des Befestigungsmechanismus kann der Lastplattendurchmesser vergrößert werden. Dabei kann die für den Einbau benötigte Zeit reduziert werden und ein flächendeckender Einsatz der Messvorrichtung ermöglicht werden. Eine Vergrößerung der Lastplatte führt zwangsläufig zu größeren Prüfkräften, jedoch ist eine Streuungsreduktion in den Ergebnissen zu erwarten.

Literaturverzeichnis

- Behnen, G., Nevrlý, T., & Fischer, O. (2012). *Bettung von Tunnelschalen: Taschenbuch für den Tunnelbau*. Essen: VGE Verlag.
- Brandl, H., Adam, D., & Kopf, F. (2003). *Der dynamische Lastplattenversuch mit dem Leichten Fallgewicht: Grundlagenforschung und praktische Anwendung*, volume 533 of *Schriftenreihe Strassenforschung*. Wien: Bundesministerium für Verkehr, Innovation und Technologie.
- Bundesamt für Straßen (2014). *Leichtes Fallgewichtsgesetz für die Verdichtungskontrollen von Fundamentalschichten*. Bern: Schweizer Eidgenossenschaft - Bundesamt für Straßen (ASTRA).
- DIN (2011). *Handbuch Eurocode 7 - Geotechnische Bemessung - Band 2: Erkundung und Untersuchung* (1 ed.). Berlin: Beuth Verlag.
- Henzinger, M. R., Radončić, N., Moritz, B. A., & Schubert, W. (2016). Tübbingbettung - Stand der Technik, Umlagerungsverhalten von Perlkies, Verbesserungspotenzial. *Geomechanik Tunnelbau*, 9(3), 188–199.
- Kuntsche, K. (2016). *Geotechnik: Erkunden - Untersuchen - Berechnen - Ausführen - Messen* (2 ed.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Maybaum, G., Mieth, P., Oltmanns, W., & Vahland, R. (2011). *Verfahrenstechnik und Baubetrieb im Grund- und Spezialtieftiefbau: Baugrund - Baugruben - Baugrundverbesserung - Pfahlgründungen - Grundwasserhaltung* (2 ed.). Wiesbaden: Vieweg + Teubner.
- ÖNORM B 4417 (1979). *Erd- und Grundbau - Untersuchung von Böden - Lastplattenversuch*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM EN 12504-2 (2013). *Prüfung von Beton in Bauwerken - Teil 2: Zerstörungsfreie Prüfung - Bestimmung der Rückprallzahl*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM EN 12620 (2014). *Gesteinskörnungen für Beton*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.

- ÖNORM EN ISO 17892-5 (2015). *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Laborversuche an Bodenproben - Teil 5: Oedometerversuch mit stufenweiser Belastung: Entwurf*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- ÖNORM EN ISO 22476-12 (2009). *Geotechnische Erkundung und Untersuchung - Felduntersuchungen - Teil 12: Drucksondierungen mit mechanischen Messwertaufnehmern*. Wien: Österreichisches Normungsinstitut.
- Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik (2009). *Richtlinie - Tübbingsysteme aus Beton*. Wien: Österreichische Vereinigung für Beton- und Bautechnik.
- RVS.08.03.04 (2008). *Technische Vertragsbedingungen - Vor-, Abbruch- und Erdarbeiten - Verdichtungsnachweis mittels Dynamischen Lastplattenversuches*. Wien: Österreichische Forschungsgesellschaft Straße - Schiene - Verkehr.
- Schmidt, H.-H., Buchmaier, R. F., & Vogt-Breyer, C. (2014). *Grundlagen der Geotechnik* (4 ed.). Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Schröder, B. (2014). *Geotechnik für Ingenieure: Ein Überblick*. Wiesbaden: Springer Vieweg.
- Schultze, E. & Muhs, H. (1967). *Bodenuntersuchungen für Ingenieurbauten* (2. ed.). Berlin: Springer-Verlag.
- SN 670 317b (1998). *Böden - Plattendruckversuch EV und ME: Schweizer Norm SN 670 317b*. Zürich: Vereinigung Schweizerischer Strassenfachleute (VSS).
- Thienert, C. & Pulsfort, M. (2011). Tübbingbemessung unter Berücksichtigung der Eigenschaften des Ringspaltmaterials. *Geomechanik Tunnelbau*, 4(6), 665–680.
- Wieser, P. (2011). *Design of a Large Oedometer for the Determination of Stress Dependent Moduli on Fault Rocks*. Masterarbeit, Technische Universität Graz, Graz.

Anhang A - Materialliste

STAHLBAUKOMPONENTEN				
Komponentennummer	Komponente	Anzahl	techn. Daten	Material
B-01	Lastplatte	1	d = 68,00 mm h = 25,00 mm m = 835 g	Rundstahl S355J2G3
B-02	Schutzrohr	1	d _i = 63,00 mm d _a = 68,00 mm h = 40,00 mm m = 165 g	Rundstahl S355J2G3
B-03	Verlängerung - Zylinderkolben	1	d = 25 mm l = 262,00 mm m = 965 g	Rundstahl S355J2G3
B-04	Zylinderrohr	1	d _i = 40,00 mm d _a = 46,00 mm h = 40,00 mm m = 385 g	Stahlrohr X2CrNi12
B-05	Zylinderkopfplatte	1	d _i = 30,00 mm d _a = 55,00 mm h = 3,00 mm m = 40 g	Stahlblech S355J2+N
B-06	Befestigungsplatte	1	d _i = 46,00 mm d _a = 180,00 mm h = 6,00 mm m = 1035 g	Stahlblech S355J2+N
B-07	Widerlagerplatte	1	d = 140,00 mm h = 6,00 mm m = 1205 g	Stahlblech S355J2+N
B-08	Distanzelement	1	d = 36,00 mm h = 8,00 mm m = 50 g	Rundstahl S355J2G3
B-09	Montagewinkel - Wegaufnehmer	1	l = 163,00 mm b = 50,00 mm d = 3,00 mm m = 255 g	Stahlblech S355J2+N
B-10	Montagewinkel - Messvorrichtung	4	l = 528,30 mm b = 40,00 mm d = 6,00 mm m = 990 g	Stahlblech S355J2+N
B-11	Messhorizont	2	Kombination d _i = 25,00 mm d _a = 35,00 mm b = 15,00 mm l = 19,50 mm m = 40 g	Stahlblech S355J2+N
B-12	Einrichtplatte	1	l = 85,32 mm b = 85,32 mm d = 6,00 mm m = 240 g	Stahlblech S355J2+N

ZUBEHÖR				
Komponentennummer	Komponente	Anzahl	techn. Daten	Material
Z-01	Gelenkteller mit Bolzen	4	d ₁ = M8 d ₂ = 25 mm l ₁ = 80 mm	Teller: Delrin Kugelement: Vergütungsstahl
Z-02	Sechskantmutter für Z-01	8	M8 Regelgewinde	Festigkeitsklasse 8
Z-03	Unterlegscheibe für Z-01	8	d ₁ = 8,40 mm d ₂ = 16,00 mm h = 1,60 mm	Härteklasse 140HV
Z-04	Fixierschrauben für Messhorizont	6	Gewindestift mit Innensechskant d = M5 l = 10,00 mm	Festigkeitsklasse 8.8
Z-05	Verlängerung - Wegtaster	1	Gewindestab d = M6 l = 365,00 mm	Festigkeitsklasse 8.8
Z-06	Sechskantmutter für Z-05	5	M6 Regelgewinde	Festigkeitsklasse 8
Z-07	Unterlegscheibe für Z-05	4	d ₁ = 6,40 mm d ₂ = 12,00 mm h = 1,60 mm	Härteklasse 140HV
Z-08	Verbindung Widerlagerplatte und Montagewinkel-Wegaufnehmer	2	Sechskantschraube Gewinde bis Kopf d = M4 l = 20,00 mm	Festigkeitsklasse 8.8
Z-09	Sechskantmutter für Z-08	2	M4 Regelgewinde	Festigkeitsklasse 8
Z-10	Unterlegscheibe für Z-08	4	d ₁ = 4,30 mm d ₂ = 9,00 mm h = 0,80 mm	Härteklasse 140HV
Z-11	Verbindung Wegaufnehmer und Montagewinkel-Wegaufnehmer	4	Sechskantschraube Gewinde bis Kopf d = M4 l = 20,00 mm	Festigkeitsklasse 8.8
Z-12	Sechskantmutter für Z-11	4	M4 Regelgewinde	Festigkeitsklasse 8
Z-13	Unterlegscheibe für Z-11	8	d ₁ = 4,30 mm d ₂ = 9,00 mm h = 0,80 mm	Härteklasse 140HV
Z-14	Verbindung Widerlagerplatte und Druckkraftsensor	3	Senkschraube Innensechskant d = M2,5 l = 10,00 mm	Festigkeitsklasse 8.8
Z-15	Verbindung Widerlagerplatte und Befestigungsplatte	4	Gewindestab d = M10 l = 120 mm	Festigkeitsklasse 10.9

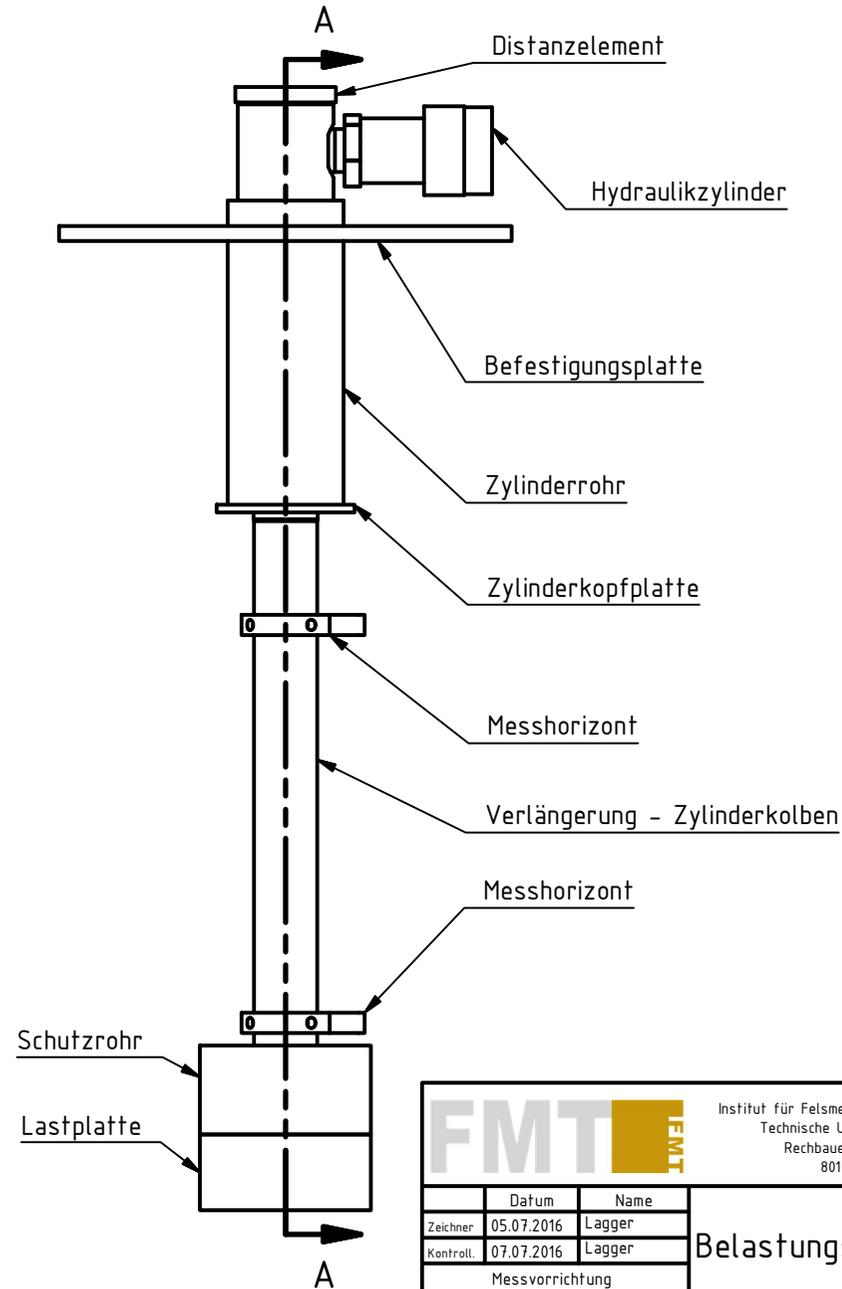
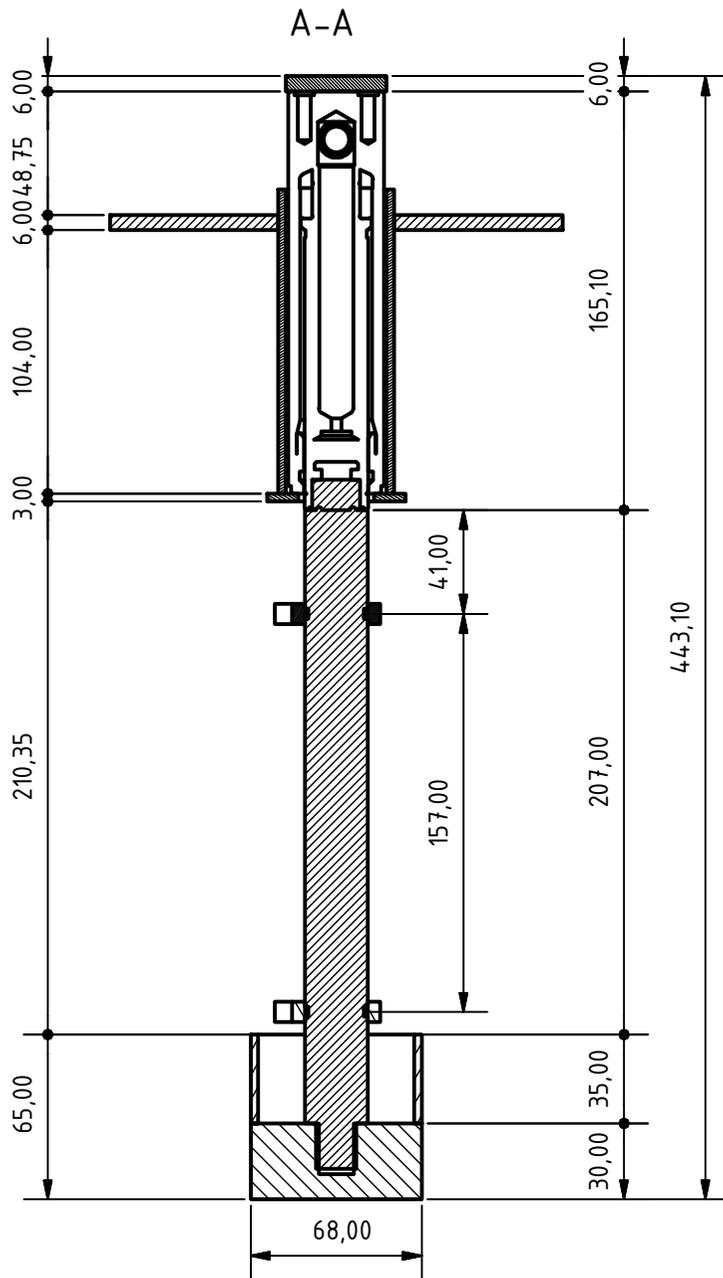
ZUBEHÖR				
Komponentennummer	Komponente	Anzahl	techn. Daten	Material
Z-16	Sechskantmutter für Z-15	8	M10 Regelgewinde	Festigkeitsklasse 10
Z-17	Unterlegscheibe für Z-15	8	d ₁ = 10,50 mm d ₂ = 20,00 mm h = 2,00 mm	Härteklasse 140HV
Z-18	Verbindung Spannklemme und Befestigungsplatte	4	Sechskantschraube Gewinde bis Kopf d = M10 l = 30,00 mm	Festigkeitsklasse 10.9
Z-19	Sechskantmutter für Z-18	4	M10 Regelgewinde	Festigkeitsklasse 10
Z-20	Unterlegscheibe für Z-18	8	d ₁ = 10,50 mm d ₂ = 20,00 mm h = 2,00 mm	Härteklasse 140HV
Z-21	Gewindestab für Einbauhilfe	1	Gewindestab d = M16 l = 450,00 mm	Festigkeitsklasse 8.8
Z-22	Sechskantmutter für Z-21	2	M16 Regelgewinde	Festigkeitsklasse 8
Z-23	Unterlegscheibe für Z-21	2	d ₁ = 17,00 mm d ₂ = 30,00 mm h = 3,00 mm	Härteklasse 140HV
Z-24	Verbindung Distanzelement und Hydraulikzylinder (angepasste Schraube)	2	Zylinderschraube Innensechskant d = 1/4" - 20UNC l = 13,00 mm	Festigkeitsklasse 8.8

HYDRAULIKSYSTEM			
Komponentennummer	Komponente	Anzahl	Beschreibung
H-01	Hydraulikzylinder hydraulisch einfachwirkend mit Hochflussschraubmuffe	1	Enerpac RC-53 Hub = 76,00 mm d = 38,00 mm h _{Ein} = 165,00 mm h _{Aus} = 241,00 mm m = 1.500 g
H-02	Hochflussschraubstecker mit Staubkappe	1	Gewinde: 3/8"-18NPT m = 300 g m = 150 g
H-03	Hydraulikschlauch 700 bar 3,0 m mit Gummizugentlastung	1	l = 3,00 m Gewinde: 3/8"-18NPT m = 900 g
H-04	Manometer-Aufnahmestück 1/2"	1	l = 155 mm Gewinde: 3/8"-18NPT m = 980 g
H-05	Glyzerin-Manometer 0-700 bar | 0-45 kN	1	d = 100 g Gewinde: 1/2"-NPT m = 600 g
H-06	Absperr- und Nadelventil handbetätigt	1	Gewinde: 3/8"-18NPT m = 540 g
H-07	Hydraulikschlauch 700 bar 0,60 m mit Gummizugentlastung	1	l = 0,60 m Gewinde: 3/8"-18NPT m = 500 g
H-08	Niederdruck-Handpumpe kompakt aus Stahl 200 bar 0,36 L	1	Volumen = 2,46 ccm je Hub 1-stufig m = 5.100 g

MESSTECHNIK			
Komponentennummer	Komponente	Anzahl	Beschreibung
M-01	Universalmessgerät	1	Ahlborn Mess- und Regelungstechnik GmbH Model: ALMEMO 25904AS Typ: Messgerät und Datenlogger Speicher: 100.000 Messwerte Eingänge: 4 Ausgänge: 2 Stromversorgung: Batterie Display: LCD 128x64 Pixel max. Messrate: 10 Messungen/s
M-02	Druckkraftaufnehmer	1	Lorenz Messtechnik GmbH Model: K-13/N410 Typ: Druckkraftsensor Messbereich: 10 kN Genauigkeit: 0,5 % Kennwert: 1 mV/V Material: Edelstahl - rostbeständig Schutzart: IP65
M-03	Wegaufnehmer	1	WayCon Positionsmesstechnik GmbH Model: LRW2-C-100 Typ: Linearpotentiometer Taster mit Kugelspitze Messbereich: 100 mm Linearität: +/- 0,10 % Federkraft: <4 N Material Kolbenstange: Edelstahl Material Gehäuse: Aluminium/Nylon Schutzart: IP40

WERKZEUG		
Komponentennummer	Komponente	Anzahl
W-01	Schlitzschraubenzieher	1
W-02	Innensechskant M3	1
W-03	Innensechskant M6	1
W-04	Gabelschlüssel für M4 SW 7	2
W-05	Gabelschlüssel für M6 SW 10	2
W-06	Gabelschlüssel für M8 SW 13	2
W-07	Gabelschlüssel für M10 SW 17	2
W-08	Gabelschlüssel SW 24	2
W-09	Gummihammer	1

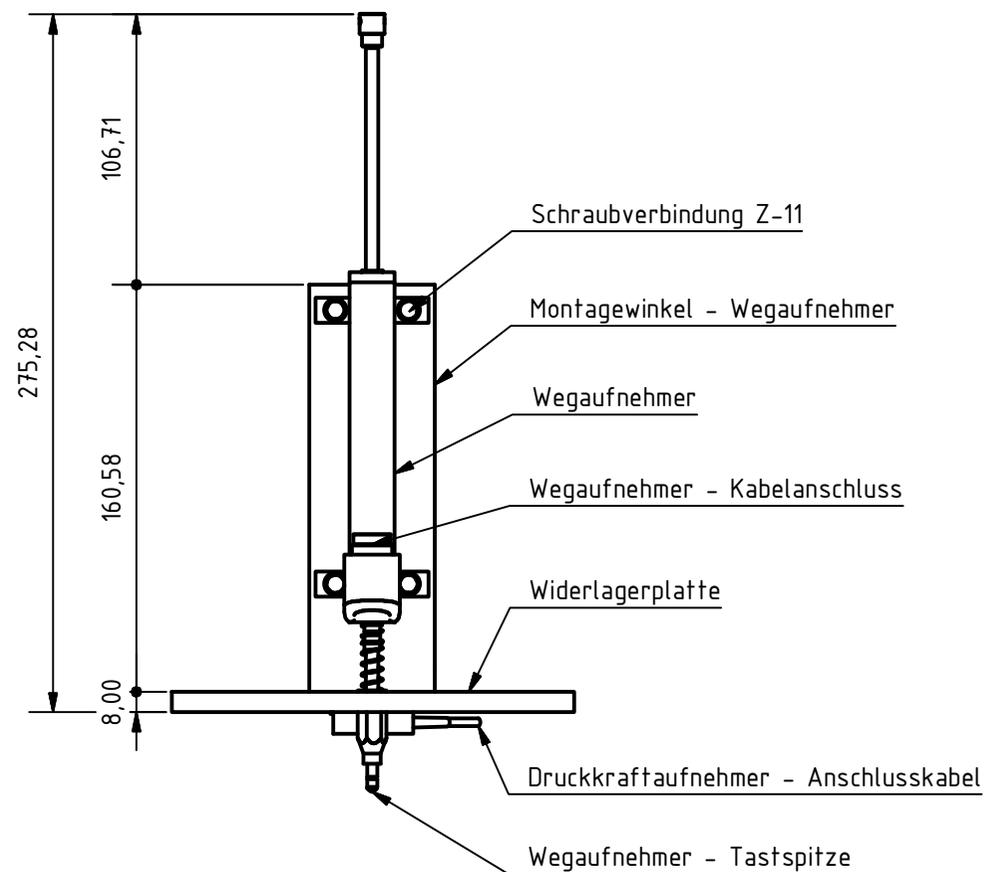
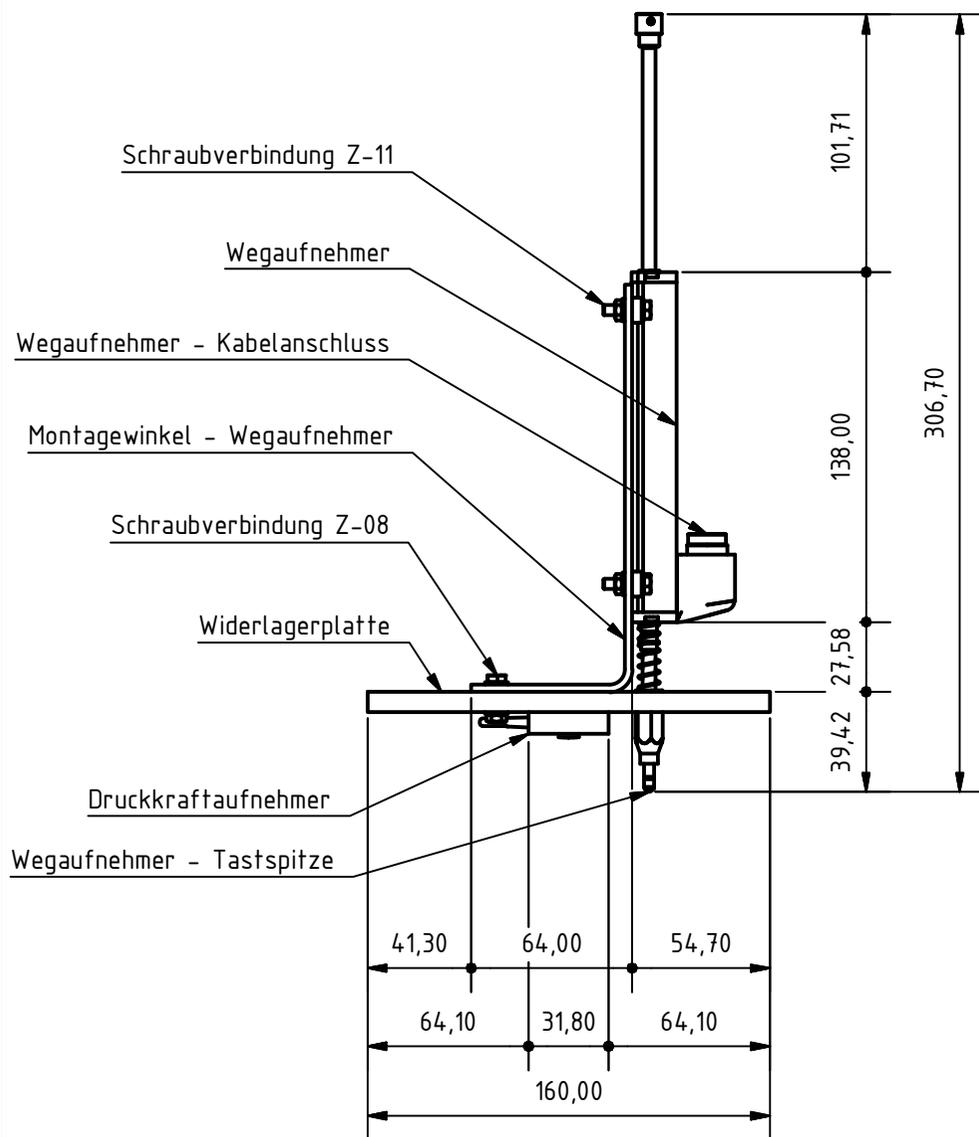
Anhang B - Detailpläne



Anmerkungen:

- Zusammenbau der Belastungseinheit vor Montage in der Verblasöffnung
- Verlängerung des Wegtasters nicht abgebildet

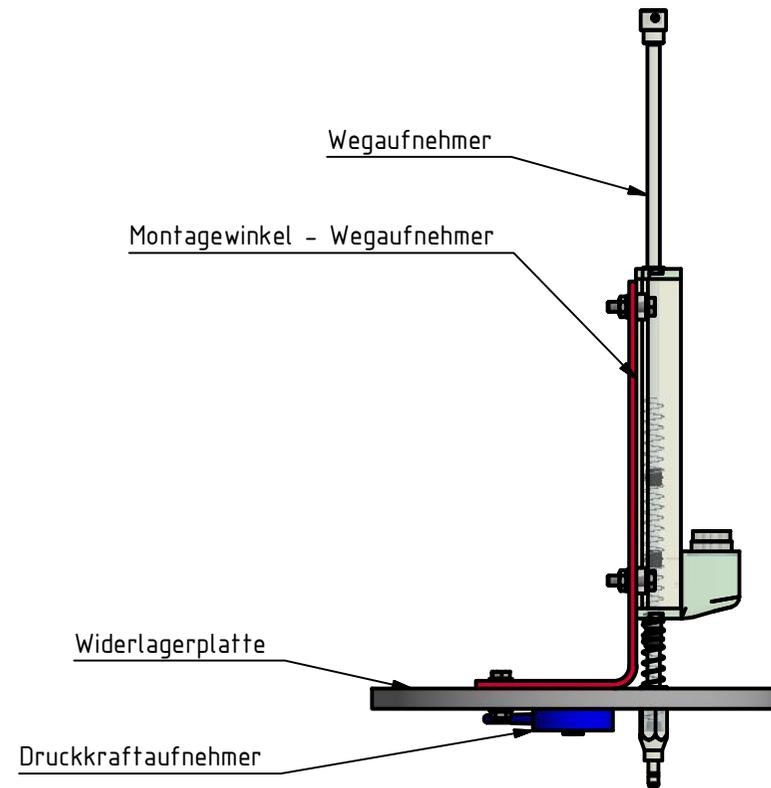
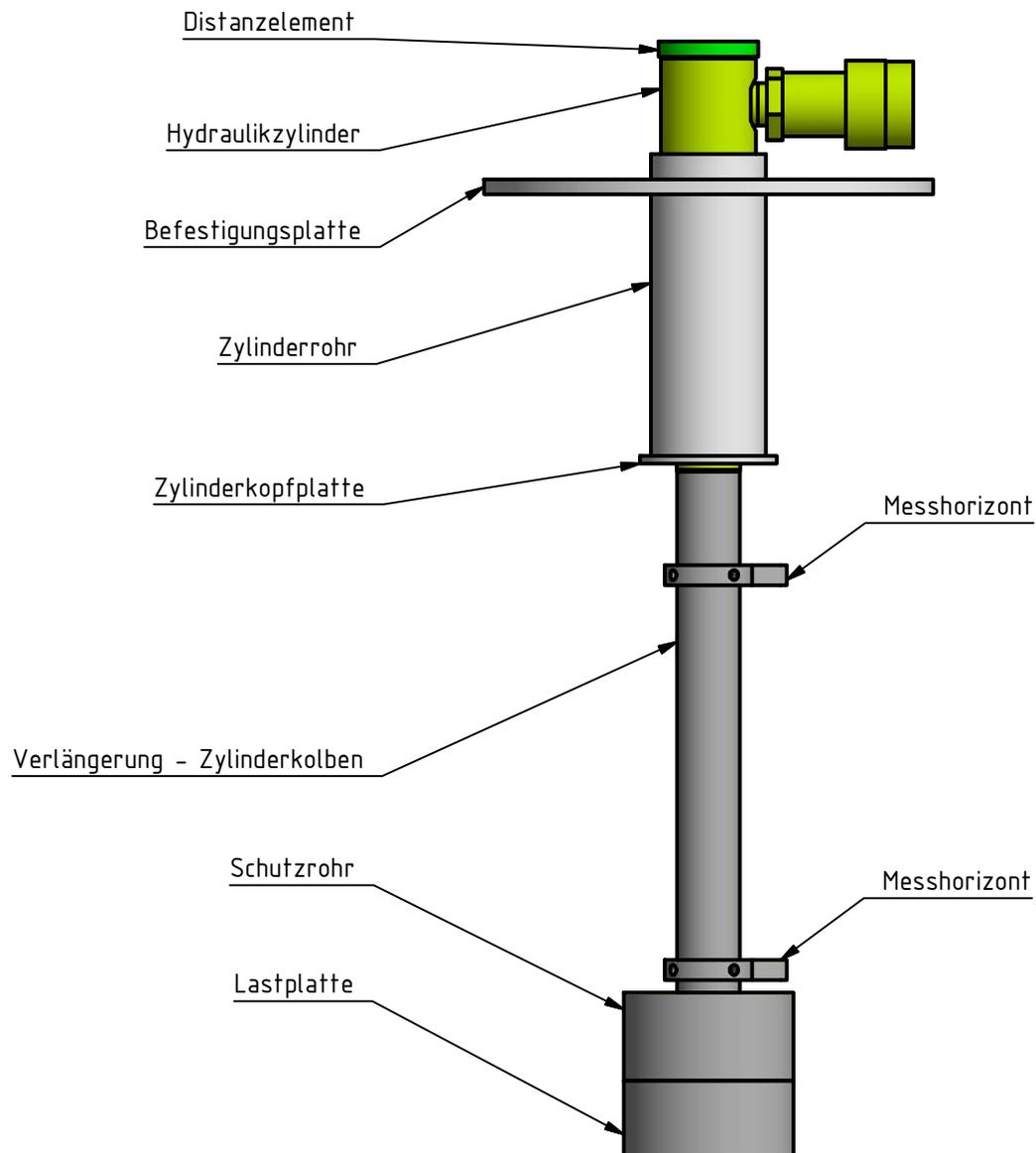
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Belastungseinheit	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				M 1:3	
Alle Maße in mm.				Montageschema	
				01	
				A4	



Anmerkungen:

- Zusammenbau der Widerlagereinheit vor Montage in der Verblasöffnung
- Verlängerung des Wegtasters nicht abgebildet
- Wegaufnehmer in "eingefahrener" Stellung

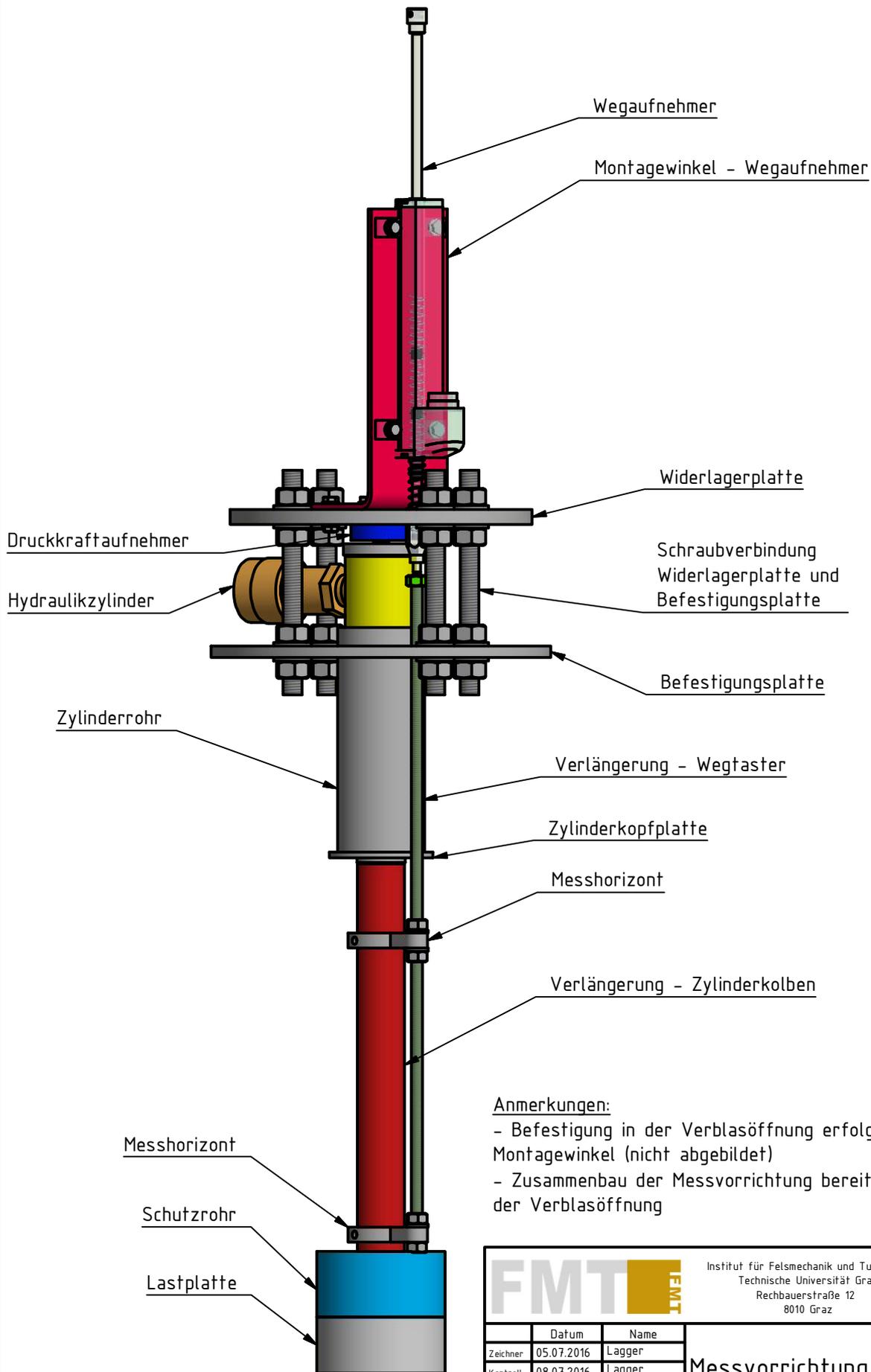
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Widerlagereinheit	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:3				Montageschema	
Alle Maße in mm.					
					02 A4



Anmerkungen:

- Zusammenbau von Belastungseinheit und Widerlagereinheit vor Montage in der Verblasöffnung
- Verlängerung des Wegtasters nicht abgebildet

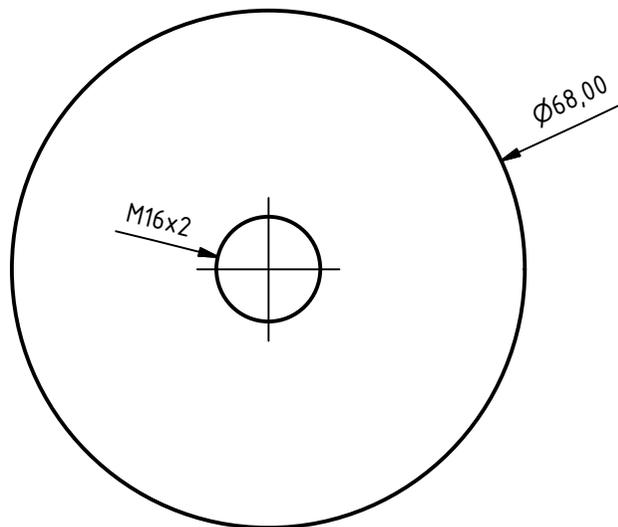
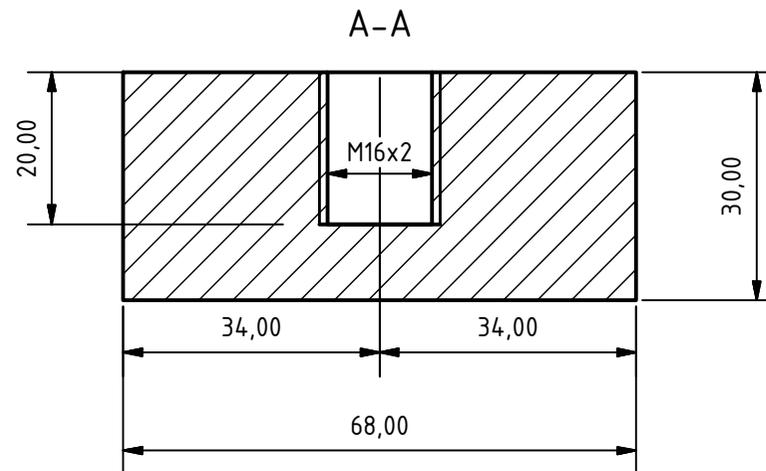
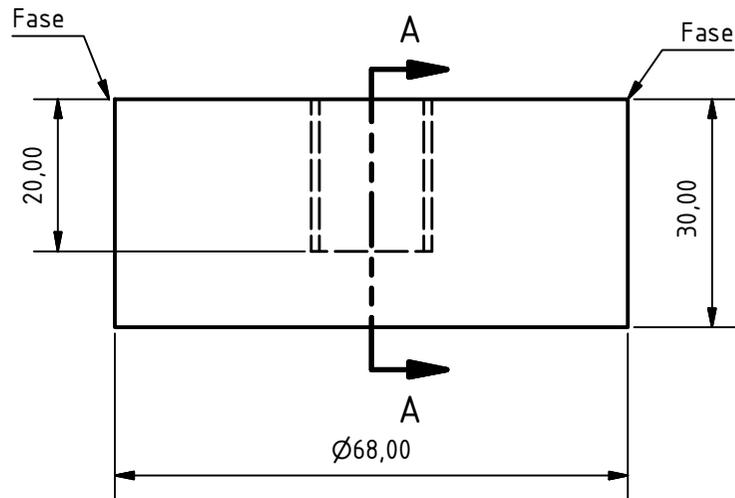
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Hauptkomponenten	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	08.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:3		Montageschema		03	
Alle Maße in mm.				A4	



Anmerkungen:

- Befestigung in der Verblasöffnung erfolgt mit vier Montagewinkel (nicht abgebildet)
- Zusammenbau der Messvorrichtung bereits vor Einbau in der Verblasöffnung

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Messvorrichtung	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	08.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:3		Montageschema		04	
Alle Maße in mm.				A4	



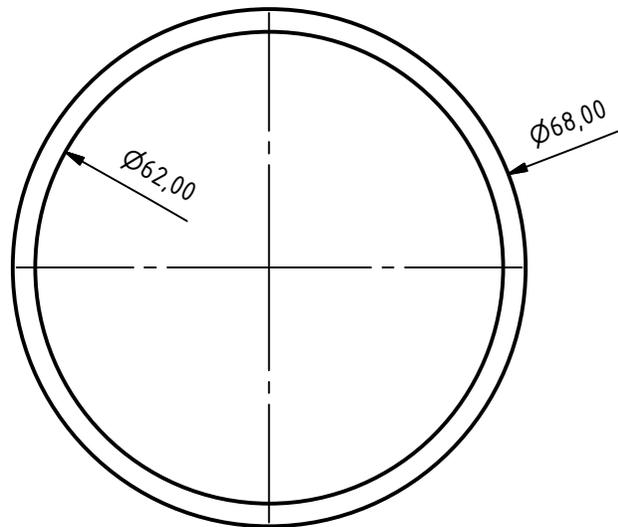
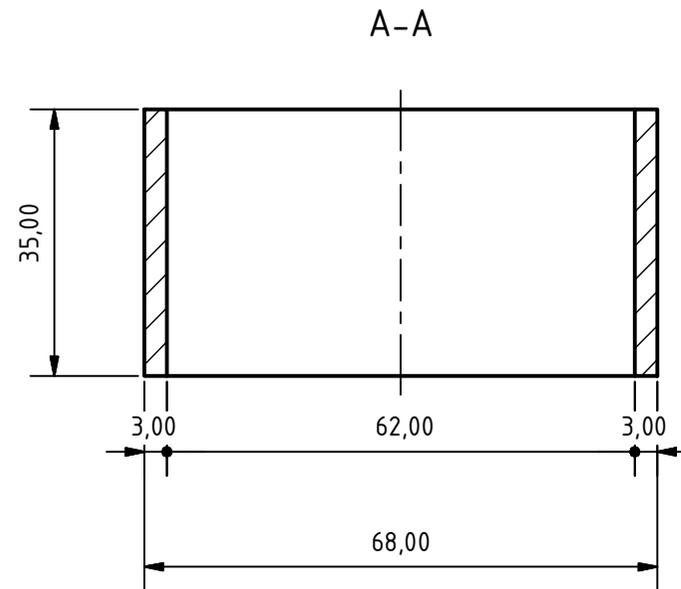
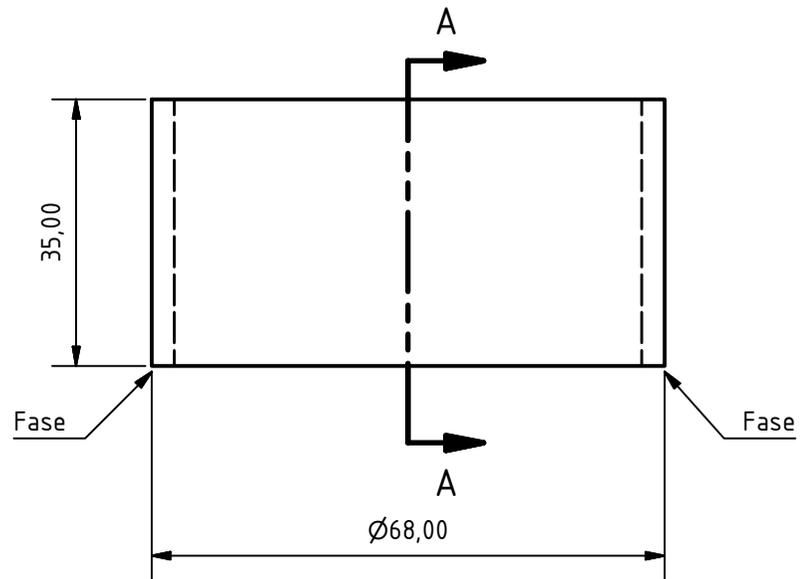
Material:

- Rundstahl | S355J2G3
- Bearbeitung: CNC-Drehen

Anmerkungen:

- Anpassung des Gewindes an Verlängerung - Zylinderkolben
- Flächenbündige Verbindung mit Verlängerung - Zylinderkolben

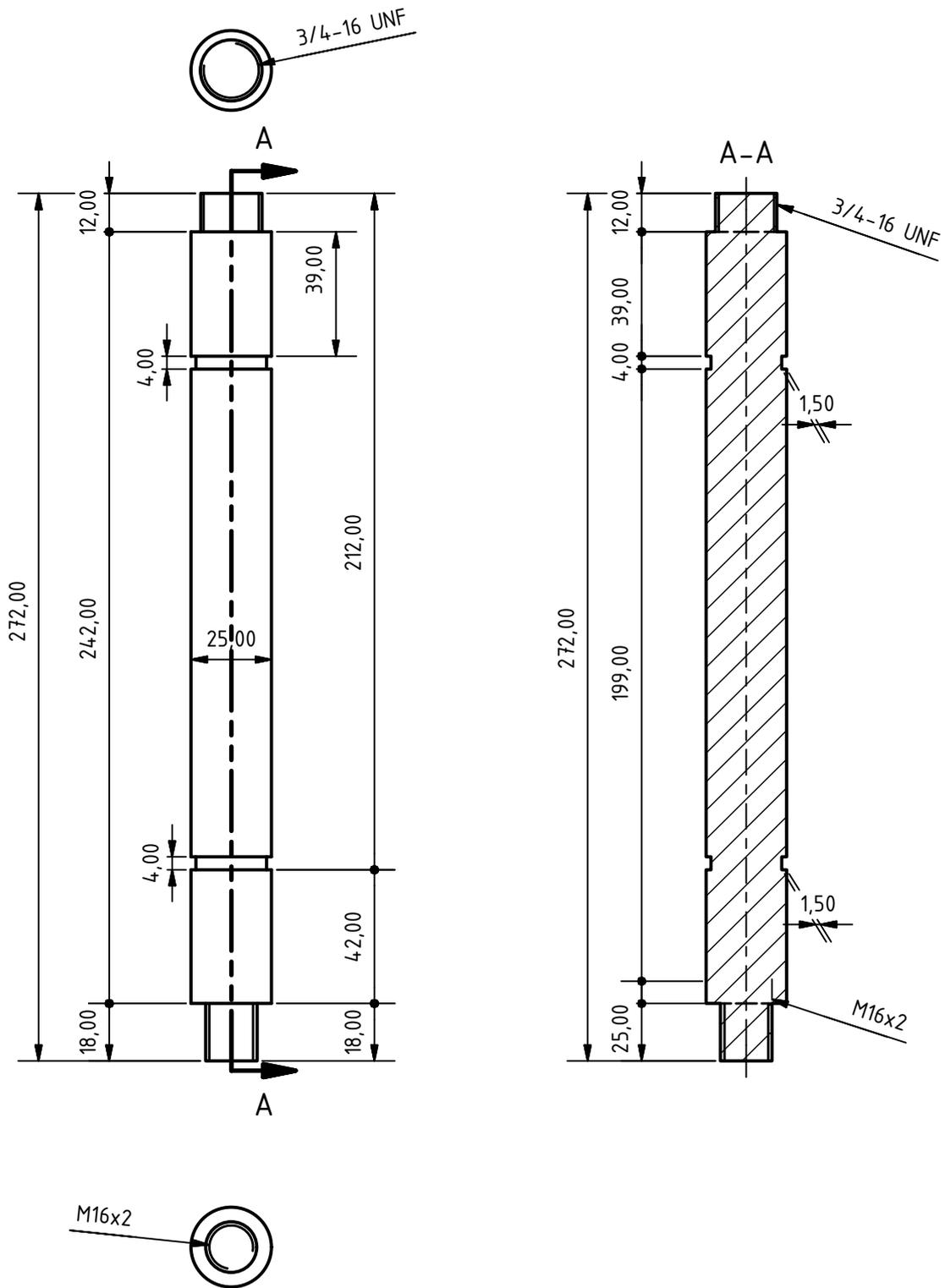
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Lastplatte	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:1				Konstruktionszeichnung	
Alle Maße in mm.					
					01 A4



Material:

- Rundstahl | S355J2G3
- Bearbeitung: CNC-Drehen

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Schutzrohr	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:1				Konstruktionszeichnung	
Alle Maße in mm.				02 A4	



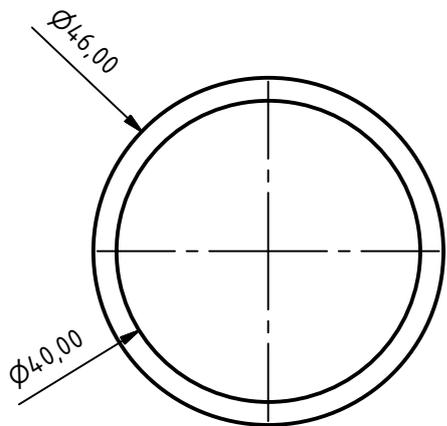
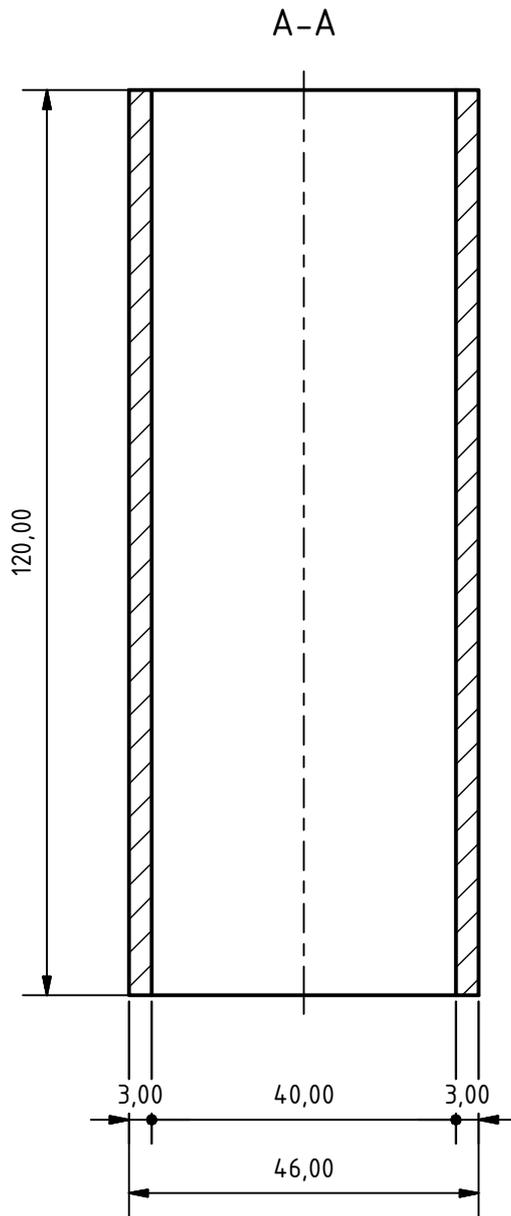
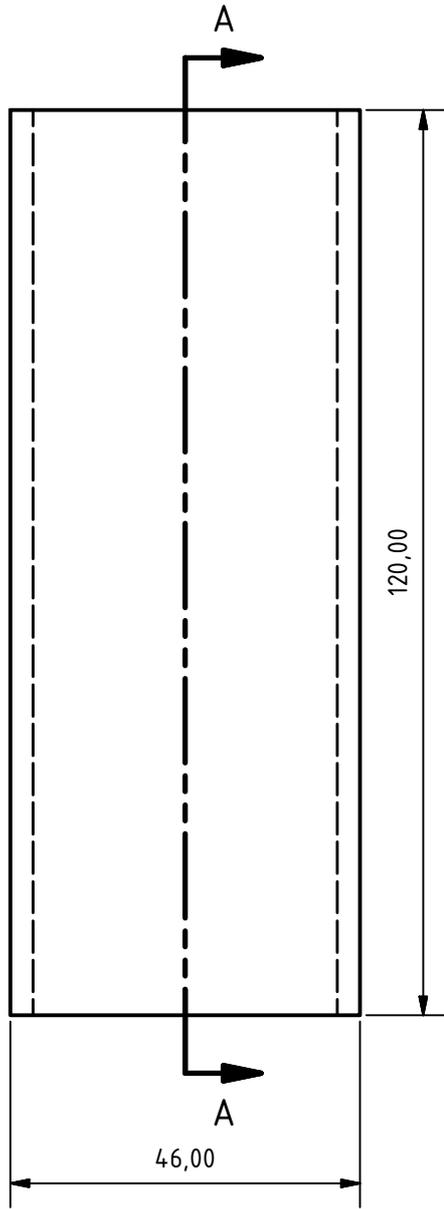
Material:

- Rundstahl | S355J2G3
- Bearbeitung: CNC-Drehen

Anmerkungen:

- Flächenbündige Verbindung mit Lastplatte
- Flächenbündige Verbindung mit Zylinderkolben

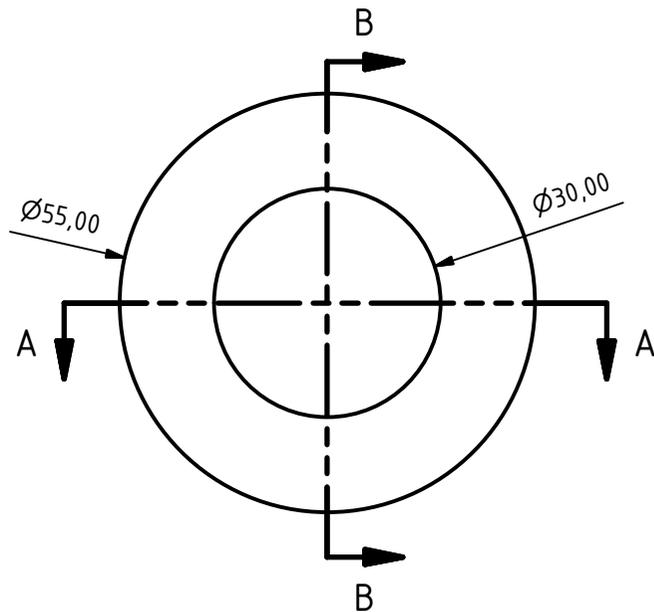
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Verlängerung - Zylinderkolben	
Zeichner	04.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Konstruktionszeichnung	
M 1:2		03			
Alle Maße in mm.				A4	



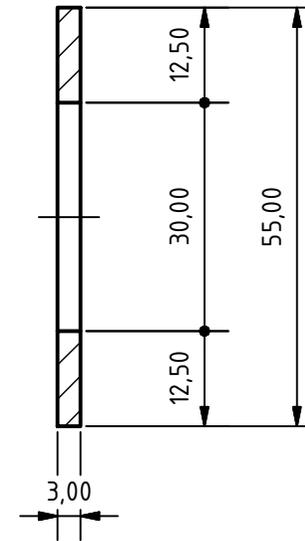
Material:

- Stahlrohr | X2CrNi12
- Bearbeitung: CNC-Drehen

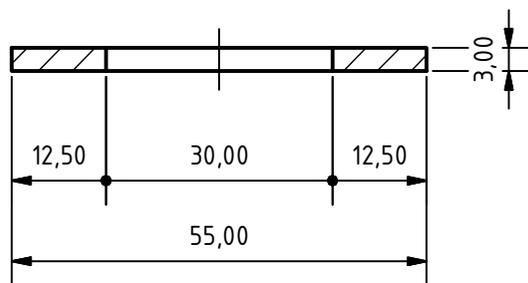
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Zylinderrohr	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:1		Konstruktionszeichnung		04	
Alle Maße in mm.				A4	



B-B



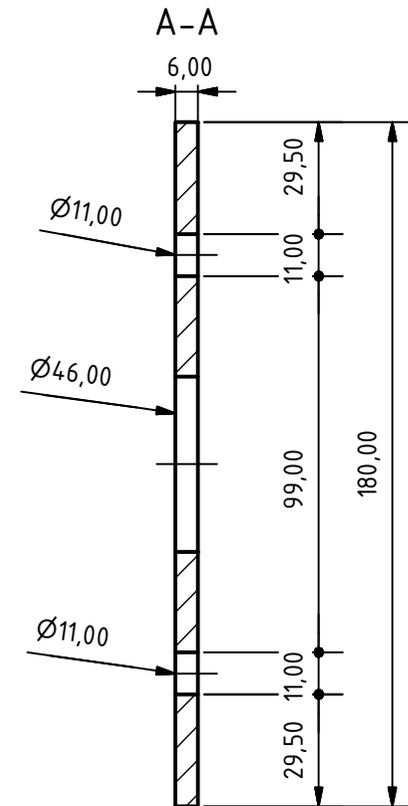
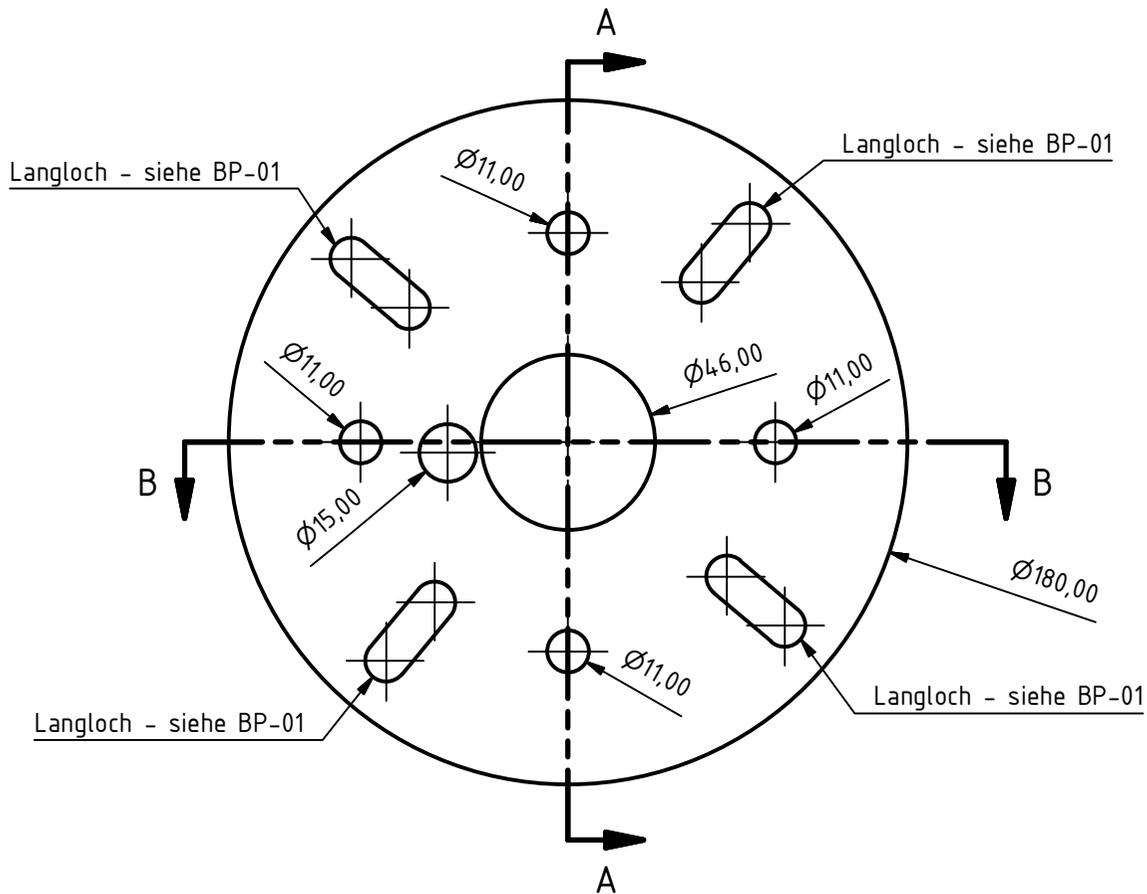
A-A



Material:

- Stahlblech 3 mm | S355J2+N
- Bearbeitung: Laserzuschnitt

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Zylinderkopfplatte	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Konstruktionszeichnung	
M 1:1		05			
Alle Maße in mm.				A4	

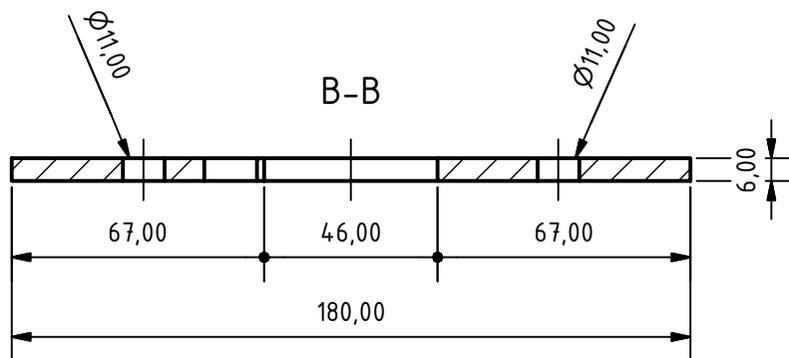


Material:

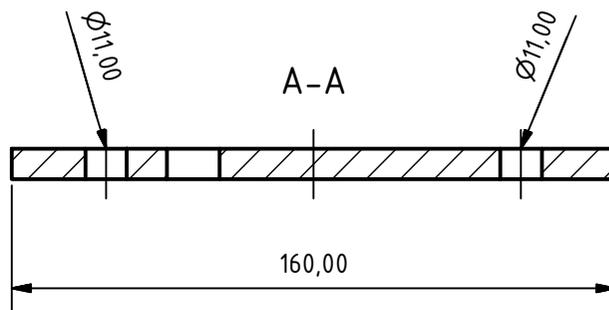
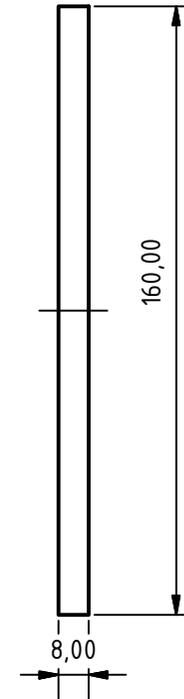
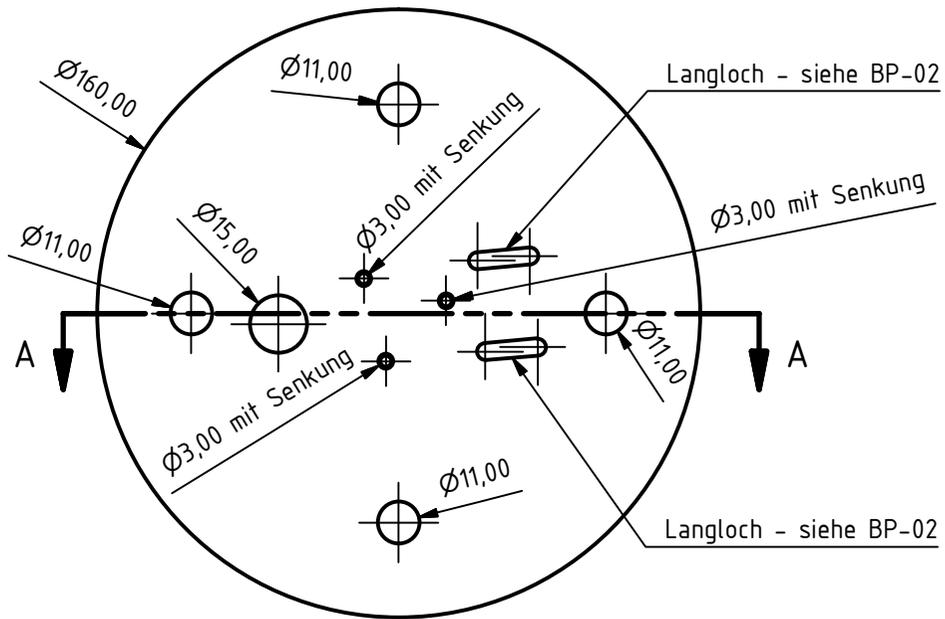
- Stahlblech 6 mm | S355J2+N
- Bearbeitung: Laserzusschnitt

Anmerkungen:

- Bohrpositionen siehe Bohrpositionen 01



FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
Datum	05.07.2016	Name	Lagger	Befestigungsplatte	
Zeichner	05.07.2016	Lagger	Lagger		
Kontroll.	07.07.2016	Lagger	Lagger		
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Konstruktionszeichnung	
M 1:2					
Alle Maße in mm.				06 A4	



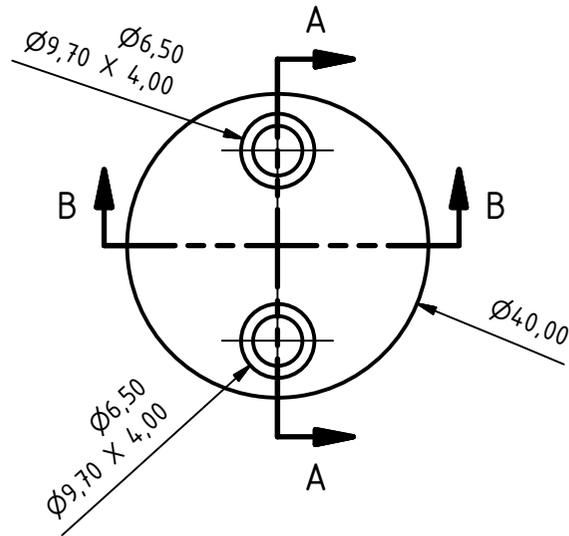
Material:

- Stahlblech 8 mm | S355J2+N
- Bearbeitung: Laserzuschchnitt und CNC-Fräsen

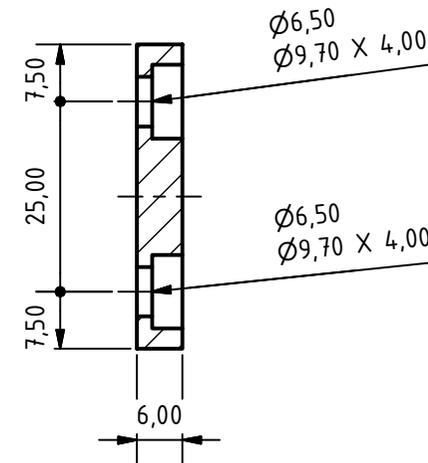
Anmerkungen:

- Bohrpositionen siehe Bohrpositionen 02

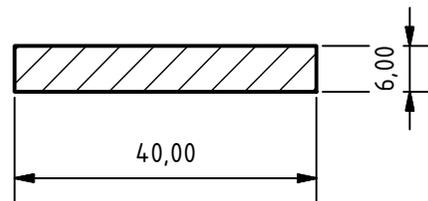
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Widerlagerplatte	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Konstruktionszeichnung	
M 1:2					
Alle Maße in mm.				07 A4	



A-A



B-B



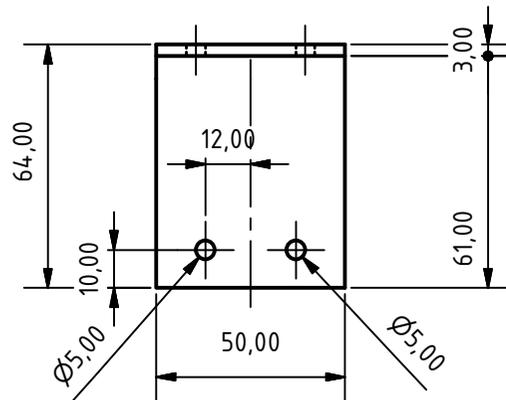
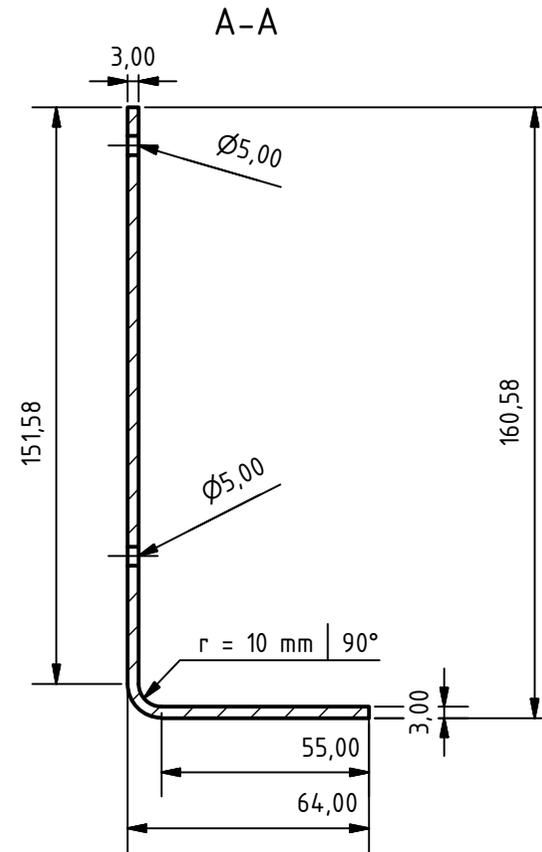
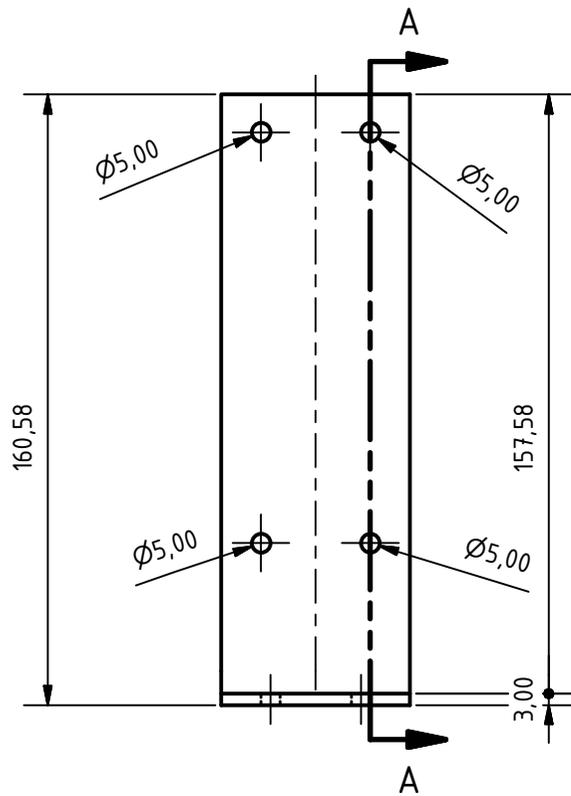
Material:

- Rundstahl 6 mm | S355J2G3
- Bearbeitung: CNC-Drehen

Anmerkungen:

- Anpassung der Senkung an Senkkopfschraube mit Innensechskant
- Gewinde für Senkkopfschraube: 1/4" - 20UNC
- Senkkopfschrauben werden an Hydraulikzylinder und Distanzelement angepasst

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Distanzelement	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Konstruktionszeichnung	
M 1:1					
Alle Maße in mm.				08 A4	



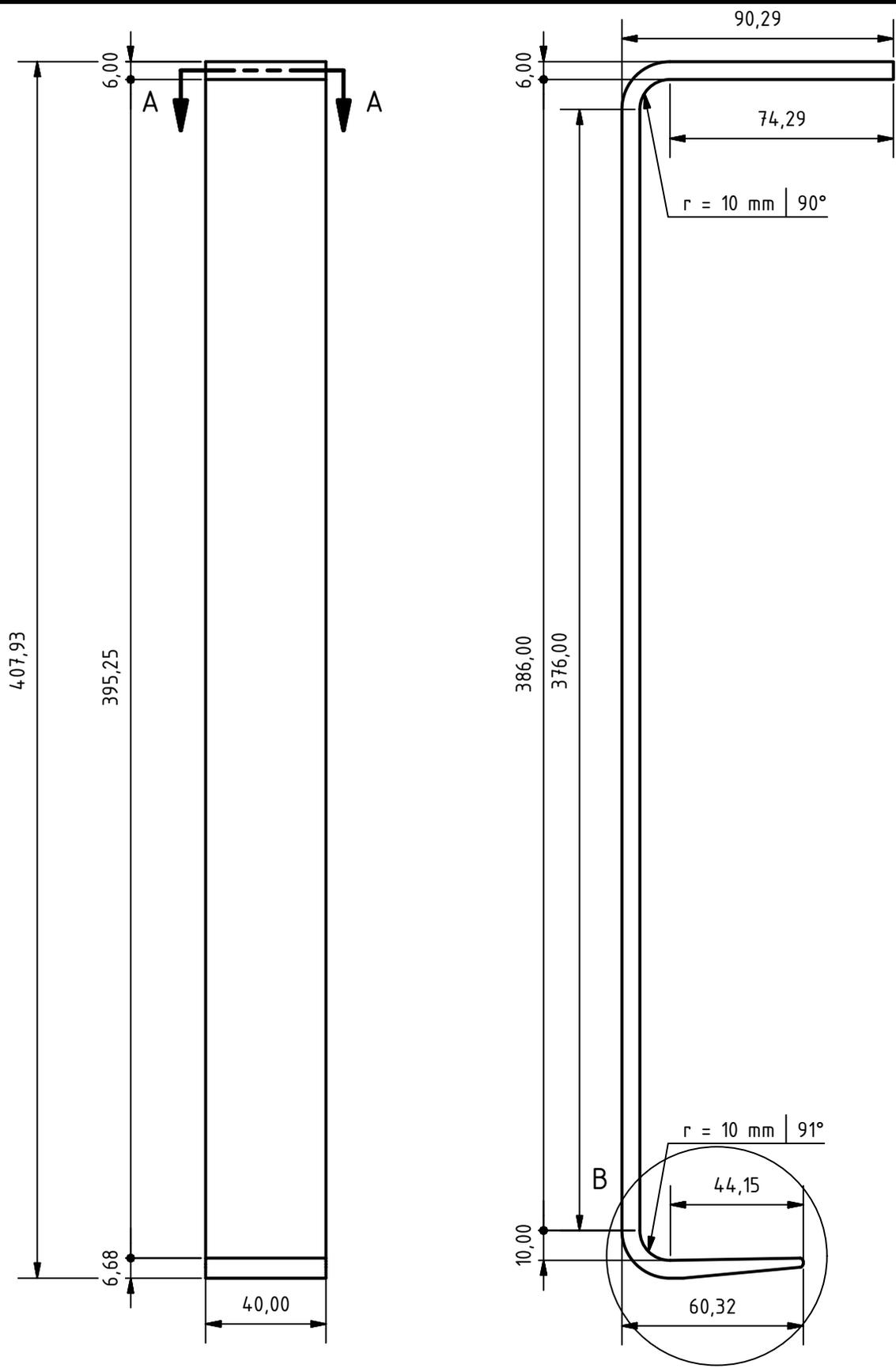
Material:

- Stahlblech 3 mm | S355J2+N
- Bearbeitung: Laserzuschnitt und Kanten

Anmerkungen:

- Abwicklung des Bauteil siehe Abwicklung 01

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Montagewinkel - Wegaufnehmer	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Konstruktionszeichnung	
M 1:1					
Alle Maße in mm.				09 A4	



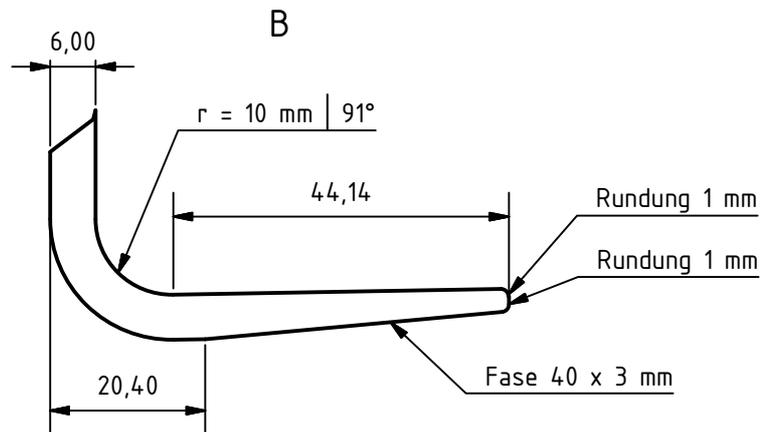
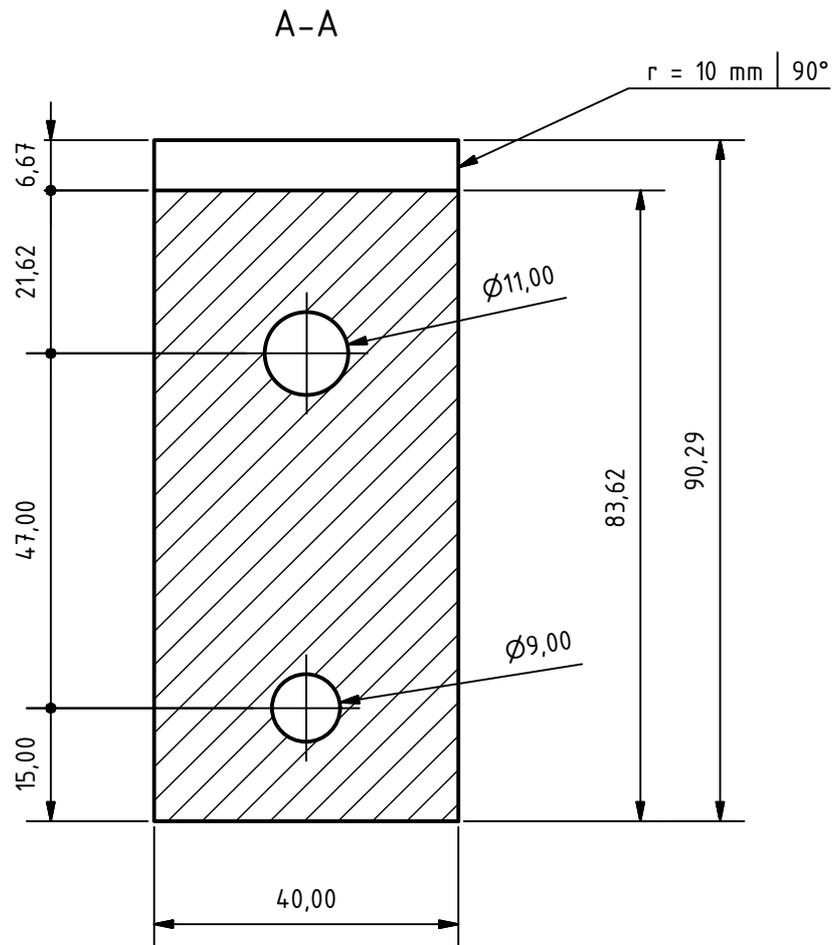
Material:

- Stahlblech 6 mm | S355J2+N
- Bearbeitung: Laserzuschnitt und Kanten

Anmerkungen:

- Abwicklung siehe Abwicklung 02

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Montagewinkel - Messvorrichtung	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:2		Konstruktionszeichnung		10.1	
Alle Maße in mm.				A4	



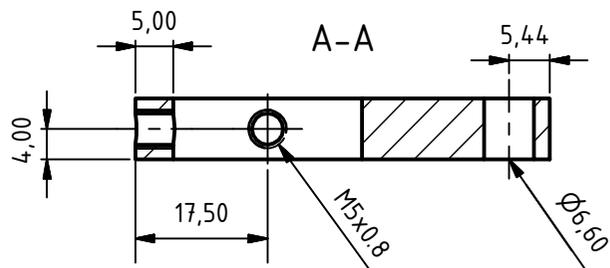
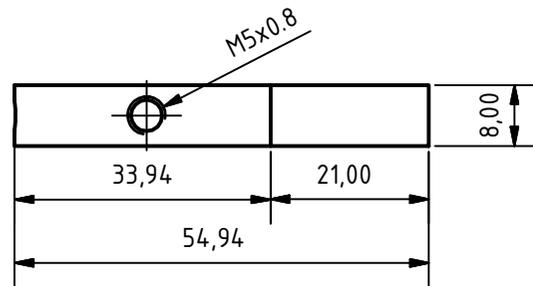
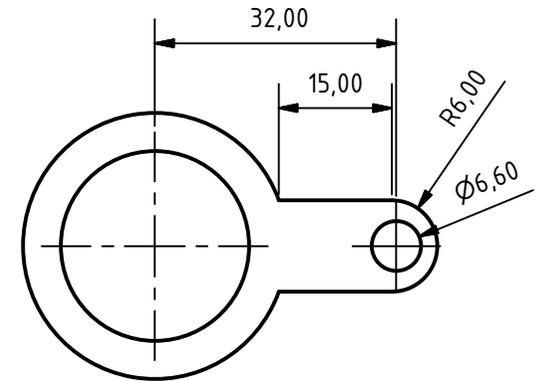
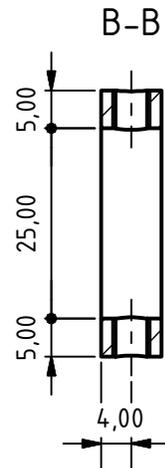
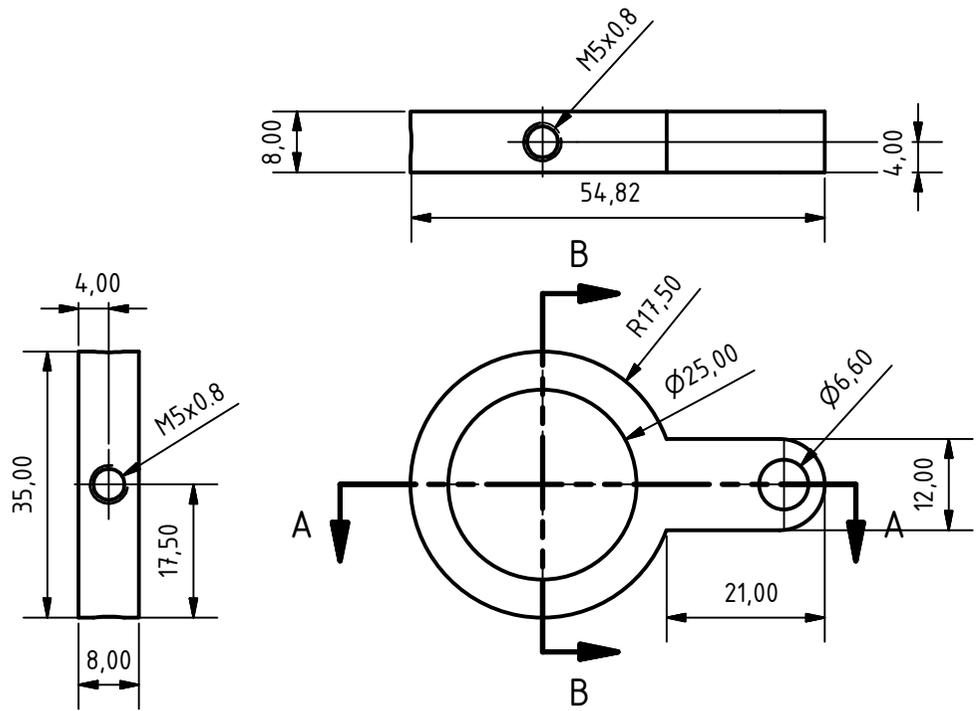
Material:

- Stahlblech 6 mm | S355J2+N
- Bearbeitung: Laserzuschnitt und Kanten

Anmerkungen:

- Abwicklung siehe Abwicklung 02

		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		 Graz University of Technology
		Datum	Name		Montagewinkel - Messvorrichtung
Zeichner	05.07.2016	Lagger		
Kontroll.	07.07.2016	Lagger		
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies			Konstruktionszeichnung	
M 1:1					10.2
Alle Maße in mm.			A4	



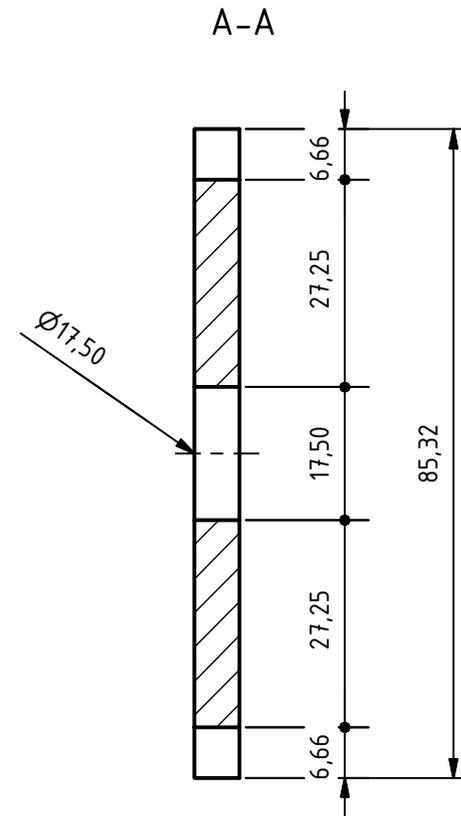
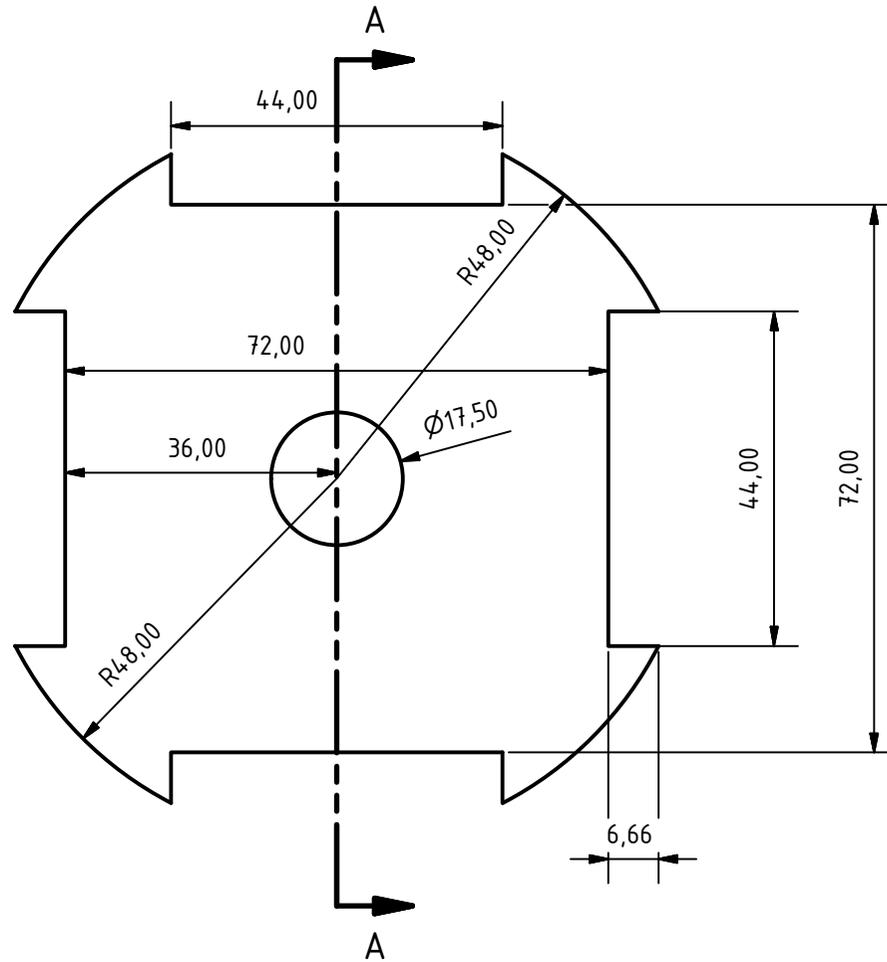
Material:

- Stahlblech 8 mm | S355J2+N
- Bearbeitung: Laserzuschnitt

Anmerkungen:

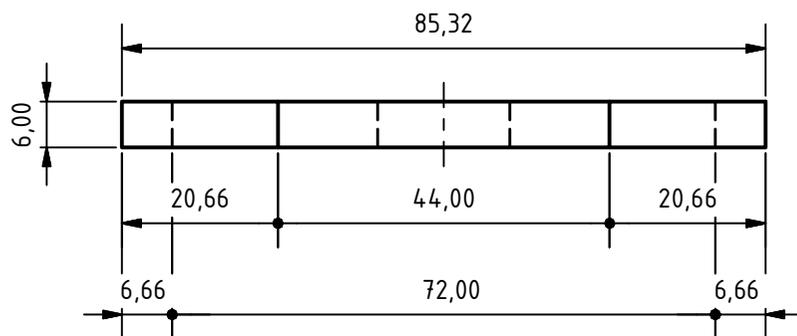
- Bohrungen M5 mit Gewinde durch Fa. Fleischer

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
Datum	05.07.2016	Name	Lagger	Messhorizont	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				M 1:1	
				Konstruktionszeichnung	
				11	
				A4	
Alle Maße in mm.					

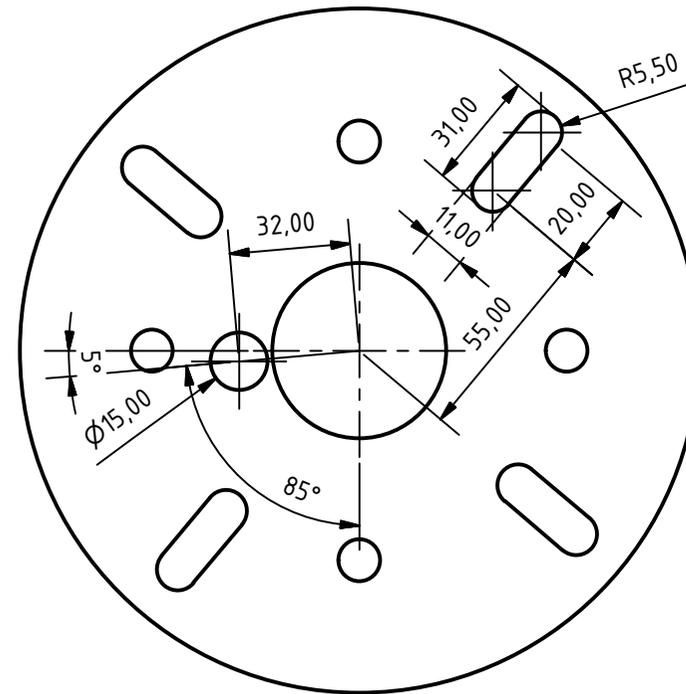
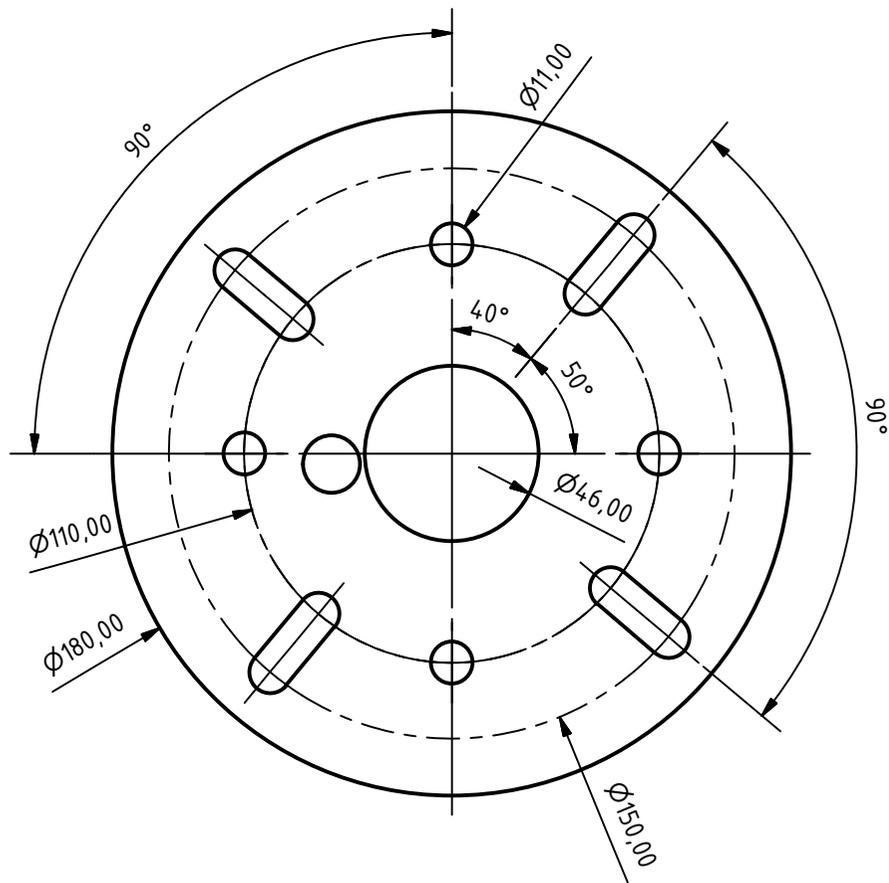


Material:

- Stahlblech 6 mm | S355J2+N
- Bearbeitung: Laserzuschnitt



FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Einrichtplatte	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:1				Konstruktionszeichnung	
Alle Maße in mm.				12 A4	



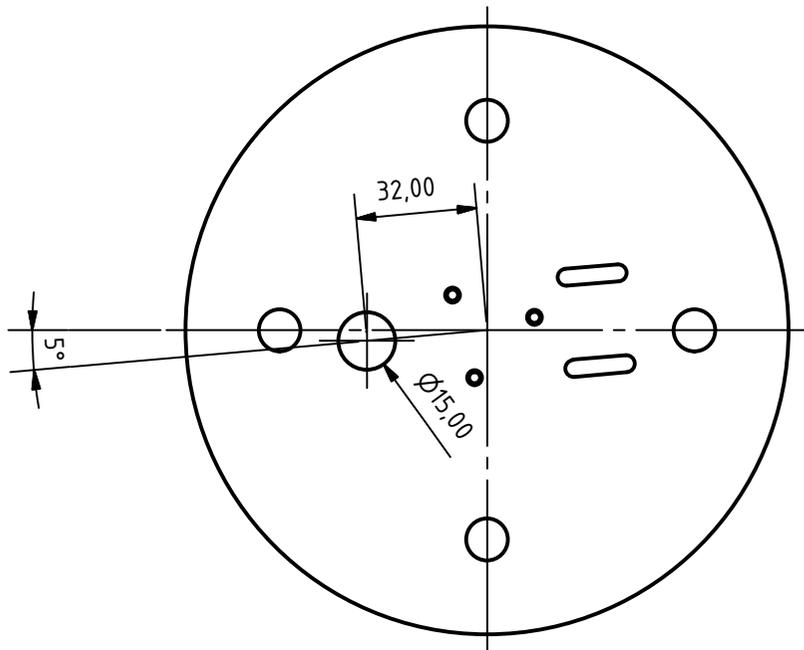
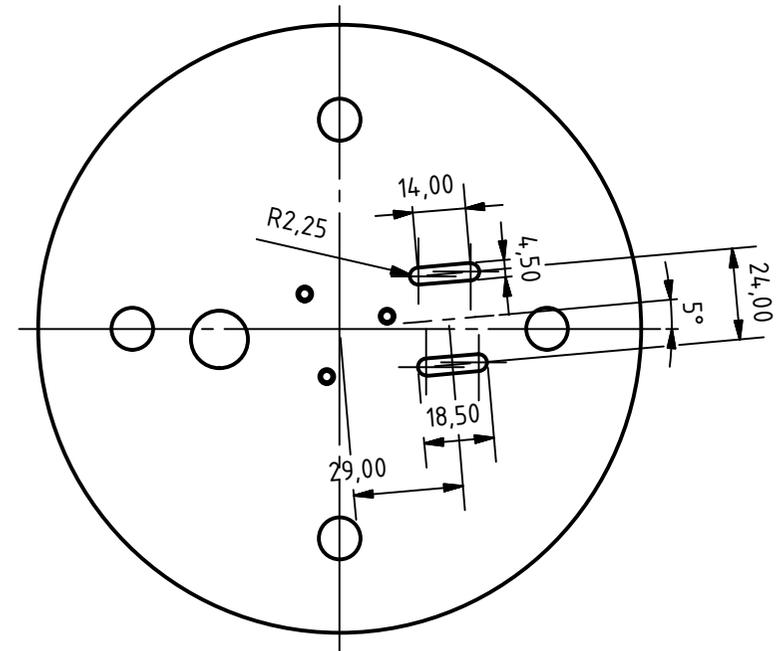
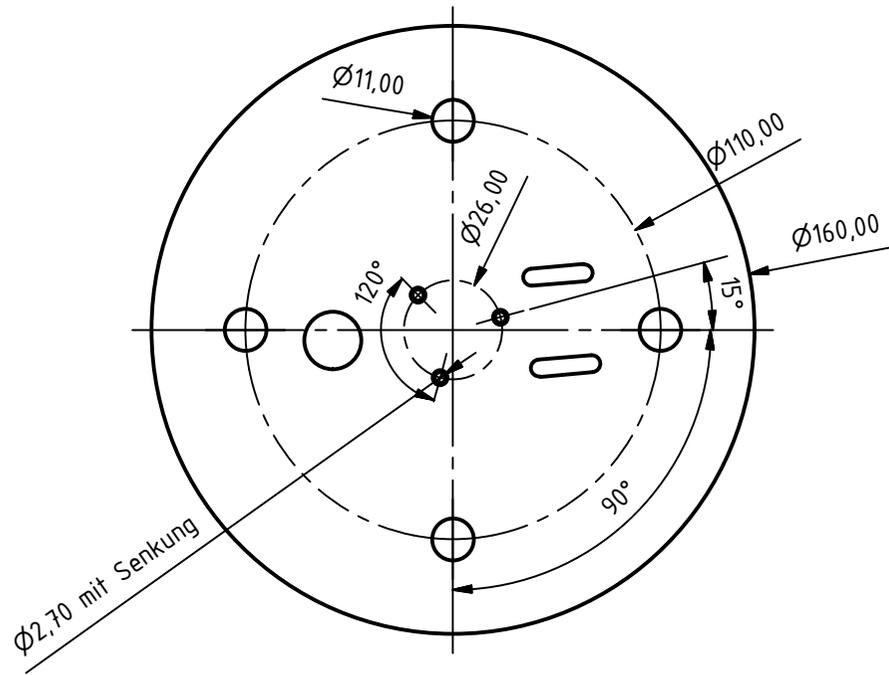
Material:

- Stahlblech 6 mm | S355J2+N
- Bearbeitung: Laserzuschnitt

Anmerkungen:

- Bohrpositionen in Ergänzung zu Konstruktionszeichnung 06

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Befestigungsplatte	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Bohrpositionen	
M 1:2					
Alle Maße in mm.				01 A4	



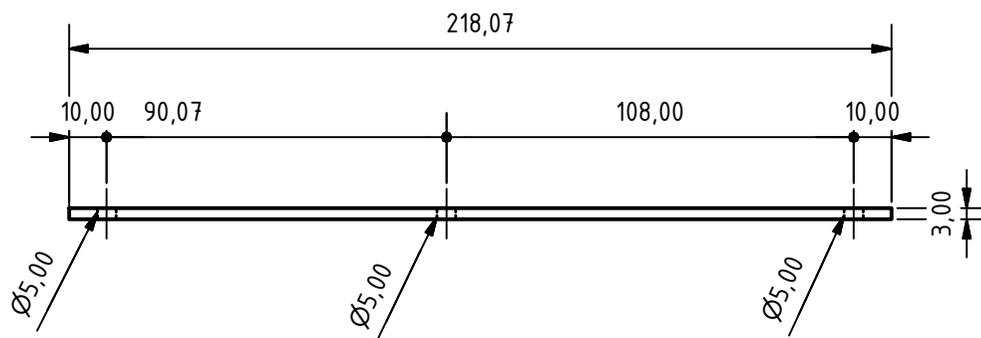
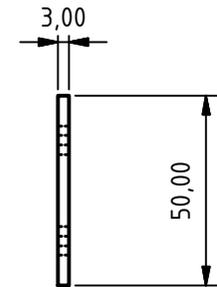
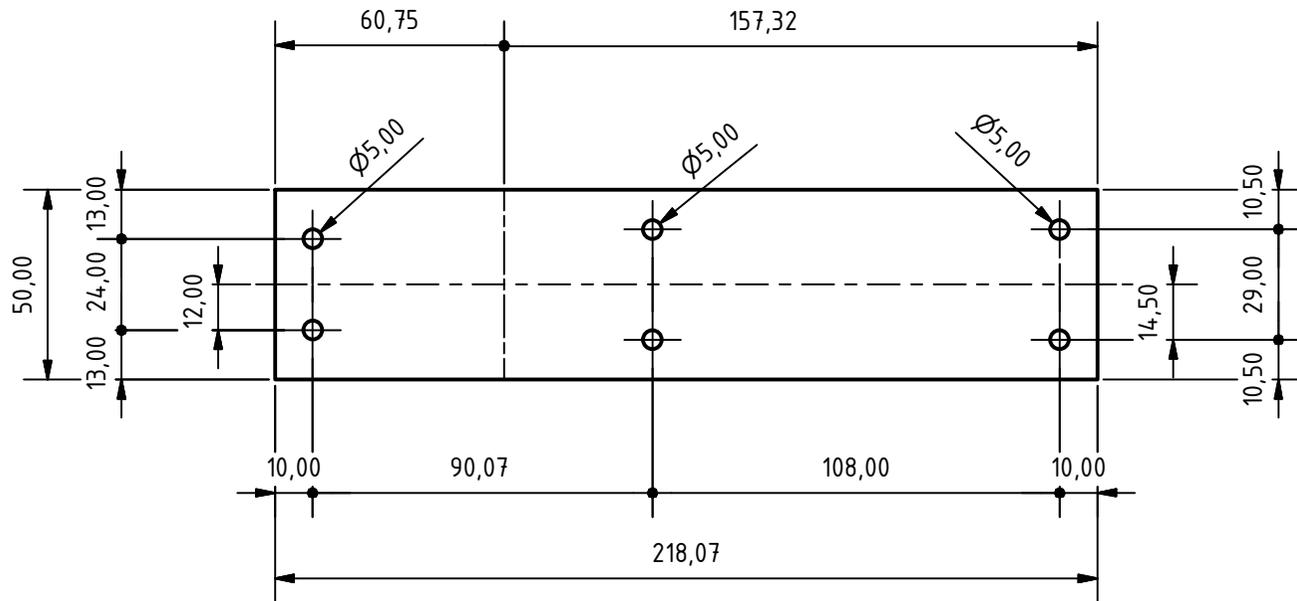
Material:

- Stahlblech 8 mm | S355J2+N
- Bearbeitung: Laserzuschnitt und CNC-Fräsen

Anmerkungen:

- Bohrpositionen in Ergänzung zu Konstruktionszeichnung 07

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Widerlagerplatte	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:2				Bohrpositionen	
Alle Maße in mm.					
					02 A4



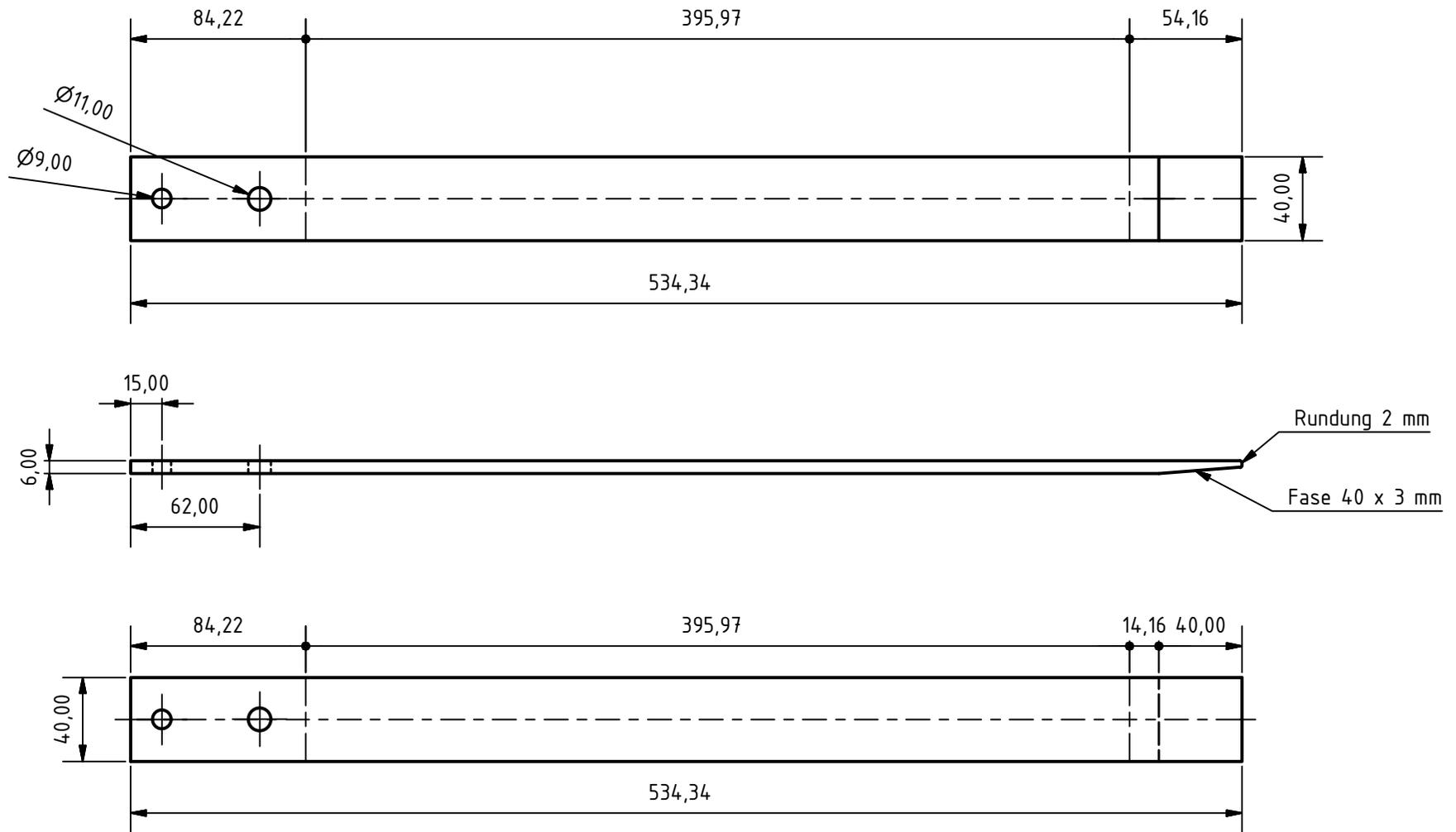
Material:

- Stahlblech 3 mm | S355J2+N
- Bearbeitung: Laserzusschnitt und Kanten

Anmerkung:

- Abwicklung in Ergänzung zu Konstruktionszeichnung 09

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Montagewinkel - Wegaufnehmer	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Abwicklung	
M 1:1					
Alle Maße in mm.				01 A4	



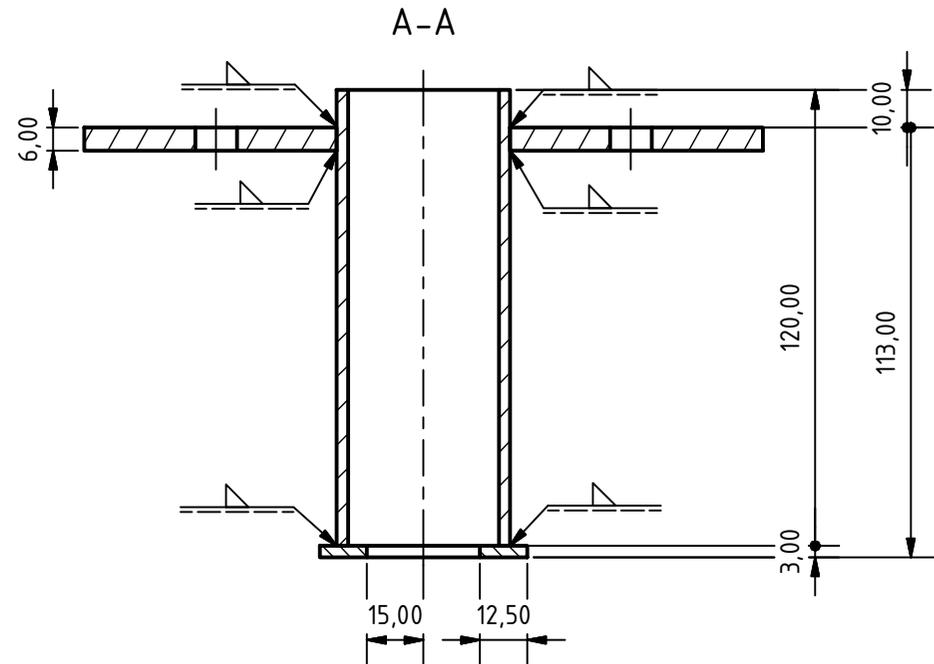
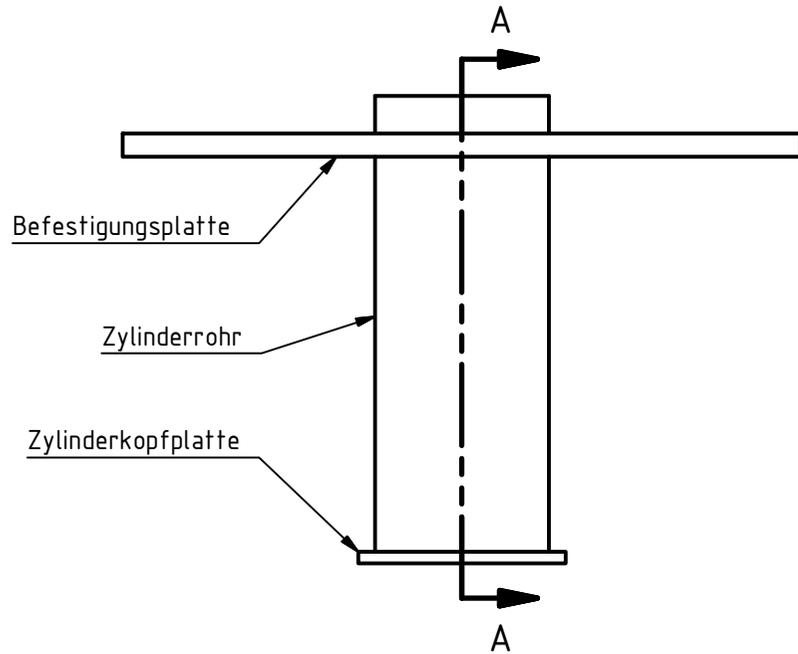
Material:

- Stahlblech 6 mm | S355J2+N
- Bearbeitung: Laserzuschnitt und Kanten

Anmerkungen:

- Abwicklung in Ergänzung zu Konstruktionszeichnung 10

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Montagewinkel - Messvorrichtung	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Abwicklung	
M 1:3					
Alle Maße in mm.				02 A4	



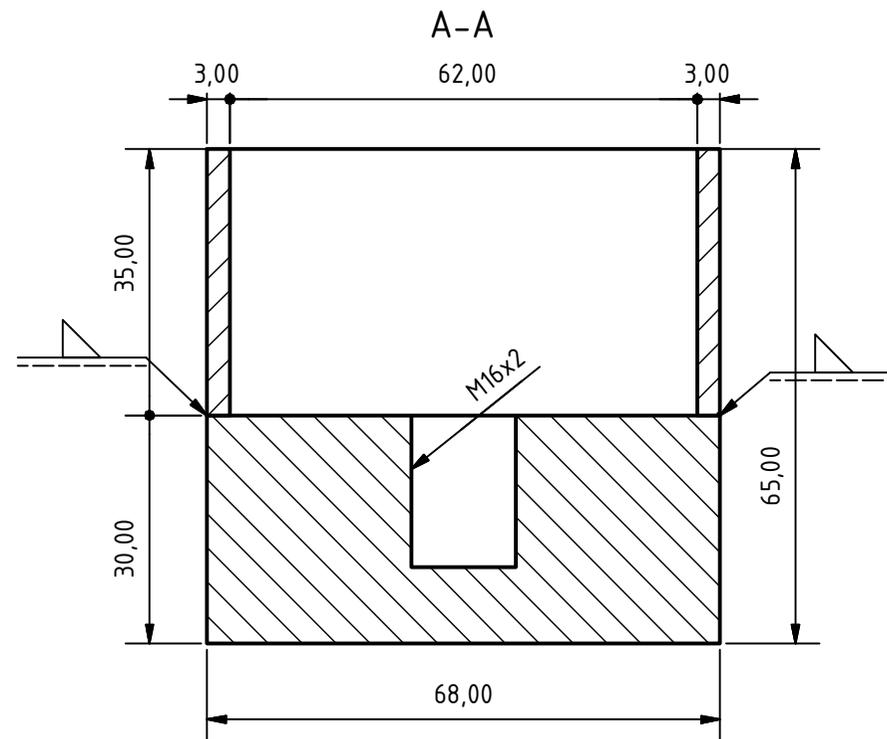
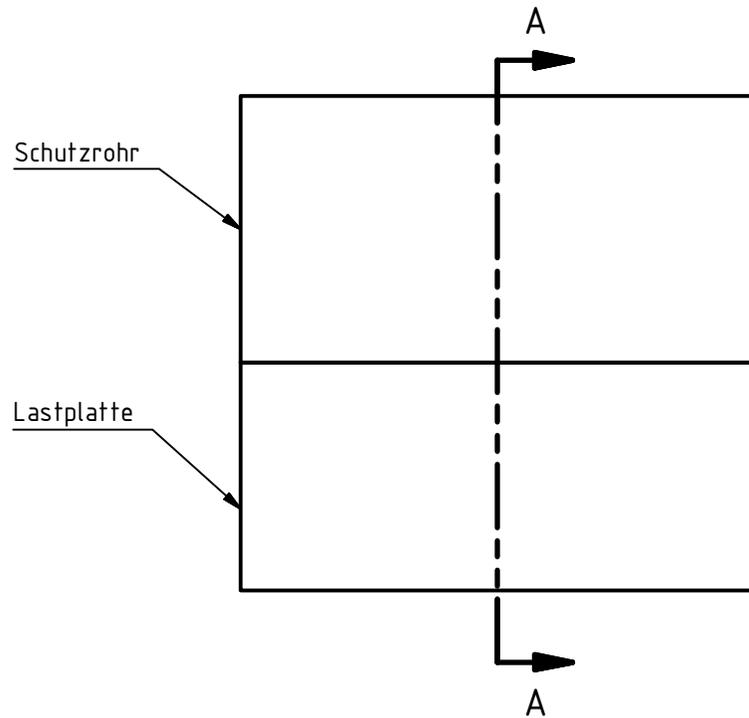
Material:

- siehe Konstruktionspläne

Schweißnähte:

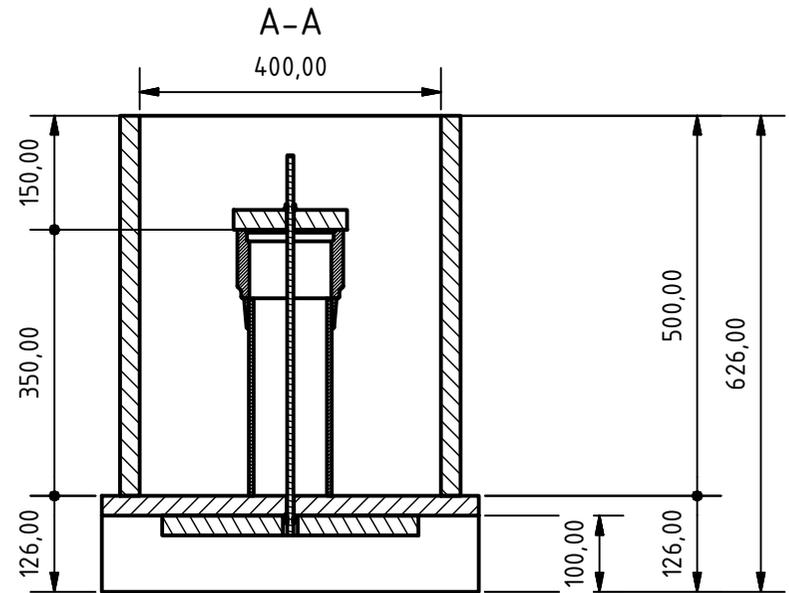
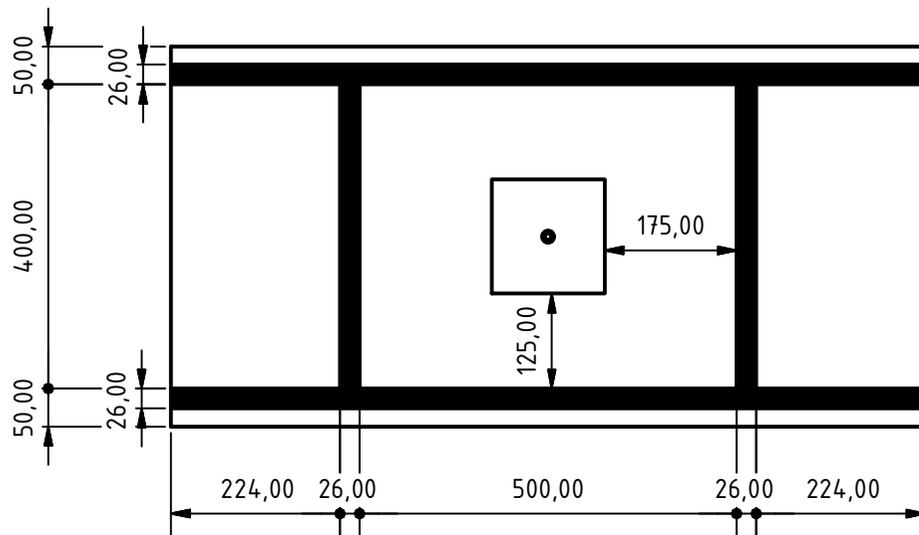
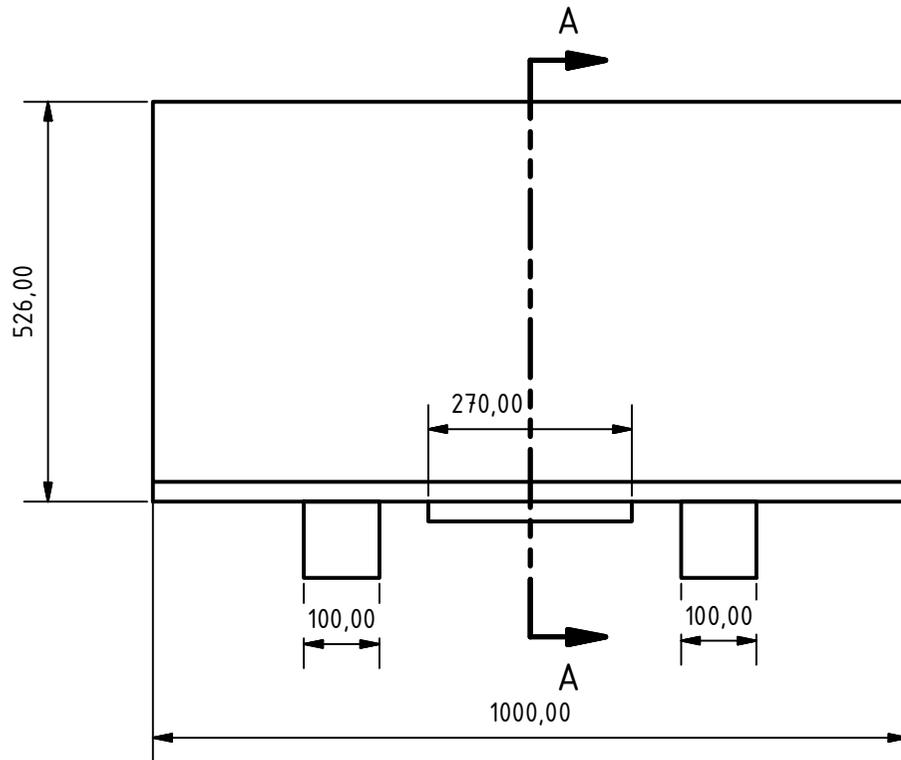
- Schweißnaht wird bei Bohrung $\varnothing 15$ mm bei Bedarf unterbrochen

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Zylinderhalterung	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Schweißplan	
M 1:2					
Alle Maße in mm.					
				01 A4	



Material:
- siehe Konstruktionspläne

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Lastplatte und Schutzrohr	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	07.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Schweißplan	
M 1:1					
Alle Maße in mm.				02 A4	



Schalungsmaterial:

- 3x Schalttafel 1000 x 500 x 26 mm
- 2x Schalttafel 400 x 500 x 26 mm
- 1x Schalttafel 340 x 270 x 26 mm

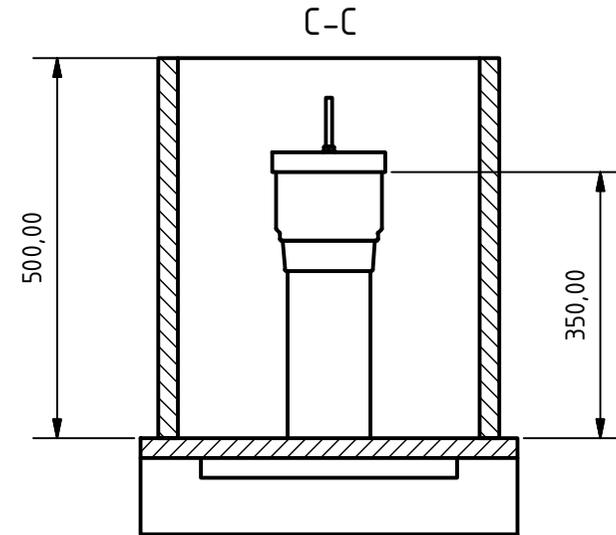
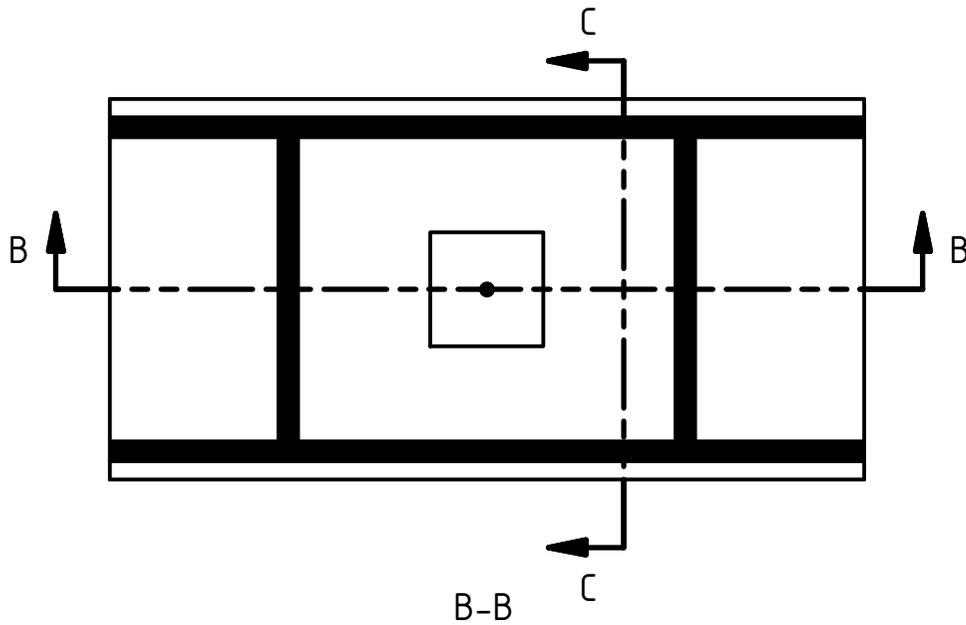
Anmerkungen:

- Verschraubung der Schalttafeln
- Verstärkung durch Stahlwinkel
- Kubatur: 0,07 m³

Abmessungen:

- Innen: 400 x 500 x 500 mm
- betonierter Bereich: 500 x 400 x 350 mm

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
Datum	05.07.2016	Name	Lagger	Tübbingabschnitt	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	08.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				M 1:10	
Schalungsplan				01.1	
Alle Maße in mm.				A4	



Schalungsmaterial:

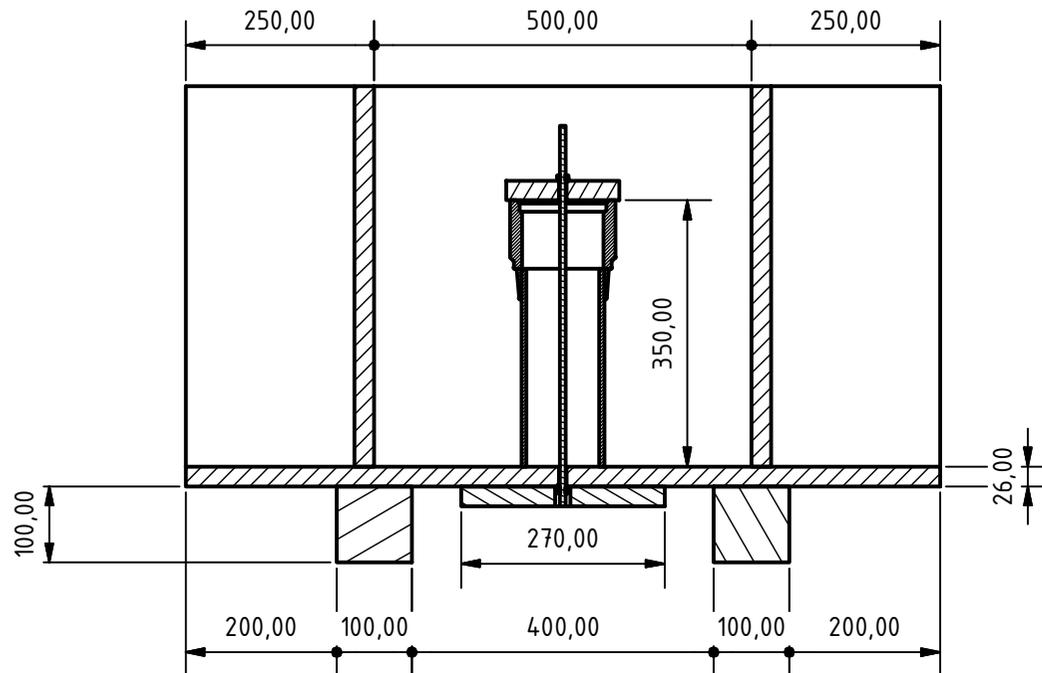
- 3x Schaltafel 1000 x 500 x 26 mm
- 2x Schaltafel 400 x 500 x 26 mm
- 1x Schaltafel 340 x 270 x 26 mm

Anmerkungen:

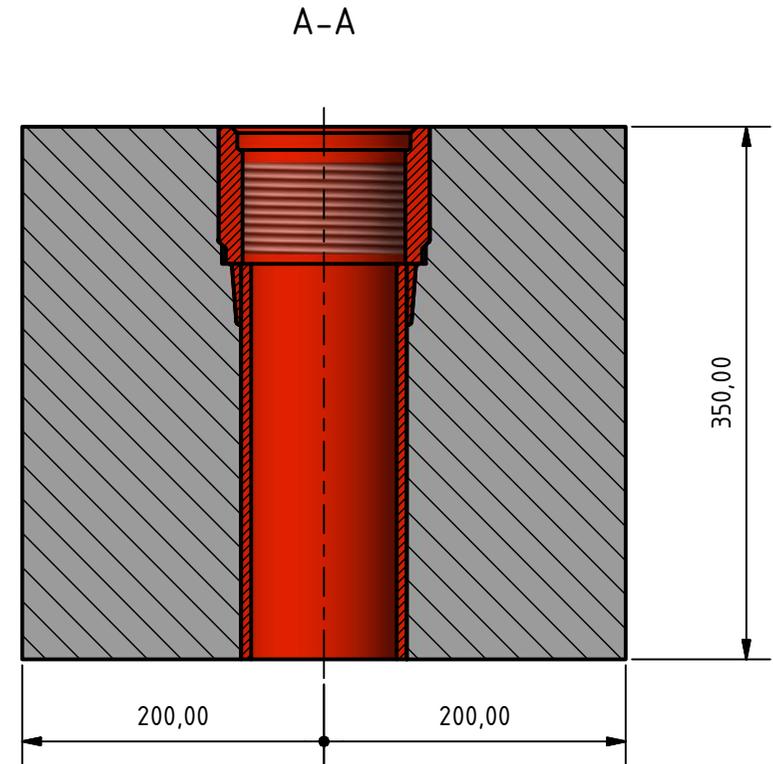
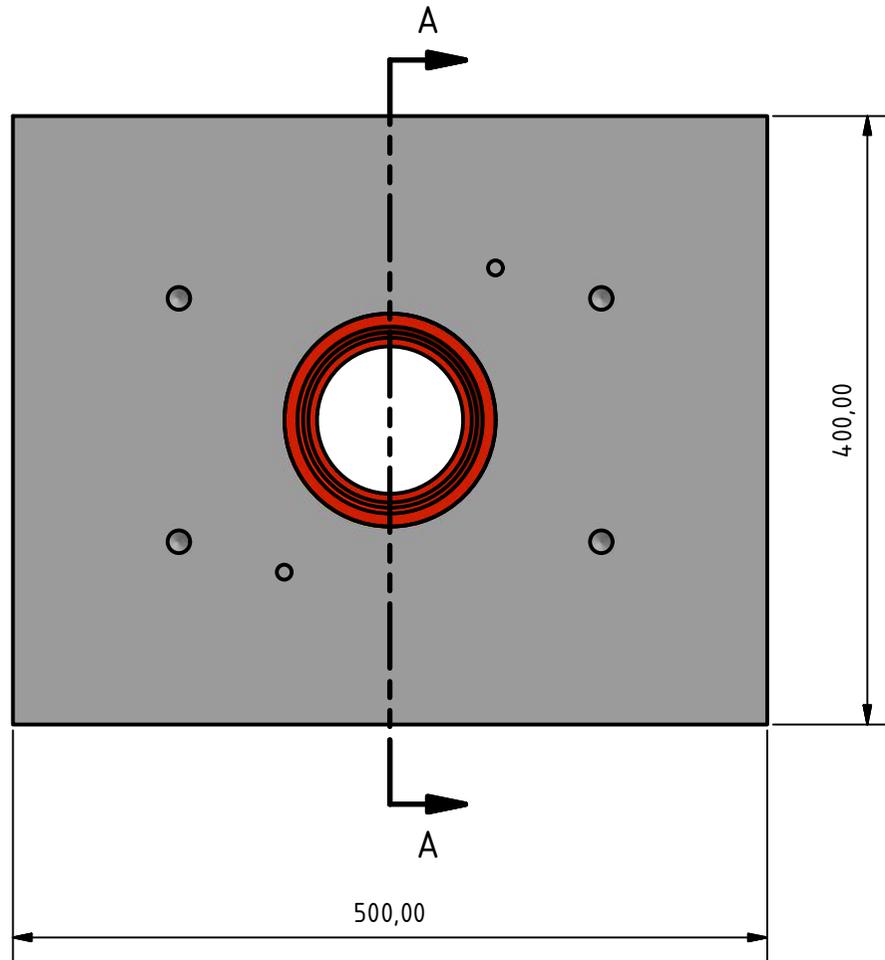
- Verschraubung der Schaltafeln
- Verstärkung durch Stahlwinkel
- Kubatur: 0,07 m³

Abmessungen:

- Innen: 400 x 500 x 500 mm
- betonierter Bereich: 500 x 400 x 350 mm



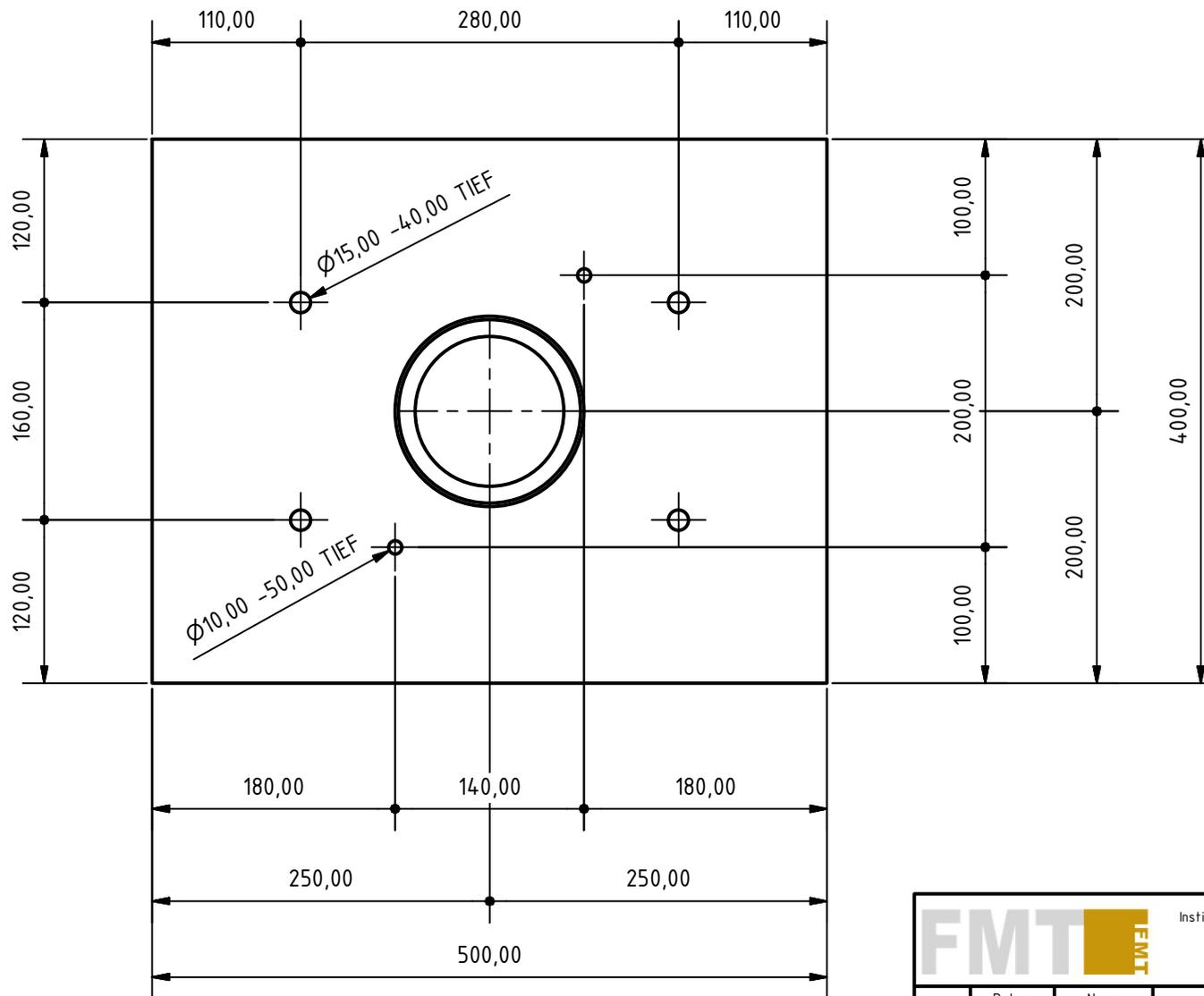
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Tübbingabschnitt	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	08.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:10				Schalungsplan	
Alle Maße in mm.				01.2 A4	



Anmerkungen:

- Betonqualität: C25/30
- Masse: 150 kg
- Darstellung mit Verblasstutzen

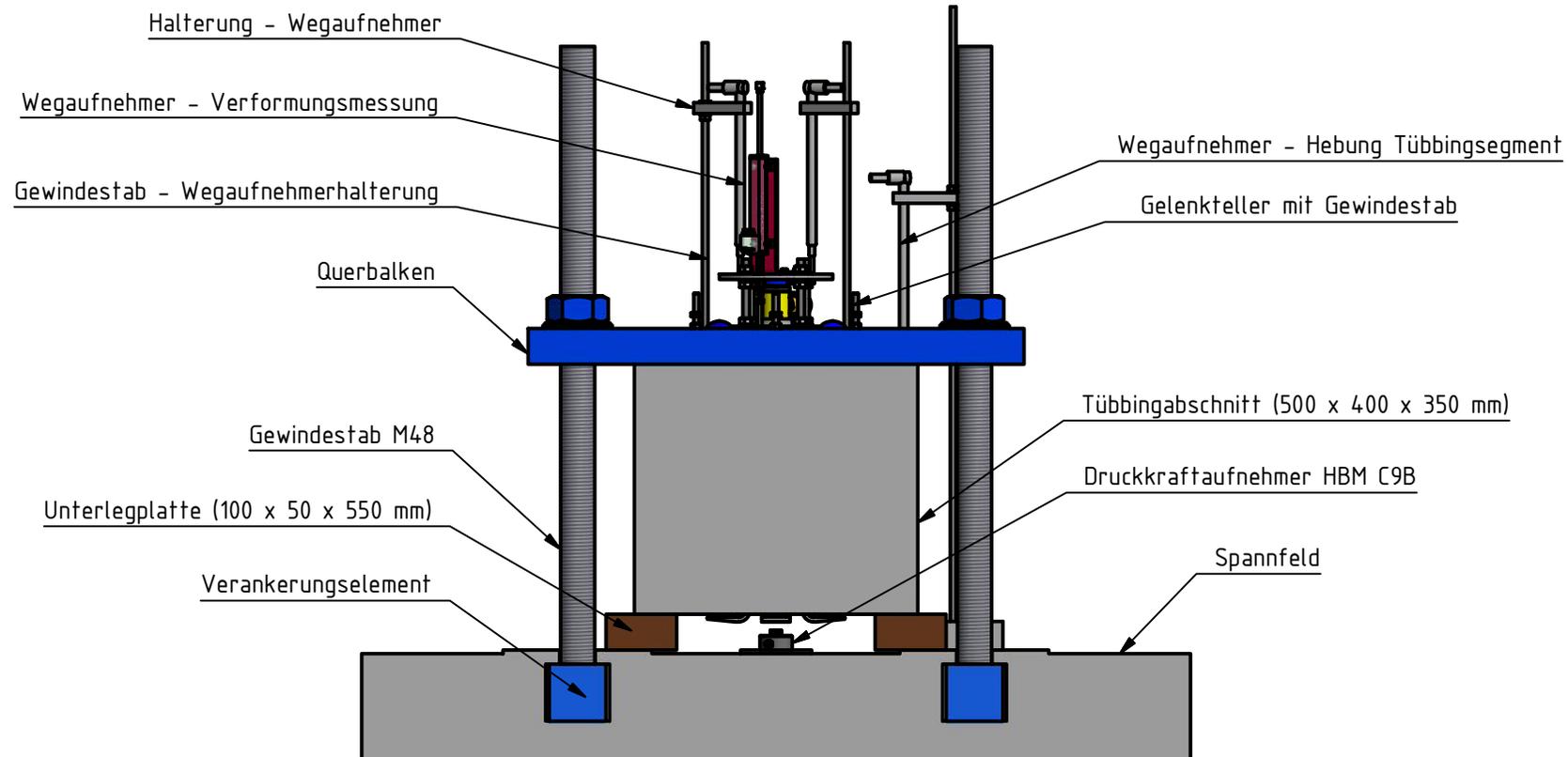
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Tübbingabschnitt	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	08.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Versuchsaufbau	
M 1:5					
Alle Maße in mm.				01.1 A4	



Anmerkungen:

- Betonqualität: C25/30
- Masse: 150 kg

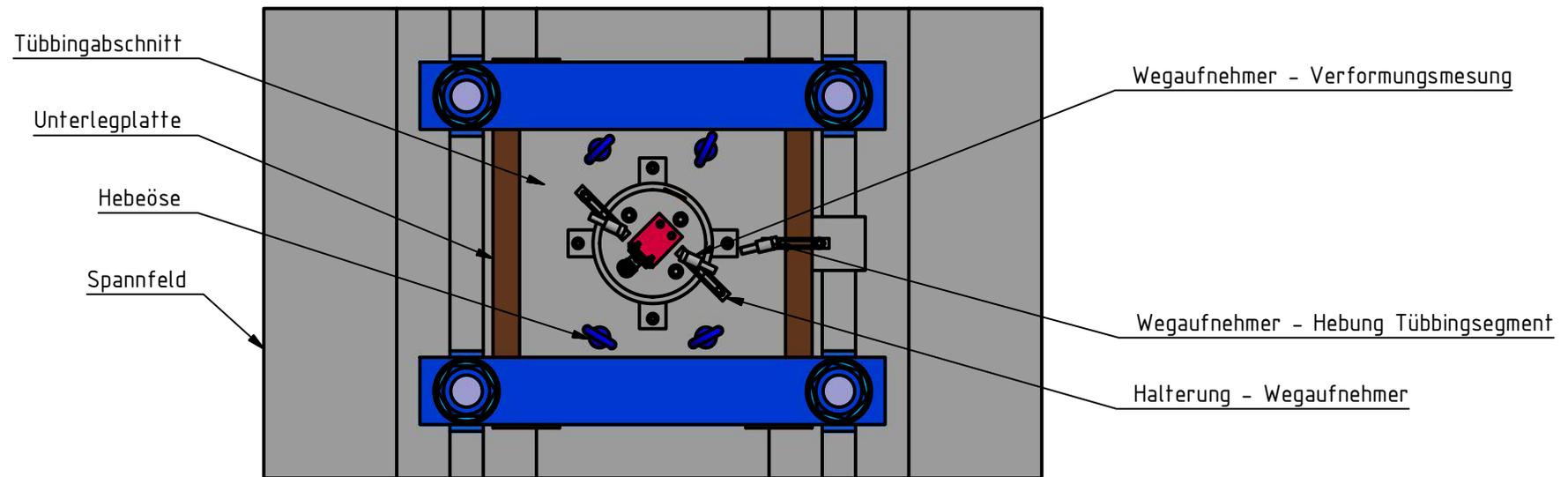
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Tübbingabschnitt	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	08.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:5				Versuchsaufbau	
Alle Maße in mm.				01.2 A4	



Anmerkungen:

- Abspannung des Tübbingabschnitts über Spannfeld
- Aufstellung des Druckkraftaufnehmers zentrisch unter der Lastplatte
- Komponenten der Messvorrichtung sind nicht beschriftet

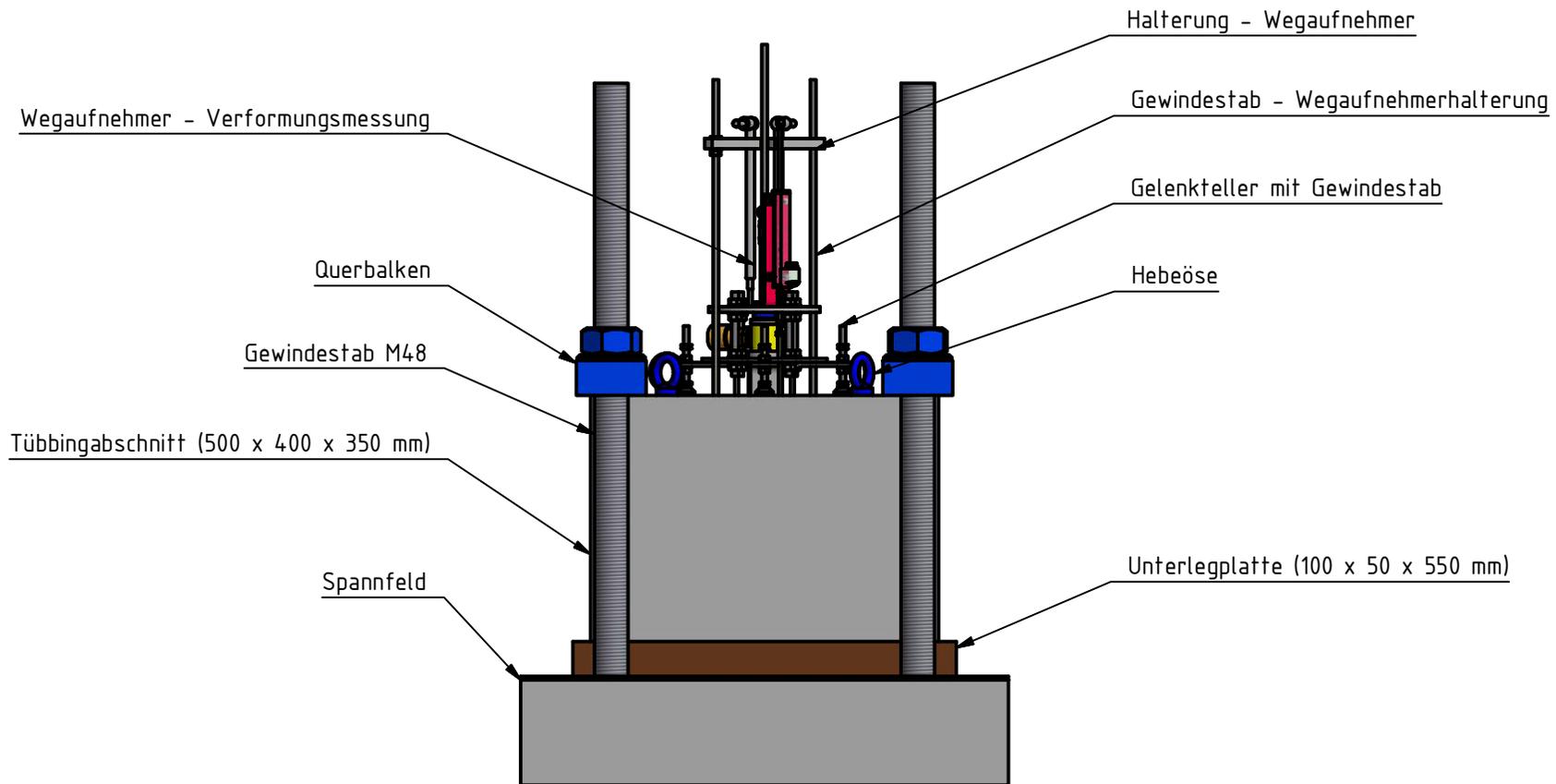
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Funktionstest	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	08.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:10				Versuchsaufbau	02.1
Alle Maße in mm.					



Anmerkungen:

- Abspannung des Tübbingabschnitts über Spannfeld
- Aufstellung des Druckkraftaufnehmers zentrisch unter der Lastplatte
- Komponenten der Messvorrichtung sind nicht beschriftet

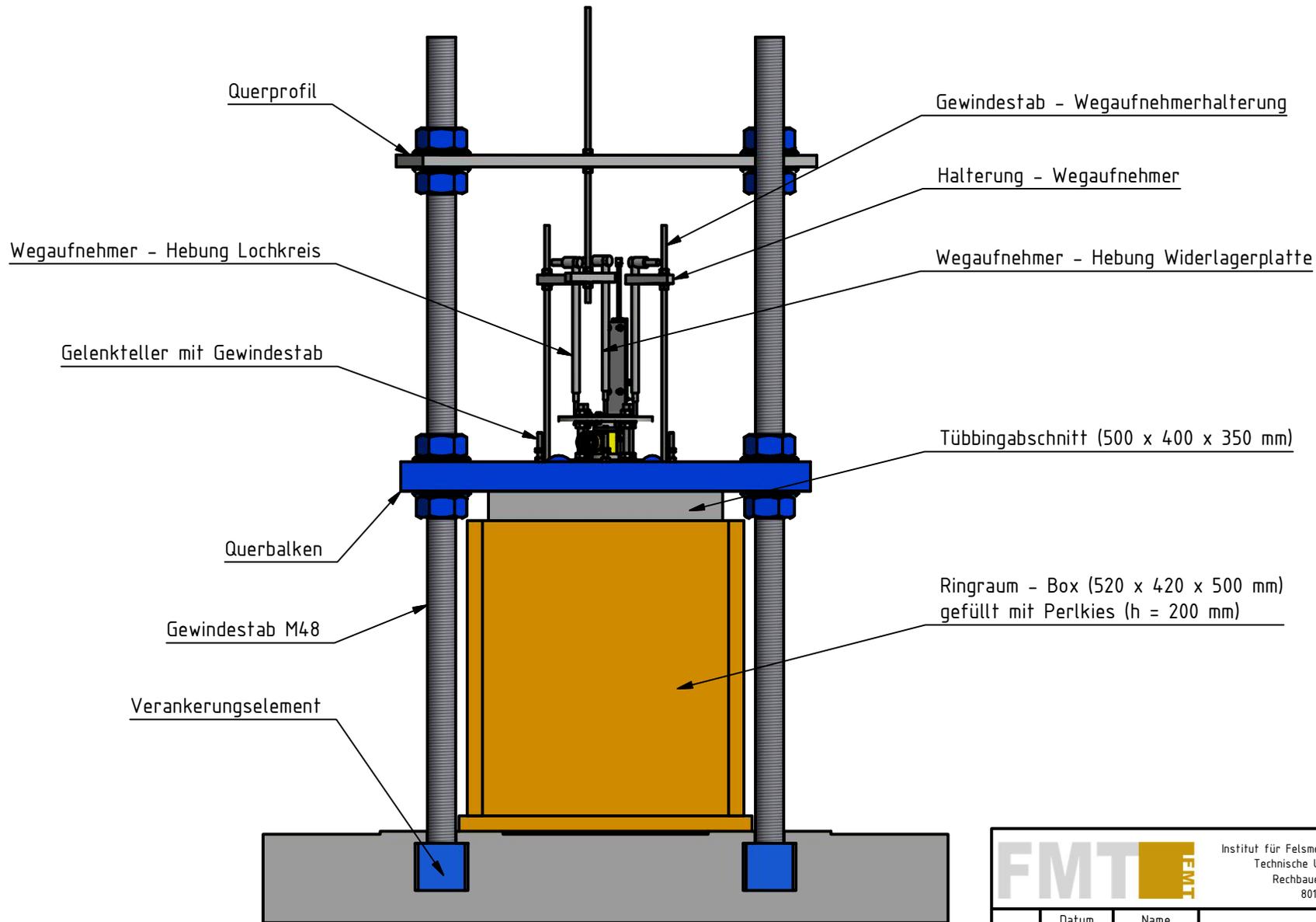
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Funktionstest	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	08.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:10				Versuchsaufbau	
Alle Maße in mm.				02.2 A4	



Anmerkungen:

- Abspannung des Tübbingabschnitts über Spannfeld
- Aufstellung des Druckkraftaufnehmers zentrisch unter der Lastplatte
- Komponenten der Messvorrichtung sind nicht beschriftet

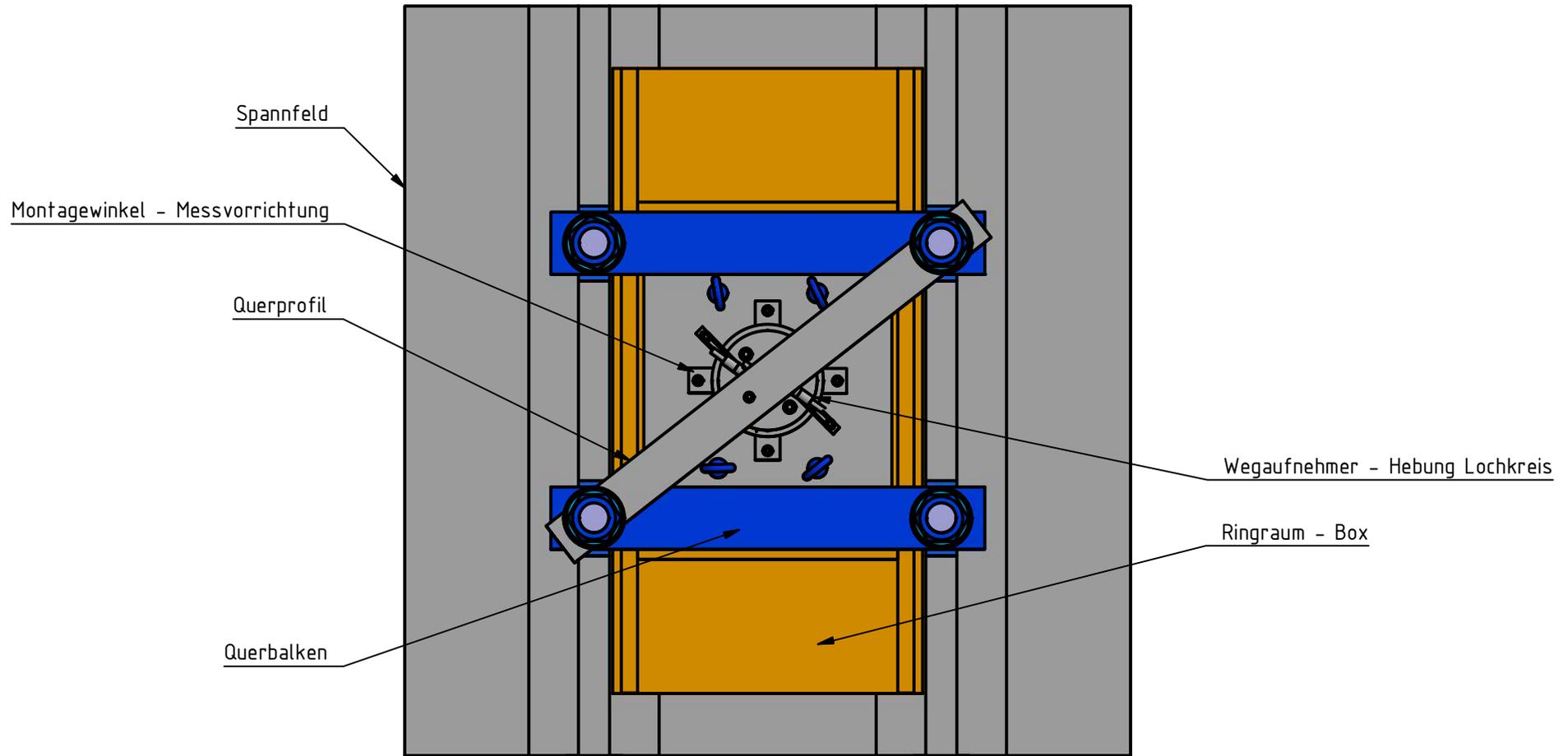
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Funktionstest	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	08.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				M 1:10	
				Versuchsaufbau	
				02.3	
				A4	
Alle Maße in mm.					



Anmerkungen:

- Abspannung des Tübbingabschnitts über Spannfeld
- Komponenten der Messvorrichtung sind nicht beschriftet

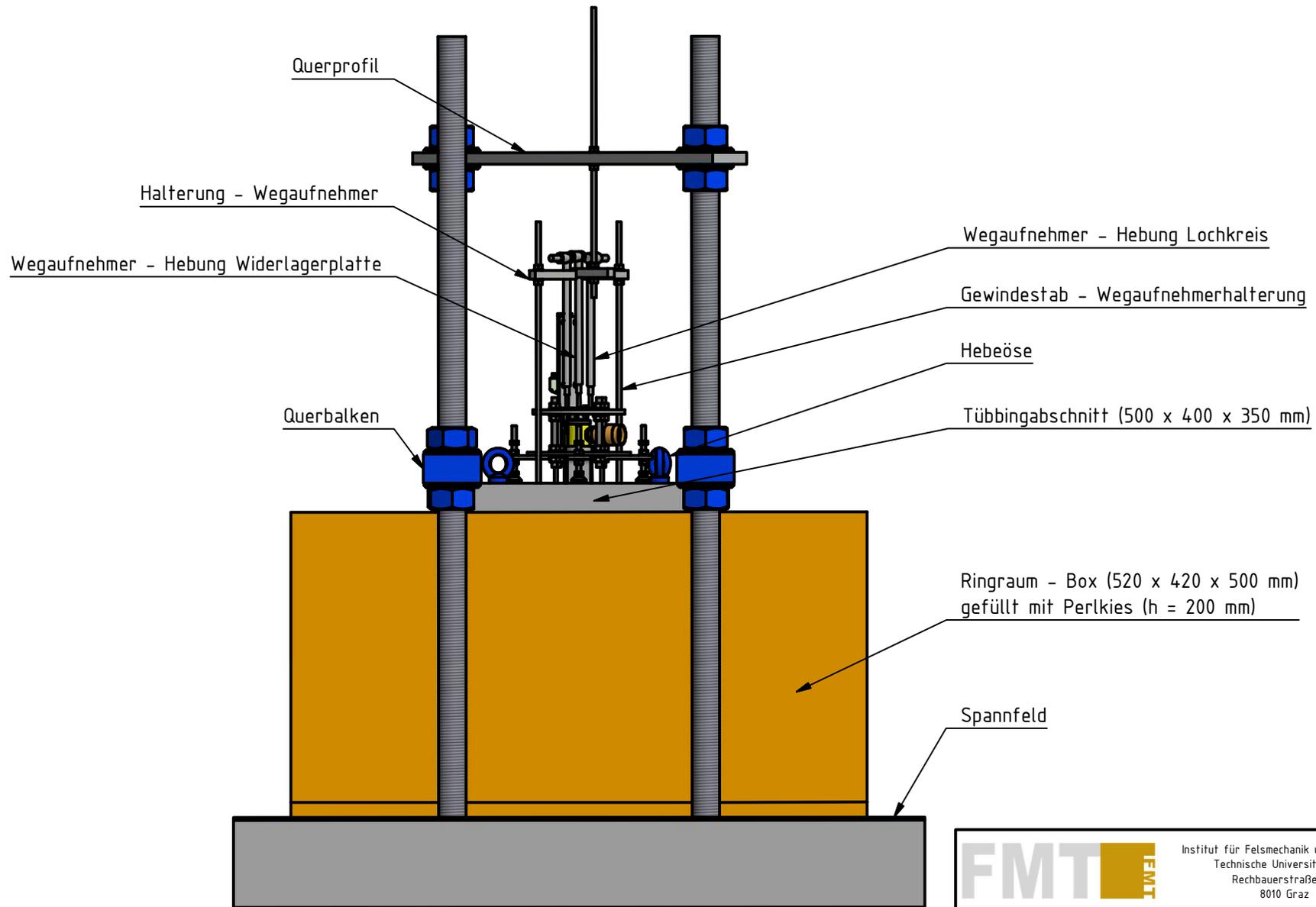
FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Laborversuch	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	08.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Versuchsaufbau	
M 1:10		03.1			
Alle Maße in mm.				A4	



Anmerkungen:

- Abspannung des Tübbingabschnitts über Spannfeld
- Komponenten der Messvorrichtung sind nicht beschriftet

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Laborversuch	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	08.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies				Versuchsaufbau	
M 1:10		03.2			
Alle Maße in mm.				A4	



Anmerkungen:

- Abspannung des Tübbingabschnitts über Spannfeld
- Komponenten der Messvorrichtung sind nicht beschriftet

FMT		Institut für Felsmechanik und Tunnelbau Technische Universität Graz Rechbauerstraße 12 8010 Graz		TU Graz Graz University of Technology	
	Datum	Name		Laborversuch	
Zeichner	05.07.2016	Lagger			
Kontroll.	08.07.2016	Lagger			
Messvorrichtung Bettungszustand von Perlkies					
M 1:10				Versuchsaufbau	
Alle Maße in mm.				03.2 A4	